

04;12

Моделирование развития ступенчатого лидера молнии

© А.А. Дульзон, В.В. Лопатин, М.Д. Носков, О.И. Плешков

Научно-исследовательский институт высоких напряжений при Томском политехническом университете, 634050 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 10 декабря 1997 г. В окончательной редакции 13 марта 1998 г.)

Представлена стохастически-детерминистическая модель распространения нисходящего лидера, формирование молнии описывается стохастическим ростом ветвящихся разрядных каналов, определяемым электрическим полем. Динамика электрического поля и распределения зарядов по структуре молнии рассчитывается детерминистически. Модель включает в себя инициирование молнии, предварительный разряд в облаке, распространение нисходящего ступенчатого лидера к земле, инициирование и движение вверх встречного лидера с земной поверхности. С помощью численной реализации модели получена динамическая картина развития нисходящего лидера и внутриоблачной разрядной структуры. Проведено исследование влияния плотности заряда облака и параметров развивающихся каналов на пространственно-временные, токовые и зарядовые характеристики распространения ступенчатого лидера. Исследовано влияние отдельно стоящих сооружений на распределение точек удара молнии по земной поверхности.

Введение

Формирование проводящих каналов молнии облако–земля происходит в результате стохастического распространения ступенчатого лидера по направлению к земле. Основным фактором, определяющим динамику этого процесса, является напряженность электрического поля вблизи головки лидера [1–3]. На первых стадиях распространения лидера напряженность поля на его головке зависит от заряда канала лидера и распределения объемного заряда в облаке. По мере продвижения лидера к земле все большее влияние на распределение поля начинают оказывать скопления зарядов на земной поверхности и выступающих над ней объектах. При приближении лидера к земле на критическое расстояние (расстояние удара) с земли может развиваться встречный лидер. Математическое моделирование распространения нисходящего ступенчатого лидера с учетом параметров грозового облака, атмосферы и подстилающей поверхности имеет не только научный интерес, но представляет и практическое значение для совершенствования систем молниезащиты.

В настоящее время существуют различные модели распространения ступенчатого лидера [4–13]. Численные реализации этих моделей использовались для изучения распределения точек удара молнии по земной поверхности [4,9,12], определения вероятности поражения различных наземных и летящих объектов [7,8,10–12], расчета зоны защиты молниеотводов [7,8,10,12]. Однако имеющиеся модели используют существенные упрощения. Они описывают движение ступенчатого лидера только между основанием облака и землей, не рассматривают развитие внутриоблачных каналов молнии, свойства разрядных каналов считаются не изменяющимися во времени, не учитывается перераспределение зарядов в облаке и каналах в процессе движения лидера.

В настоящей работе предлагается стохастически-детерминистическая модель распространения ступенча-

того лидера, основанная на модификации фрактальной модели пробоя диэлектриков [14,15]. Формирование внутриоблачной структуры молнии и распространение ступенчатого лидера к земле описываются стохастическим ростом фрактальной структуры, управляемым напряженностью электрического поля. Динамика распределений электрического поля и зарядов определяется детерминистически на основе уравнений Максвелла и соответствующих полуэмпирических формул для проводимости каналов молнии [16]. В отличие от известных фрактальных моделей развития ступенчатого лидера [6,12], основанных на использовании предложенного в [14] закона роста фрактальной структуры, в настоящую модель введены текущие по разрядным каналам токи [17]. Численная реализация модели использована для исследования пространственно-временных, токовых и зарядовых характеристик развития ступенчатого лидера, а также распределения точек удара по земной поверхности.

Модель развития ступенчатого лидера

Модель описывает развитие отрицательно заряженного ступенчатого лидера по направлению от облака к земле и развитие с земли встречного лидера. В соответствии с этим область моделирования включает в себя только нижнюю отрицательно заряженную часть облака, расположенную под облаком часть земной поверхности и пространство между ними (рис. 1). Место инициирования молнии предполагается расположенным между центром распределения отрицательного заряда и областью локального положительного заряда в нижней части облака. Данное предположение основывается на возможности существования локальных положительно заряженных областей в нижней части облака [1–3] и результатах локализации высокочастотных сигналов, сопровождающих инициирование разряда молнии [18–20]. Разви-

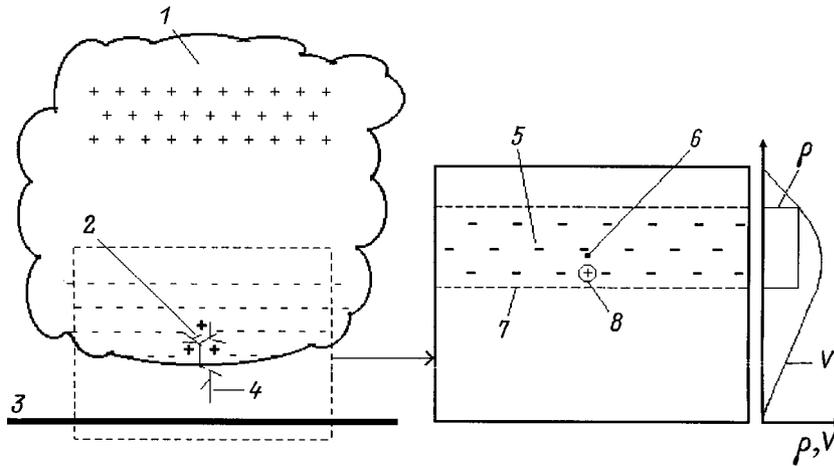


Рис. 1. Область моделирования: 1 — грозовое облако, 2 — внутриоблачный разряд, 3 — поверхность земли, 4 — ступенчатый лидер, 5 — область распределения отрицательного заряда, 6 — точка инициирования молнии, 7 — основание облака, 8 — положительный заряд; V — вертикальные профили потенциала, ρ — плотности отрицательного заряда.

тие разрядных каналов внутри облака и по направлению к земле описывается стохастическими ступенями роста. Вероятность P роста ступени в некотором направлении \mathbf{n} определяется состоянием среды и проекцией локальной напряженности поля E_n на это направление

$$P = \begin{cases} \frac{(E_n)^\eta}{Z}, & E_n \geq E_c, \\ 0, & E_n < E_c, \end{cases} \quad (1)$$

где $Z = \Sigma(E_n)^\eta$ — нормировочный множитель (суммирование производится по всем возможным направлениям роста).

Критическая напряженность E_c и параметр роста η зависят от условий распространения. Критическая напряженность в облаке E_c принимается в 5 раз меньше, чем критическая напряженность в воздухе E_c , из-за значительного снижения напряжения зажигания разряда в воздухе в присутствии кристалликов льда, паров и капель воды, а также снижения давления с высотой. Параметр роста η может быть оценен путем анализа механизма распространения лидера. Логично связать вероятность роста с мощностью энерговыделения в стримерной зоне. В этом случае параметр роста должен быть равен двум ($\eta = 2$).

На каждой ступени роста распределение электрического поля находится из теоремы Гаусса

$$\text{div}(\epsilon\epsilon_0\mathbf{E}) = \rho, \quad (2)$$

где ϵ , ϵ_0 — относительная и абсолютная диэлектрические проницаемости; ρ — плотность распределения свободных зарядов в каналах молнии и облаке.

В качестве первого приближения в модели принимается равномерное начальное распределение отрицательного заряда в нижней части облака (рис. 1). Используемое приближение существенно отличается от классической

дипольной модели электрической структуры облака и больше соответствует распределению поля, создаваемого зарядами нескольких грозовых ячеек.

Граничными условиями для решения уравнения (2) являются фиксированные потенциалы на верхней и нижней границе области моделирования и свободные потенциалы на боковых границах (рис. 1). Потенциал нижней границы, соответствующей земной поверхности, полагается равным нулю. Верхняя граница находится между положительно и отрицательно заряженными частями грозового облака. Место ее расположения также соответствует нулевому значению потенциала. Потенциал боковых границ пересчитывается на каждой ступени роста из условия нулевого потока вектора напряженности поля на них.

Распределение заряда изменяется во времени. Происходит сбор заряда в грозовом облаке и вынос заряда к земле распространяющимся ступенчатым лидером. Характерное время от момента инициирования молнии до достижения лидером земли составляет приблизительно 0.02 s [1–3,21]. Поскольку это время много меньше максвелловского времени релаксации зарядов в облаке и воздухе, то токами проводимости в последних можно пренебречь. Сбор заряда облака происходит только растущей внутриоблачной структурой молнии. Распределение заряда удовлетворяет уравнению непрерывности

$$\frac{d\rho}{dt} = -\text{div}\mathbf{j}, \quad (3)$$

где \mathbf{j} — плотность электрического тока в каналах молнии.

Перенос заряда по каналам молнии описывается законом Ома

$$I = \gamma \cdot E_l. \quad (4)$$

Здесь I — сила тока, γ — проводимость единицы длины канала (погонная проводимость), E_l — падение

напряжения на единицу длины канала. Величина γ равна произведению удельной проводимости плазмы канала лидера σ на величину эффективного поперечного сечения канала S ($\gamma = \sigma \cdot S$). Изменение проводимости γ определяется балансом выделения и рассеяния джоулева тепла в канале молнии [3,21]. В качестве первого приближения принимается, что увеличение проводимости прямо пропорционально энерговыделению

$$\frac{d\gamma}{dt} = \xi \gamma \cdot E_t^2, \quad (5)$$

где ξ — параметр возрастания проводимости.

Уравнение (5) представляет собой дифференциальный аналог формулы Ромпе–Вейцеля для проводимости длинной искры в газах. Погонная проводимость вновь образовавшегося канала принимается равной γ_0 . Для адекватного описания динамики зарядов и изменения проводимости в модель вводится физическое время t . Каждой ступени роста структуры молнии соответствует интервал физического времени Δt . Из выражения (1) следует, что вероятность ω роста канала в единицу времени зависит от напряженности поля по степенному закону

$$\omega(E) = \frac{E^\eta}{\Theta}, \quad (6)$$

где Θ — временная константа.

Полагая величины роста различных каналов статистически независимыми друг от друга, получим, что вероятность W роста какого-либо из каналов молнии в единицу времени Δt определяется суммированием по всем возможным направлениям $W = \Sigma \omega(E)$. Интервал времени, соответствующей ступени роста, обратно пропорционален вероятности W , следовательно

$$\Delta t = (W(E))^{-1} = \frac{\Theta}{\Sigma E^\eta} = \frac{\Theta}{Z}. \quad (7)$$

Таким образом, временная константа Θ имеет смысл параметра перехода к физическому времени.

Распространение ступенчатого лидера приводит к увеличению напряженности поля вблизи земной поверхности. Когда величина напряженности достигает критического значения, с поверхности инициируется встречный лидер. Распространение встречного лидера подчиняется той же вероятностной зависимости (1) от напряженности поля, что и ступенчатого лидера, а их развитие заканчивается после встречи. Точкой удара молнии считается место инициирования встречного лидера.

Для проведения компьютерных экспериментов модель была реализована численно на двухмерной квадратной решетке. Размер решетки соответствует средней длине ступени лидера. Структура молнии растет на одно ребро или диагональ решетки за одну ступень в соответствии с распределением вероятности (1). Распределения электрических полей и зарядов рассчитываются с помощью конечно-разностной аппроксимации уравнений (2)–(7).

Результаты и обсуждение

С помощью предложенной модели исследованы пространственно-временные и зарядовые характеристики развивающегося лидера молниевых разряда. Выбор пределов изменений параметров модели осуществлялся с учетом экспериментальных данных из цитируемой литературы и условий совпадения формогенеза получаемых при моделировании картин развития лидера с наблюдаемыми в природе. Таким образом, компьютерное моделирование можно рассматривать как метод решения обратной задачи, дающий дополнительные к натурным наблюдениям параметры. Двумерная реализация модели позволяет получать безразмерные величины, которые лишь качественно можно сравнивать с результатами измерений.

Инициирование ступенчатого лидера происходит вследствие возникновения предварительного пробоя между отрицательно заряженной частью облака и расположенным вблизи основания облака локальным положительным зарядом или флуктуацией отрицательного заряда (рис. 2, *a*). Первоначально канал предварительного пробоя распространяется вертикально, а затем начинают развиваться боковые ответвления. Полученная картина качественно согласуется с данными высокочастотной локации начальной стадии развития молнии [18,19], что свидетельствует о правильности модели. Внутриоблачная разрядная структура, эффективно собирая заряды, увеличивает напряженность поля в своей нижней части. Когда напряженность поля превышает критическую напряженность поля E_c (воздух), становится возможным распространение направленного к земле ступенчатого лидера. Запаздывание развития ступенчатого лидера относительно начала внутриоблачного разряда отмечалось многими исследователями, например [19,20]. Развитие внутриоблачной структуры продолжается преимуще-

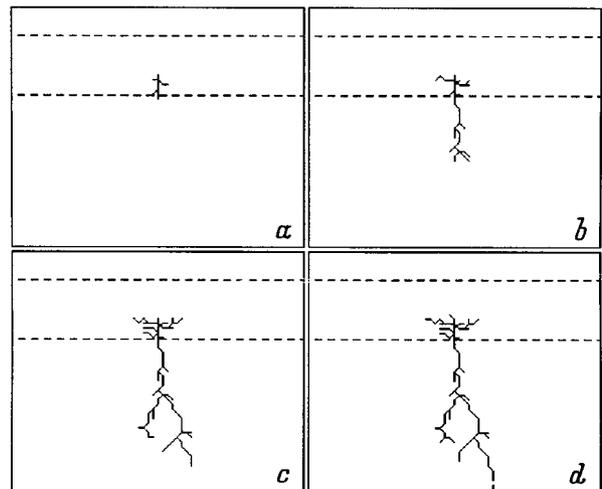


Рис. 2. Развитие ступенчатого лидера и внутриоблачной структуры молнии, параметры модели: $\rho = 0.6$, $\gamma_0 = 20$, $\xi = 1$, $\Theta = 5$, $E_c(\text{воздух}) = 2.5$, $E_c(\text{облако}) = 0.5$.

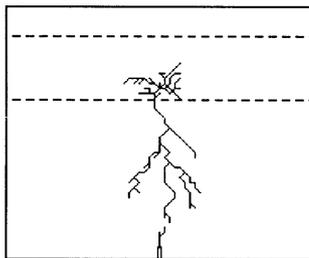


Рис. 3. Развитие встречного лидера с высокого сооружения $h = 2$. Параметры модели те же, что и на рис. 2.

ственно в горизонтальном направлении, причем частота ветвления ее каналов выше, чем у каналов ступенчатого лидера. Распространение ступенчатого лидера от основания облака к земле также сопровождается случайным ветвлением (рис. 2, *b*). Как правило, одна из ветвей лидера начинает доминировать и опережает остальные (рис. 2, *c*). Приближение головки доминирующей ветви лидера к земле приводит к увеличению напряженности поля на подстилающей поверхности. В результате этого с поверхности происходит инициирование встречного лидера (рис. 2, *d*). Если на поверхности расположены высокие сооружения, то они являются местами старта встречного лидера. В этом случае инициирование происходит раньше, а расстояние, проходимое встречным лидером до соединения со ступенчатым, увеличивается (рис. 3). Полученные картины также не противоречат общепринятым представлениям и наблюдениям. Распределение точек удара молнии по плоской поверхности имеет вид, близкий к нормальному. Максимум распределения находится под точкой инициирования молнии (рис. 4, *a*). Наличие на поверхности высоких сооружений приводит к существенному перераспределению точек удара (рис. 4, *b*). При этом вероятность поражения сооружения повышается с увеличением его высоты и приближением к координате инициирования молнии (рис. 5).

Развитие ступенчатого лидера сопровождается поляризацией всей разрядной структуры молнии. Внутриоблачная ее часть заряжается положительно, а движущаяся по направлению к земле — отрицательно. Линейная плотность заряда лидера экспоненциально нарастает при приближении к головке лидера (в литературе отсутствуют однозначные данные о распределении заряда вдоль канала ступенчатого лидера, предполагается [3] однородное или экспоненциально убывающее с высотой распределение плотности заряда). Перераспределение зарядов по структуре молнии приводит к выносу части потенциала облака на головку ступенчатого лидера и повышению потенциала облака вблизи расположения внутриоблачных каналов молнии. Напряженность поля на головке лидера возрастает, а в каналах уменьшается. После прохождения лидером половины расстояния между облаком и землей напряженность на головке доминирующей ветви примерно на порядок превосходит

среднюю напряженность между облаком и землей, а напряженность поля в каналах лидера на порядок меньше средней напряженности. Полученные соотношения для напряженностей находятся в соответствии с имеющимися представлениями о распределении полей в канале ступенчатого лидера [3,20]. Наибольшая сила тока и проводимость достигаются в каналах доминирующей ветви ступенчатого лидера. Токи увеличиваются по мере приближения лидера к земле. Каналы внутриоблачной

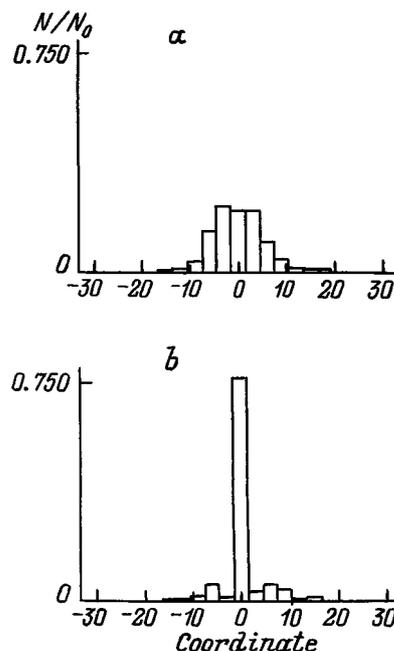


Рис. 4. Распределение точек удара молнии по поверхности: количество опытов $N_0 = 300$; параметры модели те же, что на рис. 2: *a* — плоская поверхность, *b* — высокое сооружение $h = 2$, расположенное под точкой инициирования молнии.

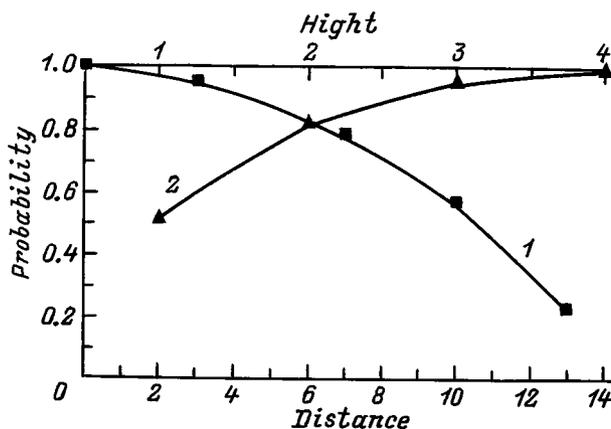


Рис. 5. Зависимости вероятности поражения высокого сооружения от его расположения относительно координаты точки инициирования (1) и высоты при нулевом расстоянии (2). Точки соответствуют данным, усредненным по 200 компьютерным экспериментам.

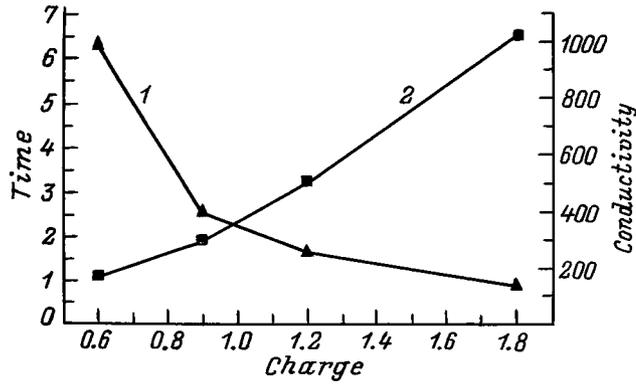


Рис. 6. Зависимость времени развития (1) и максимальной погонной проводимости ступенчатого лидера (2) от начальной плотности заряда в облаке: $\gamma_0 = 20$, $\xi = 1$, $\Theta = 5$, $E_c = 2.5$ (воздух), 0.5 (облако); точки соответствуют данным, усредненным по 200 компьютерным экспериментам.

структуры молнии имеют меньшую проводимость по сравнению с каналами ступенчатого лидера. Эффективный транспорт заряда к точке инициирования лидерного канала обеспечивает большая "густота" внутриоблачной разрядной структуры.

Характеристики ступенчатого лидера в значительной степени зависят от параметров облака и особенностей окружающей среды, в которой происходит разряд молнии. В рамках рассматриваемого подхода, варьируя параметры модели, удается воспроизвести наблюдаемые в природе разбросы величин токов и скоростей нисходящих лидеров. Результаты моделирования показывают, что наибольшее влияние на пространственно-временные и токовые характеристики развития ступенчатого лидера оказывает величина заряда облака. Увеличение заряда облака приводит к пропорциональному увеличению средней напряженности поля между облаком и землей. В результате уменьшается время развития ступенчатого лидера, увеличивается максимальная погонная проводимость канала (рис. 6), а разрядная структура ветвится сильнее. Увеличение параметра возрастания проводимости ξ от 0.2 до 5 приводит к подобным последствиям, но количественно этот эффект не столь сильный, а изменение начальной проводимости канала γ_0 на порядок практически не меняло картину развития лидера.

Распределение времен от момента инициирования молнии до момента достижения лидером земли для различных значений параметров модели приведены на рис. 7. Скорости распространения ступенчатого лидера в этих случаях различаются примерно на порядок. В соответствии с соотношением скоростей и характером ветвления быстрые и медленные лидеры могут быть сопоставлены с наблюдаемыми α - и β -ступенчатыми лидерами [2,21]. Скорость распространения лидера несколько увеличивается при приближении к земле. На рис. 8 приведены типичные зависимости длины доминирующей ветви молнии от времени для двух типов лидера. Вели-

чина силы тока в быстром лидере примерно на порядок выше, чем в медленном. Наблюдаемый экспериментально разброс значений силы тока в ступенчатом лидере также составляет примерно порядок величины [1,3].

Таким образом, предложенная модель адекватно описывает основные закономерности развития ступенчатого лидера. Результаты моделирования качественно согласуются с известными экспериментальными данными. Модель может служить основой для создания новых эффективных методов расчета зоны защиты молниевыводов, вероятности поражения различных объектов в зависимости от геометрии и параметров подстилающей поверхности и характеристик грозового облака. Однако для получения количественных результатов модель необходимо реализовать на трехмерной решетке, что может позволить производить количественное сравнение результатов моделирования и наблюдений.

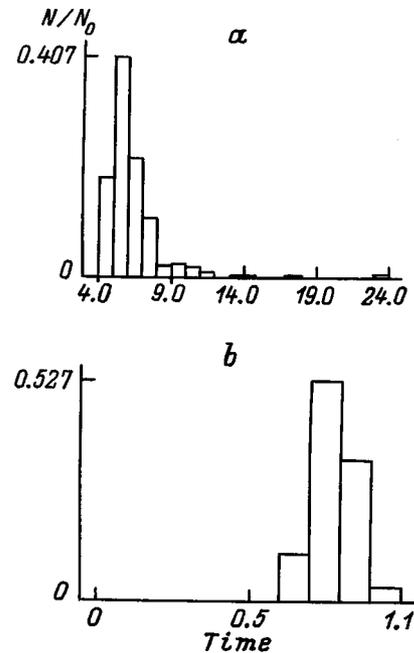


Рис. 7. Некоторые распределения времен развития ступенчатого лидера для различных параметров модели: количество опытов $N_0 = 300$; $\rho = 0.6$ (a), 1.8 (b); остальные параметры те же, что и на рис. 6.

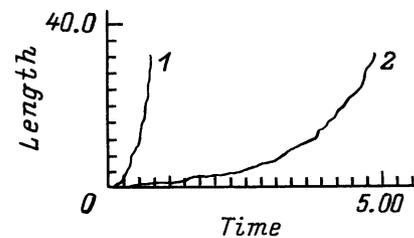


Рис. 8. Зависимость длины доминирующей ветви лидера от времени: $\rho = 1.8$ (1), 0.6 (2); остальные параметры те же, что и на рис. 6.

Список литературы

- [1] *Krider E.P.* The Earth's Electrical Environment. Washington: National Academy Press, 1986. P. 263.
- [2] *Uman A.M.* The Lightning discharge. London: Academy Press, 1987. P. 397.
- [3] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. М.: Изд-во МФТИ, 1997. 320 с.
- [4] *Niemeyer L.* // J. Phys. D. 1987. Vol. 20. P. 897–906.
- [5] *Kawasaki Z., Nakano M., Takeuti T.* et al. // Proc. Intern. Conf. on Atmospheric Electricity. 1988. P. 483–488.
- [6] *Kawasaki Z., Matsuura K., Nakano M.* et al. // Res. Lett. Atmospheric Electricity. 1989. Vol. 9. P. 63–71.
- [7] *Dellera L., Garbagnati E.* // IEEE Trans. Power Delivery. 1990. Vol. 5. N 4. P. 2009–2020.
- [8] *Dellera L., Garbagnati E.* // IEEE Trans. Power Delivery. 1990. Vol. 5. N 4. P. 2023–2029.
- [9] *Takeuti T., Hashimoto T., Takagi N.* // J. Atmos. Electr. 1993. Vol. 13. P. 9–14.
- [10] *Takeuti T., Hashimoto T., Takagi N.* // 8th Intern. Symp. on High Voltage Engineering. Yokohama (Japan), 1993. P. 265–267.
- [11] *Gaivorovsky A.S., Karasyuk K.V.* 8th Intern. Symp. on High Voltage Engineering. Yokohama (Japan), 1993. P. 277–280.
- [12] *Петров Н.И., Петрова Г.Н.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 3. С. 14–18.
- [13] *Ruhnke L., Mazuk V.* // 10th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity. Osaka (Japan), 1996. P. 192–195.
- [14] *Niemeyer L., Pietronero L., Wiesmann H.J.* // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 52. P. 1033–1036.
- [15] *Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д.* // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 2. С. 63–75.
- [16] *Dulson A., Noskov M., Lopatin V., Shelukhin D.* // 10th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity. Osaka (Japan), 1996. P. 260–263.
- [17] *Lopatin V., Noskov M., Pleshkov O.I.* // Proc. of 12th Intern. Conf. on Gas Discharges and Their Appl. Greifswald (Germany), 1997. P. 432–435.
- [18] *Rustan P.L., Uman M.A., Childer D.G.* et al. // J. Geophys. Res. 1980. Vol. 85. P. 4893–4903.
- [19] *Proctor D.E.* // J. Geophys. Res. 1983. Vol. 88. P. 5421–5440.
- [20] *Maier L., Lennon C., Krehbiel P.* et al. // 10th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity. Osaka (Japan), 1996. P. 280–283.
- [21] *Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И.* Физические и инженерные основы молниезащиты. Л.: Гидрометеиздат, 1978. С. 222.