

Влияние грозовых атмосферных условий на свойства шаровых молний

© А.Х. Амиров, В.Л. Бычков

Объединенный институт высоких температур РАН,
127412 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 28 октября 1995 г. В окончательной редакции 11 октября 1996 г.)

Методами ранговых корреляций исследовано влияние грозовых атмосферных условий на время жизни (время наблюдения) и диаметр шаровых молний (ШМ) на основе анализа наблюдений из банка данных по ШМ Стаханова–Коля–Бычкова для персонального компьютера. Для анализа было произведено ранжирование ШМ по размерам, погодные условия ранжировались по отношению к влажности, коррелирующей с характером заряженности атмосферы, грозовые условия ранжировались по отношению к напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы. Проведенный статистический анализ показал, что в условиях увеличения влажности и напряженности электрического поля происходит уменьшение времени жизни и диаметра ШМ. Проводится обсуждение возможности такого результата с позиций различных существующих моделей ШМ.

Введение

Статистические методы анализа наблюдений шаровых молний (ШМ) являются в настоящее время основными для определения их свойств. В связи с тем что у этого объекта много наблюдающихся свойств — параметров [1–3], из которых трудно выделить основные при отсутствии достоверной экспериментальной информации или разумной модели, вплоть до последнего времени в исследованиях ограничивались лишь простейшими статистическими методами. К ним относятся оценки частот проявлений параметров ШМ и получение коэффициента корреляции (по Пирсону) [1–4] и различного рода модификации этих методов (см., например [4–6]), зачастую недостаточно обоснованные математически. При этом для выявления свойств ШМ оказываются в основном используемыми только параметры, определяемые численно (например, диаметр, время жизни, эквивалентная мощность излучения), а качественные описания свойств ШМ остаются практически за пределами внимания исследователей. Вместе с тем развитые в середине XX века статистические методы позволяют вовлечь такую информацию в анализ.

Нами были проведены работы [7–9] по использованию таких методов для анализа цветовых свойств ШМ и поиска связи между цветом и другими параметрами ШМ. В данной работе мы используем методы ранговой корреляции [10–12] для анализа влияния влажности воздуха и электрических атмосферных условий на время жизни и диаметр ШМ, при этом, как и в [7–9,13], в качестве времени жизни при анализе мы используем время наблюдения ШМ, которое коррелирует с истинным временем жизни, но может от него отличаться [7]. Как и в [5–9,13,14] для анализа использовался банк данных по ШМ для персонального компьютера Стаханова–Коля–Бычкова [13,14], в котором основной массив информации составляют выверенные по [2] данные коллекции

И.П. Стаханова, пересмотренные и дополненные с учетом подходов [13–15].

Как влажность, так и грозовые явления влияют на общие свойства приземного атмосферного слоя и могут влиять на свойства объектов, присутствующих в атмосфере. Очевидно, можно выделить зависимость времени жизни ШМ от относительной влажности атмосферы h_i , находящейся в следующей зависимости от атмосферных условий:

$$h_c < h_0 < h_r < h_l, \quad (1)$$

где индекс c обозначает ясно, день без осадков; 0 — пасмурно, дни с повышенной влажностью атмосферы, но без видимых осадков; r — дождь; h — ливень или грозовой дождь.

Мы объединили условия "дождь" и "обложной дождь", а также "ливень" и "грозовой дождь" из-за невозможности восстановления полностью адекватной картины погодных условий из описаний очевидцев.

Как известно [16,17], обложные дожди, ливни и грозовые дожди повышают заряженность приземного слоя атмосферы в результате переноса зарядов из облаков и заряжения падающих капель, поэтому изменение общей влажности может влиять на напряженность приземного электрического поля. Соответствующая зависимость напряженности приземного электрического поля E_i от атмосферных условий имеет вид [16,17]

$$E_s < E_h < E_w < E_t,$$

где w — отсутствие дождя, s — обложной дождь, h — ливень, t — грозовой дождь.

Из этой зависимости следует соотношение, которое можно связать с условиями наблюдения по отношению к грозе и также использовать для анализа влияния электрических условий на время жизни ШМ

$$E_a < E_b < E_w < E_t, \quad (2)$$

где индексы a и b означают напряженность электрического поля после и перед грозой.

В то время как напряженность электрического поля приземного слоя атмосферы является неявным для наблюдателей параметром, влажность является параметром, легко определяемым очевидцами. Оба этих фактора являются проявлением грозовой активности атмосферы и находятся в неявной связи друг с другом, влияние этих факторов на время жизни ШМ может быть определено при использовании метода ранговой корреляции для анализа результатов данных наблюдения, однако выяснение наиболее вероятной причины влияния не может быть проделано без привлечения модельных представлений об объекте наблюдения.

Процедура обработки данных

Пусть мы имеем выборку описаний x_i общим числом n наблюдений ($i = 1, n$). Тогда, если мы выстроим значения так, что $x_{(i)}^0 \leq x_{(i+1)}^0$, мы получим упорядоченный ряд относительно переменной X [12]. Процесс такого упорядочения называется ранжированием, а каждому члену приписывается ранг R_i^0 (в простейшем случае рангом является порядковый номер упорядоченного наблюдения $R_i^0 = i$). Если мы имеем два параметра (x_i, y_i), то мы можем упорядочить наблюдения по любому из параметров. В случае если мы упорядочим наблюдения по рангам x_i^0 , ранги параметра y будут расставлены в некотором своем порядке R_j^0 .

Коэффициент ранговой корреляции по Кендалу определяется следующим образом [12]:

$$\tau = \frac{S}{\frac{1}{2}n(n-1)}. \tag{3}$$

Здесь S — подсчитанная определенным образом функция от разницы рангов для каждой пары параметров. В общем виде ее можно записать в следующей форме [11]:

$$S = 2 \sum_{i \neq j} \sum \text{sign}(i - y) \text{sign}(R_i^0 - R_j^0). \tag{4}$$

Как показано в [12], коэффициент корреляции τ есть частный случай обобщенного коэффициента корреляции Γ .¹

В приложении к задачам определения свойств шаровой молнии, в особенности в задаче учета качественных свойств из описаний наблюдений, ранжирование в большой степени носит субъективный характер. Такое ранжирование, когда в один ранг может попасть несколько

¹ Заметим также, в частности, что и коэффициент корреляции по Пирсону

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x}) \sum_i (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}},$$

обычно называемый просто коэффициентом корреляции, тоже представляет собой частный случай обобщенного коэффициента корреляции Γ .

Таблица 1. Частоты наблюдений для разных рангов влажности воздуха (по отношению к грозовым условиям) и времени жизни ШМ

Время жизни, с	Атмосферные (погодные) условия				
	ясно	пасмурно	дождь	ливень	всего
0.5–2.94	2	4	28	1	35
2.94–17.3	44	53	223	24	334
17.3–102	60	38	117	14	229
102–600	36	13	12	1	62
Всего	142	108	380	40	670

наблюдений, получило в статистике название связанных рангов [12]. В этом случае мы имеем таблицу с элементами Z_{ij} (где i и j есть ранги для параметров наблюдений) и Z_{ij} представляют собой частоты наблюдения ШМ, соответствующие данным рангам.

Диапазон времени жизни ШМ также разобьем на 4 ранга (мы разбили этот диапазон на 4 ранга исходя из того, чтобы для каждого ранга имелись наблюдения, т.е. $Z_{ij} \neq 0$ для любых i и j ; нет принципиальных трудностей разбить этот диапазон и на большее число рангов). Учитывая большой разброс значений времен жизни, воспользуемся процедурой стандартизации данных $\theta = \ln(t)$ [10], где t — время жизни ШМ. Для описаний наблюдений ШМ, где указаны одновременно и погодные условия, и время жизни ШМ, минимальное время равно $t = 0.5$ с ($\theta = -0.69$), максимальное — 600 с ($\theta = 6.4$). Исходя из этого получаем следующие ранги для диапазонов времени жизни: 1-й ранг — время жизни 0.5–2.94 с, 2-й ранг — 2.94–17.3 с, 3-й ранг — 17.3–102 с, 4-й ранг — 102–600 с. Таким образом, для всех рангов $\Delta\theta \approx 1.79$.

Связь между результатами ранжирования и частотами наблюдения ШМ в зависимости от влажности и времени жизни ШМ представлена в табл. 1.

Данные табл. 1 дают возможность представить сумму S (формула (3)) в виде [11]:

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K-1} \left[Z_{ij} \cdot \left(\sum_{\substack{t=1 \\ t \neq i}}^N \sum_{u>t}^K \text{sign}(t - u) \cdot Z_{tu} \right) \right], \tag{5}$$

из которого следует, что каждый член таблицы в сочетании с любым членом, расположенным ниже и правее этой клетки, несет положительный вклад в S , а элементы ниже и левее клетки таблицы дадут отрицательный вклад в сумму.

При помощи полученного значения $S = -35062$ определим коэффициент корреляции по Кендалу τ_a

$$\tau_{a1} = -0.2083.$$

Определенный таким образом коэффициент корреляции по Кендалу обладает свойством, что он не может достигнуть единицы в случае, если число строк не равно

числу столбцов [12]. Поэтому в случае связанных рангов коэффициент корреляции по Кендэлу может быть определен следующим образом [10]:

$$\tau_b = \frac{S}{\frac{1}{2}\{n(n-1) - \sum_{j=1}^N t_j(t_j-1)\}^{1/2} \times \{n(n-1) - \sum_{j=1}^K u_j(u_j-1)\}^{1/2}}, \quad (6)$$

где $t_j = \sum_i Z_{ij}$ — сумма по строкам таблицы, $u_j = \sum_i Z_{ji}$ — сумма по столбцам таблицы.

Вычисленный по формуле (5) коэффициент корреляции по Кендэлу дает значение

$$\tau_{b1} = -0.2546.$$

Мы видим, что учет смежности рангов привел к увеличению абсолютного значения коэффициента корреляции.

Полученный результат свидетельствует о наличии отрицательной связи между количеством влаги в атмосфере и временем жизни ШМ. Отрицательная зависимость означает, что при увеличении влажности время жизни ШМ уменьшается.

Обратимся теперь к вопросу о значимости полученного коэффициента корреляции τ_b (или к проверке гипотезы о независимости двух параметров). Процедура определения основывается на том, что при справедливости гипотезы о независимости параметров сумма рангов S имеет нормальное распределение с нулевым средним значением и дисперсией, являющейся функцией от общего количества наблюдений $\text{var}S = \sigma^2(n)$ [10–12]. В случае смежных рангов дисперсия вычисляется следующим образом [12]:

$$\begin{aligned} \text{var}S = & \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^N t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right. \\ & \left. - \sum_{j=1}^K u_j(u_j-1)(2u_j+5) \right] + \frac{1}{9n(n-1)(n-2)} \\ & \times \left[\sum_{j=1}^N t_j(t_j-1)(t_j-2) \right] \left[\sum_{j=1}^K u_j(u_j-1)(u_j-2) \right] \\ & + \frac{1}{2n(n-1)} \left[\sum_{j=1}^N t_j(t_j-1) \right] \left[\sum_{j=1}^K u_j(u_j-1) \right]. \quad (7) \end{aligned}$$

Используя (7) для данных из табл. 1, получаем, что $\text{var}S = \sigma^2 = (5.29 \cdot 10^3)^2$, а следовательно, $S = -6.62\sigma$. Из статистических таблиц [18] находим, что разность рангов генеральной совокупности S превысит значение, вычисленное по формуле (4), $P(|S| > 35062) \ll 0.05$. Таким образом, коэффициент корреляции по Кендэлу τ_{b1} является существенным с очень высокой вероятностью (почти равной 1).

Перейдем к задаче о влиянии электрического поля приземного слоя атмосферы на время жизни ШМ. Мы, как и в первом случае, отобрали только те случаи,

Таблица 2. Частоты наблюдений для разных рангов напряженности электрического поля (по отношению к погодным условиям) и времени жизни ШМ

Время жизни, с	Грозовые проявления по отношению к ШМ				
	после	до	без	во время	всего
0.5–2.94	6	15	5	34	60
2.94–17.3	48	55	92	281	476
17.3–102	42	23	82	140	287
102–600	13	7	44	18	82
Всего	109	100	233	473	905

когда ШМ наблюдалась вне помещения. Общее количество наблюдений оказалось 905. Атмосферные условия, соответствующие напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы, ранжированы согласно соотношению (2): a — после грозы (1-й ранг), b — перед грозой (2-й ранг), w — без грозы (3-й ранг), t — во время грозы (4-й ранг). Ранжирование по диапазону времени жизни проведено аналогично способу, описанному выше, т.е. на 4 ранга с применением процедуры стандартизации. В табл. 2 представлены частоты наблюдения шаровых молний для различных рангов по напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы и по диапазонам времени жизни шаровых молний.

При обработке данных табл. 2 получаем, что разность рангов S равна

$$S = -48194,$$

коэффициент корреляции τ_a по Кендэлу между напряженностью электрического поля и временем жизни ШМ равен

$$\tau_{a2} = -0.1259, \quad (8)$$

а с учетом смежности рангов

$$\tau_{b2} = -0.1884. \quad (9)$$

Видим, что в этом случае коэффициент корреляции ниже, чем в случае анализа влажности.

Статистическую значимость полученного результата вновь оценим исходя из того, что сумма рангов S имеет нормальное распределение с нулевым средним значением и дисперсией, являющейся функцией от общего количества наблюдений [10–12] $\text{var}S = \sigma^2(n)$. Учитывая смежность рангов, получаем после обработки табл. 2, что $S = -8.58\sigma$. На основе статистических таблиц [18] можно получить, что и в этом случае коэффициент корреляции τ_b по Кендэлу является существенным. Отметим, что ранжирование напряженности электрического поля в другом порядке приводило к уменьшению значения корреляционного коэффициента по Кендэлу, что говорит о выполнении зависимости (2) для ШМ.

Теперь перейдем к задаче о влиянии влажности на диаметр ШМ. Мы отобрали в базе данных те наблюдения, когда ШМ находилась на открытом воздухе. Общее количество наблюдений оказалось 1077. Погодные условия,

Таблица 3. Частоты наблюдений для разных рангов влажности воздуха (по отношению к грозовым условиям) и диаметра ШМ

Диаметр, см	Атмосферные (погодные) условия				
	ясно	пасмурно	дождь	ливень	всего
0.25–1.44	1	1	3	1	6
1.44–8.30	27	30	148	18	223
8.30–47.8	122	96	434	50	702
47.8–275	39	22	80	5	146
Всего	189	149	665	74	1077

соответствующие влажности, мы, как и выше, разбиваем на 4 ранга в связи с соотношением (1).

Диапазон диаметров ШМ также разобьем на 4 ранга. Учитывая большой разброс значений диаметров, воспользуемся, как и выше, процедурой стандартизации данных $\theta = \ln(D)$ [10], где D — диаметр ШМ. Для описаний наблюдений ШМ, где указаны одновременно и погодные условия, и диаметр ШМ, минимальный диаметр равен $D_{\min} = 0.25$ см ($\theta = -1.886$), максимальный — $D_{\max} = 275$ см ($\theta = 5.617$). Исходя из этого получаем следующие ранги для диапазонов диаметров: 1-й ранг — диаметры 0.25–1.44 см; 2-й ранг — 1.44–8.30 см; 3-й ранг — 8.30–47.8 см; 4-й ранг — 47.8–275 см. Таким образом, для всех рангов $\Delta\theta \approx 1.751$.

Связь между результатами ранжирования и частотами наблюдения ШМ в зависимости от влажности и диаметра ШМ представлена на табл. 3.

Из данных табл. 3 и значения разности рангов $S = -30878$, полученного по формуле (5), определим коэффициент корреляции по Кендэлу τ_a

$$\tau_{a3} = -0.053,$$

а с учетом смежности рангов

$$\tau_{b3} = -0.100. \quad (10)$$

Мы видим, что в этом случае коэффициент корреляции ниже, чем в случае анализа времени жизни.

Статистическую значимость полученного результата вновь оценим, как и выше, исходя из того, что сумма рангов S имеет нормальное распределение с нулевым средним значением и дисперсией, являющейся функцией от общего количества наблюдений [10–12] $\text{var}S = \sigma^2(n)$. Учитывая смежность рангов, получаем после обработки табл. 3, что $S = -3.59\sigma$. На основе статистических таблиц [18] можно получить, что и в этом случае коэффициент корреляции τ_{b3} по Кендэлу является существенным.

Рассмотрим задачу о влиянии электрического поля приземного слоя атмосферы на диаметр ШМ. Мы, как и в первом случае, отобрали только те случаи, когда ШМ наблюдалась вне помещения. Общее количество наблюдений оказалось 1587. Атмосферные условия,

Таблица 4. Частоты наблюдений для разных рангов напряженности электрического поля (по отношению к погодным условиям) и диаметра ШМ

Диаметр, см	Грозовые проявления по отношению к ШМ				
	после	до	без	во время	всего
0.25–1.44	1	1	1	5	8
1.44–8.30	22	17	52	247	338
8.30–47.8	111	144	201	588	1044
47.8–275	17	20	61	99	197
Всего	151	182	315	939	1587

соответствующие напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы, ранжированы согласно соотношению (2): a — после грозы (1-й ранг), b — перед грозой (2-й ранг), w — без грозы (3-й ранг), t — во время грозы (4-й ранг). Ранжирование по диапазону диаметров проведено аналогично способу, описанному выше, т.е. на 4 ранга с применением процедуры стандартизации. В табл. 4 представлены частоты наблюдения шаровых молний для различных рангов по напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы и по диаметрам шаровых молний.

При обработке данных табл. 4 по формуле (5) получаем, что разность рангов S равна

$$S = -82540,$$

коэффициент корреляции τ_a по Кендэлу между напряженностью электрического поля и диаметрами ШМ равен

$$\tau_{a4} = -0.066,$$

а с учетом смежности рангов

$$\tau_{b4} = -0.095. \quad (11)$$

Мы видим, что в этом случае коэффициент корреляции ниже, чем в случае анализа влажности.

Статистическую значимость полученного результата также оценим, как и выше. Учитывая смежность рангов, получаем после обработки табл. 4, что $S = -5.29\sigma$. На основе статистических таблиц [18] можно получить, что и в этом случае коэффициент корреляции τ_{b4} по Кендэлу является существенным.

Обсуждение результатов

Полученные в предыдущем разделе результаты показывают, что с увеличением влажности атмосферы время жизни и радиусы шаровых молний уменьшаются. Также они уменьшаются с увеличением напряженности электрического поля, которое само является неявной функцией от влажности, при этом, как и следовало бы ожидать, $|\tau_{b1}| > |\tau_{b2}|$ и $|\tau_{b3}| > |\tau_{b4}|$, т.е. данная закономерность подчеркивает вторичность влияния напряженности электрического поля по отношению к влажности.

Низкие значения коэффициента корреляции по Кендэлу говорят о нелинейной связи между временем жизни или диаметром ШМ и влажностью и ставят вопрос о том, что оказывает наиболее существенное влияние — увеличение концентрации молекул воды в атмосфере или появление мелких водных частиц и капель в воздухе. При этом мы оставляем в стороне вопрос о механическом разрушении вещества ШМ под действием ударов больших капель, которое может реализоваться во время сильного ливня и соответственно уменьшить время жизни или поверхностный слой ШМ, но надежная информация в данных наблюдателей о таком процессе в настоящее время отсутствует.

Очевидно, что химический состав атмосферы может иметь значение для шаровых молний, свечение которых поддерживается разрядными процессами в воздухе, процессами горения или состав которых сильно зависит от концентрации кластерных ионов, включающих в свой состав молекулы воды. Как известно [19,20], при наличии источника ионизации ионный состав в тропосфере может сильно отличаться при наличии паров воды и их отсутствии. Модели атмосферных ионов приводят к результату, что основными сортами отрицательных ионов в сухом воздухе в реальной тропосфере являются CO_3^- и NO_3^- , в которые превращаются ионы O^- и O_2^- , образованные в результате диссоциативного и трехтельного прилипания электронов к молекулам O_2 , а основными сортами положительных ионов являются O_2^+ и O_4^+ . Во влажном воздухе основными сортами ионов становятся сложные — кластерные ионы $\text{NO}_3^- \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$ и $\text{H}^+ \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$ ($n \geq 1$).

Увеличение количества кластерных ионов в воздухе с ростом влажности увеличивало бы концентрацию ионов в составе кластерной ШМ, состоящей из кластерных ионов молекул воды [2], и соответственно увеличивало бы ее время жизни. Наличие же капель никак не влияет на время жизни кластерной ШМ, т.е. данная модель не в состоянии объяснить наблюдаемую статистическую закономерность.

Каркас фрактальной ШМ [21] собирается наиболее эффективно в грозу, при наличии сильных электрических полей. Время жизни такой ШМ [21], состоящей из твердых частичек, зависит от наличия молекул окислителей, при горении которых происходит нагрев и высвечивание металлических частиц (натрий, калий), входящих в состав каркаса. При этом при повышении влажности и уменьшении поступления молекул O_2 на поверхность процессы горения затрудняются и время разогрева и соответственно жизни ШМ увеличивается. Появление капелек на поверхности такой ШМ также может затруднить поступление окислителя к областям горения, и время жизни ШМ увеличится, т.е. данная модель так же, как и в [2], не в состоянии объяснить статистическую закономерность.

Время жизни полимерной ШМ [22] и ее диаметр зависят от нагрева ее поверхности зажигающимися возле нее разрядами. При этом интенсивность нагрева про-

порциональна $\cong eN_eWE$ (e — заряд электрона, N_e — концентрация электронов, W — их дрейфовая скорость, E — напряженность электрического поля вблизи поверхности). Поэтому время жизни ШМ увеличивается при уменьшении интенсивности нагрева поверхности ШМ [22]. Наличие многих дополнительных каналов преобразования электронов в отрицательные ионы во влажной атмосфере по отношению к сухой уменьшило бы их концентрацию вблизи поверхности и, следовательно, уменьшило бы выделение энергии в разрядах около поверхности, а значит, увеличило бы время жизни ШМ. Так было бы при отсутствии капель, однако наличие капель в воздухе с размерами, большими, чем размер частичек, из которых состоит поверхность ШМ, которые могут заряжаться вблизи поверхности, будет приводить к значительному улучшению условий зажигания разряда в приповерхностном слое (как показано в [22], изменение размера частиц от 10^{-3} до 10^{-1} см уменьшает величину напряженности поля, необходимого для зажигания разряда, на порядок величины). Появление таких частиц приведет к дополнительной ионизации, увеличению концентрации плазмы и соответственно к большему нагреву поверхности, ее разрушению и уменьшению времени жизни ШМ. К этому же эффекту будет приводить и увеличение значения электрического поля грозовой атмосферы. Итак, мы видим, что наличие паров воды и капель ведет к противоположным эффектам, т.е. влияние влажности атмосферы на время жизни и размер полимерной ШМ будет нелинейным.

Электрические полевые и чисто плазменные теории ШМ (см. их анализ в [1—3]) говорят об улучшении условий образования и существования ШМ и, следовательно, об увеличении времени жизни ШМ с увеличением напряженности внешнего электрического поля, а влияние состава атмосферы не рассматривают, поэтому такие теории не объясняют результаты статистики в отношении времени жизни ШМ.

Перейдем к возможным причинам уменьшения диаметра ШМ. В принципе все модели ШМ как заряженного объекта, вблизи поверхности которого генерируется электрическое поле, спадающее с расстоянием, смогут объяснить в той или иной степени уменьшение видимого радиуса с ростом влажности как действие пондермоторных сил на капельки или на мелкие аэрозольные частицы вблизи поверхности ШМ, которые нагреваются, испаряются и изменяют условия на поверхности, и только теории ШМ с твердым незаряженным каркасом не будут объяснять изменение размера ШМ с изменением влажности в атмосфере.

Выводы

Проведенный анализ влияния влажности и напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы на время жизни и диаметр ШМ при помощи метода ранговых корреляций выявил влияние этих факторов в

сторону уменьшения времени жизни и диаметра ШМ. Невысокие значения коэффициентов корреляции показывают на нелинейную зависимость между условиями в атмосфере и временем жизни или диаметром ШМ. При этом влияние напряженности электрического поля вторично по сравнению с влиянием влажности.

Анализ возможного влияния влажности на время жизни ШМ на основе моделей [1–3,21,22] показал, что плазменно-полевые модели ШМ, кластерная [2] и фрактальная [21] модели, не в состоянии объяснить полученных результатов. Полимерная модель [22] объясняет эффект за счет влияния капелек воды на улучшение условий образований плазмы в приповерхностном слое ШМ и эффективности ее нагрева, приводящих к более быстрому выделению внутренней энергии ШМ и ее гибели, при этом развитие процессов на поверхности будут также приводить к уменьшению диаметра ШМ.

В работах [7,8] было показано, что процессы, отвечающие за перенос энергии через поверхность ШМ (и отвечающие за способ ее гибели), являются существенными для параметров ШМ, поэтому представляет интерес задача о влиянии паров воды на каждый способ гибели ШМ — погасание, распад и взрыв в отдельности. Однако здесь в настоящее время мы сталкиваемся с недостатком статистических данных и необходимостью числа наблюдений в банке данных.

Список литературы

- [1] Сингер С. Природа шаровой молнии. М.: Мир, 1973. 239 с.
- [2] Стаханов И.П. Физическая природа шаровой молнии. М.: Атомиздат, 1979. 240 с.
- [3] Барри Д. Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983. 288 с.
- [4] Григорьев А.И., Григорьева И.Д., Ширяева О.Д. // Химия плазмы. Вып. 17. М.: Энергоатомиздат, 1993. С. 218–249.
- [5] Bychkov V.L., Smirnov B.M., Stridjev A.J. // J. of Meteorology (UK). 1993. Vol. 18. N 178. P. 113–120.
- [6] Smirnov B.M., Strizhev A.Ju. // Physica Scripta. 1994. Vol. 50. P. 606–608.
- [7] Amirov A.Kh., Bychkov V.L. // Physica Scripta. 1994. Vol. 50. N 1. P. 588–590.
- [8] Amirov A.Kh., Bychkov V.L. // Physica Scripta. 1995. Vol. 52. N 2. P. 222–224.
- [9] Amirov A.Kh., Bychkov V.L. // Physica Scripta. 1995. Vol. 51. P. 413–416.
- [10] Справочник по прикладной статистике / Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана. М.: Финансы и статистика, 1990. Т. 2. Гл. 16, 17.
- [11] Гаек Я., Шидак З. Теория ранговых критериев. М.: Наука, 1971. 376 с.
- [12] Кендэл М. Ранговые корреляции. М.: Статистика, 1975. 216 с.
- [13] Амиров А.Х., Бычков В.Л. // Шаровая молния. Вып. 2. М.: ИВТАН, 1991. С. 19–27.
- [14] Amirov A.Kh., Bychkov V.L., Strizhev A.Ju. // J. of Meteorology (UK). 1995. Vol. 20. N 197. P. 85–93.
- [15] Keul A.G., Schwarzenbacher K. // Science of Ball Lightning / Ed. by Y.H. Ohtsuki. Singapore: World Scientific, 1989. P. 58–80.
- [16] Israel H. Atmospheric Electricity. Jerusalem: Keter Press Binding, 1973.
- [17] Тверской П.Н. Курс метеорологии. М.: Гидрометеоиздат, 1962.
- [18] Оуэн Д.Б. Сборник статистических таблиц. М.: ВЦ АН СССР, 1966.
- [19] Arijis E., Brasseur G. // J. Geophys. Res. A. 1986. Vol. 91. (D3). P. 4003–4016.
- [20] Kawamoto H., Ogawa T. // Planet. Space Sci. 1986. Vol. 34. N 12. P. 1229.
- [21] Smirnov B.M. // Phys. Rep. 1993. Vol. 224. N 4. P. 151.
- [22] Bychkov V.L. // Physica Scripta. 1994. Vol. 50. P. 591.