

МЕТОДИКА ВИКЛАДАННЯ

УДК: 551.594

ПЛАЗМЕННАЯ МОДЕЛЬ ГРОЗЫ

Буравченко А.Н.

Раковский Я.П., к.биол.н., доцент

Харьковская государственная зооветеринарная академия, г. Харьков

Аннотация. Рассматривается плазменная модель грозы, принципиально меняющая известные теоретические представления о процессах грозового облака.

Ключевые слова: электронный ключ, плазменная электризация, природный пресс.

Актуальность проблемы. Существует ряд теорий грозы. К сожалению, ни одна из них на сегодня не является общепринятой. Выполненная работа актуальна тем, что в ней, а priori, принята плазменная модель грозы, позволившая установить закономерную связь плазмы с известными процессами грозового облака.

Задание исследования - изучение физических процессов, протекающих в грозовых облаках, формализация результатов в систему теоретических знаний, позволяющих обозначить возможные пути их практической реализации в аграрном секторе. Конечной целью исследований является создание экологически чистой технологии управления водными ресурсами облаков [1].

Материал и методы исследования. Анализ научно-технической литературы, результаты собственных работ. Метод исследования базируется на курсе общей физики и элементах физики плазмы.

Результаты исследования. Все облака по мере своего развития электризуются. Наиболее сильно это проявляется в грозовых, где наряду с униполярными областями образуются зоны с примерно равной концентрацией зарядов двух знаков [2]. Отмечается, что такие зоны электронейтральны, а это, как известно, одно из свойств, присущих плазме. Закономерен вопрос, насколько близка такая зона зарядов по своим свойствам к плазме?

Совокупность заряженных и нейтральных частиц может рассматриваться как плазма, если в ней реализованы определенные условия. Так, для идеальной плазмы кинетическая энергия частиц $W(3kT)$ должна значительно превышать их потенциальную энергию взаимодействия. Это условие можно выразить как

$$\gamma = \left(\frac{\epsilon_0}{q^2} \cdot \frac{W}{n^{1/3}} \right)^{1/2} \gg 1, \quad (1)$$

где q - заряд частицы, n - плотность зарядов, ϵ_0 - электрическая постоянная, k - постоянная Больцмана, T - температура среды.

По определению плазма электрически квазинейтральна. Это означает примерное равенство зарядов двух знаков, но только в среднем – для достаточно больших объемов и интервалов времени. Масштабы времени и длины, в пределах которых может быть нарушена нейтральность, определяются временным τ_d и пространственным λ_d масштабами разделения зарядов

$$\tau_D = (\varepsilon_0 m / nq^2)^{1/2}, \text{сек} \quad (2)$$

$$\lambda_D = (\varepsilon_0 kT / nq^2)^{1/2}, \text{м} \quad (3)$$

Если время τ_D меньше времени возмущения τ_B действующего на плазму – квазинейтральность не соблюдается. Только при $\tau_D \gg \tau_B$ нарушение нейтральности приводит к быстрым колебаниям плотности зарядов. В среднем, за несколько периодов, плазма возвращается в нейтральное состояние. Величина $\omega = \tau_D^{-1}$ есть плазменная частота.

Дебаевский радиус λ_D определяет пространственное разделение зарядов, где может не соблюдаться нейтральность плазмы. В этом случае, электрическое поле, созданное избытком частиц одного знака в пространстве λ_D недостаточно, чтобы определять коллективное движение частиц. В разреженной плазме λ_D может превышать линейный размер L совокупности заряженных и нейтральных частиц. Тогда их движение принимает независимый друг от друга характер, - квазинейтральность не обеспечивается и такая среда не является плазмой. Только при

$$\lambda_D \ll L \quad (4)$$

плазма квазинейтральна (в грозовом облаке L порядка сотен метров и более). Чем выше плотность зарядов, тем больше ω и тем меньше масштаб разделения зарядов как во времени, так и в пространстве. Плотная плазма практически всегда электронейтральна. Неравенство (4) выполняется, если в дебаевской сфере находится большое число частиц

$$N_D \approx n\lambda^3 \gg 1, \quad (5)$$

Дебаевское число N_D определяет также примерную частоту столкновений частиц

$$\nu \approx \omega / N_D \quad (6)$$

а через l длину свободного пробега частиц – как ее скорость движения деленная на ν

$$l = \nu / \nu \quad (7)$$

Роль коллективных процессов в плазме велика, если выполняются неравенства $\nu \ll \omega$ и $N_D \gg 1$.

Рассмотрим на примере условия образования плазмы в грозовом облаке. Принимая во внимание огромные величины массы и заряда облачных частиц в начальной стадии грозы, примем радиус частицы $r = 10^{-4}$ м, массу $m = 10^{-9}$ кг и заряд $q = 1,6 \cdot 10^{-12}$ Кл. Формула для расчета τ_D (2) справедлива, если радиус частиц значительно меньше среднего свободного пробега молекул газа ($\sim 10^{-7} \div 10^{-8}$) м. В противном случае движущаяся частица кроме электрической силы $F_3 = qE$ будет испытывать силу сопротивления со стороны воздуха. Согласно

уравнению Стокса эта сила пропорциональна r , скорости движения частицы v под действием внешней силы F_3 и вязкости η воздуха

$$F = 6\pi r v \eta \quad (8)$$

Для определения τ_D с учетом вязкости воздуха приравняем силы

$$F_3 = F_{тр} = qE = 6\pi r v \eta, \text{ где}$$

$$E = nq\lambda_D / \epsilon_0 \quad (9)$$

Тогда выражая скорость v через смещение λ_D , частицы деленное на характерное время τ_D получаем:

$$\tau_D = 6\pi r \epsilon_0 \eta / nq^2 \quad (10)$$

Аналогично находим пространственный масштаб разделения зарядов

$$\lambda_D = (t_D^2 \cdot W_k / m)^{1/2} \quad (11)$$

При соотношении кинетической и потенциальной энергий частиц, например, $\gamma \sim 4$ получаем:

- значение необходимой кинетической энергии частицы $W = 2 \cdot 10^{-9}$ Дж. Видно, что противовесом потенциальной энергии частицы может быть только внешняя кинетическая энергия. Тепловая энергия частицы, определяемая температурой среды ее нахождения явно недостаточна ($W = 3kT \sim 10^{-20}$ Дж). Только в зоне действия конвективного потока воздуха смесь зарядов может организоваться в плазму. Выйдя из него, плазма прекращает свое существование;

- плотность зарядов $n = 10^7 \text{ м}^{-3}$ выбрана из условия влагосодержания облаков 10^{-2} кг/м^3 ;

- пространственный и временной масштабы разделения зарядов $\lambda_D = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и $\tau_D = 1,17 \cdot 10^{-2} \text{ сек}$;

- плазменная частота $\omega = 85 \text{ сек}^{-1}$;

- необходимая скорость конвективного потока воздуха $v = \lambda_D / \tau_D = 1,4 \text{ м/сек}$;

- дебаевское число $N_D \sim 40$;

- частота столкновения частиц $\nu = 2 \text{ сек}^{-1}$;

- длина свободного пробега частиц $l = 7 \cdot 10^{-1} \text{ м}$.

Критерии существования рассмотренной области заряженных частиц как плазма выполняются:

$$N_D \gg 1; \quad L \gg \lambda_D; \quad \omega > \nu. \quad (12)$$

Присутствие в тропосфере физического объекта с плазменными свойствами представляет несомненный интерес с точки зрения его связи с рядом природных явлений, которые сегодня не имеют общепризнанного объяснения. Рассмотрим некоторые из них.

О ступенчатом лидере грозового облака. Известен ряд теорий дающих, в целом, качественную картину механизма ступенчатого лидера. Исключением является неясность

причины прерывистого, ритмичного его прохождения. «Для объяснения образования ступеней привлекаются такие понятия как пространственный заряд, рекомбинация, захват электронов и процессы ионизации. Правда, это мало что дает, поскольку физика этих явлений запутана и неточна» [2]. Это замечание Шонланда (Schonland) остается в силе и сегодня. Постараемся разобраться в природе этого явления, исходя из предположения, что ступенчатый лидер это одно из проявлений плазмы тропосферы. Этапом, предшествующим разряду молнии, является процесс образования и развития ступенчатого лидера, примерные сведения о котором можно свести к следующему. Минимальная средняя скорость отрицательно заряженного, движущегося вниз ступенчатого лидера $\sim 10^5$ м/с. Длина ступени лидера ~ 50 м; интервал времени между ступенями ~ 50 мкс. Примем в качестве носителя зарядов кластер, - соединение положительного или отрицательного иона с оболочкой из нейтральных молекул. Так как вода хорошо притягивается ионами, то именно H_2O может быть той «шубой» в которую они «одеваются». Такая кластерная оболочка до пяти молекул воды с энергией связи примерно 4 эВ может не разрушаться от ударов при температуре ниже 1000 К. Более того она способна воспрепятствовать рекомбинации и задержать ее. Два кластера в столкновении могут с небольшой вероятностью рекомбинировать, образуя нейтральную молекулу. На расстоянии большем радиуса кластера его электрическое поле такое же, как и у иона. Степень ионизации среды может быть существенной, так как часть нейтральных молекул связана в кластерных оболочках [3]. Тогда при коэффициенте $\gamma \sim 4$ и концентрации частиц $n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ несущих заряд $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, массой $m = 1,28 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$ и тепловой энергии $W = 3kT = 1,13 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$ параметры кластерной плазмы будут:

- временной масштаб разделения зарядов $\tau_d = 6,6 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$;
- плазменная частота $\omega = 1,5 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}$;
- дебаевский радиус $\lambda_d = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$;
- дебаевское число $N_d = 80$.

Видно, что движение частиц мало ($v \sim 3 \cdot 10^2 \text{ м/с}$), чтобы обеспечить следование ступенчатого лидера со скоростью $v \sim 10^5 \text{ м/с}$ и более. Это указывает на то, что кроме тепловой энергии на частицы действует внешняя сила, например, электрическая. Как это происходит? Плазма может находиться в тропосфере где угодно. Для нас представляет интерес, когда она расположена ниже отрицательно заряженного основания облака. Такой физический объект представляет природный конденсатор, одна пластина которого находится под отрицательным потенциалом основания, а вторая несет переменный потенциал, положительный и отрицательный полярности которой чередуются с частотой плазменных колебаний. По мере развития грозового процесса электрическое поле основания облака достигает границ плазмы. Это воспринимается как возмущение, на которое она реагирует переменным полем плазменных колебаний. При взаимодействии этих полей они могут как суммироваться, так и вычитаться. Скорость заряженных частиц и кластеров плазмы, находящихся под действием этих полей, определяется из выражения силы:

$$F = qE = ma \approx mvv,$$

Откуда

$$V = qE / mv \tag{13}$$

При суммировании полей скорость зарядов может достигать $v \sim 10^5$ м/с и более. В этом случае кластеры с энергией связи 4эВ «разваливаются», а электроны достигают энергии ионизации окружающей среды. В результате образуется электронная плазма с высокой плотностью зарядов и соответственно с большой частотой плазменных колебаний.

Ступенчатость прохождения лидера определяется рассмотренным выше природным конденсатором и заключается в следующем. При суммировании электрических полей электроны устремляются вниз от основания облака к граничным слоям плазмы. Ионизируя проходящую среду, они повышают ее проводимость. Как следствие этого снижается электрическая прочность среды до имеющей на этот момент величины напряженности электрического поля. В результате проходит разряд – первая ступень лидера, которая обгоняя лавину электронов, устремляется вниз. Ее длина определяется временем спада напряжения до момента вычитания полей, разность которых не обеспечивает продолжение разряда. Следующий за ступенью интервал времени это период релаксации, роста напряженности электрического поля и ускорения электронов до скорости ионизации окружающей среды. Следует электрический разряд, т.е. вторая ступень лидера и т.д. Такая цикличность прохождения лидера обеспечивается электронным ключом, функцию которого выполняет плазма.

О механизмах образования электрических зарядов. Несмотря на большое число известных механизмов электризации, принято считать, что ни один из них не может быть главным и тем более единственным, определяющим электрические процессы грозового облака. Вместе с тем, в ряде работ высказывается мнение о том, что грозовое облако это «естественный генератор электричества способный накапливать потенциалы в сотни миллионов вольт, но как он действует пока не ясно» [4]. По – существу, указывается на неизвестный механизм электризации с большой эффективностью действия. Действительно – ли это так? Чтобы ответить на этот вопрос рассмотрим один из наиболее существенных механизмов электризации связанный с замерзанием переохлажденных капель воды [4]. Кристаллизация капли начинается обычно в одной из точек ее поверхности. Образовавшийся на ней ледяной зародыш быстро разрастается и приобретает форму сферического сегмента. От зародыша внутрь капли распространяется фронт кристаллизации. Жидкая и твердая фазы воды являются самодиссоциирующими средами. Это означает, что в каждой из фаз происходит расщепление молекул H_2O на положительный ион водорода H^+ и отрицательный ион гидроксила OH^- :



Поскольку концентрация ионов H^+ и OH^- в твердой фазе меньше, чем в жидкой, то возникает поток ионов H^+ и OH^- через фронт кристаллизации из жидкой фазы в твердую. Однако, ионы H^+ , будучи более подвижными, чем OH^- быстрее проникают в твердую фазу и тем самым создают во льду избыточный положительный заряд. В результате некоторая часть ионов H^+ , отделяющаяся от капли вместе со связанными с ними молекулами H_2O в окружающую среду, оказываются положительно заряженными. Испарение молекул H_2O стимулируется тем, что во время кристаллизации температура поверхности капли выше температуры окружающего воздуха. Замерзшие капли, несущие избыток ионов OH^- , становятся отрицательно заряженными. Очевидно, что электризация определяется двумя факторами физического свойства:

- асимметричным распределением ионов двух знаков вблизи раздела двух фаз за счет процесса кристаллизации;

- разделение массы частицы на тела, уносящие в окружающую среду заряды. преимущественно одного или другого знака.

Однако, если кристаллизация протекает в области отрицательных температур и с этим проблем нет, то испарение (разделение) зарядов определяется тепловой энергией выделяемой при кристаллизации частицы. Ее должно быть достаточно, чтобы поверхность частиц находилась в жидком состоянии, позволяющем ей легко испаряться. Именно от количества тепла, получаемого частицей, зависит эффективность процесса электризации. Можно полагать, что эти факторы присущи и другим известным механизмам электризации. Очевидно, что эффективность электризации может быть многократно повышена, если кристаллизирующаяся частица получит тепловую энергию достаточную для полного перевода ее в жидкое состояние. Роль такого источника может выполнить только плазма диссипация энергии которой достаточно велика. Так, рассеиваемая мощность частицы плазмы составляет:

$$P = \sigma E^2 / 2n, \quad (15)$$

где $\sigma = \epsilon_0 \omega N_D$ – электропроводность плазмы. Формула (15) справедлива до значения критического внешнего поля $E_{кр} \approx q / \epsilon_0 \lambda_D^2$, действие которого на плазму приводит к сверхсопротивлению. Этой мощности вполне достаточно, чтобы в течение небольшого интервала времени перевести замерзшую частицу в дваагрегатное состояние (лед-жидкость). Эффективность такого механизма электризации высока, так как плазма большей частью находится в турбулентном состоянии. По – существу, плазма представляет преобразователь с низким коэффициентом полезного действия, в котором большая часть кинетической энергии рассеивается на частицах в виде тепла. Таким образом, доминирующим процессом электризации является механизм плазменной электризации, обеспечивающий дваагрегатное состояние частиц за счет своих тепловых потерь.

О физической сущности грома. Принято считать, что гром это ударные волны, которые образуются при взрыве гремучего газа в канале молнии. Частота колебаний грома $f \sim 20$ Гц, а скорость распространения совпадает со скоростью звуковой волны

$v \sim 330$ м/с. Поскольку волна приходит от разных частей канала, а также отражается от облаков, гор и др. возникает явление раскатов грома. Радиус области слышимости грома 20 и более километров. При этом расстояние до молнии определяют по времени, прошедшему между ее вспышкой и ударом грома. Так ли это в действительности? Если принять плазменную модель грозы, то физика этого явления иная и заключается в следующем. Гром это одно из проявлений плазмы, возникающего при нарушении ее электронейтральности. Параметры грома в терминах плазмы определяются моментом ее образования. Так, при коэффициенте $\gamma \sim 2,5$, радиусе частиц $r = 10^{-6}$ с зарядом $q = 8 \cdot 10^{-17}$ Кл, кинетической энергией $W = 10^{-16}$ и плотностью зарядов $n = 10^{13} \text{ м}^{-3}$,

- временной масштаб разделения зарядов $\tau_D = 4,7 \cdot 10^{-2}$ сек;
- пространственный масштаб разделения зарядов $\lambda_D = 1,17 \cdot 10^{-4}$ м;
- плазменная частота $\omega = 21 \text{ сек}^{-1}$;
- дебаевское число $N_D = 16$;
- частота столкновений частиц $\nu = 1,3 \text{ сек}^{-1}$.

Такая среда представляет собой слабоионизированную плазму, частота колебаний которой находится в звуковом диапазоне и соответствует частоте звуковых колебаний грома $f \sim 20$ Гц. Находим интенсивность звуковых колебаний P_s плазмы через плотность энергии $P_v = B^2/2\mu_0$ магнитного поля $B = nq\tau/\epsilon_0$ и скорость частиц $v = \lambda_D/\tau_D$

$$P_s = (nq)^2 \lambda_D / 2\mu_0 \epsilon_0^2 \omega \quad (16)$$

Тогда уровень громкости плазменных колебаний или уровень громкости грома:

$$L = 10 \lg P_s / P_0, \quad (17)$$

где $P_0 = 10^{-6}$ Вт/м² - порог слышимости на частоте $f \sim 21$ Гц.

Для приведенных выше параметров грозовой плазмы $L \approx 160$ дБ, что хорошо согласуется с известным уровнем громкости грома ≈ 130 дБ.

В начальной стадии грозы, гром носит одиночный, краткий по длительности характер. Иногда при замедлении грозы можно наблюдать следующее явление. Тяжелые, нависшие над земной поверхностью тучи, по которым без остановки проходят раскаты грома примерно на одном уровне громкости. При этом длительность такого рокота может составлять десятки секунд. Это указывает на то, что в облаках организовалась плазма, находящаяся в турбулентном состоянии. Гром, возникающий после разряда молнии, это также одно из проявлений плазмы, которое заключается в следующем. Частота плазменных колебаний по мере развития грозового процесса растет и может достигать $8 \div 10$ кГц. Соответственно напряженность электрического поля увеличивается до пробойного для среды значения. Как результат этого облако пронизывает молния. От резкого мощнейшего звукового удара высокой частоты, предшествующего грому плазма «рассыпается». Далее происходит известный в физике процесс. Переохлажденные капли от «встряхивания» их звуковой волной моментально кристаллизуются, т.е. замерзают. Начинается бурная перекачка влаги с жидких капель на замерзшие, которые быстро набирают массу. С некоторого момента не превышающего 1 сек, плазма восстанавливается. Огромная масса частиц и большой интервал времени разделения зарядов определяют плазменные колебания на низких частотах звуковых волн согласно уравнению (10). Эти волны и воспринимаются нами как гром. Таким образом, время между разрядом молнии и ударом грома это время восстановления плазмы, а раскаты грома это время плазменных колебаний на частоте звуковых волн. Гром воспринимается органами слуха как звуковое давление, начиная с порога его чувствительности на частоте ~ 20 Гц. Плазменные колебания более высоких частот имеют меньший уровень громкости и сильнее поглощаются в воздухе. Может быть поэтому они не слышимы.

Выводы

Плазма тропосферы является неотъемлемой частью грозового облака. Она принципиальным образом меняет известные представления о грозе и объясняет ряд природных явлений, которые на сегодня не имеют общепризнанного объяснения. Установленные закономерные связи плазменной модели грозы с явлениями грозового облака, представлены соответствующими уравнениями. Плазма это доминирующий фактор, определяющий старт и финиш грозы.

Литература

1. Буравченко А.Н. Механизм управления водными ресурсами облаков / Буравченко А.Н., Раковский Я.П., Васильев В.С., Карпенко Т.А // Сборник научных трудов ХГЗВА. - Харьков, 2008. - С. 159-167.

2. Шонланд Б. Электричество гроз / Б. Шонланд // Труды третьей международной конференции по электричеству атмосферы. (Монте, Швейцария, 1963). Ленинград, Гидрометиздат, 1969. - С. 152-153, 280-284.
3. Стаханов И.Н. Кластерная плазма /Стаханов И.Н. // Журнал технической физики АН СССР. – Ленинград: Наука, 1976. - Т. XLVI №1. - С. 82-90.
4. Имянитов И.М. Электричество облаков / Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.Н. – Ленинград: Гидрометиздат, 1971. - С. 48.

ПЛАЗМОВА МОДЕЛЬ ГРОЗИ

Буравченко А.Н., к.б.н., доцент Раковський Я.П.

Харківська державна зооветеринарна академія, м. Харків

Анотація. Розглядається плазмова модель грози, яка принципово змінює відомі теоретичні уявлення про процеси грозової хмари.

Ключові слова: електронний ключ, плазмова електризація, природний прес.

PLAZMENNAYA MODEL OF THE THUNDERSTORM

Buravchenko A.N, Rakovskiy Y.P.

Kharkov state zooveterinarnaya academy, Kharkov

Summary. It is considered plazmennaya model of the thunderstorm, in principal changing known theoretical beliefs about process storm of the cloud.

Key words: electronic key, plasma electrification, natural press.