

На правах рукописи

БОЧКОВ Евгений Иванович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ  
ПРОЦЕССОВ В ГРОЗОВОЙ АТМОСФЕРЕ**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва, 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

**Бабич  
Леонид Петрович**

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

**Куцык  
Игорь Михайлович**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,  
ведущий научный сотрудник

**Хренов  
Борис Аркадьевич**

доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук,  
главный научный сотрудник

**Рухадзе  
Анри Амвросиевич**

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук**

Защита состоится 11 декабря 2013 года в 15 часов на заседании Диссертационного совета Д.501.001.45 на базе Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по адресу: Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы д.1 стр.5 (19-й корпус НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан « 06 » ноября 2013 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.501.001.45,  
кандидат физико-математических наук

**О.М. Вохник**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Проблема инициирования разряда молнии и развития ступенчатого лидера остается одной из нерешенных проблем области физики атмосферного электричества, несмотря на долгую историю исследований. Генерация проникающих излучений в поле грозовых облаков вообще и в молнии в частности – еще одна интригующая проблема, связанная с грозовой активностью, которая имеет почти вековую историю. В последние десятилетия был открыт и исследован целый ряд новых высокоэнергетических процессов, протекающих в условиях грозовой активности. К ним относятся различные высотные оптические явления в верхней стратосфере и нижней ионосфере Blue Jets (Голубые Струи), Red Sprites (Красные Духи), Elves (Эльфы), мощные биполярные электромагнитные импульсы (ЭМИ) ВЧ-УВЧ диапазона (narrow bipolar pulses – NBPs), импульсы рентгеновского и жесткого гамма излучений, усиление потока нейтронов. Имеются экспериментальные свидетельства о связи указанных процессов с грозовой активностью. В 1992 г. Гуревичем, Милихом и Русселлем-Дюпре предложен механизм [1], который представляется способным единообразно объяснить всю совокупность наблюдаемых электромагнитных явлений. В основе механизма лежит идея о развитии лавин релятивистских убегающих электронов (ЛРУЭ) с энергетическим спектром в районе минимума энергетических потерь электронов (~1 МэВ), так что электрон оказывается убегающим в слабом грозовом электрическом поле. Источником первичных убегающих электронов (УЭ) в атмосфере является космическое излучение.

С начала 1990-х годов постоянно растет масштаб экспериментальных исследований высокоэнергетических явлений в грозовой атмосфере, ведущихся международным сообществом. Для интерпретации результатов экспериментов, установления их достоверности и планирования новых экспериментов необходимы соответствующая теория и численные модели, развитие которых сильно отстает от потребностей эксперимента.

**Актуальность** исследований высокоэнергетических процессов в грозовой атмосфере определяется как интересами фундаментальной физики атмосферного электричества, так и рядом практических задач, описанных ниже.

**Целью работы** являлось создание эффективной численной модели атмосферных разрядов, развивающихся в режиме генерации лавин электронов высоких энергий, расчет характеристик сопутствующих потоков гамма-излучения и нейтронов, генерируемых грозовыми полями и регистрируемых на поверхности Земли и в грозовых облаках, характеристик оптического излучения и ЭМИ, генерируемых разрядами.

### **Научная значимость и новизна работы.**

1. Разработана эффективная методика моделирования развития лавины релятивистских убегающих электронов на основе диффузионно-дрейфового уравнения.
2. Рассчитан атмосферный источник убегающих электронов, инициируемый фоновым космическим излучением.
3. Развита математическая модель грозового разряда в самосогласованном электрическом поле, отличающаяся детальным учетом физических процессов с включением кинетики убегающих электронов.
4. Выполнен анализ механизма развития разряда молнии в рамках концепции лавин релятивистских убегающих электронов.
5. Выполнены расчеты генерации в грозовых полях проникающих излучений и узких биполярных ЭМИ.

**Достоверность полученных результатов** обоснована согласием рассчитанных характеристик исследуемых процессов и явлений с данными натуральных наблюдений.

**Практическая ценность** исследований высокоэнергетических явлений в грозовой атмосфере связана с необходимостью знания потоков гамма-излучения и нейтронов, генерируемых грозовыми полями, поскольку проникающие излучения могут представлять опасность для электронного оборудования летательных аппаратов, экипажей и пассажиров самолетов, влияя на надежность запуска ракет различного назначения. Гамма-импульсы атмосферного происхождения могут восприниматься системами слежения как следствие несанкционированных ядер-

ных взрывов, и по этой причине представляют интерес для программ по контролю над нераспространением ядерного оружия.

**Личный вклад автора** заключается в развитии физических и математических моделей, разработке и тестировании компьютерных программ, выполнении численного моделирования, анализе промежуточных и окончательных результатов, написании и оформлении статей и докладов.

**На защиту выносятся следующие положения.**

1. С использованием кинетических коэффициентов, вычисленных стохастическим методом Монте-Карло, диффузионно-дрейфовое уравнение позволяет эффективно моделировать кинетику убегающих электронов высоких энергий в пространстве и времени с точностью, близкой к точности метода Монте-Карло.
2. В основе механизма инициирования молнии лежит пробой атмосферы на убегающих электронах, инициируемый фоновым космическим излучением.
3. Источником продолжительных вспышек жесткого гамма-излучения и усиления потока нейтронов в грозовой атмосфере, регистрируемых на уровне моря и в высокогорных условиях, является тормозное излучение лавин релятивистских убегающих электронов.
4. Узкие биполярные импульсы электромагнитного излучения генерируются компактными внутриоблачными разрядами, развивающимися с участием лавин релятивистских убегающих электронов.

**Апробация работы.** Результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- VI Российская конференция по атмосферному электричеству. Нижний Новгород, октябрь, 2007 г.
- 35-я конференция Европейского Физического Союза по физике плазмы. Херсонес, Греция, июнь, 2008. [35th EPS Conference on Plasma Physics. Hersonissos, Greece, June, 2008].
- VII Научно-техническая конференция "Молодежь в науке" РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров, октябрь, 2008.
- Чэпменовская конференция по влиянию гроз и молний на верхнюю атмосферу. Пенсильванский государственный университет, Пенсильвания, США, май, 2009. [Chapman Conference on the Effects of Thunderstorms and Lightning in the Upper Atmosphere. Penn State University, State College, Pennsylvania, USA, May, 2009].
- Осенний семинар Американского геофизического союза. Сан-Франциско, США, декабрь, 2009. [Fall 2009 meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, USA, December, 2009].
- IX Научно-техническая конференция "Молодежь в науке" РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров, октябрь, 2010.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 8 статей в рецензируемых журналах, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5-и глав, заключения и списка литературы из 184 наименований, изложена на 173 страницах, включает 50 рисунков и 18 таблиц.

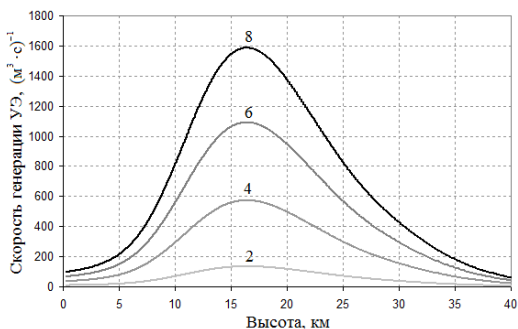
## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обосновывается актуальность и практическая целесообразность работы, формулируются цели, перечисляются новые результаты, дана общая характеристика работы по главам.

**В первой главе** дан обзор экспериментов по регистрации проникающих излучений в грозовой атмосфере, выполненных в последние десятилетия, описываются результаты наблюдений высотных оптических явлений над грозowymi облаками, приведены результаты экспериментов по регистрации узких биполярных ЭМИ. Изложен механизм пробоя атмосферы на релятивистских УЭ и его применение к описанию различного рода высокоэнергетических явлений в грозовой атмосфере.

**Во второй главе** исследуются возможности двух детерминистических методик описания кинетики УЭ высоких энергий, как альтернативные стохастическим методикам, требующим больших вычислительных ресурсов в задачах численного моделирования электрических разрядов с участием убегающих электронов. Одна из методик основана на многогрупповых уравнениях для моментов функции распределения электронов, другая – на уравнении переноса в диффузионно-дрейфовом приближении. Обсуждаются преимущества и недостатки методик. Приведено описание программы Монте-Карло (МК), разработанной автором для расчета транспорта в электрическом поле электронов высоких энергий. На основе программы вычислены кинетические коэффициенты, входящие в диффузионно-дрейфовое уравнение.

**В третьей главе** излагается упрощенная физическая модель прохождения космического излучения через атмосферу Земли на основе представлений о ядерно-каскадном процессе. С помощью одномерной программы МК, разработанной для численного моделирования транспорта космического излучения в атмосфере, вычислена зависимость источника первичных УЭ, генерируемых фоновым космическим излучением, от высоты над уровнем моря для различных значений пороговой энергии убегания электронов. Рассчитанная зависимость приведена на рис. 1 для четырех значений перенапряжения электрического поля  $\delta = eE/(F_{\min} P)$  относительно минимума  $F_B^{\min} = 218 \cdot P$  (кэВ/м·атм.) силы трения электронов вследствие их взаимодействия с атомами воздуха при давлении  $P$ , описываемой формулой Бете [2]. Также вычислена линейная концентрация затравочных убегающих электронов, порождаемых широким атмосферным ливнем космических частиц, инициируемым первичной космической частицей с энергией  $10^{16}$  эВ.



**Рисунок 1.** Зависимость от высоты над уровнем моря источника затравочных УЭ, генерируемых фоновым космическим излучением.

**В четвертой главе** анализируется гипотеза Гуревича и др. [3], согласно которой в основе инициирования разряда молнии лежит преионизация атмосферы космическим излучением, усиленная лавинами релятивистских УЭ. Процесс развивается следующим образом: вторичное космическое излучение в грозовом поле иницирует лавины, которые в свою очередь генерируют большое число электрон-ионных пар. В результате в атмосфере возникает проводящая область, поляризация которой в грозовом поле приводит к росту напряженности поля до пробойного значения. Рассмотрены два возможных источника ЛРУЭ: широкий атмосферный ливень космических частиц (ШАЛ) [3] и стационарное фоновое космическое излучение (ФКИ) [4]. С целью расчета данного процесса разработана двумерная численная модель, описывающая кинетику УЭ, электронов низких энергий, положительных и отрицательных ионов в самосогласованном электрическом поле. Пороговое перенапряжение, выше которого развиваются лавины релятивистских УЭ  $\delta_{th} \approx 1,3$ .

В рамках данной модели пространственно-временная эволюция УЭ в электрическом поле с напряженностью  $\vec{E}$  описывается диффузионно-дрейфовым уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{re}}{\partial t} + \text{div}[(n_{re} \vec{v}_{re} - D_{re}^T (\vec{\nabla} n_{re} - \vec{v}_{re} (\vec{\nabla}_{re}, \vec{\nabla} n_{re}) / v_{re}^2) - \\ - D_{re}^L \vec{v}_{re} (\vec{\nabla}_{re}, \vec{\nabla} n_{re}) / v_{re}^2)] = v_{re} \cdot n_{re} + S_{re}^{ext}, \end{aligned} \quad (1)$$

где приняты следующие обозначения:  $n_{re}$  – концентрация УЭ;  $\vec{v}_{re} = -u_{re}(\delta) \cdot \vec{E} / |\vec{E}|$  – вектор направленной скорости УЭ,  $u_{re}$  – модуль направленной скорости,  $D_{re}^L$  и  $D_{re}^T$  – коэффициенты продольной и поперечной относительно вектора напряженности поля диффузии УЭ;  $v_{re}$  – частота, с которой меняется число УЭ;  $S_{re}^{ext}$  – внешний источник УЭ, обусловленный космическим излучением.

Кинетика электронов низких энергий (e), положительных (p) и отрицательных (n) ионов описывается следующей системой уравнений:

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

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

Система уравнений (1), (2) замыкается уравнением Пуассона для потенциала электрического поля:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -\vec{\nabla} \varphi_{int} + \vec{E}_{ext}, \\ \Delta \varphi_{int} &= -\frac{q_e}{\varepsilon_0} (n_p - n_n - n_e - n_{re}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\vec{E}_{\text{ext}}$  – вектор напряженности внешнего (грозового) электрического поля,  $\Phi_{\text{int}}$  – потенциал поля пространственного заряда, возникающего за счет движения заряженных частиц.

**Результаты моделирования. ШАЛ.** В случае ШАЛ в качестве источника ЛРУЭ внешнее грозовое поле полагалось стационарным, поскольку, время развития разряда меньше характерного времени, с которым меняется грозовое поле. Использованы два профиля грозового поля вдоль высоты: поле, создаваемое двумя плоскими параллельными слоями зарядов разного знака (линейный профиль), и параболический профиль, принятый в работе [3]:

$$\vec{E}_{\text{ext}}(\vec{r}) = -E_{\text{ext}}^{\text{L,P}}(z) \cdot \vec{e}_z, \quad \vec{e}_z - \text{единичный вектор вдоль оси OZ}$$

$$E_{\text{ext}}^{\text{L}}(z) = \begin{cases} E_m \cdot \frac{(z_b - z)}{\Delta z_c}, & z_b < z < z_b + \Delta z_c \\ -E_m, & z_b + \Delta z_c < z < z_t - \Delta z_c \\ E_m \cdot \frac{(z - z_t)}{\Delta z_c}, & z_t - \Delta z_c < z < z_t \end{cases} - \text{профиль (L),} \quad (4)$$

$$E_{\text{ext}}^{\text{P}}(z) = E_m \cdot \left( \frac{(2z - (z_b + z_t))^2}{(z_t - z_b)^2} - 1 \right) - \text{профиль (P),}$$

где  $z_b$  – нижняя граница области, занятой полем,  $E_m = \delta_{\text{ext}} \cdot F_B^{\text{min}}(0, 5 \cdot (z_b + z_t))$  – максимальное значение напряженности грозового поля,  $\delta_{\text{ext}}$  – перенапряжение внешнего поля в центре расчетной области. Верхняя граница области с полем  $z_t$  определялась параметром  $\zeta_{\text{ext}}$ , который представляет собой число длин усиления ЛРУЭ в грозовом поле.

Были выполнены расчеты для трех значений перенапряжения внешнего поля  $\delta_{\text{ext}} = 2, 3, 4$ . Варьировались энергия первичной космической частицы  $\epsilon_{\text{crs}}$  и величина  $\zeta_{\text{ext}}$ . Результаты приведены в таблице 1. Видно, что достигается не более чем двукратное усиление грозового электрического поля, даже для наибольших значений  $\delta_{\text{ext}}$ ,  $\epsilon_{\text{crs}}$  и  $\zeta_{\text{ext}}$ . В случае  $\zeta_{\text{ext}} = 11$ ,  $\epsilon_{\text{crs}} = 10^{20}$  эВ для  $\delta_{\text{ext}} = 3-4$  получены значения  $\delta_{\text{max}} \approx 5-8$ , достаточные для старта молнии в присутствии осадков  $\delta_{\text{br,pr}} \approx 4,5-6,5$  [5]. Однако поток частиц с энергией, большей  $10^{20}$  эВ на границе атмосферы, равен  $3 \cdot 10^{-16}$   $1/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  [6], что эквивалентно примерно одной частице на  $100 \text{ км}^2$  за год. Очевидно, что эта величина гораздо меньше частоты разрядов молнии. В случае  $\epsilon_{\text{crs}} = 10^{16}$  эВ для усиления поля до пробойной величины необходимо  $\zeta_{\text{ext}} = 22$ , что превосходит ограничение на число длин усиления ЛРУЭ в грозовой атмосфере, установленное Двайером [7].

**Таблица 1.**

Результаты расчета усиления поля в канале, инициированном совместным действием ШАЛ и ЛРУЭ.

$\delta_{\text{ext}}$	$\zeta_{\text{ext}}$	$\epsilon_{\text{crs}}$ эВ	$\delta_{\text{max}}$
2 (L)	11	$10^{20}$	3,4
3 (L)	11	$10^{20}$	5,6
4 (L)	11	$10^{20}$	7,5
4 (L)	11	$10^{18}$	5,5
2 (P)	11	$10^{20}$	3,9
3 (P)	11	$10^{20}$	5,3
4 (P)	11	$10^{20}$	6,8
2 (L)	22	$10^{16}$	3,9
3 (L)	22	$10^{16}$	5,9
4 (L)	22	$10^{16}$	7,8

Как итог, можно сделать вывод, что в реалистичных условиях для инициирования разряда молнии совместным действием ШАЛ и ЛРУЭ требуется либо сильное и протяженное электрическое поле, которое, скорее всего, не может достаточно долго существовать в грозовых облаках, либо нереально большая энергия космической частицы, инициирующей ШАЛ.

Результаты моделирования. ФКИ. Помимо ШАЛ единственным источником первичных УЭ на высотах грозовых облаков является фоновое космическое излучение. В этом случае внешнее электрическое поле моделировалось верхним положительным  $Q_p$  и равным ему по абсолютной величине нижним отрицательным  $Q_n$  зарядами, пространственная плотность которых распределена по закону Гаусса в цилиндрической системе координат:

$$\rho_p(z, \rho, t) = \frac{Q_p(t)}{\pi \cdot \sqrt{\pi} \cdot l_{z,p} \cdot l_{r,p}^2} \cdot \exp(-(z - z_p)^2 / l_{z,p}^2) \cdot \exp(-\rho^2 / l_{r,p}^2),$$

$$\rho_n(z, \rho, t) = \frac{Q_n(t)}{\pi \cdot \sqrt{\pi} \cdot l_{z,n} \cdot l_{r,n}^2} \cdot \exp(-(z - z_n)^2 / l_{z,n}^2) \cdot \exp(-\rho^2 / l_{r,n}^2),$$
(5)

здесь  $z_p$  и  $z_n$  – координаты центров “тяжести” зарядов  $l_{z,p}, l_{r,p}, l_{z,n}, l_{r,n}$  – ширины распределений.

Полагалось, что облако заряжается по линейному закону со скоростью нарастания заряд  $k_{ch}$ :

$$Q_p(t) = -Q_n(t) = k_{ch} \cdot t. \quad (6)$$

Расчеты были выполнены для следующей конфигурации грозового поля:  $l_{z,p} = l_{z,n} = 300$  м,  $l_{r,p} = l_{r,n} = 600$  м,  $z_n = 5$  км,  $z_p = 7$  км. Скорость зарядки облака  $k_{ch}$  варьировалась. Результаты приведены в таблице 2, где  $\delta_{max}$  и  $\zeta_{max}$  – максимальное перенапряжение поля и максимальное число длин усиления ЛРУЭ, достигаемые в процессе развития разряда,  $Q_{cl}^f$  – заряд облака в момент достижения полем максимального значения.

**Таблица 2.**

Результаты расчета усиления поля в канале, инициированном совместным действием ФКИ и ЛРУЭ.

$k_{ch}$ , Кл/с	$\delta_{max}$	$\zeta_{max}$	$Q_{cl}^f$ , Кл
13	13,2	22,2	16,2
4,3	13,2	19,8	15,8
2,2	12,8	18,2	15,8
1,6	10,7	17,4	15,7
1,3	9,4	16,8	15,6
0,65	5,8	14,2	15,7
0,32	2,8	10,1	16,6

Из этих данных видно, что значения перенапряжения, очень близкие к пробойной величине  $\delta_{br} \approx 13,5$ , достигаются для  $k_{ch}$  в диапазоне от 1,3 Кл/с до 13 Кл/с. При  $k_{ch} = 0,65$  Кл/с максимальное значение перенапряжения равно 5,8, что вполне достаточно для старта лидера молнии в атмосфере с осадками.



**В пятой главе** выполнен анализ различных высокоэнергетических явлений в грозовой атмосфере.

Моделирование усиления потоков гамма-излучения. Развитие в грозовом электрическом поле ЛРУЭ приводит к генерации тормозного излучения, которое может быть зарегистрировано. В частности, в работе [8] усиление потока гамма-излучения наблюдалось на побережье Японского моря. С целью проверки гипотезы, что источником излучения является тормозное излучение ЛРУЭ, методом МК по программе ЭЛИЗА [9] было выполнено численное моделирование транспорта фотонов в предположении точечного источника излучения. В результате для различных значений высоты источника над уровнем моря  $z_\gamma^{\text{emis}}$  вычислены доли фотонов относительно числа эмитированных фотонов  $\Delta_{\gamma,\text{det}}$ , нормированный на единицу флюенс фотонов  $\Phi_\gamma$  и число фотонов в источнике необходимое для воспроизведения наблюдавшегося в [8] потока гамма-квантов  $N_\gamma^{\text{emis}}$ .

**Таблица 3.**

Доля  $\Delta_{\gamma,\text{det}}$  и, нормированный на единицу максимальный флюенс  $\Phi_\gamma^{\text{max}}$  фотонов, достигших поверхности земли, число фотонов в источнике  $N_\gamma^{\text{emis}}$ .

$z_\gamma^{\text{emis}}$ , км	$\Delta_{\gamma,\text{det}}$	$\Phi_\gamma^{\text{max}}$ , м <sup>-2</sup>	$N_\gamma^{\text{emis}}$
0,5	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{12}$
1	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{13}$
2	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{15}$
4	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{17}$
6	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{18}$
8	$7,5 \cdot 10^{-9}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{19}$
10	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{20}$

Расчётный энергетический спектр наилучшим образом описывает спектр, измененный на уровне моря [8], в случае источника излучения локализованного на высотах 0,5-2 км. Этот результат вполне ожидаемый, так как зимние грозы над Японским морем отличаются низким расположением нижнего края облака и зарядов в нем [10]. По результатам расчетов можно утверждать, что ЛРУЭ способны развиваться внутри низких тропосферных грозовых облаков и могут быть источником, зарегистрированных вспышек гамма-излучения.

Моделирование вспышек нейтронов. Поскольку спектр гамма-излучения, зарегистрированного в работе [8], превышает порог фотоядерных реакций на азоте  $\epsilon_{\gamma,\text{th}} = 10,55$  МэВ [11], процесс прохождения гамма-излучения через атмосферу должен сопровождаться генерацией нейтронов. С целью проверки идеи [12], согласно которой за усиление потока нейтронов в эксперименте [13], отвечают фотоядерные реакции с участием фотонов тормозного излучения ЛРУЭ, развивающихся в грозовой атмосфере, автором разработана программа численного моделирования методом МК транспорта нейтронов в воздухе в следующей постановке. Задавался точечный источник гамма-излучения с угловой апертурой  $\alpha$  на высоте  $z_\gamma^{\text{emis}}$ , в качестве спектра излучения был использован спектр тормозного излучения ЛРУЭ [14]. В результате вычислены доля

нейтронов  $\Delta_{n,\text{det}} = N_n^{\text{det}} / N_n^{\text{emis}}$ , достигших высоты расположения детектора  $z_{\text{det}} = 3$  км в работе [13], и нормированный на единицу флюенса нейтронов  $\Phi_n(\rho, z_\gamma^{\text{emis}}, z_{\text{det}}, \alpha)$ . На основании этих данных вычислено число фотонов в источнике  $N_\gamma^{\text{emis}}$ , необходимое для воспроизведения, измеренного в [13] потока нейтронов  $F_n^{\text{exp}} \approx 670$  н/м<sup>2</sup>. Результаты приведены в таблице 4.

**Таблица 4.**

Максимальное значение рассчитанного нормированного флюенса  $\Phi_n^{\text{max}}$ , доля нейтронов  $\Delta_{n,\text{det}}$ , достигших высоты  $z_{\text{det}} = 3$  км, число гамма-квантов в источнике  $N_\gamma^{\text{emis}}$ .

$z_\gamma^{\text{emis}}$ , км	$\alpha = 20^\circ$			$\alpha = 60^\circ$		
	$\Phi_n^{\text{max}}$ , м <sup>-2</sup>	$\Delta_{n,\text{det}}$	$N_\gamma^{\text{emis}}$	$\Phi_n^{\text{max}}$ , м <sup>-2</sup>	$\Delta_{n,\text{det}}$	$N_\gamma^{\text{emis}}$
15	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{17}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{18}$
12	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{16}$	$7,3 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{17}$
10	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{16}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{16}$
8	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{15}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{15}$
6	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{14}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{14}$
5	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{13}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{14}$
4	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$5,4 \cdot 10^{12}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{13}$

Видно, что величина  $N_\gamma^{\text{emis}}$  меняется в пределах от  $5 \cdot 10^{12}$  до  $10^{18}$  при изменении  $z_\gamma^{\text{emis}}$  от 4 до 15 км. Двайер и Смит оценивают число УЭ в источнике земных гамма-вспышек, расположенном на высоте 15 км, величиной  $10^{17}$  [15], что согласуется с рассчитанной здесь величиной  $N_\gamma^{\text{emis}}$  для высоты 12 км. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс, ответственный за генерацию гамма-вспышек, может также быть источником усиления потока нейтронов, наблюдавшегося в работе [13].

*Численное моделирование узких биполярных электромагнитных импульсов.* Развитие ЛРУЭ в грозовом поле сопровождается рождением большого числа электронов низких энергий, ток которых может генерировать ЭМИ. Развивая идею Гуревича и др. [16], согласно которой источником регистрируемых узких биполярных импульсов НВР является пробой на убегающих электронах, было выполнено численное моделирование внутриоблачного разряда, генерирующего НВР. Расчеты выполнены для  $\zeta_{\text{ext}} = 11, 15$  и 20 и двух значений перенапряжения грозового поля  $\delta_{\text{ext}} = 2$  и 3. Рассчитанные параметры ЭМИ в "точке наблюдения" на поверхности Земли ( $z_{\text{ob}} = 0$  км,  $\rho_{\text{ob}} = 100$  км) приведены в таблице 5.

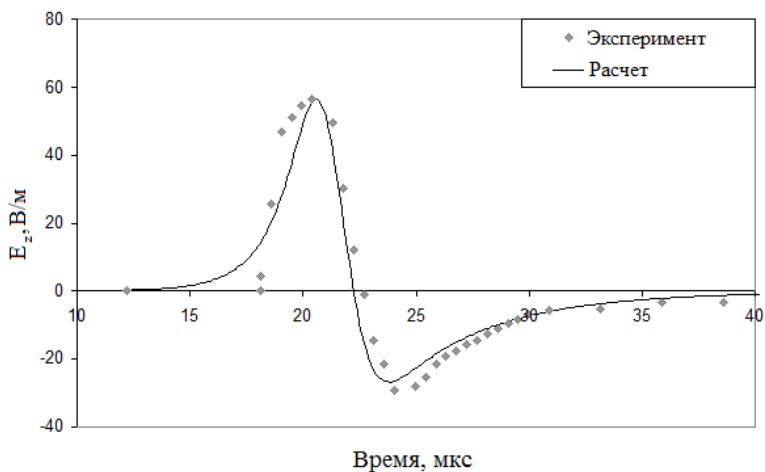
Рассчитанные характеристики ЭМИ для  $z_t = 16$  км неплохо согласуются с данными наблюдений. Значения  $N_{\text{re}}^{\text{emis}}$  подбирались таким образом, чтобы рассчитанные значения  $E_z^{\text{max}}$  в "точке наблюдения" были близки к измеренному значению 20 В/м [17]. Полная длительности  $\Delta t_{0,1}^{\text{max}} + \Delta t_{0,1}^{\text{min}}$  и длительность первого полуцикла ЭМИ  $\Delta t_{0,1}^{\text{max}}$ , вычисленные для  $\delta_{\text{ext}} = 2$ , равны примерно 18 и 5 мкс соответственно, что близко

к измеренным значениям [17, 18]. Отношение модуля максимума напряженности поля  $E_z^{\max}$  к минимуму  $|E_z^{\min}|$ , равное примерно 2,3 для  $z_t = 16$  км, в два с половиной раза меньше среднего экспериментального значения 5,7 [17], но близко к 2,7 в работе [18]. На рис. 2 NBP, зарегистрированный 30 мая 1999 на станции Florida TA на расстоянии 32 км от источника [19], сравнивается с рассчитанным ЭМИ для  $\delta_{\text{ext}} = 2$ ,  $\zeta_{\text{ext}} = 11$ ,  $z_t = 16$  км и  $\rho_{\text{ob}} = 32$  км. Видно хорошее согласие форм кривых.

**Таблица 5.**

Параметры NBP.  $z_{\text{ob}} = 0$  км,  $\rho_{\text{ob}} = 100$  км.

$\delta_{\text{ext}}$	$z_t$ , км	$\zeta_{\text{ext}}$	$N_{\text{re}}^{\text{emis}}$	$E_z^{\max}$ , В/м	$ E_z^{\min} $ , В/м	$\Delta t_{0,1}^{\max}$ , мкс	$\Delta t_{0,1}^{\min}$ , мкс
2	8	11	$5 \cdot 10^{11}$	21,1	19,1	1,8	1,9
2	8	15	$7,5 \cdot 10^9$	20,1	17,9	1,8	2,0
2	8	20	$5 \cdot 10^7$	15,0	13,1	1,8	2,0
3	8	11	$5 \cdot 10^{11}$	45,0	30,0	1,1	1,6
3	8	15	$7,5 \cdot 10^9$	54,8	35,2	1,1	1,6
3	8	20	$5 \cdot 10^7$	43,5	29,0	1,1	1,6
2	16	11	$5 \cdot 10^{11}$	12,2	5,4	5,0	12,7
2	16	15	$7,5 \cdot 10^9$	7,7	3,1	4,8	13,8
2	16	20	$5 \cdot 10^7$	9,7	3,9	4,6	13,6
3	16	11	$5 \cdot 10^{11}$	21,3	7,1	3,0	10,2
3	16	15	$7,5 \cdot 10^9$	23,3	8,0	3,0	10,2
3	16	20	$5 \cdot 10^7$	20,2	6,9	3,1	10,4



**Рисунок 2.** Сравнение расчетного и зарегистрированного в [19] NBP.

Расчет люминесценции гало спрайтов. Грозовая активность приводит различного рода оптическим явлениям над грозовыми облаками [20]. Одним из таких явлений является гало – кратковременные диффузные свечения на высотах 70-85 км, достигающие в поперечном сечении 40-70 км, которые иногда предшествуют спрайтам, развивающимся как гигантская стримерная корона. Спрайты и гало возникают вслед за разрядами положительной молнии на землю [20]. Адачи и др. [21] установили, что длительность молний, генерирующих только гало без стримерной короны  $\sim 1$  мс. С такими молниями связаны относительно небольшие вариации дипольного момента грозового облака  $Q \cdot h_Q \sim 400$  Кл·км. Характерная длительность разрядов молнии, инициирующих гало и корону, того же порядка, но они приводят к большим изменениям дипольного момента  $Q \cdot h_Q \sim 1300$  Кл·км. Разряды молний, инициирующих стримеры без видимого гало, приводят к вариациям  $Q \cdot h_Q \sim 1300$  Кл·км и развиваются они в течение характерных времен  $\sim 10$  мс. На основании разработанной автором модели было выполнено моделирование разряда и его свечения в нижней ионосфере вслед за ударом положительной молнии на Землю. Грозовое поле моделировалось двумя параллельными однородно заряженными дисками с радиусом  $R_{cl}$ . Нижний диск, несущий в начальный момент времени положительный заряд  $Q_{cl}^0$ , располагался на высоте  $z_p = 5$  км, верхний диск с равным по абсолютной величине отрицательным зарядом  $Q_{cl}^0$  был расположен на высоте  $z_n = 8$  км. В процессе моделирования заряд верхнего диска оставался постоянным, а нижнего уменьшался по линейному закону с характерным временем  $t_{disch} = 1$  мс. Величина заряда  $Q_{cl}^0$  варьировалась в диапазоне от 80 до 200 Кл, чему соответствует изменение дипольного момента облака от 400 Кл·км до 1000 Кл·км. Результаты расчетов свечения разряда приведены в таблице 6, в которой  $t_{a-s}$  и  $z_{a-s}$  – момент времени и высота лавинно-стримерного перехода,  $J_{av,max}$  – максимальная величина яркости свечения,  $z_{J,max}$  – высота, на которой достигается  $J_{av,max}$ .

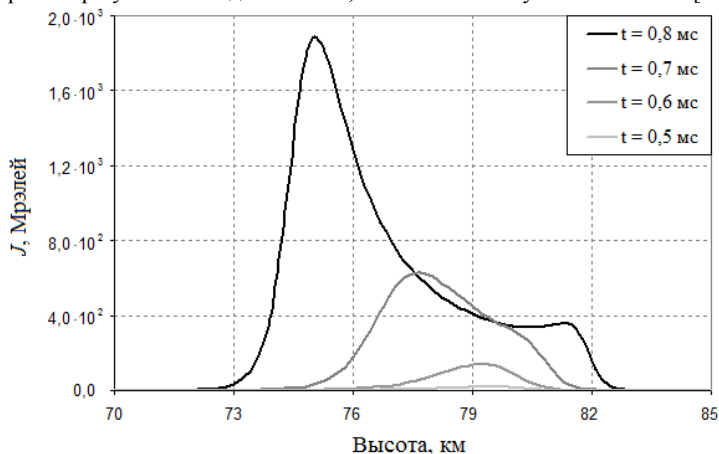
**Таблица 6.**

Результаты расчетов светимости гало спрайтов.

$Q_{cl}^0$ , Кл	$t_{a-s}$ , мкс	$z_{a-s}$ , км	$J_{av,max}$ , Мрэлей	$z_{J,max}$ , км
50	-	-	$10^{-3}$	79
80	-	-	0,10	77
100	1,0	73	0,22	77
120	0,8	74	0,38	77
200	0,4	76	0,56	78

При расчете яркости свечения использована модель расчета оптического излучения, разработанная в работе [22]. Временная эволюция распределения яркости свечения вдоль оси симметрии разряда по высоте иллюстрируется на рис. 3 для случая  $Q_{cl}^0 = 120$  Кл. Свечение в верхней части разряда начинается у границы ионосферы и распространяется вниз, при этом мгновенная амплитуда яркости свечения быстро возрастает. Яркость свечения меняется в диапазоне от 0,22 до 0,56 Мрэлей при изменении  $Q_{cl}^0$  в пределах от 100 Кл до 200 Кл, что согласуется с наблюдавшейся величиной максимальной яркости спрайтов 0,6 Мрэлей [23]. Для  $Q_{cl}^0 = 80$  Кл яркость свечения равна 0,11 Мрэлей, причем в процессе

развития разряда стримеры не инициируются в соответствии с данными [21], согласно которым при изменении дипольного момента  $Q \cdot h_0 \approx 400$  Кл·км стримерная корона не наблюдается. В случае  $t_{\text{disch}} = 10$  мс и  $Q_{\text{cl}}^0 = 200$  Кл лавинно-стримерный переход происходит на высоте  $z_{\text{a-s}} = 65$  км в момент времени  $t_{\text{a-s}} = 8,4$  мс; при этом  $J_{\text{av,max}} = 2$  килоэрлей, т.е. стримерная корона образуется без видимого гало, что также согласуется с анализом [22].



**Рисунок 3.** Эволюция яркости свечения гало на оси разряда.  $Q_{\text{cl}}^0 = 120$  Кл.

**В заключении** приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту, указаны мероприятия, где результаты диссертации были апробированы.

### Список цитированной литературы.

1. Gurevich A.V., Milikh G.M., and Roussel-Dupre R.A. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // Phys. Lett. A. Vol. 165. P. 463-468. 1992.
2. Бете Г.А., Ашкин Ю. Прохождение излучения через вещество // В книге: Экспериментальная ядерная физика / Ред. Э. Серге. М.: Изд-во иностранной литературы. С. 141-298. 1955.
3. Gurevich A.V., Milikh G.M., and Valdivia J.A. Model of X- ray emission and fast preconditioning during thunderstorm. // Phys. Lett. A. V. 231. P. 402-408. 1997.
4. Dwyer J.R. The initiation of lightning by runaway air breakdown. // Geophys. Res. Lett. Vol. 32. L20808. doi: 10.1029/2005GL023975.
5. Solomon R., Schroeder V., Baker M.B. Lightning initiation - Conventional and runaway-breakdown hypothesis // Q.J.R. Meteorol. Soc. Vol. 127. P. 2683-2704. 2001.
6. Berezinskii V. S., et al. Astrophysics of Cosmic Rays. Elsevier. New York. 1990.
7. Dwyer J.R. A fundamental limit on electric fields in air. // Geophys. Res. Lett. Vol. 30. № 20. 2055. doi:10.1029/2003GL017781. 2003.
8. Tsuchiya H., Enoto T., Yamada S., Yuasa T., Kawaharada M., Kitaguchi T., Kokubun M., Kato H., Okano M., Nakamura S., Makishima K. Detection of High-

- Energy Gamma Rays from Winter Thunderclouds. // *Phys. Rev. Lett.* Vol. 99. 165002. week ending 19 October 2007.
9. Бабич Л.П., Донской Е.Н., Илькаев Р.И., Куцык И.М., Рюссель-Дюпре Р.А. Фундаментальные характеристики лавины релятивистских убегающих электронов в воздухе. // *Физика плазмы.* Т. 30. С. 666-674. 2004.
  10. Krehbiel P.R. The electrical structure of thunderstorm, in: *The Earth's Electrical Environment.* National Academy Press. Washington. 1986.
  11. Dietrich S.S., Berman B.L. Atlas of photonutron cross sections obtained with monoenergetic photons. *Atomic data and nuclear tables* 38. P.199-338. 1988.
  12. Бабич Л.П. Генерация нейтронов в гигантских восходящих атмосферных разрядах. // *Письма в ЖЭТФ.* Т. 84. С. 345-348. 2006.
  13. Shah G.N., Razdan H., Bhat C.L. Ali Q.M. Neutrons generation in lightning bolts. // *Letters to Nature.* Vol. 313. P.773-775. 1985.
  14. Бабич Л.П., Куцык И.М., Донской Е.Н., Рюссель-Дюпре Р.А. Тормозное излучение лавин релятивистских убегающих электронов в атмосфере. // *Геомагнетизм и аэронавигация.* Т. 44. № 5. С.1-7. 2004.
  15. Dwyer J.R., and Smith D.M. A comparison between Monte Carlo simulations of runaway breakdown and terrestrial gamma-ray flash observations. // *Geophys. Res. Lett.* Vol. 32. L22804. doi:10.1029/2005GL023848. 2005.
  16. Gurevich A.V., Zybin K. P. High energy cosmic ray particles and the most powerful discharges in thunderstorm atmosphere. // *Phys. Lett. A.* Vol. 329. P. 341-347. 2004.
  17. Nag A., Rakov V.A., Tsalikis D., and Cramer J.A. On phenomenology of compact intracloud lightning discharges. // *J. Geophys. Res.* Vol. 115. D14115. doi:10.1029/2009JD012957. 2010.
  18. Smith D. A., Shao X.M., Holden D.N., Rhodes C.T., Brook M., Krehbiel P.R., Stanley M., Rison W., and Thomas R.J. A distinct class of isolated intracloud discharges and their associated radio emissions. // *J. Geophys. Res.* Vol. 104. P. 4189-4212. 1999.
  19. Smith D. A., Eack K. B., Harlin J., Heavner M. J., Jacobson A. R., Massey R. S., Shao X. M., and Wiens K. C. The Los Alamos Sferic Array: A research tool for lightning investigations. // *J. Geophys. Res.* Vol. 107. NO. D13. P.4183. 10.1029/2001JD000502. 2002.
  20. Pasko V.P. Recent advances in theory of transient luminous events. // *J. Geophys. Res.* Vol. 115. A00E35. doi:10.1029/2009JA014860. 2010.
  21. Adachi T., et al. Electric fields and electron energies in sprites and temporal evolutions of lightning charge moment measurements. // *J. Phys. D Appl. Phys.* Vol.41 (23). 234010. 2008.
  22. Babich L.P., Haldoupis C., Kudryavtsev A.Yu., Kutsyk I.M. The effect of charge density in tropospheric thunderclouds on production of sprites and terrestrial gamma ray flashes. // *J. Geophys. Res.* Vol.116. A09313. doi:10.1029/2011JA016726. 2011.
  23. Sentman D.D., Wescott E.M., Osborne D.L., Hampton D.L. and Heavner M.J. Preliminary results from the Sprites 94 campaign: 1.Red Sprites. // *Geophys. Res. Lett.* Vol.22. P.1205-1208. 1995.

## Статьи, опубликованные автором по теме диссертации.

1. Бабич Л.П., Бочков Е.И., Куцык И.М. Источник убегающих электронов в поле грозового облака, обусловленный космическим излучением // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 47. № 5. с. 709-713. 2007.
2. Бабич Л.П., Бочков Е.И., Куцык И.М. Численное моделирование проводящего канала, инициированного широким атмосферным ливнем в грозовом электрическом поле // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 49. № 2. с. 247-253. 2009.
3. Babich L.P., Bochkov E.I., Kutsyk I.M., Roussel-Dupre R.A. Localization of the source of terrestrial neutron bursts detected in thunderstorm atmosphere // Journal of Geophysical Research. Vol. 115. A00E28. doi:10.1029/2009JA014750. 2010.
4. Babich L.P., Bochkov E.I., Donskoi E.N., Kutsyk I.M. Source of prolonged bursts of high-energy gamma rays detected in thunderstorm atmosphere in Japan at the coastal area of the Sea of Japan and on high mountaintop // Journal of Geophysical Research. Vol. 115. A09317. doi:10.1029/2009JA015017. 2010.
5. Бабич Л.П., Бочков Е.И. Детерминистические методики численного моделирования лавин убегающих электронов высоких энергий. // ЖЭТФ. 2011. Т. 139. № 2. с. 568-578. 2011.
6. 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. Т. 139. № 5. с. 1028-1038. 2011.
7. Babich L.P., Bochkov E.I., Dwyer J., 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. // Journal of Geophysical Research. doi: 10.1029/2012JA017799. 2012.
8. Бочков Е.И., Бабич Л.П., Куцык И.М. Численное моделирование узких биполярных импульсов, генерируемых грозовыми разрядами. // ЖЭТФ. Т. 94. № 7. 2013.

БОЧКОВ Евгений Иванович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ  
ПРОЦЕССОВ В ГРОЗОВОЙ АТМОСФЕРЕ**

Автореферат

Подписано к печати 21.10.2013 г. Формат 60×84/16  
Бумага офсетная. Печать электрографическая. Усл. печ. л. ~1,6  
Тираж 100 экз. Заказ 1398-2013

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе ФГУП «РФЯЦ-  
ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, 23