

РАСЧЕТНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПОЛЯ В МЕЗОСФЕРЕ НАД ИЗОГНУТЫМ ГРОЗОВЫМ РАЗРЯДОМ

И. Г. Кудинцева¹, А. П. Николаенко², М. Хайакава³

¹*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина*

²*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085 Украина
sasha@ire.kharkov.ua*

³*Университет электросвязи, Чофугаока
1-5-1, Чофу-сити, Токио, 182-8585, Япония
hayakawa@whistler.ee.uec.ac.jp*

Расчитаны импульсные электрические поля нейтральной атмосферы над мощным положительным изогнутым грозовым пробоем. Молния состоит из вертикальной и горизонтальной секций, каждая из которых имеет длину 10 км. Показано, что запаздывающие импульсы от вертикальной и горизонтальной частей молнии складываются так, что в пространственном распределении поля над пробоем возникает тонкая структура. Распределение зависит от времени и от ориентации канала молнии по отношению к наблюдателю. «Волокна» в распределении импульсного электрического поля имеют характерную ширину 1 км и достигают десятков километров в высоту. Ил. 3. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: электрическое поле в атмосфере, импульсы излучения, изогнутый пробой.

Настоящая публикация имеет отношение к феномену «red sprite», широко обсуждаемому в литературе (см. например обзор [1] и библиографию). В работе [2] была предложена модель образования спрайта, которая успешно применяется до сих пор. В ней используют квазистатическое поле, присутствующее в средней атмосфере (мезосфере) после того, как молния переносит из облака на землю половину дипольного заряда. Детальное описание модели и результатов ее применения содержится в обзоре [1]. Обычно спрайт порождается сверхмощным положительным пробоем со сложной геометрией канала разряда. Впечатляющие результаты по пространственно-временному моделированию развития спрайта продемонстрированы в работе [3], где использовалась модель клеточных автоматов, комбинированная с феноменологическим вероятностным перколяционным подходом. В двумерной задаче о перколяции (движении стримера) удалось получить структуры весьма похожие на видеоизображения спрайтов. Все упомянутые выше модели используют исключительно статическую компоненту поля грозы, импульсное излучение молний игнорируется.

Самые последние изображения спрайтов с исключительным временным разрешением [4] и видеозапись, приложенная к этой публикации, показали, что типичная картина спрайта возникает за счет интегрирования обычной видеокамерой невысокого быстродействия изображений ком-

пактных, быстро движущихся ярких элементов. Возникает естественный вопрос: не могут ли такие объекты быть связаны со структурой предшествовавшего электрического поля, созданного мощной молнией со сложной геометрией канала пробоя? В качестве первого шага в поисках ответа на этот вопрос обратимся к пространственному распределению поля, излучаемого таким пробоем, что и составляет предмет настоящей публикации. Ниже мы рассмотрим радиационные компоненты поля изогнутой молнии. Наш интерес оправдан еще и тем, что поле квазистатики убывает с расстоянием как $1/r^3$, тогда как поле излучения – $1/r$. При формировании спрайта поле излучения может оказаться столь же значимым, как и поле статики, если речь идет о достаточном удалении от молнии. Мы покажем, что радиоизлучение простейшего, изогнутого канала уже приводит к сложному распределению импульсного электрического поля в пространстве, которое к тому же изменяется во времени. Структурированность поля по нашему мнению может играть важную роль в развитии волокон в теле спрайта.

1. Описание модели. При расчетах электрических импульсов в средней атмосфере (мезосфере) мы используем модель изогнутого пробоя [5-7], которая тесно связана с традиционной «инженерной» моделью разряда [7-9]. Мы увеличили ток типичного возвратного пробоя [7] и изменили его полярность на положительную, оставив

прежней форму импульса. Таким образом, ток разряда у основания канала пробоя по-прежнему описывается суммой четырех экспоненциальных слагаемых $I(t) = \sum_{k=1}^4 I_k \exp(-t\omega_k)$, $t \geq 0$. Амплитуды тока I_k типовой модели [5, 7] были умножены на -20 и составляют: $I_1 = 569$ кА, $I_2 = -460$ кА, $I_3 = -100$ кА и $I_4 = -9$ кА. Обратные постоянные времени тока остались неизменными $\omega_1 = 6 \cdot 10^5$ с⁻¹, $\omega_2 = 3 \cdot 10^4$ с⁻¹, $\omega_3 = 2 \cdot 10^3$ с⁻¹ и $\omega_4 = 147$ с⁻¹. Ток разряда достигает максимального значения, равного 480 кА, через 5,5 мкс после начала пробоя. Заряд, переносимый на землю, равен: $Q = \int_0^{\infty} I(t) dt = 126$ К. Выбранные параметры относятся типичным молниям, способным вызвать спайты [1].

$$M_R \approx V_o \sum_{k=1}^4 I_k \exp(-\omega_k t) \left[\left(1 + \frac{\omega_k}{\omega_V} \right) \exp(-\omega_V t) - \frac{\omega_k}{\omega_V} \right] \quad t > 0. \quad (1)$$

При этом учитывается, что вначале дипольный момент источника ориентирован вертикально, его горизонтальная составляющая появляется, когда время t превысит «момент поворота» $t_k = \frac{1}{\omega_V} \ln\left(\frac{V_o}{V_o - \omega_V z_k}\right)$, т. е. когда фронт волны тока, двигаясь со скоростью $V(t)$, дойдет до высоты $z_k = 10$ км и повернет в горизонтальном направлении. В рассмотрение включены также отражения импульсов от идеально проводящей земли. Поле излучения (компоненты E_x , E_y и E_z) рассчитывалось в произвольной точке нейтральной атмосферы с помощью формул опубликованных в работах [5-7]. Главное отличие состоит в том, что прежде (см. например [5]) рассматривались временные изменения поля в фиксированных точках над разрядом, в настоящей работе мы рассматриваем пространственную зависимость поля, но в фиксированные моменты времени.

2. Результаты вычислений. Начальный электромагнитный импульс формируется излучением вертикальной части канала молнии и его отражением в земле. Распределение поля в пространстве имеет форму «бублика» [10, 11], обусловленную диаграммой излучения вертикального электрического диполя. Излучение горизонтального участка канала возникает после поворо-

Мы удлиннили молнию от 4 до 20 км, что достигается уменьшением обратной постоянной времени ω_V скорости движения волны тока по каналу пробоя [5-7]. Волна тока движется по каналу молнии с переменной скоростью $V(t) = V_o \exp(-t\omega_V)$, где начальная скорость $V_o = 8 \cdot 10^7$ м/с осталась такой же, как и в модели среднего возвратного пробоя [7], а постоянная времени уменьшилась до $\omega_V = 4 \cdot 10^3$ с⁻¹. Поэтому полная длина пробоя равна $L = \tau_V V_o = 20$ км.

Начальная часть канала ориентирована вертикально, она совпадает с осью Z прямоугольной системы координат и имеет длину 10 км. На высоте 10 км ток резко изгибается и продолжается горизонтально, вдоль оси X . Момент излучения разряда находят с помощью стандартного соотношения [5-7].

та волны тока в горизонтальном направлении ($t = 390$ мкс от начала пробоя). Позже всего к наблюдателю приходит волна от горизонтальной части молнии, отраженная от земли. На рис. 1 показаны расчетные импульсы для высоты $Z = 80$ км. Рассмотрены два положения наблюдателя относительно молнии: «Вдоль» и «Поперек».

Положительный изогнутый пробой 10+10 км $Z=80$ км.
«Поперек»: $X=0, Y=50$ км; «Вдоль»: $X=50$ м, $Y=0$

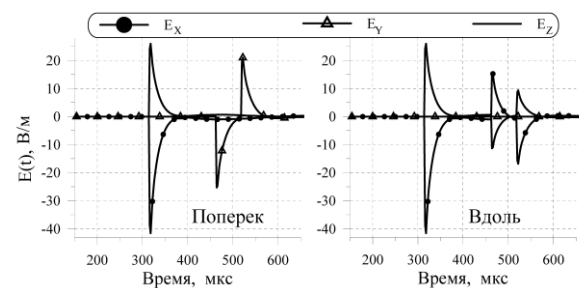


Рис. 1. Импульсы излучения от вертикальной и горизонтальной частей пробоя

Начало системы координат помещено в основание пробоя облако-земля. Его горизонтальная часть совпадает с осью X . Позиция «Вдоль» находится на высоте 80 км в плоскости YZ (или $X=0$), на горизонтальном расстоянии $Y = 50$ км. Положение «Поперек» находится на

той же высоте в плоскости XZ (или $Y=0$) на том же по величине горизонтальном удалении $X=50$ км. Вдоль абсциссы на рис. 1 отложено время от начала пробоя в микросекундах.

Видно, что сначала приходит импульс от вертикальной части пробоя. Импульс от горизонтальной части молнии запаздывает из-за конечной скорости движения волны тока по каналу пробоя. Самым последним приходит импульс, отраженный от земли. Видно, что он имеет знак, противоположный импульсу, пришедшему от горизонтальной части молнии. В позиции «Вдоль» поле E_Y обращается в нуль, что следует из симметрии источника поля.

Отдельные пики в сигнале возникают в соответствии с задержками начала излучения различных частей молнии плюс время распространения в атмосфере. Концепция сама по себе не нова, если не тривиальна. Однако, до сих пор не было построено распределение поля в пространстве над молнией сложной геометрии. Мы провели расчет временных вариаций поля, подобных тем, что показаны на рис. 1, для точек, распределенных в пространстве над молнией. Для

фиксированного момента времени координаты этих точек изменялись от 50 до 100 км по высоте и от -50 до 50 км по горизонтали с шагом 1 км.

Получаемая сетка данных позволила построить пространственное распределение поля в фиксированные моменты времени (компоненты E_X , E_Y , E_Z). Двумерные сечения таких трехмерных распределений позволяют показать, как интерферируют импульсные поля в пространстве.

На рис. 2 приведены пространственные распределения электрического поля в три момента времени. К сожалению, в черно-белом изображении невозможно детальнее показать эти распределения. Снова используются два сечения: плоскость XZ («Вдоль») и YZ («Поперек»). Используются три запаздывания: 290 мкс (верхний ряд графиков), 350 мкс (средние графики) и 470 мкс (нижние графики). Две левых колонки показывают поля E_Z и E_X в продольной плоскости. График E_Y для этой плоскости не приводится, поскольку эта компонента повсюду равна нулю в этой плоскости. Три правых колонки графиков показывают распределения компонент E_Z , E_X , и E_Y , рассчитанные в поперечной плоскости.

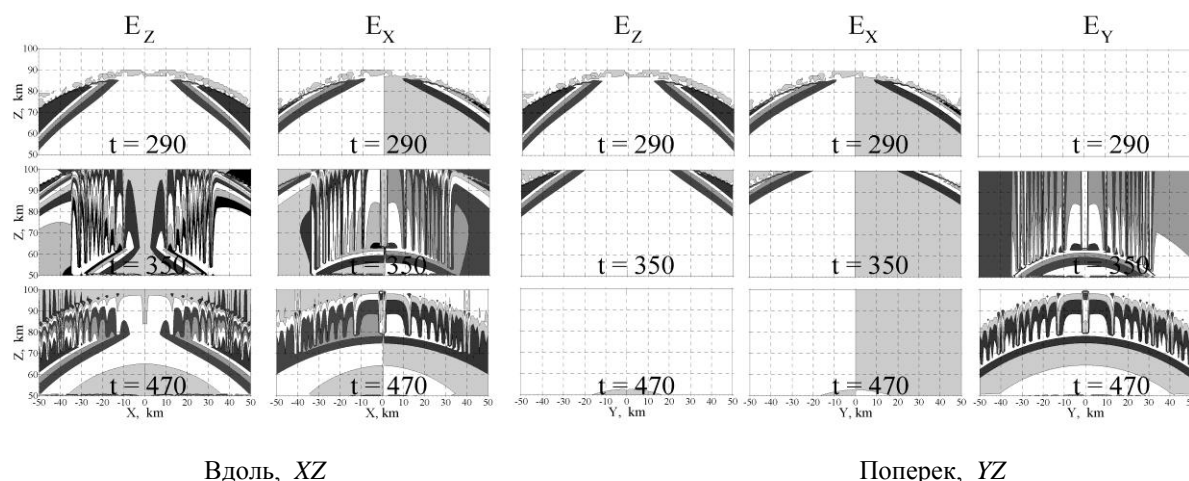


Рис. 2. Пространственное распределение поля над изогнутым пробоем в моменты времени 290, 350 и 470 мкс после начала пробоя. Контуры горизонтальных компонент поля показаны в диапазоне от -50 до +50 В/м с шагом 10 В/м, а контуры вертикальной компоненты – в диапазоне от -10 до +10 В/м с шагом 2 В/м

Верхний ряд графиков рис. 2 иллюстрирует «прибытие» начального импульса от вертикальной части пробоя $t = 290$ мкс. Отчетливо просматривается диаграмма направленности источника, одинаковая в обоих сечениях, как и следовало ожидать [5, 6]. Графики во втором ряду отвечают более сложной ситуации, когда в точку наблюдения приходят импульсы от горизонтальной

части пробоя, однако импульсы этой части, отраженные от земли, еще не пришли. Времена прихода зависят от дистанции и от ориентации горизонтальной ветви пробоя относительно направления на источник. Поэтому в разных компонентах поля возникают отличающиеся друг от друга «гребнеобразные» распределения отрицательного импульсного поля.

Графики третьего ряда на рис. 2 демонстрируют переменчивость распределений, заметные изменения происходят за интервал времени около 0,1 мс. Например, компонента E_z в продольной плоскости преимущественно отрицательна для $t = 350$ мкс и очень изрезана в пространстве. При $t = 470$ мкс она становится положительной (импульсы, отраженные от земли), а ее пространственная структура изменяется. Как показали вычисления, изрезанность пространственного распределения наблюдается долго, сотни микросекунд, тогда как ток разряда в применяемой модели изменяется гораздо быстрее, за времена меньше 10 мкс. Физическая причина такого «замедления» очевидна: форма излученных импульсов определяется изменениями токового момента источника, а значит, скоростью движения волны тока по каналу пробоя. Временные изменения тока пробоя оказываются второстепенными. Скорость волны тока снижается при движении по вертикальной части пробоя и становится умеренной уже при начале горизонтального движения. Поэтому импульс от горизонтальной части изогнутого пробоя растянут во времени по сравнению с первым импульсом от его вертикальной части.

Области, где импульсы положительны, притягивают свободные электроны атмосферы, а области отрицательного знака – отталкивают. Как видно, электрические поля имеют разные, весьма сложные распределения. В результате этого атмосферные частицы оказываются под воздействием нерегулярных электрических сил.

Конечно, электрическое поле в атмосфере оказывается изрезанным и переменчивым в любой плоскости. Мы выбрали для демонстрации только две из них, такие, где наблюдается высокая симметрия, легко объясняемая из элементарных соображений. Кроме того, мы ограничились только полем излучения изогнутого пробоя. Тем не менее, даже эта простая модель приводит к сложному распределению полей. Геометрия канала и отражения в земле увеличивают число импульсов излучения, а сами импульсы интерферируют в пространстве над молнией, обеспечивая тонкую структуру поля, зависящую от времени.

На рис. 3 отдельно показаны временные изменения пространственного распределения вертикальной компоненты электрического поля E_z . Контуры амплитуды поля показаны с шагом 2 В/м в диапазоне от -10 до +10 В/м.

Отдельные «кадры» рисунка отвечают шагу по времени в 30 мкс в интервале $t \in [320; 440]$ мкс. Очевидно вертикальное сме-

ещение фронтов импульсов при весьма переменчивой волокнистой структуре поля. Полученные данные дают представление о динамике «движущей силы», взаимодействующей с заряженными частицами атмосферы.

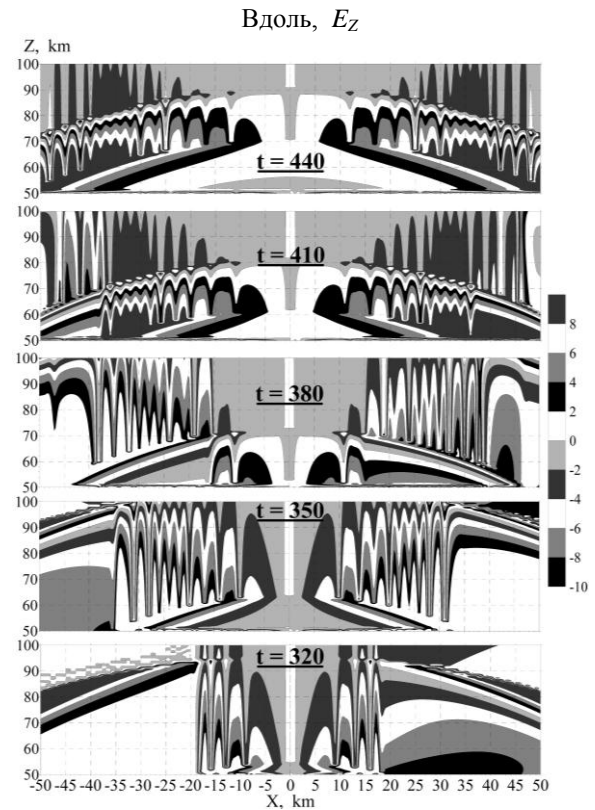


Рис. 3. Развитие во времени (с шагом 30 мкс) пространственного распределения компоненты поля E_z . Контуры амплитуды импульса показаны с шагом 2 В/м в диапазоне от -10 до +10 В/м

Эти силы понадобятся при интегрировании уравнений движения для получения бунчировки частиц и формирования «лучей» над грозой. Наша простая модель показывает, что мощная молния с однократно изогнутым каналом создает в мезосфере заметные импульсные поля со сложным распределением. Эти поля могут не только ускорять свободные частицы, но и «разогреть» различные области атмосферы, что в дальнейшем может сказаться на формировании, движении и ветвлении стримеров, отмеченным в наблюдениях. Похоже, что сильно структурированное электрическое поле, создаваемое интерференцией отдельных импульсов от изогнутой молнии, способно играть роль «затравки» для будущих волокон спрайта.

3. Обсуждение данных. Мы показали, что в атмосфере над изогнутым пробоем происходит своеобразное сложение отдельных импульсов электрического поля в пространстве. Тонкая структура создается за счет наложения (интерференции) последовательно излученных во времени импульсов от вертикальной и горизонтальной частей молнии. Нами была использована простейшая модель изогнутого положительного пробоя облако-земля, включающая всего лишь одну вертикальную и одну горизонтальную части, каждая длиной по 10 км. Такой канал можно также называть изломанным [6] или Г-образным. Мы не изучали физику излучения такого пробоя, что может составить предмет отдельного и не очень простого исследования. Форма тока и скорость движения волны по каналу были заимствованы из обычных моделей возвратного пробоя [7-9] и модифицированы в минимальной степени. Тем не менее, результаты расчетов показали, что при наличии двух секций в канале обязательно возникает тонкая структура в пространственном распределении поля. Детали распределения и его временные параметры мало зависят от формы тока молнии, они определяются особенностями продвижения волны тока по каналу, но тонкая структура возникает только тогда, когда канал состоит из двух или более секций.

Общепринятое объяснение развития спрайтов использует только квазистатическое поле [1-3], а излучение молнии игнорируется. Мы, напротив, сосредоточились исключительно на радиационном поле, рассчитанном в нейтральной атмосфере. В действительности импульсные поля излучения и индукции складываются с более медленным полем статики. Поле излучения убывает с дистанцией как $1/r$, но оно имеет меньшее начальное значение, чем статическая компонента, убывающая как $1/r^3$. Поэтому обе компоненты сравниваются по величине на расстоянии r , так, что $kr=1$. Это классическое условие дальней зоны в электродинамике. Если принять $r=50$ км, то равенство выполняется на частотах выше или равных 955 Гц. Таким образом, на частотах выше 1 кГц поле излучения превосходит по величине поля статики и индукции. Известно, что импульсные поля от типичных молний занимают более высокие частоты, заведомо удовлетворяя указанному условию, следовательно, их необходимо учитывать в моделировании спрайтов.

На столь «высоких частотах» проводимостью воздуха обычно пренебрегают [1, 2]. Если же учесть конечную проводимость атмосферы, то

амплитуда импульсного поля станет убывать с дистанцией чуть быстрее, а тонкие детали пространственного распределения размоются. Однако тонкая структура не исчезнет полностью. Мы надеемся, что приведенные результаты привлекут внимание, и импульсные поля со сложным пространственным распределением станут использоваться при моделировании спрайтов.

Выводы. Из-за конечной скорости движения волны тока по изогнутому каналу в атмосфере над молнией наблюдается последовательность импульсов разной полярности. Каждый из них порождается различными частями пробоя и отражениями от земли.

Сложение импульсов в пространстве обуславливает тонкую структуру интерференции электрического поля над изогнутой молнией, быстро изменяющуюся во времени.

В использованной нами модели среднего возвратного пробоя с минимальными модификациями оказалось, что характерный размер «волокон» в пространственном распределении импульсного поля составляет около 1 км по горизонтали и достигает десятков километров по вертикали, что хорошо согласуется со строением спрайтов, наблюдаемым экспериментально.

1. Pasko V. P. Theoretical modeling of sprites and jets // M. Füllekrug et al (eds.), "Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges", 253 - 311, Springer. Printed in Netherlands, 2006.
2. Pasko V. P., Inan U. S., Bell T. F., Taranenko Y. N. Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere // J. Geophys. Res. - 1997. 102(A3), - P.4529-4562.
3. Hayakawa M., Iudin D. I., Mareev E. A., Trakhtengerts V. Y. Cellular automaton modeling of mesospheric optical emissions, sprites // Phys. of Plasmas. - 2007. - 14, 042902.
4. Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Kammer T. and Sentman D. D. Observed emission rates in sprite streamer heads // Geophys. Res. Lett. - 2007. - 34, L11105.
5. Николаенко А. П. Шумановский резонанс и молнии в мезосфере // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2000. - 5, №1. - С.92-107.
6. Nickolaenko A. P. and M. Hayakawa. Lightning effects in mesosphere and associated ELF radio signals // PINSA. - 2001. - 67A, N4-5. - P.509-529.
7. Nickolaenko A. P. and M. Hayakawa. Resonances in the Earth-ionosphere Cavity, Kluwer Publ., Dordrecht, 2002.
8. McGorman D. R. and Rust W. D. The Electrical Nature of Storms, Oxford, University Press, 1998.
9. Rakov V. A. and Uman M. A. Lightning: Physics and Effects, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2003.
10. Николаенко А. П. О нагреве электронов нижней ионосферы электромагнитным излучением возвратных грозовых разрядов // Геомагнетизм и аэронавигация. - 1976. - 16. - С.260-264.
11. Nickolaenko A. P. and M. Hayakawa. Heating of the lower ionosphere electrons by electromagnetic radiation of lightning discharges // Geophys. Res. Let. - 1995. - 22. - P.3015-3018.

MODEL TRANSIENT ELECTRIC PULSES IN
MESOSPHERE ABOVE THE BENT STROKE OF
LIGHTNING

I. G. Kudintseva, A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa

Pulsed electric fields were computed in the neutral atmosphere above a powerful positive bent (broken) stroke of lightning that contains vertical and horizontal sections, each 10 km long. We demonstrate the fine structure of the field arises in space owing to interference of delayed pulses arriving from the vertical and horizontal sections of the causative discharge. Particular distribution depends on time and on the bent stroke orientation in respect to an elevated observer. Characteristic size of 'filaments' in transient electric field was obtained about 1 km along the horizontal direction, and it reaches a few tens of kilometers on the height.

Key words: electric field in atmosphere, pulsed radiation, bent stroke.

РОЗРАХУНКОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ ІМПУЛЬСНІ
ПОЛЯ У МЕЗОСФЕРІ НАД ЗІГНУТИМ
ГАЗОВИМ РОЗРЯДОМ

І. Г. Кудінцева, О. П. Ніколаєнко, М. Хайакава

Розраховано імпульсні електричні поля нейтральної атмосфери над потужним зігнутим позитивним грозовим пробом. Блискавка має вертикальну та горизонтальну секції, кожна з котрих сягає 10 км у довжину. Показано, що імпульси від вертикальної та горизонтальної частин блискавки запізнюються та складаються так, що у просторовому розподілі поля над пробом виникає фінна структура. Розподіл залежить від часу та орієнтації каналу блискавки відносно спостерігача. Волокна у розподілі імпульсного електричного поля мають характерну ширину 1 км та вертикальну довжину біля 10 км.

Ключові слова: електричне поле в атмосфері, імпульси випромінювання, зігнутий пробой.

Рукопись поступила 12 декабря 2007 г.