

М.И. БАРАНОВ, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ФОРМУЛИРОВКА ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПЛАЗМОИДОВ ШАРОВОЙ МОЛНИИ В ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ

Приведены результаты анализа электрофизических условий, приводящих к возможному возникновению в воздушной атмосфере при развитии и протекании в ней линейной молнии такого редкого природного электрофизического явления как шаровая молния.

Ключевые слова: воздушная атмосфера, линейная молния, шаровая молния, условия возникновения шаровой молнии.

Введение

Международная статистика наблюдений в земной атмосфере линейной (ЛМ) и шаровой (ШМ) молний свидетельствует о том, что последний вид молнии на нашей планете регистрируется в количестве не менее 2000 штук в год [1]. Феномен такого природного явления как ШМ оказался настолько сложным, что до сих пор он не разгадан многими учеными-физиками, предметно занимавшихся и занимающимися вот уже не одно столетие его происхождением и развитием в воздушной атмосфере. Это природное явление притягивает к себе внимание различных специалистов мира не только из-за своей необычности (экзотичности), но, в основном, из-за тех физических принципов, которые находятся в основе его образования. При своих сравнительно небольших геометрических размерах (обычно от 0,1 до 1 м в диаметре) сферические образования ШМ запасают во внутреннем ядре и наружной оболочке достаточно большие количества электромагнитной энергии, исчисляемые от единиц до сотен мегаджоулей [1,2]. Разгадка электрофизических основ построения, развития и существования в земной атмосфере ШМ позволит выйти на новые принципы аккумулирования электромагнитной энергии и создания с их помощью мощных малогабаритных источников этого вида энергии.

Основные принципы и условия, необходимые для развития и существования ШМ в воздушной атмосфере

Ограничимся в дальнейшем рассмотрением лишь природного феномена ШМ, возникающего, как правило, при развитии и протекании ЛМ в воздушной атмосфере (обычно между электрически заряженными облаками или подобными облаками и земной поверхностью). Результаты многолетних зарубежных как теоретических [3], так и экспериментальных [4] исследований, а также собственных работ [2,5,6] и выполненный анализ электрофизических

процессов, протекающих в воздушной атмосфере при развитии и сравнительно длительном существовании (порядка одной секунды [7]) в ней длинного сильноточного канала искрового разряда ЛМ, позволяют автору сформулировать следующие основные электрофизические принципы и условия, приводящие к возможному возникновению в воздушной атмосфере плазмоидов ШМ:

- наличие сильного (ярко выраженного) петлеобразного изгиба в цилиндрическом плазменном канале сильноточного искрового разряда ЛМ, протекающего в той или иной локальной области воздушной атмосферы;
- наличие в зоне петлеобразного изгиба канала сильноточного искрового разряда ЛМ сильного импульсного азимутального магнитного поля, скрещенного с основным импульсным азимутальным магнитным полем прямолинейных участков канала воздушного искрового разряда ЛМ;
- появление в зоне петлеобразного изгиба канала сильноточного воздушного искрового разряда ЛМ высокотемпературного тороидального контура (кольца) большего импульсного тока (БИТ) с электронной проводимостью, охватывающего по кругу снаружи цилиндрический канал грозового разряда и способного стать внутренним энергетическим ядром плазмоида ШМ;
- наличие в зоне наружного (по отношению к внутреннему цилиндрическому каналу воздушного искрового разряда ЛМ) высокотемпературного электронного тора с кольцевым БИТ (ядра плазмоида ШМ) сильного импульсного азимутального магнитного поля и соответственно появление вокруг ядра ШМ сверхсильного вихревого радиального электрического поля;
- наличие в воздушной атмосфере вблизи зоны петлеобразного изгиба цилиндрического канала сильноточного искрового разряда ЛМ огромного множества молекулярных и мелкодисперсных образований влаги (воды);
- протекание в цилиндрическом канале воздушного искрового разряда ЛМ на его финальной стадии электродинамических процессов, характерных для стадии дугового электрического разряда и характеризующихся временем протекания в нем (плазменном канале ЛМ) и образованном вне его высокотемпературном торе дрейфующих свободных электронов до единиц секунд.

Для лучшего понимания этого материала электрофизической направленности следует отметить, что в физике плазмы под понятием плазмоида понимается такое физическое понятие, которое представляет собой сравнительно небольшой объем овальной формы, заполненный высокотемпературной плазмой, удерживаемой собственным магнитным полем [8]. Что касается понятия плазмы, то под ним в физике понимается сильно ионизированный квазинейтральный газ, в котором концентрация отрицательно заряженных свободных электронов приблизительно равна концентрации положительно заряженных ионов [9]. Рассмотрим более подробно каждое из указанных выше условий.

Первое условие. При наличии петлеобразного изгиба в цилиндрическом плазменном канале сильноточного воздушного искрового разряда ЛМ существенно изменяется электромагнитная обстановка в локальной зоне рассматриваемого канала. Чем может быть вызван в воздушной атмосфере подобный изгиб канала разряда ЛМ? Прежде всего, неоднородностями распределения электрического поля вдоль пути развития воздушного искрового разряда ЛМ, обусловленными концентрацией электропроводящих микровключений на данном пути (особенно на предпробойной стадии рассматриваемого электрического разряда). Искровой разряд ЛМ будет развиваться по пути наименьшего активного сопротивления воздушной среды. Учитывая стохастический (вероятностный) характер распределения в воздушной атмосфере проводящих и непроводящих микровключений (например, электронов, ионов атомов различных газов и металлов, кварцевых микрочастиц пыли, нейтральных молекул газов, входящих в состав атмосферного воздуха, и др.), появление на пути развития в ней (воздушной атмосфере) искрового разряда ЛМ подобных локальных зон со значительно различающимися концентрациями электропроводящих микровключений является вполне реальным физическим фактом.

Второе условие. Протекание в зоне явно выраженного петлеобразного изгиба цилиндрического плазменного канала сильноточного воздушного искрового разряда ЛМ в соответствии с законом полного тока [9] вызывает появление вокруг данного изгиба плазменного канала грозового разряда сильного импульсного азимутального магнитного поля с напряженностью H_B :

$$H_B = i_M(t)/(2\pi r), \quad (1)$$

где $i_M(t)$ – импульсный ток ЛМ; r – текущее значение радиуса вокруг канала.

Величина радиуса r в (1) для нормальных атмосферных условий (температура воздуха равна 0 °С, а его давление составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па [9]) принимает значения, соответствующие следующему неравенству: $r \geq r_m$, где $r_m = 0,093 \cdot (I_m)^{1/3} \cdot (t_m)^{1/2}$ – максимальный радиус канала искрового разряда ЛМ [10]; I_m , t_m – соответственно амплитуда импульсного тока ЛМ и время, соответствующее данной амплитуде. Из (1) для принятых МЭК нормированных амплитудно-временных параметров (АВП) тока ЛМ ($I_m = 200$ кА; $t_m = 10$ мкс [7]) следует, что в рассматриваемом случае при $r \approx r_m = 17,2$ мм величина напряженности H_B внешнего импульсного азимутального магнитного поля достигает численного значения, примерно равного $H_B \approx 1,57 \cdot 10^6$ А/м. Заметим, что этой напряженности в воздухе соответствует магнитная индукция $B_B = \mu_0 \cdot H_B$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная [9], примерно равная 1,98 Тл. Видно, что для принятых АВП импульсного тока ЛМ в зоне петлеобразного изгиба цилиндрического канала молнии будет формироваться сильное импульсное азимутальное магнитное поле. Причем, вектор напряженности такого магнитного поля в зоне петлеобразного изгиба канала ЛМ будет перпендикулярен вектору напряженности азимутального магнитного поля, создаваемого в зоне прямолинейного канала воздушного искрового

разряда ЛМ. В результате петлеобразный изгиб сильноточного канала искрового разряда ЛМ будет приводить к возникновению в его зоне скрещенных сильных импульсных азимутальных магнитных полей. Так физически просто в рассматриваемой геометрии развития в воздушной атмосфере цилиндрического канала ЛМ будет реализовываться условие скрещенности магнитных полей, имеющее определяющее значение для зарождения в дальнейшем энергетического ядра ШМ.

Третье условие. Сильное импульсное азимутальное магнитное поле, возникающее при указанных выше АВП импульсного тока молнии на прямолинейных участках цилиндрического канала ЛМ (у основания петлеобразного изгиба плазменного канала грозового разряда), приводит к образованию вблизи рассматриваемого сильноточного канала ЛМ электронных и протонных колец с соответствующими ларморовскими радиусами (порядка единиц мкм для электронов и порядка десятков мкм для протонов) [11]. Плоскости данных колец будут перпендикулярны вектору напряженности сильного импульсного азимутального магнитного поля, генерируемого вокруг цилиндрического канала ЛМ. Электроны и протоны (ядра ионизированных вблизи канала ЛМ атомов водорода) будут круговым образом вращаться по своим ларморовским радиусам во взаимно противоположных направлениях с огромными циклотронными частотами (порядка 10^{11} Гц для электронов и 10^8 Гц для протонов). Такое вращение электронов и протонов вблизи плазменного канала разряда ЛМ, с одной стороны, будет способствовать их пространственному разделению, а, с другой стороны, их циклотронному нагреву [9]. В результате будут создаваться условия для бесстолкновительного движения указанных электронов и протонов вблизи канала разряда ЛМ, а также для приобретения ими (этими заряженными частицами) высоких уровней соответственно электронной и ионной температур. Множество таких вращающихся по ларморовским радиусам электронов и протонов будут создавать вокруг прямолинейного плазменного канала ЛМ проводящие тороидальные полые образования, охватывающие снаружи сильноточный канал молнии. Причем, в этих тороидальных образованиях электронные кольца будут находиться внутри протонных колец, защищающих от холодного воздуха высокотемпературные электронные тороидальные образования. В этой связи в описываемой электромагнитной микроконструкции электронов и протонов, создаваемой вокруг плазменного канала молнии сильным импульсным азимутальным магнитным полем искрового разряда ЛМ, будет автоматически решаться теплоизоляция ускоренных высокоэнергетических электронов от окружающей холодной среды.

В результате воздействия напряженности H_B сильного импульсного азимутального магнитного поля, генерируемого согласно (1) в зоне петлеобразного изгиба цилиндрического канала ЛМ, на указанные выше тороидальные образования из электронных и протонных колец в них (этих проводящих то-

рах) в соответствии с законом электромагнитной индукции [9] и электрофизическим микромеханизмом его проявления [12] будет возникать электродвижущая сила (ЭДС). Возникновение такой ЭДС в проводящих электронных и протонных торах приведет к круговому движению в противоположные стороны их электронов и протонов. Выполненная расчетная оценка для принятых АВП тока молнии ($I_m = 200$ кА; $t_m = 10$ мкс; $dH_B/dt = 1,57 \cdot 10^{11}$ А/(м·с); $r_m \approx 17,2$ мм) показывает, что в этом случае скорость кругового движения вокруг плазменного канала ЛМ для электронов составляет порядка 10^6 м/с, а для протонов – порядка 10^4 м/с. При этом движущиеся по циклоидам электроны вызывают появление вокруг цилиндрического канала ЛМ суммарного электронного тока проводимости порядка 10^4 А, а циклоидально вращающиеся вокруг исследуемого канала ЛМ протоны лишь порядка 10^2 А. В этой связи определяющим влиянием на электромагнитную картину, возникающую вблизи сильноточного канала искрового разряда ЛМ, будет обладать БИТ в виде электронного тока проводимости, определяемого круговым вращением в зоне, примыкающей к низкотемпературной плазме грозового разряда, ускоренных электронов.

Четвертое условие. Спирально-кольцевой электронный ток проводимости, протекающий в отдельных элементарных микроторах радиусом r_e поперечного сечения (при главных радиусах $r_{T\Omega}$) и соответственно в эквивалентном макроторе радиусом r_{eT} поперечного сечения (при главном радиусе r_T) вокруг плазменного канала ЛМ радиусом $r_m < r_T$, будет создавать вне своего высокотемпературного электронного тора-кольца сильное импульсное азимутальное магнитное поле. Напряженность H_{eT} такого поля вблизи указанного проводящего тора может быть приближенно оценена по следующей формуле:

$$H_{eT} \approx i_{eT} / (2\pi r_{eT}), \quad (2)$$

где i_{eT} – величина электронного тока проводимости, протекающего в эквивалентном макроторе, образуемом вокруг цилиндрического канала ЛМ.

Из (2) при расчетном значении амплитуды тока i_{eT} примерно в 13,87 кА и величине радиуса макротора $r_{eT} \approx 1$ мм находим, что в рассматриваемом случае искомый уровень напряженности H_{eT} импульсного азимутального магнитного поля достигает значения $2,2 \cdot 10^6$ А/м. Этому уровню напряженности H_{eT} в воздухе будет соответствовать значение магнитной индукции $B_{eT} \approx 2,8$ Тл. Поэтому можно говорить о том, что вблизи макротора ($r_T \approx 20,2$ мм; $r_{eT} \approx 1$ мм) с электронным током величиной $i_{eT} \approx 13,87$ кА генерируется сильное импульсное азимутальное магнитное поле, вызывающее появление вокруг этого макротора вихревого радиального электрического поля. Оценочный амплитудный уровень величины напряженности E_{eT} такого электрического поля в воздушной зоне вокруг электронного макротора (будущего энергетического ядра ШМ) и возможной высокополяризованной водяной оболочки ШМ радиусом r_0 может быть определен по приближенному расчетному

соотношению:

$$E_{eT} \approx (\mu_0/\varepsilon_0)^{1/2} \cdot H_{eT}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная [9].

Согласно (3) при $r_0 \approx 2r_T \approx 40,4$ мм [2,3] и соответственно $H_{eT} \approx 0,34 \cdot 10^6$ А/м численное значение напряженности E_{eT} вихревого радиального электрического поля в зоне ядра и оболочки ШМ окажется примерно равным $1,28 \cdot 10^8$ В/м. При учете влияния микродиполей воды, присутствующих в огромном количестве в высокополяризованной водяной оболочке ШМ, амплитудный уровень напряженности E_{eT} вихревого радиального электрического поля в зоне петлеобразного изгиба цилиндрического канала ЛМ может быть примерно равным:

$$E_{eT} \approx (\mu_0/\varepsilon_0\varepsilon_r)^{1/2} \cdot H_{eT}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_r \approx 81$ – относительная диэлектрическая проницаемость воды [9].

Тогда из (4) при используемых нами исходных данных ($r_T \approx 20,2$ мм; $r_0 \approx 40,4$ мм; $H_{eT} \approx 0,34 \cdot 10^6$ А/м; $\varepsilon_r \approx 81$) получаем, что $E_{eT} \approx 1,42 \cdot 10^7$ В/м. Из этого можно заключить, что в области электронного макротока, образуемого циклоидально движущимися по кругу радиусом r_T свободными электронами, генерируется сверхсильное вихревое радиальное электрическое поле. Данное поле будет радиально выстраивать и активно стягивать (транспортировать) из воздушной атмосферы в область кольцевого тока i_{eT} полярные молекулы и микрочастицы воды [13], оказавшиеся вблизи петлеобразного изгиба канала ЛМ. В результате чего будет создаваться высокополяризованная водяная оболочка ШМ, аккумулирующая между своими сферическими слоями энергию сверхсильного электрического поля. Составные элементы данных слоев (полярные молекулы и микрочастицы воды) до их сборки в водяную оболочку ШМ будут подготавливаться и образовываться за счет внутренних энергетических источников самой земной атмосферы. Поэтому основными энергетическими источниками образования ШМ, не считая мощного сильноточного канала искрового разряда ЛМ, является именно сама материальная среда воздушной атмосферы с ее мощными тепловыми, механическими (кинетическими) и электромагнитными потоками энергии вне канала ЛМ. Незначительная часть этой огромной атмосферной энергии как раз и локализуется в сравнительно небольшом объеме внутреннего ядра и наружной оболочки ШМ.

Пятое условие. Непременным условием возникновения в воздушной атмосфере ШМ является наличие в зоне петлеобразного изгиба канала ЛМ огромного количества полярных молекул и микрочастиц воды, непосредственно участвующих в образовании высокополяризованной водяной оболочки ШМ. Без присутствия подобных образований воды в указанной зоне сильноточного канала искрового разряда ЛМ появление в земной атмосфере ШМ становится просто невозможным. Оценочные расчеты показывают, что энергетический запас внутреннего ядра ШМ (в нашем случае электронного тора со спирально-кольцевым током i_{eT}) незначителен, а протекающий в нем (этом

ядре) отрицательный электрический заряд не превышает 10^{-3} Кл. Поэтому основные запасы энергии ШМ сосредотачиваются в ее водяной высокополяризованной оболочке. Токи электрического смещения, радиально протекающие в подобной электронейтральной высокополяризованной оболочке ШМ, вызывают электролюминесценцию [9], сопровождающуюся холодным свечением атомов газов, присутствующих в атмосферном воздухе и автоматически оказавшихся в составе слоев водяной оболочки ШМ. Важно заметить, что согласно теории электромагнитного поля Максвелла токи смещения не выделяют джоулева тепла. По-видимому, из-за такой электрофизической особенности очевидцы наблюдений природной ШМ не отмечали при ее близком пролете от наблюдателя исходящего от нее тепла. При оценке тока электрического смещения i_c , протекающего в высокополяризованной водяной оболочке ШМ, можно воспользоваться следующим приближенным расчетным соотношением:

$$i_c = \delta_c \cdot S_c, \quad (5)$$

где δ_c – плотность тока смещения; $S_c = 4\pi r_0^2$ – площадь наружной поверхности высокополяризованной водяной оболочки ШМ ($r_0 \approx 2r_T$ [2, 3]).

Что касается плотности δ_c тока смещения, протекающего в высокополяризованной оболочке ШМ, то ее значение может быть найдено из выражения:

$$\delta_c = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \partial E_{eT} / \partial t. \quad (6)$$

Численная оценка временной производной $\partial E_{eT} / \partial t$ показывает, что для указанных исходных данных она принимает значение около $0,59 \cdot 10^{12}$ В/(м·с). Поэтому в соответствии с (6) плотность δ_c тока смещения в водяной оболочке ШМ может принимать численное значение, примерно равное $423,1$ А/м². Тогда с учетом (5) при $r_0 \approx 40,4$ мм находим, что ток смещения i_c для исследуемого вида молнии составляет около $8,7$ А. Такой ток смещения i_c будет приводить к энергетическому возбуждению валентных электронов атомов газобразных химических элементов [9], оказавшихся в области формирования ШМ.

Шестое условие. Для надежного формирования электронного тора со спирально-кольцевым током i_{eT} необходим не только БИТ, протекающий в канале искрового разряда ЛМ, но и требуется достаточно длительное существование такого импульсного тока, создающего вокруг плазменного канала ЛМ сильное импульсное азимутальное магнитное поле с напряженностью H_B . Ведь циклотронный нагрев электронных и протонных колец, образующихся вокруг круговых силовых линий индукции магнитного поля от канала ЛМ, формирование высокотемпературного электронного тора со спирально-кольцевым током i_{eT} вокруг цилиндрического канала ЛМ и образование высокополяризованной водяной оболочки вокруг подобного электронного тора (внутреннего ядра ШМ) требует достаточно большого временного отрезка. Вот поэтому воздушный сильноточный искровой разряд ЛМ на своей финальной стадии протекания должен соответствовать стадии дугового элек-

трического разряда, характеризующейся большой силой тока (в сотни ампер), большой продолжительностью протекания (секундами) и малой напряженностью электрического поля (в сотни вольт на метр) в канале такого разряда [9].

Выводы

1. На основании анализа электромагнитных и электродинамических процессов, протекающих в зоне слабоионизированной плазмы, примыкающей к высокоионизированной области развития и достаточно длительного существования сильноточного плазменного канала ЛМ, сформулированы основные физические принципы и условия, необходимые для возможного возникновения в воздушной атмосфере плазмоидов ШМ.

2. Из приведенных в данной статье развернутых описаний каждого из сформулированных условий возникновения в атмосферном воздухе плазмоидов ШМ следует, что для появления в земной атмосфере рассматриваемого электрофизического феномена должны выполняться соответствующие сформулированные автором условия как для АВП импульсного тока в плазменном канале ЛМ, геометрии цилиндрического плазменного канала на пути его развития, так и для концентрации полярных молекул и микрочастиц влаги в воздушной атмосфере, окружающей сильноточный плазменный канал ЛМ. С учетом данных условий становится ясным то, что почему не всякий грозовой разряд в воздушной атмосфере сопровождается появлением в ней плазмоидов ШМ. Только неукоснительное выполнение в воздушной атмосфере с ЛМ указанных электрофизических условий может приводить к возникновению в ней такого достаточно редкого природного электрофизического явления как ШМ.

Список литературы: 1. *Смирнов Б.М.* Физика шаровой молнии // Успехи физических наук. – 1990. – Т. 160, вып. № 4. – С. 1-45. 2. *Баранов М.И.* Электрофизическая природа шаровой молнии // Электричество. – 2009. – № 9. – С. 15-25. 3. *Никитин А.И.* Образование шаровой молнии при развитии линейной молнии // Электричество. – 2000. – № 3. – С. 16-23. 4. *Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д.* Демонстрация шаровой молнии в лаборатории // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 1. – С. 107-109. 5. *Баранов М.И.* Электрическая корона в микродипольной модели шаровой молнии // Электричество. – 2010. – №1. – С. 23-28. 6. *Баранов М.И.* Расчетная оценка температуры в микродипольной модели шаровой молнии // Электричество. – 2010. – № 6. – С. 15-20. 7. *Кужекин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н.* Молния и молниезащита. – М.: Знак, 2003. – 330 с. 8. *Стаханов И.П.* О физической природе шаровой молнии. – М.: Научный мир, 1996. – 264 с. 9. *Кузьмичев В.Е.* Законы и формулы физики / Отв. ред. *В.К. Тартаковский.* – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с. 10. *Баранов М.И.* Приближенный расчет максимальной температуры плазмы в сильноточном канале искрового разряда высоковольтного воздушного коммутатора атмосферного давления // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 5. – С. 18-21. 11. *Бортник И.М., Белоголовский А.А., Верещагин И.П.* и др. Электрофизические основы техники высоких напряжений / Под общ. ред. *И.П. Верещагина.* – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с. 12. *Баранов М.И.* Электрофизический микромеханизм явления электромагнитной индукции в неподвижном металлическом проводнике // Электричество. – 2012. – № 1. – С. 36-42. 13. *Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М.* Электрический транспорт полярных молекул воды в неоднородном электрическом поле полимерной изоляции высоковольтных кабелей // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 5. – С. 3-9.

Поступила в редколлегию 25.03.2013

УДК 621.3.022:621.7.044.7

Формулировка основных электрофизических условий для возникновения плазмонидов шаровой молнии в воздушной атмосфере / М.И. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 27 (1000). – С. 3-11. – Бібліогр.: 13 назв.

Приведені результати аналізу електрофізичних умов, що приводять до можливого виникнення в повітряній атмосфері при розвитку і протіканні в ній лінійної блискавки такого рідкісного природного електрофізичного явища як кульова блискавка.

Ключові слова: повітряна атмосфера, лінійна блискавка, кульова блискавка, умови виникнення кульової блискавки.

The results of analysis of electrophysics terms, resulting in a possible origin in an air atmosphere at development and flowing in it of linear lightning of such rare natural electrophysics phenomenon as a of ball lightning are resulted.

Keywords: air atmosphere, linear lightning, ball lightning, terms of origin of ball lightning.