

УДК 533.9; 551.594; 537.531

## Численное моделирование узких биполярных электромагнитных импульсов, генерируемых грозowymi разрядами

Е. И. Бочков, Л. П. Бабич,  
И. М. Куцык

### Введение

В 1980-х гг. в грозовой атмосфере обнаружены, а затем исследованы [1–13] электромагнитные импульсы (ЭМИ) ВЧ-УВЧ диапазона, более мощные, нежели ЭМИ «нормальных» разрядов молнии [13]. Импульсы характеризуются малой длительностью (порядка нескольких десятков микросекунд) и характерной биполярной формой, в связи с чем идентифицируются как узкие биполярные импульсы (narrow bipolar pulses – NBP). Как отмечают авторы [11–13], термин неудачен, поскольку не может характеризовать данный класс ЭМИ: «сигнатуры радиационного поля пространственно ограниченного источника, включающегося и выключающегося за ограниченное время, всегда биполярны» и многие атмосферные ЭМИ даже короче, нежели NBP. Однако термин употребляется в опубликованных исследованиях, и мы будем им пользоваться.

Предполагается, что источником NBP являются компактные внутриоблачные разряды (compact intracloud discharges – CID) [3]. Несмотря на внимание исследователей к этим, по-видимому, наиболее мощным атмосферным генераторам широкополосного ВЧ-УВЧ излучения [11, 14], природа CID остается неясной. Предложена гипотеза [15, 16], согласно которой источником NBP является пробой на убегающих электронах (УЭ) [17], инициируемый широким атмосферным ливнем (ШАЛ), порождаемым космической частицей с энергией  $10^{17}$ – $10^{19}$  эВ. Предполагается следующая последовательность процессов: электроны ШАЛ с энергиями, превышающими порог убегания  $\epsilon_{th}$  в грозовом электрическом поле, ускоряются и в ионизирующих соударениях с молекулами порождают новые электроны, малая часть которых также способна ускоряться; в результате развивается лавина релятивистских убегающих электронов (ЛРУЭ) высоких энергий, сопровождающаяся генерацией большого числа электронов в подпороговой области энергий  $\epsilon \leq \epsilon_{th}$ , ток которых и создает NBP. Идея об участии ШАЛ в генерации NBP, однако, уязвима, поскольку зарегистрированы 4 % NBP, которые приходили парами с одновременностью менее 200 мс [11], много меньшей одновременности между последовательными событиями ШАЛ. Альтернативным

*Выполнено численное моделирование компактного внутриоблачного разряда в самосогласованном электрическом поле как генератора мощных электромагнитных импульсов ВЧ-УВЧ излучения (узкие биполярные импульсы). Вычислено число электронов, инициирующих лавину релятивистских убегающих электронов, при которых расчетные характеристики электромагнитных импульсов согласуются с измеренными параметрами узких биполярных импульсов. Отмечаются затруднения гипотезы об участии широких атмосферных ливней космических частиц в инициировании лавины релятивистских убегающих электронов. Разряд, способный генерировать узкие биполярные импульсы, порождает убегающие электроны в количествах, близких к оценкам числа убегающих электронов в источнике  $\gamma$ -вспышек земного происхождения.*

источником УЭ может являться лидер молнии: часть электронов в сильном поле лидера набирает энергию порядка сотен эВ и, оказываясь в режиме убегания ( $\epsilon \geq \epsilon_{th}$ ), порождает ЛРУЭ [18, 19].

В работе [9] выполнен 1D расчет ЭМИ разряда, развивающегося с участием ЛРУЭ на высоте 5 км. Вычисленные радиационные поля в ВЧ- и УВЧ-диапазонах согласуются с результатами наблюдений в ограниченном интервале углов, причем амплитуда ЭМИ отличается на одно стандартное отклонение от наблюдаемой средней амплитуды NBP [9]. Использована упрощенная модель самосогласованного поля. Моделирование выполнено для одноэлектронного инициирования ЛРУЭ, но из текста статьи не ясно, каково усиление ЛРУЭ, обеспечивающее согласие с результатами наблюдений. Полагалось, что ЛРУЭ движется со скоростью  $0,987c$ , где  $c$  – скорость света, хотя согласно расчетам, выполненным методом Монте-Карло, скорость лавины меньше  $0,9c$  [20, 21]. Диффузия УЭ не учитывается; поэтому поперечный размер ЛРУЭ фиксирован и принят равным 0,5 м, что гораздо меньше размера  $\sim 100-1000$  м, получающегося 2D численным моделированием в самосогласованном поле [22]. Занижение поперечного размера ЛРУЭ приводит к существенному завышению концентрации УЭ и, следовательно, концентраций всех заряженных частиц на оси симметрии разряда.

Целью нашего исследования является развитие идеи об участии УЭ в механизме CID [9, 15, 16]. Выполнено численное 2D моделирование разряда в самосогласованном поле. Для нескольких значений напряженности поля и высоты, на которой развивается разряд, вычислены числа инициирующих ЛРУЭ затравочных УЭ  $N_{re}^0$ , при которых расчетные характеристики ЭМИ наилучшим образом согласуются с измеренными параметрами NBP. Природа источника затравочных УЭ не конкретизируется.

### Математическая постановка задачи

Исследования процессов в грозовом поле с участием УЭ ведутся в терминах перенапряжения поля  $\delta = eE / (F_{min}P)$  относительно минимума силы трения  $F_B^{min} = 218P$  кВ/(м·атм), действующей на электрон в результате неупругих взаимодействий с молекулами атмосферы. Развитие ЛРУЭ в воздухе возможно начиная с  $\delta_{th} \approx 1,3$  [23], чему соответствует критическая напряженность поля  $E_{th} \approx 283$  кВ/м при нормальных условиях. То обстоятельство, что пороговое значение  $\delta_{th} > 1$ , обусловлено рассеянием электронов на молекулах, в результате чего они в среднем движутся под некоторым углом к направлению электрической силы  $-e\vec{E}$ .

Используем ту же модель разряда, что и в работах [22, 24], где транспорт УЭ описывается диффузионно-дрейфовым уравнением:

$$\frac{\partial n_{re}}{\partial t} + \text{div} \left( n_{re} \vec{v}_{re} - D_T \left( \vec{\nabla} n_{re} - \vec{v}_{re} \left( \vec{v}_{re} \vec{\nabla} n_{re} \right) / v_{re}^2 \right) - D_L \vec{v}_{re} \left( \vec{v}_{re} \vec{\nabla} n_{re} \right) / v_{re}^2 \right) = v_{re} n_{re} + S_{re}^{ext}, \quad (1)$$

где  $n_{re}$  – концентрация УЭ;  $v_{re}$  – коэффициент размножения (гибели) УЭ (runaway electron rate);  $\vec{v}_{re} = -v_{re} \vec{E} / E$  – вектор и  $v_{re}$  – абсолютная направленная скорость УЭ;  $D_T$  и  $D_L$  – коэффициенты поперечной и продольной диффузии УЭ;  $S_{re}^{ext} = N_{re}^0 \delta(t) \delta(\vec{r} - \vec{r}_s)$  – внешний источник УЭ;  $\vec{r}_s$  – положение источника УЭ.

Модель включает описание кинетики электронов низких энергий (e), положительных (p) и отрицательных (n) ионов:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \text{div} n_e \vec{v}_e = (v_{ion} - v_{att}) n_e - \beta_{ep} n_e n_p + v_{ep} n_{re} + S_{ep},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_p}{\partial t} + \operatorname{div} n_p \bar{v}_p &= v_{\text{ion}} n_e - \beta_{ep} n_e n_n - \beta_{pn} n_p n_n + v_{ep} n_{re} + S_{ep}, \\ \frac{\partial n_n}{\partial t} + \operatorname{div} n_n \bar{v}_n &= v_{\text{att}} n_e - \beta_{pn} n_p n_n. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $n_e, n_p, n_n$  – концентрации;  $\bar{v}_e = -\mu_e \vec{E}$ ,  $\bar{v}_p = \mu_p \vec{E}$ ,  $\bar{v}_n = -\mu_n \vec{E}$  – скорости дрейфа,  $\mu_e$  и  $\mu_{p,n}$  – подвижности электронов и ионов;  $v_{\text{ion}}$  – частота ионизации молекул воздуха электронами низких энергий;  $\beta_{ep}$  и  $\beta_{pn}$  – коэффициенты рекомбинации электронов с положительными ионами и положительных и отрицательных ионов;  $v_{\text{att}}$  – частота прилипания электронов к молекулам кислорода;  $v_{ep}$  – частота генерации электронов низких энергий в соударениях УЭ с молекулами;  $S_{ep}$  – внешний источник электронов и положительных ионов, обусловленный фоновым космическим излучением.

Система уравнений (1) и (2) замыкается уравнением для самосогласованного поля:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi_{\text{int}} + \vec{E}_{\text{ext}}, \quad (3)$$

$$\Delta \varphi_{\text{int}} = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_p - n_n - n_e - n_{re}),$$

где  $\vec{E}_{\text{ext}}$  – вектор напряженности внешнего (external) грозового поля,  $\varphi_{\text{int}}$  – потенциал поля пространственного заряда, созданного в результате движения заряженных частиц.

Использованы те же, что и в работах [22, 24], зависимости от напряженности поля и давления коэффициентов, входящих в уравнения (1) и (2), и начальные и граничные условия для системы (1)–(3). Решается двумерная задача в цилиндрической системе координат: аксиальной  $z$ , направленной по высоте, и ортогональной ей радиальной координате  $\rho$ . Поскольку длительность СИД крайне мала, внешнее поле (поле грозового облака) в данной задаче полагается стационарным и создается двумя плоскими равномерно заряженными слоями зарядов разного знака с толщиной  $\Delta z$ :

$$\vec{E}_{\text{ext}}(\vec{r}) = E_{\text{ext}}(z) \vec{e}_z = \vec{e}_z \begin{cases} E_m \frac{(z_b - z)}{\Delta z}, & z_b < z < z_b + \Delta z, \\ -E_m, & z_b + \Delta z < z < z_t - \Delta z, \\ E_m \frac{(z - z_t)}{\Delta z}, & z_t - \Delta z < z < z_t. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $z$  – высота над уровнем моря,  $z_b$  и  $z_t$  – нижняя и верхняя границы области с полем,  $E_m = \delta_{\text{ext}} F_B^{\text{min}}(0,5(z_b + z_t))$  и  $\delta_{\text{ext}}$  – модуль напряженности и перенапряжение поля в центре области. Вектор напряженности направлен вниз. Толщина  $\Delta z$  принята равной 200 м. Ввиду цилиндрической симметрии задачи напряженность поля в точке наблюдения зависит только от вертикальной  $z$  и радиальной  $\rho$  координат (рис. 1). NBP регистрируются, в основном, на расстояниях порядка десятков – сотен километров от источников [11–13], когда основной вклад в измеряемое поле вносит радиационная составляющая. Для ее расчета в точке наблюдения (observation) ( $z_{\text{ob}}, \rho_{\text{ob}}$ ) используем известную формулу:

$$\vec{E}(z_{ob}, \rho_{ob}, t) = -\frac{\partial \vec{A}(z_{ob}, \rho_{ob}, t)}{\partial t},$$

$$\vec{A}(z_{ob}, \rho_{ob}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \int_{V_{dis}} \frac{\vec{j}(z, \rho, t - R/c)}{R} \rho d\varphi \rho dz,$$

где  $R(z_{ob}, z, \rho_{ob}, \rho, \varphi) = \sqrt{(z - z_{ob})^2 + \rho^2 + \rho_{ob}^2 - 2\rho\rho_{ob} \cos \varphi}$ ;  $V_{dis}$  – объем области, в которой развивается разряд (discharge);  $\vec{j} = e(n_p \vec{v}_p - n_n \vec{v}_n - n_{re} \vec{v}_{re} - n_e \vec{v}_e)$  – плотность тока, в котором согласно результатам расчетов доминирует вклад электронов низких энергий.

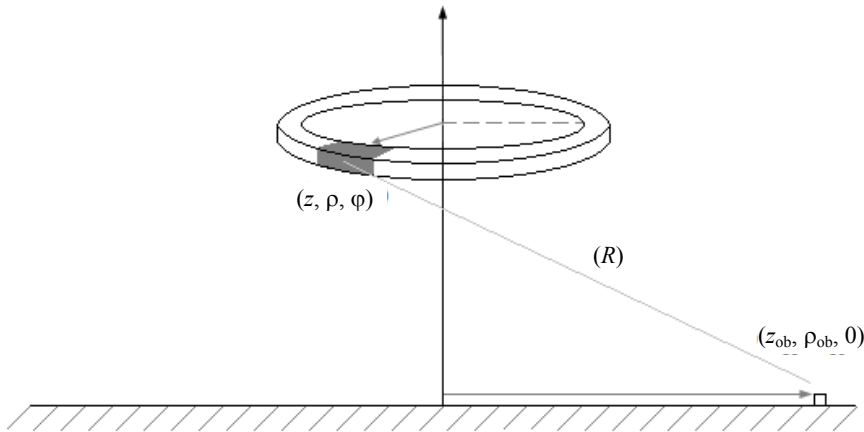


Рис. 1. Геометрическая схема, используемая для расчета электрического поля в точке наблюдения  $(z_{ob}, \rho_{ob})$

### Анализ результатов вычислений

В наземных наблюдениях измеряется вертикальный компонент напряженности поля (в наших обозначениях –  $z$ -компонент), поэтому далее под напряженностью понимается величина  $E_z$ . Согласно статистике 71 % NBP (9190 из 12892), зарегистрированных в 1998–1999 гг. с помощью Los Alamos Spheric Array, имеют положительную полярность (предполагается, что ось  $OZ$  направлена вверх – physical sign convention) [23]. В работе [11] описана феноменология 157 NBP положительной полярности, зарегистрированных в августе–сентябре 2008 г. в Gainesville (Флорида, США), причем отмечается, что за то же время были записаны только 4 импульса отрицательной полярности. Мы моделируем только положительные импульсы – как доминирующие в статистике. Положительная полярность импульса соответствует переносу отрицательного заряда вверх либо положительного – вниз, что, в свою очередь, согласуется с типичным распределением зарядов внутри облака: положительный заряд наверху, отрицательный внизу.

Характеризуем ЭМИ четырьмя параметрами: модулями напряженности поля в максимуме  $E_z^{\max}$  и в минимуме  $E_z^{\min}$  и двумя интервалами времени  $\Delta t_{0,1}^{\max}$  и  $\Delta t_{0,1}^{\min}$ . Параметр  $\Delta t_{0,1}^{\max}$  определяется как отрезок времени между моментом, когда напряженность поля достигает 10 % от максимального значения  $E_z^{\max}$ , и моментом, когда поле становится равным нулю (рис. 2). Аналогичным образом определяется  $\Delta t_{0,1}^{\min}$ . В работе [11] для набора из 48 импульсов рассчитаны геомет-

рические средние значения следующих параметров: высота источника излучения – 16 км; максимум напряженности поля, нормированный на случай для расстояния 100 км до источника, – 20 В/м; полная длительность импульса – 23 мкс; длительность первого полуцикла (initial half-cycle) – 5,6 мкс; модуль отношения максимума напряженности поля к минимуму – 5,7.

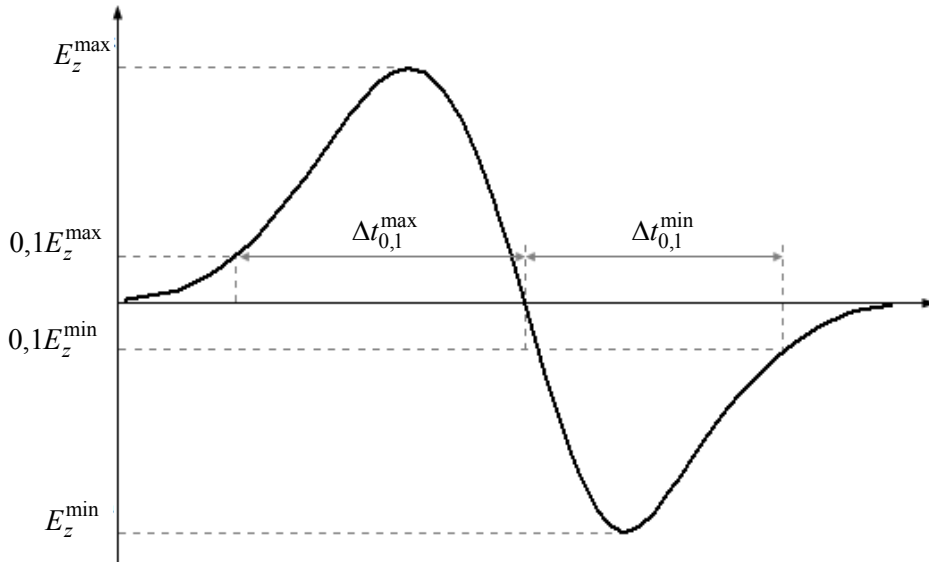


Рис. 2. Основные характеристики NBP

Согласно измерениям Маршалла и др. [25, 26] напряженность поля внутри грозовых облаков, приведенная к нормальным условиям, не превышает 3–4 кВ/см, чему соответствуют  $\delta = 1,5\text{--}2$ . В настоящем сообщении приведены результаты расчетов, выполненных для  $\delta_{\text{ext}} = 2$  и  $\delta_{\text{ext}} = 3$ . Чтобы оценить зависимость параметров ЭМИ от высоты, расчеты выполнялись для двух значений верхней границы  $z_t$  области с полем 8 и 16 км. По вертикали размер этой области определяется

числом длин усиления ЛРУЭ  $\zeta_{\text{ext}} = \int_D \frac{v_{\text{re}}(\delta(z)) dz}{v_{\text{re}}(\delta(z))}$ , где интегрирование ведется вдоль оси симметрии

задачи внутри области  $D$ ,  $\delta_{\text{ext}} > 1,3$ . Расчеты выполнены для  $\zeta_{\text{ext}} = 11, 15$  и  $20$ . Следует отметить, что согласно пределу по обратной релятивистской связи (relativistic feedback – RFB) [27, 28]  $\zeta$  не может превышать  $\sim 11$  ( $e^\zeta \sim 10^4\text{--}10^5$ ) для случая однородного поля [27]. Источник УЭ располагался на нижней границе области  $D$ . Число УЭ в источнике  $N_{\text{re}}^0$  принято равным  $5 \cdot 10^{11}$ ,  $7,5 \cdot 10^9$ ,  $5 \cdot 10^7$  соответственно для  $\zeta_{\text{ext}} = 11, 15$  и  $20$ . Значение  $N_{\text{re}}^0$  подобрано так, чтобы рассчитанные значения в «точке наблюдения» ( $z_{\text{ob}} = 0$  км,  $\rho_{\text{ob}} = 100$  км) были близки к 20 В/м. Вычисленные параметры ЭМИ представлены в таблице. На рис. 3 показаны ЭМИ, рассчитанные для случая  $\zeta_{\text{ext}} = 11$ .

Видно, что параметры ЭМИ, вычисленные для  $z_t = 8$  км, плохо согласуются с экспериментальными данными. Так, длительность ЭМИ  $\sim 4$  мкс значительно меньше средней измеренной длительности NBP 23 мкс [11]. Отношение модуля амплитуд первого и второго полуциклов равно примерно 1,5, что также сильно отличается от измеренного отношения 5,7 [11]. Результаты, полученные для  $z_t = 16$  км, неплохо описывают данные экспериментов. Так, расчетные значения полной длительности и длительности первого полуцикла ЭМИ для  $\delta_{\text{ext}} = 2$  равны примерно 20 и 5 мкс соответственно, что близко к экспериментальным значениям. Отметим, что увеличение длитель-

ности ЭМИ с ростом высоты связано с падением плотности воздуха, поскольку длительность второго полуцикла определяется временем прилипания электронов, которое растет с высотой. Модуль отношения максимума напряженности поля к минимуму для  $z_t = 16$  км, равный примерно 3, почти в два раза меньше среднего экспериментального значения 5,7.

Расчетные параметры ЭМИ ( $z_{ob} = 0$  км,  $\rho_{ob} = 100$  км)

$\delta_{ext}$	$z_t$ , км	$\zeta_{ext}$	$N_{re}^0$	$E_z^{max}$ , В/м	$ E_z^{min} $ , В/м	$\Delta t_{0,1}^{max}$ , мкс	$\Delta t_{0,1}^{min}$ , мкс
2	8	11	$5 \cdot 10^{11}$	29,6	22,7	1,9	2,4
2	8	15	$7,5 \cdot 10^9$	29,2	22,3	1,9	2,4
2	8	20	$5 \cdot 10^7$	23,9	18,2	1,9	2,5
3	8	11	$5 \cdot 10^{11}$	44,2	24,4	1,1	2,1
3	8	15	$7,5 \cdot 10^9$	51,3	28,6	1,1	2,1
3	8	20	$5 \cdot 10^7$	38,2	22,2	1,2	2,1
2	16	11	$5 \cdot 10^{11}$	20,2	7,4	4,9	14,7
2	16	15	$7,5 \cdot 10^9$	18,8	7,1	4,8	15,0
2	16	20	$5 \cdot 10^7$	17,5	6,4	4,7	15,2
3	16	11	$5 \cdot 10^{11}$	21,9	6,2	3,1	12,8
3	16	15	$7,5 \cdot 10^9$	23,9	7,0	3,1	12,6
3	16	20	$5 \cdot 10^7$	21,5	6,3	3,1	12,7

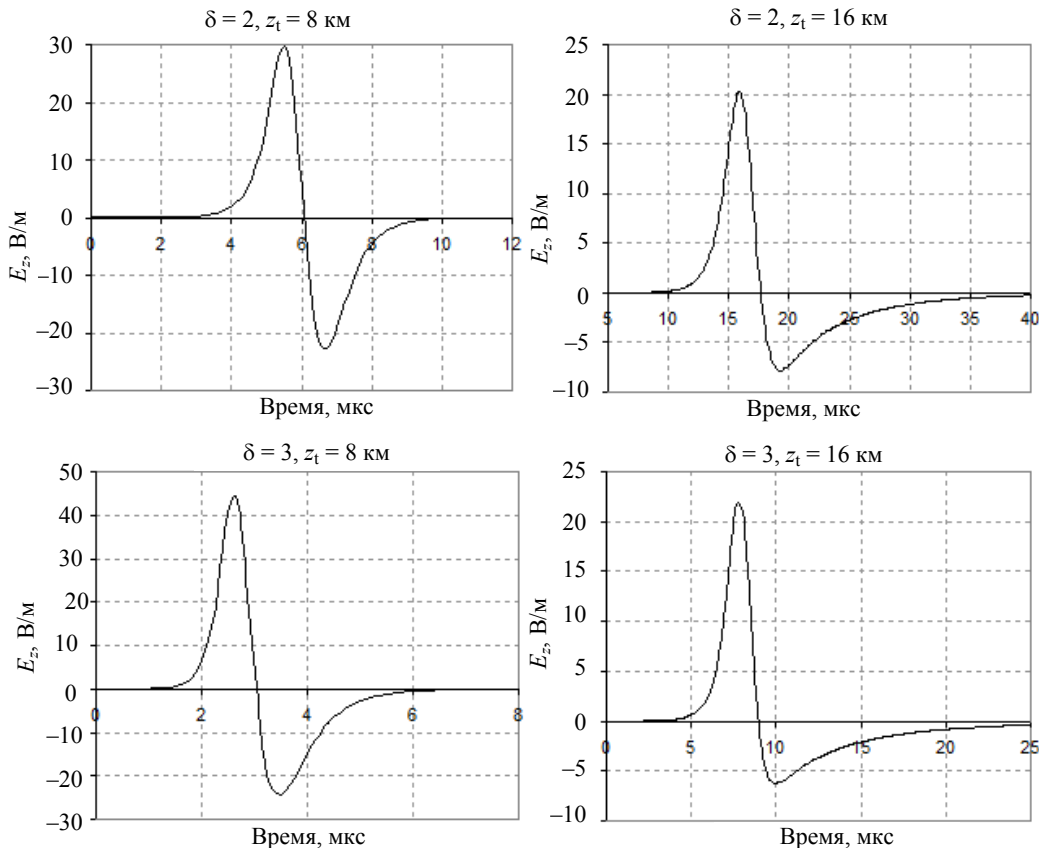


Рис. 3. Результаты расчетов вертикального компонента напряженности электрического поля ЭМИ в «точке наблюдения» на поверхности Земли  $z_{ob} = 0$  км,  $\rho_{ob} = 100$  км для  $\zeta_{ext} = 11$

На рис. 4. приведен импульс, измеренный на полигоне ЛАНЛ. Видно, что результаты эксперимента и численного моделирования согласуются друг с другом.

Обсудим вопрос о природе источника УЭ, основываясь на результатах расчетов с числом  $\zeta_{\text{ext}} = 11$ , предельным по релятивистской связи RFB. В этом случае, чтобы получить наблюдаемую амплитуду ЭМИ, требуется  $5 \cdot 10^{11}$  УЭ в источнике (см. таблицу). Нами численно моделировался [29] наземный эксперимент по регистрации рентгеновского излучения лидера молнии [30]. Для согласия с данными измерений число УЭ, генерируемых одной ступенью лидера, в различных редакциях эксперимента и моделирования должно находиться в интервале  $4 \cdot (10^9 - 10^{11})$ , что близко к  $5 \cdot 10^{11}$ . Следовательно, лидер может быть источником релятивистских лавин, отвечающих за развитие CID и, в конечном итоге, за NBP.

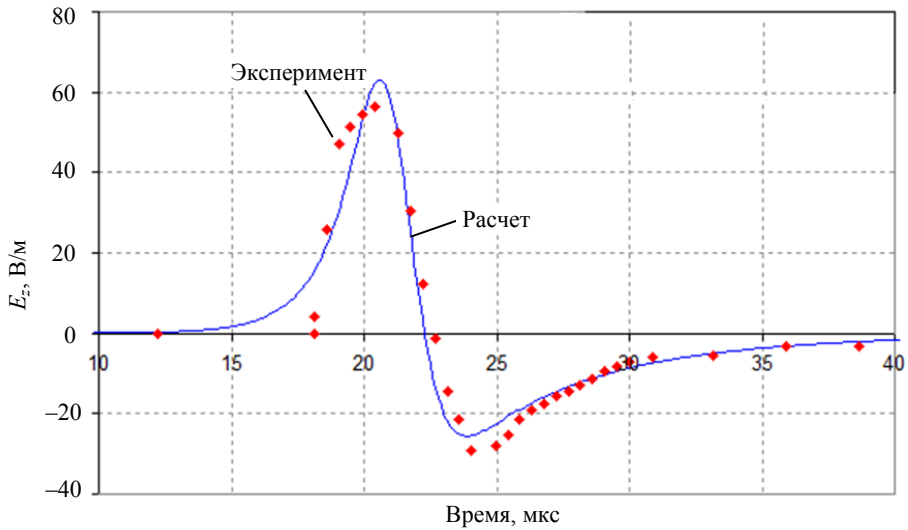


Рис. 4. Вертикальный компонент напряженности электрического поля ЭМИ, измеренный в эксперименте [3] в «точке наблюдения» на поверхности Земли на расстоянии 32,2 км от источника, и приведенный к нему компонент, полученный численным моделированием ( $z_{\text{ob}} = 0$  км,  $\rho_{\text{ob}} = 32,2$  км,  $\delta = 2$ ,  $\zeta_{\text{ext}} = 11$ ,  $z_t = 16$  км)

Оценим возможность того, что источником необходимого числа «затравочных» УЭ может являться ШАЛ. Согласно расчетам ШАЛ [31] космическая частица с энергией  $10^{16}$  эВ при прохождении через атмосферу в грозном поле с  $\delta_{\text{ext}} = 2$  может создать в максимуме распределения по высоте  $10^5$  УЭ/м. Следовательно, частица с энергией  $\sim 10^{19}$  эВ может создать  $10^8$  УЭ/м. Такая частица, движущаяся в поле с  $\delta_{\text{ext}} = 2$  вертикально вниз на высотах  $\sim 16$  км на одной длине усиления ЛРУЭ  $l_{\text{re}} \approx 250$  м (согласно данным [32] для характерного времени усиления ЛРУЭ при 1 атм), создаст  $2,5 \cdot 10^{10}$  электронов, что на порядок меньше числа УЭ  $5 \cdot 10^{11}$ , необходимого для получения амплитуды ЭМИ, равной амплитуде NBP. Кроме того, максимум плотности затравочных УЭ, порождаемых частицей с энергией  $10^{16}$  эВ, двигающейся по вертикали, достигается на высоте 4 км [31], т. е. ниже 16 км. В случае частицы с энергией  $10^{19}$  эВ максимум, скорее всего, должен находиться ниже уровня Земли. В случае, когда первичная космическая частица движется горизонтально, чтобы создать  $5 \cdot 10^{11}$  «затравочных» УЭ, ШАЛ должен в грозном поле пройти путь  $l \sim (5 \cdot 10^{11} / 10^8 \text{ м}^{-1}) = 5$  км. Поток космических частиц с энергией, превышающей  $10^{19}$  эВ, на границе атмосферы равен  $\Phi \approx 4 \cdot 10^{-13} (\text{м}^2 \cdot \text{с})^{-1}$  [33], следовательно, чтобы хоть одна частица с энергией  $\sim 10^{19}$  эВ и более пересекла облако радиусом  $R_{\text{cl}} \sim l/2 = 2,5$  км, необходимо время  $\sim (\Phi \pi R_{\text{cl}}^2)^{-1} \sim 10^5$  с,

т. е. более суток. Очевидно, что время существования грозового поля существенно меньше. Таким образом, участие космических частиц высоких энергий в генерации NBP маловероятно.

Не ясно, связаны ли события NBP с разрядами молнии, поскольку 24 % NBP регистрировались до, во время или вслед за разрядами молнии на землю или «нормальной» внутриоблачной молнии в пределах от 100 мс до NBP и 500 мс после NBP [11]. Обсуждается также возможная связь CID с  $\gamma$ -вспышками земного происхождения (terrestrial  $\gamma$ -ray flashes – TGF) [34–37]. В доступной нам литературе отсутствуют сообщения о наблюдении корреляции между NBP и TGF. Согласно результатам наших расчетов для  $\zeta_{\text{ext}} = 11$  разряд, генерирующий NBP, порождает УЭ в количествах  $\sim N_{\text{re}}^0 \exp \zeta_{\text{ext}} = 5 \cdot 10^{11} \exp 11 \approx 3 \cdot 10^{16}$ , близких к оценкам числа УЭ в источнике TGF:  $10^{17}$  УЭ для источника TGF на высоте 15 км и  $10^{16}$  – на высоте 21 км [38]. В работе [11] отмечается, что в девяти случаях источники NBP, т. е. CID, находились на высотах более 20 км, следовательно, их  $\gamma$ -излучение могло быть зарегистрировано в ближнем космосе.

## Заключение

Развивая идею об участии лавин релятивистских убегающих электронов в механизме слабо изученных компактных внутриоблачных разрядов CID [9, 15, 16], являющихся мощными генераторами природного широкополосного излучения ВЧ-УВЧ-диапазона (NBP), в приближении сплошной среды построена 2D модель разряда в самосогласованном поле с учетом кинетики УЭ высоких энергий, электронов низких энергий, положительных и отрицательных ионов. Без конкретизации источника электронов, инициирующих ЛРУЭ, выполнено численное моделирование разряда для нескольких значений перенапряжения грозового поля  $\delta_{\text{ext}}$ , длин усиления ЛРУЭ  $\zeta_{\text{ext}}$  и высоты, на которой развивается разряд; вычислено число «затравочных» электронов  $N_{\text{re}}^0$ , при которых расчетные характеристики ЭМИ согласовывались бы с измеренными усредненными параметрами NBP [11]: длительностью первого полуцикла  $\Delta t_{0,1}^{\text{max}} \approx 5,6$  мкс, полной длительностью NBP  $\Delta t_{0,1}^{\text{max}} + \Delta t_{0,1}^{\text{min}} \approx 23$  мкс и модулем отношения максимума напряженности поля к минимуму  $|E_z^{\text{max}} / E_z^{\text{min}}| = 5,7$ . Так, для верхней границы области с полем  $z_t = 16$  км, перенапряжения поля  $\delta_{\text{ext}} = 2$  и числа длин усиления лавины в  $e$  раз  $\zeta_{\text{ext}} = 11$  (ограничение по RFB) вычисленные значения  $\Delta t_{0,1}^{\text{max}} \approx 5$  мкс и  $\Delta t_{0,1}^{\text{max}} + \Delta t_{0,1}^{\text{min}} \approx 20$  мкс близки к результатам измерений. Отношение  $|E_z^{\text{max}} / E_z^{\text{min}}| \approx 3$  почти в два раза меньше среднестатистического измеренного, что, возможно, обусловлено отличием модельного поля (см. рис. 1) от реальной структуры поля грозового облака.

Остается открытым вопрос о природе источника электронов, инициирующих ЛРУЭ. В частности, идея об участии ШАЛ в инициировании ЛРУЭ [15, 15] вызывает затруднения, поскольку поток космических частиц с энергиями  $\sim 10^{19}$  эВ и более на Землю не настолько интенсивен, чтобы за время жизни грозового облака создать число электронов высоких энергий, необходимое для инициирования ЛРУЭ достаточно мощной для развития разряда, генерирующего ЭМИ с амплитудой, равной амплитуде NBP.

Требуются исследования, чтобы понять, существует ли связь между CID и разрядами обычной молнии и, если таковая обнаружится, выяснить ее механизм. Крайне интересно узнать, не являются ли CID источниками импульсов  $\gamma$ -излучения TGF, электронов и позитронов земного происхождения, регистрируемыми в ближнем космосе. Из результатов наших расчетов следует, что если источником NBP действительно являются разряды, развивающиеся с участием ЛРУЭ, то по крайней мере часть NBP коррелирована с TGF.



**Благодарности**

Авторы глубоко благодарны профессору Т. Ньюберту (T. Neubert) и профессору Х. Халдоупису (C. Haldoupis), европейским коллабораторам в проекте МНТЦ № 3993-2010, в рамках которого выполнена данная работа, доктору Н. Кросби (N. Crosby), профессору А. ван Деурсену (A. van Deursen), профессору С. Каммеру (S. Summer), доктору Р. А. Русселю-Дюпре (R. Roussel-Dupré), профессору Д. Смиту (D. Smith), доктору Т. Тории (T. Torii), профессору Э. Вильямсу (E. Williams) за поддержку предложения по проекту, профессору В. Ракову (V. Rakov) – за полезные комментарии. Л. П. Бабич и И. М. Куцык выражают глубокую благодарность академику РАН А. В. Гуревичу, члену-корреспонденту РАН К. П. Зыбину, доктору Р. А. Русселю-Дюпре (R. A. Roussel-Dupré), доктору Ю. М. Д. Цымбалисту (E. M. D. Symbalisty) за многолетнее плодотворное сотрудничество по физике атмосферного электричества, продолжением которого является данная работа.

**Список литературы**

1. Le Vine D. M. Sources of the strongest RF radiation from lightning // *J. Geophys. Res.* 1980. Vol. 85(C7). P. 4091.
2. Willett J. C., Bailey J. C., Krider E. P. A class of unusual lightning electric field waveforms with very strong high-frequency radiation // *Ibid.* 1989. Vol. 94(D13). P. 255.
3. Smith D. A., Shao X. M., Holden D. N. et al. A distinct class of isolated intracloud discharges and their associated radio emissions // *Ibid.* 1999. Vol. 104. P. 4189.
4. Smith D. M., Lopez L. I., Lin R. P., Barrington-Leigh C. P. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV // *Science*. 2005. Vol. 307. P. 1085.
5. Rison W., Thomas R. J., Krehbiel P. et al. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico // *Geophys. Res. Lett.* 1999. Vol. 26(23). P. 3573.
6. Light T., Jacobson A. R. Characteristics of impulsive VHF lightning signals observed by the FORTE satellite // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107(D24). P. 4576 [doi:10.1029/2001JD001585].
7. Jacobson A. R. How do the strongest radio pulses from thunderstorms relate to lightning flashes? // *Ibid.* 2003. Vol. 108(D24). P. 4778 [doi:10.1029/2003JD003936].
8. Hamlin T., Heavner R. C., Jacobson A. R. et al. *Lightning: Principles, Instruments and Applications* / Ed. by H. D. Betz, U. Schumann, P. Laroche. – New York: Springer, 2009. P. 287–307.
9. Tierney H. E., Roussel-Dupré R. A., Symbalisty E. M. D., Beasley W. H. Radio frequency emissions from a runaway electron avalanche model compared with intense, transient signals from thunderstorms // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. P. D12109 [doi:10.1029/2004JD005381].
10. Suszcynsky D. M., Lay E. H. Case study of a strong narrow bipolar event producing storm on 2–3 July 2005. 2009. Abstract AE43B–0278 // 2005 AGU Fall Meeting, San Francisco, California.
11. Nag A., Rakov V. A., Tsalikis D., Cramer J. A. On phenomenology of compact intracloud lightning discharges // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. D14115 [doi:10.1029/2009JD012957].
12. Nag A., Rakov V. A. Compact intracloud lightning discharges: 1. Mechanism of electromagnetic radiation and modeling // *Ibid.* 2010. Vol. 115. P. D20102 [doi:10.1029/2010JD014235].

13. Nag A., Rakov V. A. Compact intracloud lightning discharges: 2. Estimation of electrical parameters // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. D20103 [doi:10.1029/2010JD014237].
14. Thomas R., Krehbiel P., Rison W. et al. Observations of VHF source powers radiated by lightning // *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28(1). P. 143.
15. Gurevich A. V., Medvedev Y. V., Zybin K. P. New type discharge generated in thunderclouds by joint action of runaway break-down and extensive atmospheric shower // *Phys. Lett. A.* 2004. Vol. 329. P. 348.
16. Gurevich A. V., Zybin K. P. High energy cosmic ray particles and the most powerful discharges in thunderstorm atmosphere // *Ibid.* 2004. Vol. 329. P. 341.
17. Gurevich A. V., Milikh G. M., Roussel-Dupre R. A. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // *Ibid.* 1992. Vol. 165. P. 463.
18. Dwyer J. R. Source mechanisms of terrestrial gamma-ray flashes // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. P. D10103 [doi:10.1029/2007JD009248].
19. Celestin S., Pasko V. P. Energy and fluxes of thermal runaway electrons produced by exponential growth of streamers during the stepping of lightning leaders and in transient luminous events // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. P. A03315 [doi:10.1029/2010JA016260].
20. Coleman L. M., Dwyer J. R. Propagation speed of runaway electron avalanches // *Geophys. Res. Lett.* 2006. Vol. 33. P. L11810 [doi:10.1029/2006GL025863].
21. Kutsyk I. M., Babich L. P., Donskoi E. N., Bochkov E. I. Numerical analysis of the concept of a laboratory experiment on the demonstration of runaway electron breakdown under normal conditions at high overvoltages // *JETP Lett.* 2012. Vol. 95, N 12. P. 631–636.
22. Babich L. P., Bochkov E. I., Dwyer J. R., Kutsyk I. M. Numerical simulations of local enhancement of thundercloud field capable of lightning initiation trigger, allowing for the runaway electron avalanches seeded by cosmic rays // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. P. A09316 [doi: 10.1029/2012JA017799117].
23. Dwyer J. R. The initiation of lightning by runaway air breakdown // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. P. L20808 [doi:10.1029/2005GL023975].
24. Бабич Л. П., Бочков Е. И., Куцык И. М. Механизм инициирования молнии, основанный на развитии лавин релятивистских убегающих электронов, инициируемых фоновым космическим излучением. Численное моделирование // *ЖЭТФ.* 2011. Т. 139, № 5. С. 1028–1038.
25. Marshall T. C., Rison W., Rust W. D. et al. Rocket and balloon observations of electric field in two thunderstorm // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100. P. 815.
26. Marshall T. C., Stolzenburg M., Maggio C. R. et al. Observed electric fields associated with lightning initiation // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. P. L03813 [doi:10.1029/2004GL021802].
27. Dwyer J. R. A fundamental limit on electric fields in air // *Geophys. Res. Lett.* 2003. Vol. 30. P. 2055 [doi:10.1029/2003GL017781].
28. Babich L. P., Donskoy E. N., Kutsyk I. M., Roussel-Dupré R. A. The Feedback Mechanism of Runaway Air Breakdown // *Ibid.* 2005. Vol. 32. P. 1–5.
29. Babich L. P., Donskoï E. N., Dwyer J. R., Kutsyk I. M. Analysis of the experiment on the registration of x-rays of the stepped leader of the lightning discharge to the ground // *J. of Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 2573–2582 [doi:10.1002/jgra.50236].

30. Dwyer J. R., Rassoul H. K., Al-Dayeh M. et al. X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. P. L01803 [doi:10.1029/2004GL021782].
31. Бабич Л. П., Бочков Е. И., Куцык И. М. Источник убегающих электронов в поле грозового облака, обусловленный космическим излучением // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2007. Т. 47, № 5. С. 709–713.
32. Бабич Л. П., Донской Е. Н., Ильяев Р. И., Куцык И. М., Рюссель-Дюпре Р. А. Фундаментальные характеристики лавины релятивистских убегающих электронов в воздухе // *Физика плазмы.* 2004. Т. 30, № 7. С. 666–674.
33. Berezhinskii V. S., Bulanov S. V., Dogiel V. A. *Astrophysics of Cosmic Rays.* – NY: Elsevier, 1990.
34. Fishman G. J., Bhat P. N., Mallozzi R. et al. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin // *Science.* 1994. Vol. 264. P. 1313.
35. Briggs M. S., Fishman G. J., Connaughton V. et al. First results on terrestrial gamma-ray flashes from the Fermi Gamma-ray Burst Monitor // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. A07323 [doi:10.1029/2009JA015242].
36. Briggs M. S., Connaughton V., Wilson-Hodge C. et al. Electron-positron beams from terrestrial lightning observed with Fermi GBM // *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38. P. L02808 [doi:10.1029/2010GL046259].
37. Connaughton V., Briggs M. S., Holzworth R. H. et al. Associations between Fermi Gamma-ray Burst Monitor terrestrial gamma-ray flashes and sferics from the World Wide Lightning Location Network // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 115. P. A12307 [doi:10.1029/2010JA015681].
38. Dwyer J. R., Smith D. M. A comparison between Monte Carlo simulations of runaway breakdown and terrestrial gamma-ray flash observations // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. P. L22804 [doi:10.1029/2005GL023848].

## **Numerical Simulation of Narrow Bipolar Electromagnetic Pulses Generated by Lightning Discharges**

E. I. Bochkov, L. P. Babich, I. M. Kutsyk

*Numerical simulation is executed of compact intracloud discharge as a generator of powerful natural electromagnetic pulses (EMP) in the HF-VHF range called narrow bipolar pulses (NBPs). The numbers of seed electrons initiating the avalanche were computed, with which calculated EMP characteristics are consistent with measured NBP parameters. Difficulties are noted of the hypothesis assuming a participation of cosmic ray air showers in the avalanche initiation. The discharge, capable of NBP generating, produces REs in the numbers close to the RE numbers in the source of terrestrial  $\gamma$ -ray flashes (TGFs) that can be an argument in favor of unified NBP and TGF source.*