УДК 551.599.21

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВОЗВРАТНОГО УДАРА МОЛНИИ

Думаева Л.В., Езаова А.Г.

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, e-mail: armand97a@gmail.com, alena_ezaova@mail.ru

Работа посвящена исследованию параметров молний на землю различной полярности. В данной работе для определения параметров тока молнии на Северном Кавказе использованы данные, полученные грозорегистратором LS 8000 Высокогорного геофизического института. Грозорегистратор обеспечивает прием информации о молниях со всей территории Северного Кавказа. Выполнен анализ результатов регистрации временных параметров импульсов токов молний. Анализ базы данных позволил найти средние значения амплитуды токов, времени нарастания и времени спада волны тока в каналах молний различных полярностей. Проведен анализ полученных результатов и на основе математических методов установлены аналитические зависимости для распределения токов молний. Получены законы нарастания и убывания электрического тока в импульсе для первых компонентов отрицательных и положительных наземных разрядов токов молний. Сделан сравнительный анализ полученных аналитических выражений с аналогами.

Ключевые слова: молния, крутизна тока, амплитуда тока молнии, грозорегистратор, полярность молнии, длительность волны тока

NUMERICAL MODEL RETURN STROKE OF LIGHTNING

Dumaeva L.V., Ezaova A.G.

H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, e-mail: armand97a@gmail.com, alena_ezaova@mail.ru

The work dedicates to the research of the parameters of lightning on the Earth of different polarity. In this work facts were used to define the parameters of the current of lightning in the Northern Caucasia. The stormy registrar guarantees the receiving of information about lightnings from the whole territory of the Northern Caucasia. The analysis of the results of the registration of time parameters of the lightnings current impulses. They were received from the stormy registrar LS 8000 of Alpine geophysical institute. The analysis of the database allowed finding average meaning of the currents amplitude, time of accumulation and the time of recession of the current wave in the lightnings canals of different polarities. The analysis of obtained results has been performed and the analytical dependencies for the distribution of the lightning currents established applying the mathematical methods. The laws of increase and decrease of electricity in impulse for the first components of the negative and positive ground discharge currents of lightning were received. A comparative analysis of the analytical expressions with analogues were made.

Keywords: lightning, steepness of the current, the amplitude of the lightning current, thunder-detector, the polarity of lightning, the duration of the current wave

Как известно, наиболее изученным является отрицательный молниевый разряд между облаком и землей. Его развитие начинается с движения ступенчатого лидера к земле, затем по подготовленному каналу немедленно следует очень яркий возвратный удар. Возвратный удар распространяется от земли к облаку. Время (период), предшествующее первому возвратному удару во вспышке, называется стадией ступенчатого лидера. Если после первого обратного удара подводится дополнительный электрический заряд к бездействующему каналу возвратного удара за время, меньшее примерно 100 мс, то непрерывный, или стрелковидный, лидер проходит этот канал возвратного удара, увеличивая степень ионизации в нем. Затем по вновь подготовленному стрелковидным лидером каналу проходит очередной возвратный удар.

Характеристики импульса тока являются определяющими как при решении задач молниезащиты различных объектов, так и для численных расчетов энерговыделения в канале молнии.

При организации молниезащиты различных объектов: линий электропередач, зданий, летательных аппаратов и др. согласно инструкции [3] – для проведения расчетов принята стилизованная кривая импульса тока первого компонента отрицательной молнии (рис. 1) со следующими характерными значениями: амплитуда тока $J_m = 20$ кА, длительность нарастания волны тока $\tau_\varphi = 10$ мкс и длительность спада волны тока $\tau_c = 200$ мкс. Предложенное в [3] распределение $J(t)$ в целом позволяет удовлетворительно вести расчеты для определения предельных значений параметров молниезащиты. Однако для численных моделей

возвратного удара молнии требуются аналитические выражения нарастания и убывания электрического тока.

В работе [4] предложено использовать для расчета первого импульса разряда молнии, приносящего на землю отрицательный заряд, следующее выражение:

$$J(t) = J_0\left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right) + J_1 e^{-\gamma t}. \qquad (1)$$

Параметры J_0, α и β выбраны таким образом, чтобы иметь наиболее реальные времена нарастания тока, максимальный ток и время спада тока до половины максимального значения. Параметры J_{01} и γ можно выбирать так, чтобы получить близкий к реальному промежуточный ток. Авторы [4] предлагают при необходимости в выражение (1) вводить дополнительный член, описывающий непрерывный ток. Предложено использовать следующие параметры для первого импульса, приносящего на землю отрицательный заряд:

$$\alpha = 2\cdot10^4\ \text{с}^{-1};\ \beta = 2\cdot10^5\ \text{с}^{-1};\ J_0 = 30\ \text{кА},$$

а для последующих импульсов

$$\alpha = 1{,}4\cdot10^4\ \text{с}^{-1};\ \beta = 6\cdot10^6\ \text{с}^{-1};\ J_0 = 10\ \text{кА}.$$

Приемлемыми параметрами для промежуточных токов являются

$$\gamma = 1{,}0\cdot10^3\ \text{с}^{-1};\ J_1 = 2{,}5\ \text{кА}.$$

Согласно инструкции [3] принята форма импульса тока молнии, представленная на рис. 1. Как правило, при разряде молнии на землю имеют место несколько подобных импульсов (ударов). Согласно исследованиям на Северном Кавказе количество импульсов может доходить до 16.

При сравнении значений $J(t)$ по формуле (1) кривая 1 на рис. 2 с принятой в России формой импульса тока молний (рис. 1) показывает их существенное расхождение. Кроме того, выражение (1), найденное по осциллограммам, создаваемым отрицательными молниями электрических полей, не применимо для положительных разрядов молний. Средние значения положительных и отрицательных разрядов достаточно различаются. Так для Северного Кавказа [1] их различие составляет от нескольких кА до 10 кА при средних значениях 16,8 и 22,9 кА соответственно для положительных и отрицательных разрядов молнии.

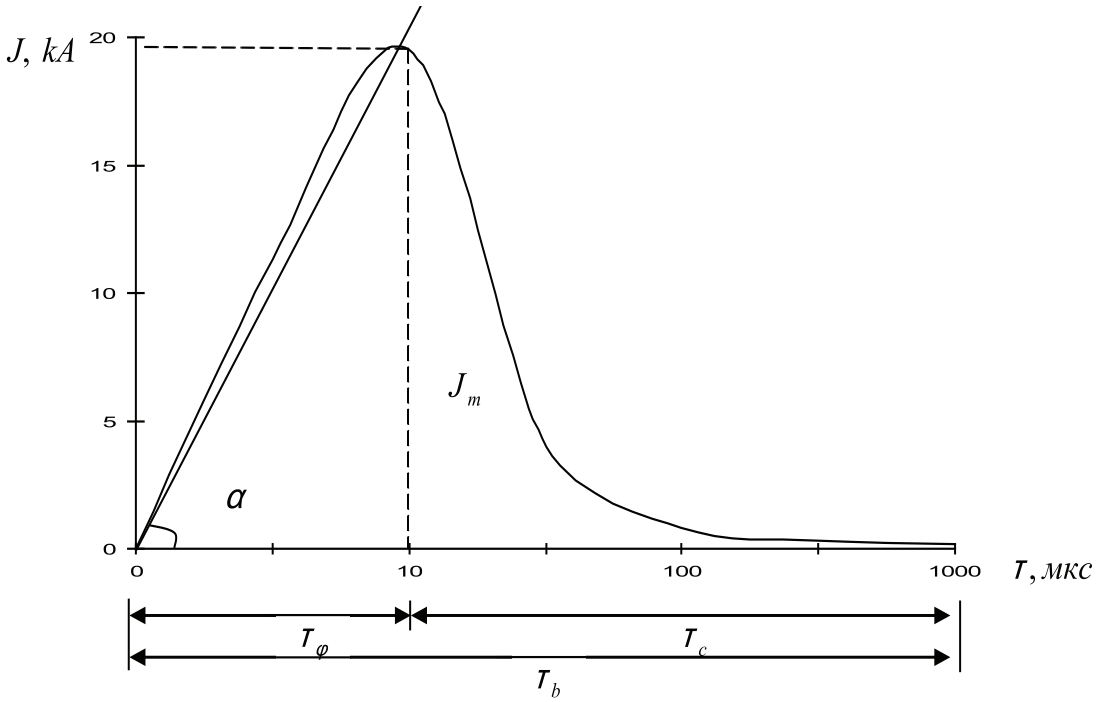

Рис. 1. Форма импульса тока молнии J(t) и его параметры:
J_m – амплитуда тока молнии; τ_φ – длительность фронта волны тока;
τ_c – длительность спада волны тока; τ_b – длительность волны тока; α – крутизна тока молнии

Другое аналитическое выражение $J(t)$ предложено в работе [5], кривая 2 на рис. 2. Согласно [2] временной ход $J(t)$ задается в виде выражения

$$J(t) = J_0 \cdot \begin{cases} 0, & \text{при} \quad t \le t_0; \\ \dfrac{(t - t_0)}{t_m}, & \text{при} \quad t_0 \le t \le t_m + t_0; \\ \exp\left[\dfrac{-(t - t_0 - t_m)}{t_c}\right], & \text{при} \quad t_m + t_0 \le t, \end{cases} \tag{2}$$

где J_0 = 10...110 кА – вероятный интервал изменения максимального тока в канале молнии; t_m = 1...15 мкс – типичное время нарастания волны тока в канале молнии; t_c – достаточно малый интервал времени между прохождением лидера и возвратным ударом молнии, при котором происходит основное энерговыделение.

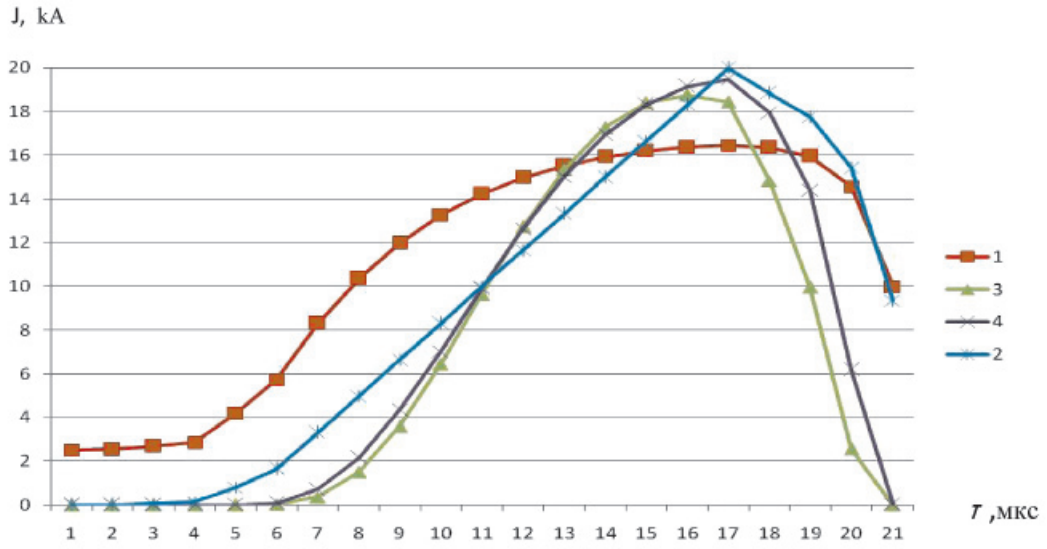

Рис. 2. Токи первой компоненты молнии различной полярности:
ряд 1 – экспериментальная кривая импульсов токов первых компонент отрицательных молний;
ряд 2 – экспериментальная кривая импульсов токов первых компонент положительных молний;
ряд 3 – расчетная кривая импульсов токов первых компонент отрицательных молний;
ряд 4 – расчетная кривая импульса токов первых компонент положительных молний

В [2] выражение (2) использовано для численного моделирования возвратного удара молнии. Была предложена численная модель возвратного удара молнии, позволяющая рассчитывать характеристики проводящего канала и определять выделяющуюся в нем энергию. В результате расчетов в [5] получена приближенная связь между током $J(t)$, временем разряда ($\tau_\varphi + \tau_c$) и энерговыделением, которое для известных наблюдаемых характеристик импульса тока молнии составляет от 10 до 200 Дж/см.

Следует отметить, на это указывают и авторы [2 и 5], точность расчета во многом определяется задаваемым законом нарастания и убывания электрического тока в импульсе разряда молнии. Кроме этого и в расчетах [2] авторы также не учитывают знак (полярность) разряда молнии.

В настоящей статье устраняются некоторые из перечисленных недостатков – полярность разряда – и предлагается более точное аналитическое выражение для токов молний различных типов. Для определения аналитических выражений токов молний различной полярности нами использованы статистические данные значений амплитуд токов молний J_m, времени нарастания τ_φ и спада τ_c волны тока, полученные грозорегистратором LS8000 Высокогорного геофизического института [1] в 2008–2010 гг. Согласно паспортным данным точность их регистраций составляет около 10%. Молниевые разряды на землю грозорегистратор разделял на положительные и отрицательные.

Анализ данных показал, что для отрицательных молний

$$J_{max} = 16{,}8 \text{ кА};$$
$$\tau_{\varphi} = 11{,}6 \text{ мкс}; \quad (3)$$
$$\tau_{c} = 26{,}6 \text{ мкс}.$$

Для положительных молний

$$J_{max} = 22{,}9 \text{ кА};$$
$$\tau_{\varphi} = 13{,}3 \text{ мкс}; \quad (4)$$
$$\tau_{c} = 22{,}4 \text{ мкс}.$$

С использованием полученных значений параметров молний различной полярности (3) и (4) методами математической статистики нами найдены выражения для токов молний.

Аналитическое выражение $J_0(t)$ для отрицательных наземных разрядов закон нарастания и убывания электрического тока в импульсе нами получено в виде

$$J_0(t) = c_1 \cdot t^{a_1} \cdot e^{-b_1 t}. \quad (5)$$

В выражении (5) при значениях t в мкс правое выражение имеет размерность кА; c_1, a_1 и b_1 – численные коэффициенты.

$$c_1 = 0{,}04;\ a_1 = 4{,}42;\ b_1\ 0{,}42.$$

Аналитическое выражение $J_n(t)$ для положительных наземных разрядов – закон нарастания и убывания электрического тока в импульсе нами получено в виде

$$J_n(t) = c_2 \cdot t^{a_2} \cdot e^{-b_2 t}. \quad (6)$$

При значениях t в мкс правое выражение также имеет размерность кА; c_2, a_2 и b_2 – численные коэффициенты для положительных молниевых разрядов.

$$c_2 = 0{,}12;\ a_2 = 3{,}45;\ b_2\ 0{,}38.$$

Стилизованные кривые импульсов токов первых компонентов отрицательных и положительных молний представлены на рис. 2, кривые 3 и 4 соответственно. Следует отметить, что полученные аналитические выражения $J(t)$ для токов молний различной полярности достаточно хорошо совпадает с другими данными. При этом полученные выражения (5) и (6) имеют достаточно простой вид. По сравнению с другими выражениями, например с заданным в виде (2), предполагаемое нами распределение $J(t)$ по форме ближе к принятым в СНиП России распределением (рис. 1).

Из выражения (5) и (6) получим

$$\frac{J_n}{J_0} = \frac{c_2}{c_1} t^{a_2 - a_1} \cdot e^{-t(b_2 - b_1)}. \quad (7)$$

Анализ соотношения (7) для различных периодов грозовой деятельности конкретного грозового очага, например изолированного грозового облака, показывает, что оно не постоянно.

В начальной и в конечной стадии развития грозы оно больше, чем в стадии наибольшей грозовой активности. Согласно выполненному нами анализу при объеме выборки около 5000 среднее значение отношения $\frac{J_n}{J_0}$ для Северного Кавказа составляет 1. Кроме этого, средние значения времени нарастания токов положительной полярности превышают время нарастания токов отрицательной полярности (3), (4). Таким образом, учитывая, что нейтрализуемый первым импульсом тока заряд пропорционален произведению $J{\cdot}t$, можно утверждать, что заряды положительной полярности, формируемые у вершины облака, а также в зоне выпадения осадков превышают заряды отрицательной полярности. Если иметь в виду, что закон сохранения электрического заряда в облаке, несомненно, имеет место, то сделанный нами вывод $J_n > J_0$ означает, что часть отрицательного заряда не участвует в формировании молниевых разрядов, либо нейтрализуется токами, не фиксируемые грозорегистратором LS8000 слабыми разрядами.

Список литературы

1. Аджиев А.Х., Аджиева А.А., Дорина А.Н. Определение параметров молниевых разрядов // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Физика атмосферы. – 2010. – С. 10–12.

2. Дубовой Э.И., Пряжинский В.И., Читанова Г.И. Расчет энерговыделения в канале молнии // Метеорологии и гидрологии. – 1991. – № 2. – С. 40–45.

3. Стандарт отраслевой: СО – 153 – 34.21.122 – 2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.

4. Dennis A.S., Pierce E.T. The Return Stroke of a Lightning Flash to Earth as a Source of VLF Atmospheres // I. Res / NBS/USNC-URSI, 68D (Radio Science). – 1964. – P. 777–794.

5. Plooster M.N. Numerical model of the return strophe the lightning discharge // Phys. Fluids. – 1971. – Vol. 14, № 10.

References

1. Adzhiev A.H., Adzhieva A.A., Dorina A.N. Opredelenie parametrov molnievyih razryadov. Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Severokavkazskiy region. Fizika atmosferyi. 2010. pp. 10–12.

2. Dubovoy E.I., Pryazhinskiy V.I., Chitanova G.I. Raschet energovyideleniya v kanale molnii // Meteorologii i gidrologii. 1991. no. 2. pp. 40–45.

3. Standart otraslevoy: SO – 153 – 34.21.122 – 2003. Instruktsiya po ustroystvu molniezaschityi zdaniy, sooruzheniy i promyishlennyih kommunikatsiy. M.: Izdatelstvo MEI, 2004.

4. Dennis A.S., Pierce E.T. The Return Stroke of a Lightning Flash to Earth as a Source of VLF Atmospheres // I. Res/ NBS/USNC-URSI, 68D (Radio Science). 1964. pp. 777–794.

5. Plooster M.N. Numerical model of the return strophe the lightning discharge// Phys. Fluids. 1971. Vol. 14, no. 10.

Рецензенты:

Ахкубеков А.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики наносистем, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик;

Хаширова Т.Ю., д.т.н., профессор кафедры, зав. кафедрой САКТУ, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик.