



Импульсные оптическое и рентгеновское излучения фракталов: обзор гипотез. Часть 1. Микропробой на убегающих электронах

П. П. Мальцев
ИСВЧПЭ РАН, Москва, Россия

В статье приведены результаты изучения пробоя фракталов из наноразмерных капель алюминия на полимерных нитях из углеродных бензольных колец при резкой подаче напряжения (разряда) величиной $1,6 \text{ кВ см}^{-1}$, которая аналогична по величине электрическому полю $2,16 \text{ кВ см}^{-1}$, необходимой для возникновения микропробоя на убегающих электронах при высотных грозовых разрядах. Для обычного пробоя на воздухе требуется напряжение $10\text{--}30 \text{ кВ}$ на сантиметр. Приведены фотографии форм излучений в оптической области спектра для двух типов пробоя и обсуждена возможность обращения эффекта Доплера и излучения Черенкова-Вавилова на метаматериалах из фракталов.

Ключевые слова: фракталы из наноразмерных капель алюминия, полимерные нити из волокна ароматического полиамида, плазма, надповерхностное высокопроводящее состояние

Статья получена: 11.06.2024
Статья принята: 11.07.2024

ПРОБОЙ НА УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНАХ

Пробой на убегающих электронах был впервые теоретически предсказан в работе А. В. Гуревича, Г. М. Милиха и Р. А. Рассела-Дюпре (1992 год) [1].

Pulsed Optical and X-ray Radiation of Fractals: Review of Hypotheses. Part I. Micro Runaway Breakdown

P. P. Maltsev

Institute of Microwave Frequencies of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The article presents the study results of the breakdown of fractals of the nano-sized aluminum droplets on the polymer filaments made of carbon benzene rings under a sudden voltage (discharge) of 1.6 kV cm^{-1} that is similar in magnitude to the electric field of 2.16 kV cm^{-1} required for the occurrence of micro-breakdown with the runaway electrons during the high-altitude lightning discharges. For the ordinary air breakdown, a voltage of $1\text{--}30 \text{ kV}$ per centimeter is required. The photographs of radiation shapes in the optical spectral region for two types of breakdowns are provided. The possible reverse of the Doppler effect and Cherenko radiation on the fractal metamaterials is discussed.

Keywords: fractals from the nano-sized aluminum droplets, polymer filaments made of aromatic polyamide fiber, plasma, off-surface highly conductive condition

Article received: 11.06.2024

Article accepted: 11.07.2024

RUNAWAY BREAKDOWN

The runaway breakdown was first theoretically predicted in the work of A. V. Gurevich, G. M. Milikha and R. A. Russell-Dupré (1992) [1]. This hypothesis is based on the peculiar interaction of the high-energy particles with the matter.

The runaway breakdown (RB) is related to the generation of secondary electrons occurred due to the ionization of neutral molecules by the high-energy runaway particles [2]. Although the bulk of secondary electrons



В основе этой гипотезы лежит особенность взаимодействия быстрых частиц с веществом.

Пробой на убегающих электронах (ПУЭ) связан с генерацией вторичных электронов, появляющихся вследствие ионизации быстрыми убегающими частицами нейтральных молекул [2]. Хотя основная масса вторичных электронов имеет малые энергии, могут родиться и электроны с достаточно большой энергией $\varepsilon_0 > \varepsilon_c$ (ε_c - критическая энергия убегания). Такие электроны тоже станут убегающими, т. е. будут ускоряться полем и в свою очередь могут при ионизации генерировать частицы с $\varepsilon_0 > \varepsilon_c$. В результате появляется экспоненциально нарастающая лавина убегающих электронов.

Вместе с ними генерируется и большое количество медленных электронов, что в конечном счете и приводит к электрическому пробою вещества. Важно, что пробой на убегающих электронах происходит в относительно слабом поле $E > E_c$, которое на порядок меньше порогового поля обычного пробоя E_{th} . Например, в воздухе при атмосферном давлении $E_{th} \approx 23$ кВ/см, а $E_c \approx 2,16$ кВ/см [2, 3].

Однако для осуществления пробоя на убегающих электронах выполнения только одного условия $E > E_c$ недостаточно. Необходимо наличие затравочных быстрых электронов с энергией, превосходящей критическую энергию убегания $\varepsilon_0 > \varepsilon_c > (0,1\text{--}1 \text{ МэВ})$. Еще более важно, что пространственный размер постоянного электрического поля в веществе L должен существенно превосходить характерную длину экспоненциального нарастания лавины убегающих электронов l_a : $L > l_a$. Последняя величина в газовых средах оказывается весьма значительной, что в основном и затрудняет реальное осуществление в лабораторных условиях рассматриваемого эффекта. Например, в воздухе при атмосферном давлении $l_a \approx 50$ м.

Вместе с тем в грозовой атмосфере ситуация существенно иная. Характерные размеры облаков L здесь всегда много больше l_a . Быстрые затравочные электроны также всегда есть - они эффективно генерируются космическими лучами (плотность потока вторичных электронов космических лучей с энергией $E > 1$ МэВ порядка 10^3 частиц $(\text{м}^2\text{с})^{-1}$). Поэтому осуществление пробоя на убегающих электронах в грозовых облаках оказывается вполне возможным при достижении электрическим полем значения E_c . И такие поля, как показывают измерения, действительно наблюдаются. Именно пробой на убегающих электронах, по-видимому, играет определяющую роль в обнаруженных таких явлениях, как гигантские высотные разряды между грозовыми облаками и ионосферой («Спрайт»), сопро-

have low energies, the electrons with a sufficiently high energy $\varepsilon_0 > \varepsilon_c$ can also be produced. Such electrons will also become runaway, i. e. they will be accelerated by the field and, in turn, will be able to generate particles with $\varepsilon_0 > \varepsilon_c$ during ionization. As a result, an exponentially growing avalanche of runaway electrons appears.

A large number of low-energy electrons are generated together with them that ultimately leads to the electrical breakdown of the matter. It is important that the runaway breakdown occurs in a relatively weak field $E > E_c$ that is by an order of magnitude lower than the threshold field of ordinary breakdown E_{th} . For example, in air at the atmospheric pressure, E_{th} is equal to 23 kV/cm, and E_c is equal to 2.16 kV/cm [2, 3].

However, to achieve the runaway breakdown, it is not enough to fulfill only one condition $E > E_c$. It is necessary to have the seed high-energy electrons with an energy exceeding the critical runaway energy $\varepsilon_0 > \varepsilon_c > (0.1\text{--}1 \text{ MeV})$. It is even more important that the spatial size of the constant electric field in matter L should significantly exceed the specific length of the exponential growth of a runaway electron avalanche l_a : $L > l_a$. Last value in the gaseous media turns out to be very significant that is mainly makes it difficult to actually implement the effect under consideration in the laboratory conditions. For example, in air at the atmospheric pressure l_a is equal to 50 m.

However, in a thunderous atmosphere the situation is significantly different. In such a situation, the typical dimensions of clouds L are always much larger than l_a . The high-energy seed electrons are also always available, since they are effectively generated by the cosmic rays (the flux density of secondary cosmic ray electrons with the energy $E > 1$ MeV of the order of 10^3 particles $(\text{m}^2\text{s})^{-1}$). Therefore, the runaway breakdown in the thunderclouds turns out to be quite possible when the electric field reaches the value of E_c . As the measurements show, such fields are indeed observed. The runaway breakdown apparently plays a decisive role in the discovered phenomena, such as the giant high-altitude discharges between the thunderclouds and ionosphere ("Sprite"), accompanied by the powerful bursts of γ -radiation and X-ray radiation.

Certain attention should be paid to the special aspect of the physical essence of these processes. The atmosphere is a very dense medium, therefore, the free path length of both neutral molecules and thermal electrons and ions is only thousandths of a millimeter, and the lifetime of free electrons is tens of nanoseconds. Despite this fact, in a relatively weak electric field, the giant macroscopic (kilometer-long and even many-kilometer-long) processes occur, being determined by the purely kinetic effects.



вождаемые мощными всплесками γ -излучения и вспышки рентгеновского излучения.

Следует обратить внимание на особую сторону физического существа этих процессов. Атмосфера является весьма плотной средой, поэтому длины свободного пробега как нейтральных молекул, так и тепловых электронов и ионов составляют в ней лишь тысячные доли миллиметра, время жизни свободных электронов – десятки наносекунд. Несмотря на это, в относительно слабом электрическом поле возникают гигантские макроскопические (километровые и даже многокилометровые) процессы, определяемые чисто кинетическими эффектами.

МОДЕЛЬ ВЫСОТНОГО РАЗРЯДА ПУЭ [2]

Необходимость для возникновения ПУЭ именно постоянного электрического поля, создающего значительную асимметрию функции распределения в области $E_0 > E_c$, также существенно выделяет пробой на убегающих электронах среди других механизмов электрического пробоя вещества.

Предполагалось, что и электрическое поле E и поток затравочных быстрых электронов однородны в пространстве. Вместе с тем затравочные высокоэнергичные электроны могут быть редкими. При этом последнее условие не выполняется. Поэтому рассмотрим, как развивается пробой на убегающих электронах, генерируемый одним затравочным быстрым электроном. Пусть s – направление движения быстрого электрона, совпадающее с направлением электрического поля E . Пробой на убегающих электронах развивается тогда не только в направлении s , но и в ортогональной плоскости r .

Таким образом, по достижении электрическим полем E в грозовом облаке значения E_c процесс ПУЭ может развиваться. При этом, поскольку вторичные электроны космических лучей имеют энергию до 30 МэВ и вследствие рассеяния на ядрах движутся во всех направлениях, в зависимости от знака электрического поля пробой может развиваться в любом направлении – как вниз к Земле, так и вверх к ионосфере. Основную роль здесь играет возможность появления необходимого электрического поля, зависящая от соотношения между процессами генерации и релаксации поля E .

Естественно различать два механизма генерации электрического поля. Первый – обычное плавное нарастание поля внутри и на границах облаков за счет действия атмосферных ветров, силы тяжести и захвата заряженных частиц каплями воды, частичками льда, аэрозо-

MODEL OF THE RB HIGH-ALTITUDE DISCHARGE [2]

The need for the RB occurrence of a constant electric field that develops a significant asymmetry of the distribution function in the region $E_0 > E_c$, also significantly distinguishes the runaway breakdown from other mechanisms of electrical matter breakdown.

It was assumed that both the electric field E and the flow of high-energy seed electrons are homogeneous in space. Moreover, the high-energy seed electrons can be rare. However, the last condition is not met. Therefore, let us consider how the runaway breakdown generated by one high-energy seed electron is developed. Let s be the motion direction of the high-energy electron, coinciding with the direction of the electric field E . The runaway breakdown then develops not only in the direction s , but also in the orthogonal plane r .

Thus, when the electric field E in the thundercloud reaches the value E_c , the RB process can develop. Moreover, since the secondary electrons of cosmic rays have an energy of up to 30 MeV and, due to the nuclear scattering, move in all directions, the breakdown can develop in any direction depending on the sign of the electric field, both down to the Earth and up to the ionosphere. The main role in this case is played by the possible occurrence of the required electric field that depends on the relations between the field E generation and relaxation processes.

It is normal to distinguish between two mechanisms for an electric field generation. The first one is the usual smooth field increase inside and at the boundaries of clouds due to the impact of atmospheric winds, gravity and capture of the charged particles by the water droplets, ice particles, and aerosols. The typical time of this process is about 1–10 min. The second mechanism is a sharp change in charge in the cloud due to a powerful electrical discharge to the Earth. The typical time of this process is milliseconds.

While comparing the typical times of these processes with the relaxation time, it is established that only in the second case is it possible for the field E to significantly exceed E_c . Moreover, in the region of high altitudes ($z \geq 20$ –50 km), due to the rapid field relaxation, the RB conditions can only be met for a fairly short period of time $\Delta t < 10$ s.

An example of such a high-altitude discharge from the thundercloud into the ionosphere is shown in Fig. 1. The discharge duration is 10–200 ms. The height range is 25–100 km, the horizontal length is 10–50 km. The peak glow intensity occurs at the altitudes of 50–60 km. The total volume of the emitting region is usually more than 1000 km³, and the radiation brightness is 10–100 kilo-Rayleigh (Rayleigh is a non-system

лями. Характерное время этого процесса порядка 1–10 мин. Второй механизм – резкое изменение заряда в облаке вследствие мощного электрического разряда на Землю. Характерное время этого процесса – миллисекунды.

Сравнивая характерные времена этих процессов с временем релаксации, установлено, что только в случае второго возможно значительное превышение поля E над E_c . При этом в области больших высот ($z \geq 20$ – 50 км) вследствие быстрой релаксации поля условия ПУЭ могут выполняться только в течение достаточно короткого времени $\Delta t < 10$ с.

Пример такого высотного разряда из грозового облака в ионосферу представлен на рис. 1. Длительность разряда согласно составляет 10–200 мс. Область высот 25–100 км, горизонтальная протяженность 10–50 км. Пик интенсивности свечения приходится на высоты 50–60 км. Общий объем излучающей области обычно более 1000 км³, а яркость излучения 10–100 килорэлей (Рэлей – внешняя единица измерения, используемая в зарубежной литературе, 1 рэлей = 10⁶ фотонов (см²с)⁻¹.) На среднем фоне выделяется миллисекундный всплеск излучения исключительно высо-

unit of measurement used in the foreign literature, 1 Rayleigh = 10⁶ photons (cm²s)⁻¹). A millisecond radiation burst with the exceptionally high brightness stands out against the average background (about (1–5)10³ kilo-Rayleigh). The frequency of positive discharges is 0.3 s.

An important feature of the critical RB field is that it is decreased exponentially quickly at a height. Moreover, the air conductivity σ at the altitudes above 20–30 km is very high, so that the constant electric field at the altitudes of 20–50 km disappears in 10 s or even less due to polarization. Therefore, in a quasi-stationary state, the field is almost absent ($E \approx 0$).

However, after a strong positive discharge to the Earth (the positive lightning transfers a charge of up to 100 C or more), the balance is disrupted and the field E may appear for a short period of time in a large spatial region significantly exceeding the critical one (Fig. 2). The electric field is directed towards the Earth, i.e. it accelerates the electrons towards the ionosphere. The flux of seed secondary electrons from the cosmic rays over a large discharge area ($S \geq 100$ km²) is rather high, and even in a time of about 1 ms their total number can be 10⁶–10⁷.

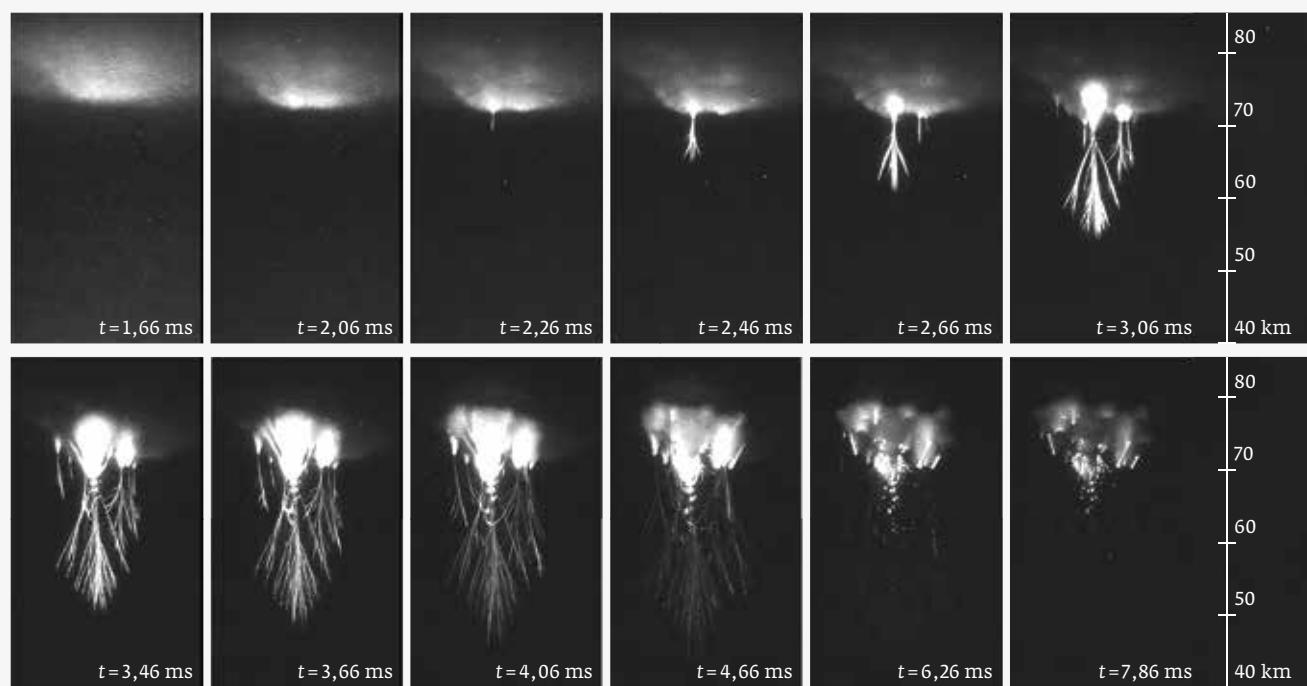


Рис. 1. Высотный разряд «Спрайт» (проект «Ломоносов», НИИЯФ МГУ им. М. В. Ломоносов; источник: <http://lomonosov.sinp.msu.ru>)

Fig. 1. Sprite high-altitude discharge (Lomonosov project, Lomonosov Moscow State University Research Institute; source: <http://lomonosov.sinp.msu.ru>)

кой яркости – $(1-5) \cdot 10^3$ килорэлей. Частота положительных разрядов – 0,3 с.

Важная особенность критического поля ПУЭ состоит в том, что оно экспоненциально быстро убывает с высотой. Вместе с тем проводимость воздуха σ на высоте выше 20–30 км весьма велика, так что постоянное электрическое поле на высотах 20–50 км благодаря поляризации исчезает за времена порядка 10 с или даже меньше. Поэтому в квазистационарном состоянии поле здесь практически отсутствует ($E \approx 0$).

Однако после сильного положительного разряда на Землю (а положительные молнии переносят заряд до 100 Кл и более) баланс нарушается, и в большой пространственной области может возникнуть на короткое время поле E , значительно превышающее критическое (рис. 2). Электрическое поле при этом направлено к Земле, т. е. оно ускоряет электроны в сторону ионосферы. Поток затравочных вторичных электронов космических лучей на большой площади разряда ($S \geq 100 \text{ km}^2$) весьма велик, и даже за время порядка 1 мс их полное число может составить 10^6 – 10^7 .

Простейшая модель такой системы представлена на рис. 2. В облаке диаметром 10 км расположены слой положительного заряда в 100 Кл на высоте 18 км, а соответствующий слой отрицательного заряда – на высоте 5 км. Электрическое поле вне облака экранировано поляризационно наведенным отрицательным зарядом, расположенным на высоте 25 км, и положительным зарядом на нижней границе ионосферы на высоте 70 км. Благодаря экранировке поле на высоте $z > 25$ км практически отсутствует: $E = E_m + E_p \approx 0$.

В результате положительного разряда Q внутри облака поле E_m исчезает, и в области между верхней границей облака и ионосферой остается значительное электрическое поле E_p . Его распределение по z на оси системы через 10 мкс после разряда приведено на рис. 3. Видно, что в большой области высот (от 20 км и вплоть до нижней ионосферы) поле E превосходит минимальное поле пробоя на убегающих электронах. Для возникновения поляризационного поля, компенсирующего E в области высот $z \leq 50$ км, требуется время порядка нескольких секунд. В этот период и появляется возможность для возникновения гигантского высотного разряда, вызванного пробоем на убегающих электронах.

Число характерных ионизационных длин, обуславливающих экспоненциальны и рост ПУЭ, равно L/l_a . При старте ПУЭ на высоте 20 км значение этого параметра достаточно велико:

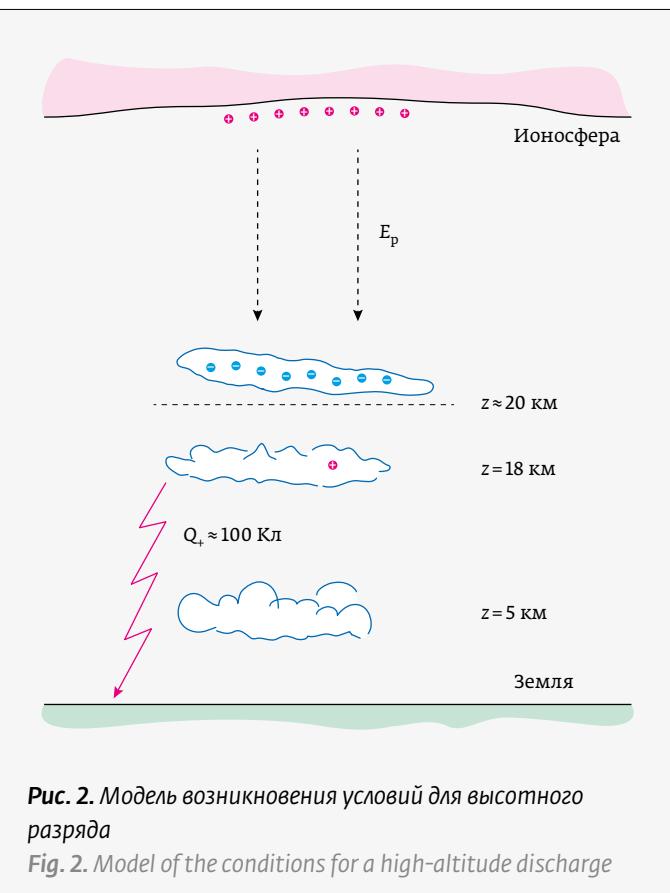


Рис. 2. Модель возникновения условий для высотного разряда

Fig. 2. Model of the conditions for a high-altitude discharge

The simplest model of such a system is shown in Fig.2. In a cloud with a diameter of 10 km there is a layer of 100 C positive charge C at an altitude of 18 km, and a relevant layer of negative charge is located at an altitude of 5 km. The electric field outside the cloud is screened by a polarization-induced negative charge located at an altitude of 25 km, and a positive charge at the lower ionosphere boundary at an altitude

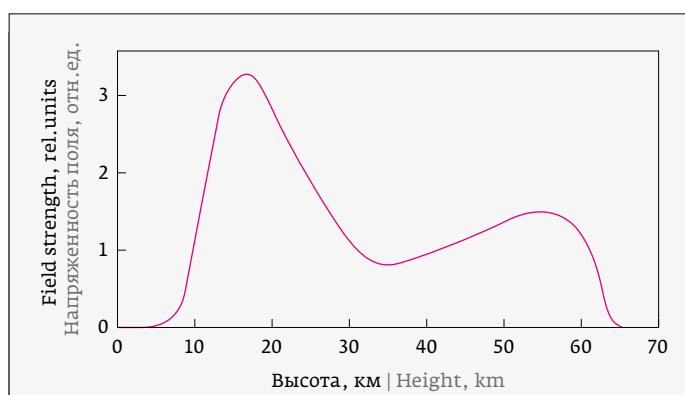


Рис. 3. Зависимость поля E/E_c от высоты z

Fig. 3. Dependence of the field E/E_c on the height z



**РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2024**

10 ЛЕТ

6
дней

3000+
участников

850+
компаний

13
секций

25+
круглых
столов

850+
докладов

150+
экспозиций

1200 м²
выставочных
площадей

10 лет
вместе!

**Российский форум «Микроэлектроника 2024» –
синергия уникальных событий**

- Предконференции
- Школа молодых ученых
- Научная конференция
- Выставка
- «ЭКБ и микроэлектронные
- модули»
- Культурная программа
- Микроэлектроника детям
- Деловая программа



MICROELECTRONICA.PRO



ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ И БУДЬТЕ В КУРСЕ
ВСЕХ ПОСЛЕДНИХ НОВОСТЕЙ!



При
поддержке:



Организаторы:



Генеральный
партнеры:



Инновационный
партнер:



Технологический
партнер:



Партнер Научной
Конференции:



Спортивный
партнер:



Партнеры:



Даркин
воды:



Партнер
программы:



Генеральный
информационный
партнер:



Оператор
форума:



+7 495 641 57 17

microelectronica.pro

info@microelectronica.pro

$L/l_a \geq 20-40$. Вследствие экспоненциального роста лавины и большого числа затравочных электронов общее количество высокоэнергичных электронов, создавших разряд к высотам порядка 50 км, может достигать очень больших значений $10^{16}-10^{20}$. При этом за счет диффузационного расширения пучка ширина области разряда ПУЭ на высоте 40–60 км достигает 30 км.

МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЭ [2]

При движении энергичных электронов в воздухе эффективность вызываемого ими оптического излучения в различных световых диапазонах известна. В условиях $\varepsilon_e \approx 0,1-10$ МэВ она практически не зависит от энергии быстрых электронов. Это позволяет достаточно точно определить излучение разряда на убегающих электронах на различных высотах [2].

При этом до высоты 50 км доминирует голубое излучение («Синие джеты»), при больших высотах – красное («Красные эльфы») [2, 4]. Именно такая картина и наблюдается в высотных разрядах «Спрайт» (рис. 1 и рис. 4). На ионосферных высотах разряд размыт вследствие диффузного рассеяния пучка.

Отметим одну важную особенность [2]. Электрическое поле E существенно превосходит минимальное поле E_c вблизи грозового облака (на высотах $z \approx 15-25$ км) и вдали от него (на высотах $z \approx 35-50$ км). Вначале доминирует уменьшение поля E , определяемое увеличением расстояния от заряда, а затем превалирует экспоненциальное падение плотности атмосферы, сильно понижающее величину E_c .

Таким образом, выделяются как бы две области – ближняя и дальняя, где эффективно может развиваться пробой на убегающих электронах. В промежуточной области ($z \approx 35-50$ км) он развивается только при особенно больших значениях освобождающегося заряда Q . Отмеченная особенность качественно

tude of 70 km. Due to the shielding, the field at an altitude of $z > 25$ km is almost absent: $E = E_t + E_p \approx 0$.

As a result of a positive discharge Q inside the cloud, the field E_t disappears, and a significant electric field E_p remains in the region between the upper boundary of the cloud and the ionosphere. Its distribution along z on the system axis 10 μ s after the discharge is shown in Fig. 3. It can be seen that in a large height region (from 20 km and down to the lower ionosphere), the field E exceeds the minimum runaway breakdown field. For the occurrence of a polarization field that compensates E in the altitude region $z \leq 50$ km, about several seconds are required. During this period of time, it is possible to obtain occurrence of a giant high-altitude discharge caused by the runaway breakdown.

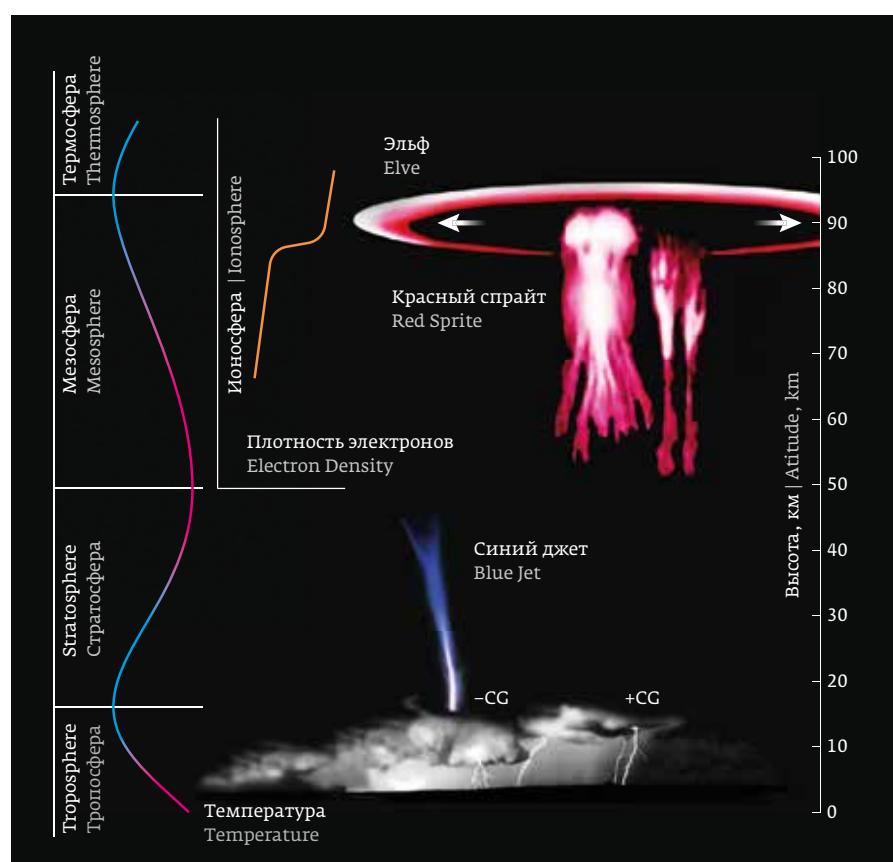


Рис. 4. Атмосферные явления, наблюдавшиеся в верхних слоях атмосферы – высотные разряды «Спрайт»: «Красные эльфы» (Red Sprite) и «Синие джеты» (Blue Jet) (источник: Neubert T. et al. Recent results from studies of electric discharges in the mesosphere surveys. Surveys in Geophysics. 2008; 29: 71–137. Doi: 10.1007/s10712-008-9043-1)

Fig. 4. Atmospheric phenomena observed in the upper atmosphere – the Sprite high-altitude discharges: Red Sprite and Blue Jet (source: Neubert T. et al. Recent results from studies of electric discharges in the mesosphere surveys. Surveys in Geophysics. 2008; 29: 71–137. Doi: 10.1007/s10712-008-9043-1)

присутствует всегда, она мало зависит от выбранной модели.

Излучение, обусловленное пучком высокозэнергичных электронов, может создавать миллисекундные импульсы гигантской интенсивности – несколько мегарэлей (рис. 5). Гораздо более длительная часть излучения (несколько десятков миллисекунд) генерируется более медленными электронами и имеет интенсивность десятки килорэлей. Результаты расчетов находятся в соответствии с данными наблюдений [2].

Следует отметить, что предложенная в работе [2] модель объяснения оптического излучения разряда «Спрайт», основанная только на ПУЭ, не единственная. Возможны и другие механизмы: пробой в поле излучения, создаваемого сверхмощным межоблачным разрядом, пробой в квазистатическом поле или их комбинация с ПУЭ. Отмечается также влияние метеоров на генерацию «Спрайта».

Однако важным дополнительным аргументом в пользу прямой связи высотных разрядов с ПУЭ являются наблюдавшиеся интенсивные импульсы рентгеновского и гамма излучений [2].

Форму оптического излучения высотного разряда можно пояснить по аналогии с волнами Гюйгенса, из каждой точки вдоль траектории движения быстрой частицы (космических лучей) исходит сферический фронт световой волны, распространяющийся по среде со скоростью света в этой среде, причем каждая следующая сферическая волна испускается из следующей точки на пути движения частицы,

Внешний вид оптического излучения высотных разрядов «Спрайта» («Красных эльфов») имеет вид конуса (рис. 1), однако имеется особенность – конус излучения направлен с преимущественным направлением к источнику высокоэнергетических затрачивающих частиц (космических лучей), т. е. обратный вектор к направлению распространения частиц, а не вдоль потока частиц по направлению к Земле.

АНОМАЛЬНЫЕ ВСПЫШКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЭ [2]

Вспышки рентгеновского излучения [5] согласно теории связаны с множественными микропробо-ями на убегающих электронах (МПУЭ), происходящими в обширных областях площадью порядка нескольких квадратных километров [2]. А именно, поскольку грозовые облака имеют плоскослоистую структуру, то среднее электрическое поле в них близко по направлению к вертикали z и каждый вторичный электрон космических лучей генерирует в грозовом облаке лавину убегающих электро-

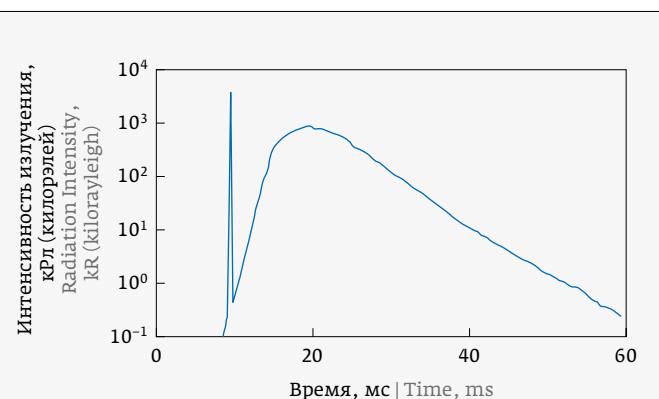


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения от времени

Fig. 5. Dependence of radiation intensity on time

The number of typical ionization lengths that determine the exponential RB growth, is equal to L/l_a . When the RB is commenced at an altitude of 20 km, the value of this parameter is quite high: $L/l_a \geq 20-40$. Due to the exponential growth of the avalanche and the large number of seed electrons, the total number of high-energy electrons developed the discharge at the height of about 50 km can reach very large values of $10^{16}-10^{20}$. Moreover, due to the diffusion expansion of the beam, the width of the RB discharge region at a height of 40–60 km reaches 30 km.

MODEL OF THE RB OPTICAL RADIATION [2]

When the energetic electrons move through the air, the efficiency of optical radiation caused by them in various light ranges is known. Under the conditions of $\varepsilon_e \approx 0.1-10$ MeV, it is almost independent of the energy of high-velocity electrons. This makes it possible to quite accurately determine the runaway discharge radiation at various heights [2].

Moreover, the blue radiation (Blue Jet) dominates at an altitude of up to 50 km, and red radiation (Red Sprite) dominates at the higher altitudes [2, 4]. This phenomenon is observed in the Sprite high-altitude discharges (Fig. 4 and Fig. 1). At the ionospheric altitudes, the discharge is blurred due to the diffuse scattering of the beam.

Let us note one important feature [2]. The electric field E significantly exceeds the minimum field E_c near the thundercloud (at the altitudes $z \approx 15-25$ km) and far from it (at the altitudes $z \approx 35-50$ km). At first, a decrease in the field E , determined by an increase in the distance from the charge, prevails, and then an exponential drop in the atmospheric density dominates, while greatly reducing the value of E_c .



нов. Число быстрых электронов при этом сильно возрастает. Этот процесс, названный «МПУЭ», и служит причиной наблюдаемой вспышки рентгеновского излучения.

Результаты расчетов интенсивности и спектра рентгеновского излучения при МПУЭ стабилен [2]. Он имеет всегда ярко выраженный максимум в районе 50–60 кэВ и быстро спадает как в область малых энергий (за счет фотоионизации), так и в область больших энергий 100–150 кэВ (за счет комптоновских потерь). Что же касается пространственного распределения интенсивности рентгеновского излучения, то она достигает максимума в окрестности максимума электрического поля – сдвиг максимума рентгеновского излучения порядка 100–200 м в направлении движения электронов.

Весьма важно, что вдали от максимума интенсивность рентгеновского излучения сильно спадает, и уже на расстоянии порядка 1–1,5 км от максимума электрического поля – оно почти не отличимо от фона.

Из результатов расчета аномальных вспышек рентгеновского излучения, обусловленных МПУЭ, следует два важных для наблюдения вывода:

1. спектр имеет стандартный вид с характерным максимумом в области 50–60 кэВ;
2. интенсивное излучение можно наблюдать лишь в пределах 1–1,5 км по высоте от максимума электрического поля.

Поскольку согласно многочисленным данным измерений значения $|E| \approx E_c$ достигаются в грозовых облаках лишь на высотах $z \geq 4$ км, то это означает, что рентгеновское излучение от МПУЭ реально можно наблюдать лишь при $z \geq 2,5$ –3 км.

Оба вывода подтверждаются данными наблюдений [2]. Следует отметить также, что согласно расчетам заметное увеличение числа быстрых электронов и генерируемого ими рентгеновского излучения происходит уже в предпробойных условиях при приближении поля E к E_c (точнее при $E > 0,95E_c$).

Напряжение критического поля E_c экспоненциально убывает с высотой: $z = 6,3$ км поле $E_c = 100$ кВ/м; $z = 11$ км поле $E_c = 50$ кВ/м.

Проводимость атмосферы σ определяется ионизацией воздуха космическими лучами. При наличии облачности и осадков вблизи поверхности Земли (до 2 км высоты) существенный вклад вносит излучение радиоактивных элементов. В ясную погоду концентрация ионов порядка 10^3 см⁻³, что соответствует времени релаксации электрического поля $\tau_r = (4\pi\sigma)^{-1} \approx 400$ с. Проводимость быстро увели-

Thus, there are somewhat two region (near and far) where the runaway breakdown can be effectively developed. In the intermediate region ($z \approx 30$ –35 km) it develops only at especially large values of the released charge Q . The given feature is always qualitatively available; it slightly depends on the selected model.

The radiation caused by a beam of high-energy electrons can create the millisecond pulses with gigantic intensity, such as several mega-Rayleigh (Fig. 5). The much longer portion of the radiation (several tens of milliseconds) is generated by the slower electrons and has an intensity of tens of kilo-Rayleigh. The calculation results are in accordance with the observational data [2].

It should be noted that the model proposed in [2] for explaining the optical radiation of the Sprite discharge and based only on the RB, is not the only one. Other mechanisms are also possible: breakdown in the radiation field generated by a super-powerful intercloud discharge, breakdown in a quasi-static field, or their combination with the RB. The influence of meteors on the Sprite generation is also noted.

However, an important additional argument in favor of the direct connection of high-altitude discharges with the RB is the observed intense pulses of X-ray and gamma radiation [2].

The type of optical radiation from the high-altitude discharge can be explained on the analogy with the Huygens waves: a spherical front of the light wave emanates from each point along the motion path of a high-energy particle (cosmic rays) while propagating through the medium at the speed of light, and each subsequent spherical wave is emitted from the next point along the motion path of the particle.

The optical radiation from the Sprite high-altitude discharges (Red Sprite) has the shape of a cone (Fig. 1). However, there is a peculiarity, since the cone of radiation is predominantly directed towards the source of high-energy seed particles (cosmic rays), i.e. it is a reciprocal vector to the direction of particle propagation, rather than along the flow of particles towards the Earth.

ANOMALOUS X-RAY BURSTS OF THE RB [2]

According to the theory, the X-ray bursts [5] are associated with the multiple micro runaway breakdowns (MRB), occurring in the vast areas of about several square kilometers [2]. Namely, since the thunderclouds have a plane-layered structure, the average electric field in them is close in direction to the vertical z and each secondary electron of cosmic rays generates an avalanche of runaway electrons in the thundercloud. In this case, the number of high-velocity electrons is increased greatly. This process, called MRB, is responsible for the observed X-ray burst.



чивается с высотой благодаря уменьшению числа соударений v_m из-за понижения концентрации молекул N_m . В облаках, напротив, проводимость может понизиться из-за прилипания зарядов к капелькам воды и аэрозолям.

При возникновении МПУЭ число энергичных электронов и, соответственно, число актов ионизации в слое толщиной порядка 100–500 м в окрестности максимума грозового поля сильно нарастает. Соответственно резко увеличивается и интенсивность рентгеновского излучения. Используя экспериментальные данные об увеличении интенсивности рентгеновского излучения в 10^2 – 10^3 раз, можно оценить число экспонент в реальных условиях в ускоряющем слое $z \approx (5\text{--}6)l_a$ и, таким образом, определить количество быстрых электронов, генерируемых одной начальной частицей.

Однако, согласно теории ПУЭ [2], функция распределения быстрых электронов эффективно растет с уменьшением энергии электронов не только при $\varepsilon > \varepsilon_c$, но и в области малых энергий $\varepsilon < \varepsilon_c$. Все эти электроны вносят существенный вклад в ионизацию атмосферы – как высокозэнергичные ($\varepsilon > \varepsilon_c \approx 100$ кэВ), так и достаточно низкозэнергичные (вплоть до максимума сечения ионизации $\varepsilon \approx 0,1$ – 1 кэВ). Благодаря этому, интенсивность генерации свободных электронов Q_e в слое толщиной порядка l_a у границы области ПУЭ значительно возрастает:

Следует отметить, что все вновь рожденные электроны, имеющие вначале энергию несколько элекtronвольт, за очень короткое время $\sim 10^{-8}$ с ее теряют из-за неупругих взаимодействий с молекулами воздуха. Кроме того, вследствие тройных соударений электроны быстро прилипают к молекулам O_2 и H_2O , образуя отрицательные ионы. Характерное время жизни свободного электрона на высотах грозовых облаков всего лишь порядка 70–100 нс. Таким образом, электроны достаточно быстро исчезают, но зато в возмущенном слое атмосферы нарастает плотность положительных Ni^+ и отрицательных Ni^- ионов. Именно ионы и определяют повышение проводимости в области МПУЭ (хотя и электроны, несмотря на их очень малое время жизни, могут внести свой вклад в рост проводимости).

В условиях МПУЭ в грозовом облаке за время в несколько десятков секунд концентрация ионов увеличивается на полтора–два порядка. Возникает слой аномально высокой проводимости, что, естественно, должно сильно сказаться на электродинамических процессах в грозовом облаке.

Явление аномального роста проводимости при $E > E_c$ было предсказано в [1] в виде гипотезы –

The calculation results of intensity and spectrum of X-ray radiation during the MRB are stable [2]. It always has a significant maximum value in the region of 50–60 keV and quickly decreases both to the region of low energies (due to the photoionization) and to the region of high energies of 100–150 keV (due to the Compton losses). As for the spatial distribution of the X-ray radiation intensity, it reaches a maximum value in the vicinity of the electric field maximum – the shift of the X-ray radiation maximum is about 100–200 m in the direction of electron motion.

It is very important that far from the maximum, the X-ray radiation intensity is decreased greatly. Already at a distance of about 1–1.5 km from the maximum of the electric field, it is almost indistinguishable from the background.

Two conclusions significant for observation follow from the calculation results of anomalous X-ray bursts caused by the MRB:

1. the spectrum has a standard form with a typical maximum in the region of 50–60 keV;
2. an intense radiation can be observed only within 1–1.5 km at a height from the electric field maximum.

Since, according to the numerous measurement data, the values $|E| \approx E_c$ are achieved in the thunderclouds only at the heights $z \geq 4$ km. It means that the X-ray radiation from the MRB can actually be observed only at $z \geq 2.5$ – 3 km.

Both conclusions are confirmed by the observational data [2]. It should also be noted that, according to the calculations, a noticeable increase in the number of high-velocity electrons and the X-ray radiation generated by them occurs already in the pre-breakdown conditions as the field E approaches E_c (more precisely, at $E > 0.95 E_c$).

The critical field voltage E_c is decreased exponentially with the height: $z = 6.3$ km – field $E_c = 100$ kV/m; $z = 11$ km – field $E_c = 50$ kV/m.

The atmospheric conductivity σ is determined by the air ionization by cosmic rays. In the presence of clouds and precipitation near the Earth's surface (at an altitude of up to 2 km), a significant contribution is made by the radiation of radioactive elements. In the case of clear weather, the ion concentration is about 10^3 cm $^{-3}$ that corresponds to the relaxation time of the electric field $\tau_g = (4\pi\sigma)^{-1} \approx 400$ s. The conductivity is increased rapidly at the height due to a decrease in the number of collisions v_m as a result of decreased molecule concentration N_m . On the contrary, conductivity in the clouds may decrease due to the adhesion of charges to the water droplets and aerosols.

When the MRB occurs, the number of high-energy electrons and, accordingly, the number of ionization



оно названо в этой работе «быстрым переносом заряда».

Согласно расчетам [2] количество быстрых электронов изменяется во много раз при изменении отношения E/E_c всего на 10%, то в реальных условиях грозового облака столь же сильно может измениться концентрация ионов, а, следовательно, и аномально высокая проводимость в слое, возникающая при $E \approx E_c$. Таким образом, приведенные оценки говорят лишь о «средней аномальной проводимости». Реальная же проводимость может иметь сильные флуктуации, в том числе пространственные флуктуации внутри слоя, отличающиеся от «средней» в несколько раз.

Отметим, что приведенную оценку роста проводимости следует рассматривать лишь как предварительную. В ней не учитывалось, например, ни поглощение свободных ионов каплями воды, частицами льда, аэрозолями в грозовом облаке, ни обратные процессы. Не исследовалась роль соударений быстрых электронов с теми же частицами и вся цепь изменений в происходящих в облаках сложных физико-химических процессах. Возможно, однако, что все эти процессы более медленные, чем МПУЭ.

МИКРОПРОБОИ НА УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНАХ И ФРАКТАЛЫ [2]

Данные показывают, что в течение 100–500 мс до появления первого импульса молниевого разряда имеет место активность в широкой зоне облаков масштаба километра или нескольких километров.

Этот процесс можно представить как медленно дрейфующие множественные мелкие разрядные токи. Каждый всплеск излучения был локализован внутри области разрешения интерферометра (50 м), но центры областей излучения постоянно смешались. Активность всплесков нарастала вплоть до сильного всплеска излучения. В этот период интенсивность излучения вначале продолжала быстро нарастать, а затем, за время меньше 1 мс, резко падала. Одновременно происходило резкое уменьшение электрического поля, связанное, по-видимому, с первым ударом молнии. Такого типа процессы с характерным временем развития порядка 0,1–1 с предшествуют основному разряду, который содержит обычно несколько ударов молний как внутри облаков, так и на Землю.

Разряд молнии, связанный с созданием высокопроводящего канала и собиранием электрического заряда грозового облака с площади 1–100 км² за время 1–10 с, представляет собой очень сложный

events in a layer with a thickness of about 100–500 m in the vicinity of the thunderstorm field maximum is increased greatly. Accordingly, the X-ray radiation intensity rises sharply. While using the experimental data on an increase in the X-ray radiation intensity by 10^2 – 10^3 times, it is possible to estimate the number of exponentials in real conditions in the accelerating layer $z \approx (5\text{--}6)l_a$ and, thus, determine the number of high-velocity electrons generated by one initial particle.

However, according to the RB theory [2], the distribution function of high-velocity electrons effectively increases with the decreasing electron energy not only at $\varepsilon > \varepsilon_c$, but also in the region of low energies $\varepsilon < \varepsilon_c$. All these electrons make a significant contribution to the atmospheric ionization, both high-energy ($\varepsilon > \varepsilon_c \approx 100$ keV) and fairly low-energy (up to the maximum ionization cross section $\varepsilon \approx 0.1$ –1 keV). Due to this fact, the generation intensity of free electrons Q_e in a layer with a thickness of about l_a at the boundary of the RB region is increased significantly.

It should be noted that all newly born electrons that initially have an energy of several electron volts, lose it in a very short period of time ($\sim 10^{-8}$ s) due to the inelastic interactions with air molecules. In addition, due to the triple collisions, the electrons quickly stick to the O₂ and H₂O molecules while forming the negative ions. The typical lifetime of a free electron at the heights of thunderclouds is only about 70–100 ns. Thus, the electrons disappear rather quickly. However, in the forced atmospheric layer the density of positive Ni⁺ and negative Ni⁻ ions increases. It is the ions that determine the increased conductivity in the MRB region (although the electrons, despite their very short lifetime, can contribute to the increase in conductivity).

Under the MRB conditions in a thundercloud, over a period of several tens of seconds, the ion concentration is increased by one and a half to two orders of magnitude. A layer of anomalously high conductivity occurs that, naturally, should greatly affect the electrodynamic processes in the thundercloud.

The phenomenon of an anomalous increased conductivity at $E > E_c$ was predicted in [1] in the form of a hypothesis. It is called the “fast charge transfer” in this work.

According to the calculations [2], the number of high-velocity electrons is changed by many times when the E/E_c ratio changes by only 10%. Then in the real conditions of the thundercloud, the ion concentration can change just as strongly, and, consequently, the anomalously high conductivity in the layer that arises at $E \approx E_c$. Thus, the above estimates



процесс, изучавшийся в многочисленных публикациях. Отметим лишь некоторые моменты, связанные с ролью пробоя на убегающих электронах.

Это, во-первых, указанное выше аномальное увеличение проводимости, вызванное МПУЭ. Рост проводимости должен естественно способствовать процессу быстрого переноса электрического заряда, распределенного в облаке. Указанное повышение проводимости хотя и велико, но «в среднем» для созиания электрического заряда, видимо, недостаточно. Во-вторых, оно может, однако, значительно увеличиться за счет сильно неоднородной случайной структуры проводящей зоны, отмечавшейся выше. Последняя может способствовать образованию эффективных проводящих каналов.

Возможно, что именно такой, обусловленный МПУЭ, «фрактальный» характер поведения проводимости в облачном слое перед первым разрядом молнии частично отражают радиоинтерферометрические наблюдения [2]. Отметим, что возможность возникновения фрактальной структуры проводимости в облаке, обусловленной мелкими разрядами обычного типа.

ВСПЛЕСКИ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЭ [2]

Подтверждением важной роли ПУЭ в высотных разрядах можно рассматривать наблюдавшиеся на спутнике «Комптон» интенсивные всплески гамма излучения [2]. Установлено, что γ -всплески [4] приходят с Земли из районов наиболее интенсивного грозообразования [2]. Длительность гамма всплесков составляет несколько миллисекунд, энергетический спектр соответствует спектру, возникающему при ПУЭ.

Можно отметить, что в сравнении с наблюдениями рентгеновского излучения в грозовом облаке спектр гамма излучения сдвинут в сторону больших энергий (максимум в районе 300–500 кэВ) [2].

Это говорит о большой длине ускорения электронов и значительных потерях γ -излучения в атмосфере, что прямо соответствует теории. Интенсивность излучения весьма велика (порядка 100 фотонов $(\text{см}^2\text{c})^{-1}$). Результаты модельных расчетов ПУЭ находятся в достаточном соответствии с данными наблюдений γ -всплесков [2].

Следует подчеркнуть, что однозначная связь высотных разрядов с мощными импульсами гамма излучения является в настоящий момент лишь гипотезой, хотя и весьма правдоподобной. Данные о прямых и одновременных наблюдениях оптического и гамма излучений высотных разрядов пока отсутствуют.

determine only the “average anomalous conductivity”. The real conductivity can have strong fluctuations, including any spatial fluctuations inside the layer, differing from the “average” ones by several times.

It should be noted that the above estimate of the increased conductivity should be considered only as the preliminary stage. For example, it did not consider the absorption of free ions by the water droplets, ice particles, aerosols in the thundercloud, or reverse processes. The role of collisions of high-velocity electrons with the same particles and the entire chain of changes in the comprehensive physical and chemical processes occurring in the clouds have not been studied. However, it is possible that all these processes are slower than the MRB.

MICRO RUNAWAY BREAKDOWNS AND FRACTALS [2]

The data show that within 100–500 ms prior to occurrence of the first lightning strike, an activity occurs in a wide area of clouds with the width of a kilometer or several kilometers.

This process can be represented as the slowly drifting multiple small discharge currents. Each radiation burst is localized within the resolution region of the interferometer (50 m), however, the centers of the radiation regions are constantly shifted. The activity of the bursts is increased until there is a strong burst of radiation. During this period of time, the radiation intensity initially continues to increase rapidly, and then, in a time of less than 1 ms, falls sharply. Moreover, there is a sharp decrease in the electric field, apparently related to the first lightning strike. Such processes with a typical development time of about 0.1–1 s precede the main discharge that usually contains several lightning strikes both inside the clouds and on the Earth.

The lightning discharge associated with the development of a highly conductive channel and collection of the thundercloud electrical charge from an area of 1–100 km² during the period of 1–10 s is a very comprehensive process that has been studied in numerous publications. Let us note only a few points related to the role of runaway breakdown.

This is, firstly, the above-mentioned abnormal increase in conductivity caused by the MRB. An increase in conductivity should naturally contribute to the rapid transfer process of electric charge distributed in the cloud. Although this increase in conductivity is rather high, “on average” it is apparently not enough to collect an electric charge. Secondly, it can be increased significantly due to the highly inhomogeneous random structure of the conducting area,



ЧЕРЕНКОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В 1934 году П. А. Черенков, выполняя в лаборатории С. И. Вавилова исследования люминесценции жидкостей под воздействием гамма-излучения, обнаружил слабое голубое излучение неизвестной природы [6]. Уже первые эксперименты П. А. Черенкова, предпринятые по инициативе С. И. Вавилова, выявили ряд необъяснимых особенностей излучения: свечение наблюдается у всех прозрачных жидкостей, причем яркость мало зависит от их химического состава и химической природы, излучение поляризовано с преимущественным направлением электрического вектора вдоль направления распространения частиц, при этом в отличие от люминесценции не наблюдается ни температурного, ни примесного тушения. На основании этих данных С. И. Вавиловым было сделано основополагающее утверждение, что обнаруженное явление не является люминесценцией, а свет излучают движущиеся в жидкости быстрые электроны.

Теория относительности гласит: ни одно материальное тело, включая быстрые элементарные частицы с высокими энергиями, не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Но в оптически прозрачных средах скорость быстрых заряженных частиц может быть больше фазовой скорости света в этой среде. Действительно, фазовая скорость света в среде c_m равна скорости света в вакууме c , деленной на показатель преломления среды n :

$$c_m = c/n.$$

При этом вода, например, имеет показатель преломления 1,33, а показатели преломления различных марок оптических стекол лежат в пределах от 1,43 до 2,1. Соответственно, фазовая скорость света в таких средах составляет 50–75% от скорости света в вакууме. Поэтому оказывается, что релятивистские частицы, скорость которых близка к скорости света в вакууме, движутся в таких средах со скоростью, превосходящей фазовую скорость света. Быстрые электроны выбиваются из электронных оболочек атомов среды гамма-излучением.

Если частица движется быстрее скорости распространения света в среде, то она обгоняет световые волны. Совокупность касательных прямых к сферическим волновым фронтам, проведенных из точки, проходящей через частицу, образует круговой конус – волновой фронт излучения Черенкова.

Детекторы, регистрирующие черенковское излучение, широко используются в физике высоких

замечаний. The latter can contribute to the generation of efficient conductive channels.

It is possible that it is precisely this “fractal” nature of conductivity in the cloud layer prior to the first lightning discharge caused by the MRB that is partially reflected by the radio interferometric observations [2]. The possible occurrence of a fractal conductivity structure in the cloud, caused by small ordinary discharges should be noted.

GAMMA RADIATION BURSTS OF THE RB [2]

The important role of RB in the high-altitude discharges can be confirmed by the intense bursts of gamma radiation observed on the Compton satellite [2]. It has been established that the gamma bursts [6] come from the Earth from the regions with the most intense thunderstorm formation [2]. The duration of gamma bursts is several milliseconds, the energy spectrum corresponds to the spectrum that appears during the RB.

It can be noted that, in comparison with the observations of X-ray radiation in a thundercloud, the gamma radiation spectrum is shifted towards the higher energies (its maximum is about 300–500 keV) [2].

This fact indicates a large electron acceleration length and significant losses of γ -radiation in the atmosphere that directly corresponds to the theory. The radiation intensity is very high (about 100 photons $(\text{cm}^2\text{s})^{-1}$). The results of model RB calculations are in the sufficient compliance with the observational data of γ -bursts [2].

It should be emphasized that currently the unambiguous connection of high-altitude discharges with the powerful gamma radiation pulses is only a hypothesis, although a very plausible one. Any findings about the direct and simultaneous observations of optical and gamma radiation of the high-altitude discharges are not yet available.

CHERENKOV RADIATION

In 1934 P. A. Cherenkov performed researches on the fluid luminescence under the influence of gamma radiation in the S. I. Vavilov's laboratory and discovered weak blue radiation of an unknown nature [6]. Already the first experiments of P. A. Cherenkov, undertaken on the initiative of S. I. Vavilov, revealed a number of inexplicable features of such a radiation: the luminescence was observed in all transparent liquids, and the brightness depended little on their chemical composition and chemical nature, the radiation was polarized with the predominant direction of an electric vector along the particle propagation direction, while, in contrast to luminescence, there was



энергий для регистрации релятивистских частиц и определения их скоростей и направлений движения. Если известна масса порождающих черенковское излучение частиц, то сразу определяется их кинетическая энергия.

Пояснить это явление можно по аналогии с волнами Гюйгенса, из каждой точки вдоль траектории движения быстрой частицы исходит сферический фронт световой волны, распространяющийся по среде со скоростью света в этой среде, причем каждая следующая сферическая волна испускается из следующей точки на пути движения частицы. Теоретическое объяснение явления было дано И. Е. Таммом и И. М. Франком в 1937 году.

В 1958 году П. А. Черенков, И. Е. Тамм и И. М. Франк были удостоены Нобелевской премии по физике с формулировкой: «За открытие и истолкование эффекта Черенкова». Манне Сигбан из Шведской королевской академии наук в своей речи на церемонии вручения премии отметил, что «открытие явления, ныне известного как эффект Черенкова, представляет собой интересный пример того, как относительно простое физическое наблюдение при правильном подходе может привести к важным открытиям и проложить новые пути для дальнейших исследований».

Излучение Черенкова-Вавилова или черенковское излучение – свечение, вызываемое в прозрачной среде заряженной частицей, движущейся со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения света в этой среде.

Возникновение черенковского излучения аналогично возникновению ударной волны в виде конуса Маха от тела, движущегося со сверхзвуковой скоростью в газе или жидкости, например, ударная конусообразная волна в воздухе от сверхзвукового самолета или пули.

ВЫВОДЫ ПО ЧАСТИ 1

В условиях микропробоя на убегающих электронах (МПУЭ) в грозовом облаке за время в несколько десятков секунд концентрация ионов увеличивается на полтора-два порядка. Возникает слой аномально высокой проводимости, что, естественно, должно сильно сказаться на электродинамических процессах в грозовом облаке. Явление аномального роста проводимости при $E > E_c$ было предсказано, и оно названо «быстрым переносом заряда». Отметим лишь некоторые моменты, связанные с ролью пробоя на убегающих электронах.

Во-первых, указанное выше аномальное увеличение проводимости, вызванное МПУЭ. Рост проводимости должен естественно способствовать про-

no phenomenon of thermal or impurity quenching. Based on these findings, S. I. Vavilov made the fundamental statement that the discovered phenomenon was not luminescence, and the light was emitted by high-velocity electrons moving in the liquid.

The relativity theory states that no material body, including the high-velocity elementary particles with high energies, can move at a speed exceeding the speed of light in a vacuum. However, in the optically transparent media, the velocity of fast charged particles can be greater than the phase speed of light in this medium. Indeed, the phase speed of light in a medium c_m is equal to the speed of light in a vacuum c divided by the medium refractive index n :

$$c_m = c/n.$$

Moreover, for example, water has a refractive index of 1.33, and the refractive indices of various brands of optical glass range from 1.43 to 2.1. Accordingly, the phase speed of light in such media is 50–75% of the speed of light in the vacuum. Therefore, it turns out that the relativistic particles which speed is close to the speed of light in vacuum, move in such media with a speed exceeding the phase speed of light. The high-velocity electrons are knocked out of the atomic envelopes in the medium by gamma radiation.

If a particle moves faster than the speed of light in the medium, then it overtakes the light waves. The set of tangent lines to the spherical wave fronts drawn from a point passing through the particle generates a circular cone, namely the wave front of Cherenkov radiation.

The detectors that record Cherenkov radiation are widely used in the high-energy physics to record the relativistic particles and determine their velocities and directions of motion. If the mass of particles generating Cherenkov radiation is known, then their kinetic energy is immediately determined.

This phenomenon can be explained by analogy with the Huygens waves; a spherical front of the light wave emanates from each point along the motion path of a high-velocity particle, propagating through the medium at the speed of light, and each subsequent spherical wave is emitted from the next point along the path of the particle. The theoretical explanation of this phenomenon was given by I. E. Tamm and I. M. Frank in 1937.

In 1958, P. A. Cherenkov, I. E. Tamm and I. M. Frank were awarded the Nobel Prize in physics with the wording: “For the discovery and interpretation of the Cherenkov effect”. Manne Siegbahn from the Royal Swedish Academy of Sciences noted in his acceptance



цессу быстрого переноса электрического заряда, распределенного в облаке. Указанное повышение проводимости хотя и велико, но «в среднем» для сортирования электрического заряда, видимо, недостаточно. Во-вторых, оно может, однако, значительно увеличиться за счет сильно неоднородной случайной структуры проводящей зоны («фракталов»), отмечавшейся выше. Последняя, может способствовать образованию эффективных проводящих каналов на «фракталах».

Возможно, что именно такой, обусловленный МПУЭ, «фрактальный» характер поведения проводимости в облачном слое перед первым разрядом молнии частично отражают радиоинтерферометрические наблюдения. Возможно возникновение фрактальной структуры проводимости в облаке, обусловлено мелкими разрядами обычного типа.

Поскольку грозовые облака имеют плоскослоистую структуру, то среднее электрическое поле в них близко по направлению к вертикали z и каждый вторичный электрон космических лучей генерирует в грозовом облаке лавину убегающих электронов. Число быстрых электронов при этом сильно возрастает. Этот процесс МПУЭ служит причиной наблюданной вспышки рентгеновского излучения.

Из результатов расчета аномальных вспышек рентгеновского излучения, обусловленных МПУЭ, следует два важных для наблюдения вывода:

1. спектр имеет стандартный вид с характерным максимумом в области 50–60 кэВ;
2. интенсивное излучение можно наблюдать лишь в пределах 1–1,5 км по высоте от максимума электрического поля.

Внешний вид оптического излучения высотных разрядов «Спрайта» («Красных эльфов») имеет вид конуса, однако имеется особенность – конус излучения направлен к источнику высоконергетических затравочных частиц (космических лучей), т.е. обратный вектор к направлению распространения частиц, а не вдоль потока частиц по направлению к Земле.

Следует отметить, что наблюдаемые в верхних слоях атмосферы высотные разряды «Спрайт» отличаются не только по цвету оптического свечения на разной высоте – «Красные эльфы» («Red Sprite») и «Синие джеты» («Blue Jet»), но и по направлению конуса свечения по отношению к потоку затравочных космических частиц, которое зависит от свойств фракталов, в которых происходит МПУЭ.

Следует подчеркнуть, что однозначная связь высотных разрядов с мощными импульсами

speech that “the discovery of phenomenon currently known as the Cherenkov effect provides an interesting example of how a relatively simple physical observation, if done correctly, can lead to the important discoveries and break new paths for further research”.

The Cherenkov-Vavilov radiation or Cherenkov radiation is a glow caused in a transparent medium by a charged particle moving at a speed exceeding the phase speed of light propagation in this medium.

The occurrence of Cherenkov radiation is similar to the occurrence of a shock wave in the form of a Mach cone from a body moving at the supersonic speed in a gas or liquid, for example, a cone-shaped shock wave in the air from a supersonic aircraft or bullet.

CONCLUSIONS: PART 1

Under the conditions of micro runaway breakdown (MRB) in a thundercloud, the ion concentration is increased by one and a half to two orders of magnitude over several tens of seconds. A layer of anomalously high conductivity occurs that, naturally, should greatly affect the electrodynamic processes in the thundercloud. The phenomenon of an anomalously increased conductivity at $E > E_c$ has been predicted and called the “fast charge transfer”. Let us note only a few points related to the role of runaway breakdown.

Firstly, it is the above-mentioned abnormal increase in conductivity caused by the MRB. An increase in conductivity should naturally contribute to the rapid transfer process of electric charge distributed in the cloud. Although this increase in conductivity is rather high, “on average” it is apparently not enough to collect an electric charge. Secondly, it can be increased significantly due to the highly inhomogeneous random structure of the conducting area (“fractals”) noted above. The latter can contribute to the generation of efficient conducting channels on the “fractals”.

It is possible that precisely this “fractal” nature of conductivity in the cloud layer prior to the first lightning discharge caused by the MRB is partially reflected by the radio interferometric observations. It is possible that the fractal conductivity structure in the cloud may occur due to the small ordinary discharges.

Since the thunderclouds have a plane-layered structure, the average electric field in them is close in direction to the vertical z and each secondary electron of cosmic rays generates an avalanche of runaway electrons in the thundercloud. In this case, the number of high-velocity electrons is increased greatly. This process, called MRB, is responsible for the observed X-ray burst.

Two conclusions significant for observation follow from the calculation results of anomalous X-ray bursts caused by the MRB:



ЭЛЕКТРОН

Универсальная телеизионная камера

МОДИФИКАЦИИ



Солнечно-слепой ЭОП +
ПЗС-матрица УТК-УФ2



Крупноформатная
КМОП-матрица УТК-1



ЭЧ* ПЗС-матрица
УТК-4

УТК-1

Крупноформатная КМОП-матрица
Применение:

- формирование изображения при слабой освещённости
- обнаружение и распознавание объектов в УФ-областях спектра
- аэро- и фотосъёмка

УТК-УФ2

Солнечно-слепой ЭОП + ПЗС-матрица
Применение:

- регистрация УФ-излучения на большом расстоянии
- регистрация однофотонных событий
- регистрация потерь на ЛЭП
- регистрация коронных разрядов

УТК-4

ЭЧ* ПЗС-матрица.

Работа в импульсных системах с активной подсветкой

Применение:

- в обзорно-следящих бортовых системах и поисковых системах МЧС
- регистрация быстропротекающих процессов
- дистанционное зондирование земли в SWIR-диапазоне

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

УТК-1

- спектральный диапазон: 0,2–1,0 мкм
- разрешение: 2048×2048 пикс
- размер пикселя: 11×11 мкм

Преимущества:

- термостабилизированная, мультиспектральная КМОП-матрица
- сверхнизкий уровень шума и темновых токов
- работа в условиях низкой освещённости

УТК-УФ2

- спектральный диапазон: 0,2–0,3 мкм
- разрешение: 768×290 пикс
- размер пикселя: 17×34 мкм

Преимущества:

- солнечно-слепое исполнение
- возможность совмещения УФ и видимого диапазонов в одном канале
- эксплуатация при температурах от –40 до 60 °C
- вычислитель, встроенный в корпус камеры

УТК-4

- спектральный диапазон: 0,95–1,65 мкм
- разрешение: 768×290 пикс
- размер пикселя: 17×34 мкм

Преимущества:

- окно прозрачности атмосферы в диапазоне 1,55 мкм
- сверхнизкий уровень шума и темновых токов
- работа в условиях плохой видимости (туман, дымка, осадки)

*ЭЧ – электронно-чувствительная



194223, г. Санкт-Петербург,
пр-т Тореза, дом 68, лит. Р



+7 (812) 297-04-03



info@niielectron.ru





гамма излучения является в настоящий момент лишь гипотезой, хотя и весьма правдоподобной. Данные о прямых и одновременных наблюдениях оптического и гамма излучений высотных разрядов пока не опубликовано. Существование ПУЭ подтверждено при исследованиях на циклотроне, но с учетом некоторых ограничениях при эксперименте.

Возникает вопрос – о возможности создания природоподобных «фракталов» для формирования и исследования высотных разрядов в лабораторных условиях на Земле.

В продолжении обзора (часть II) будут рассмотрены свойства метаматериалов, проведен анализ публикаций, которые указывают на возможность низкотемпературной эмиссии различных полупроводниковых и полимерных материалов при размерах нанозерен или острый 20–30 нм. Мы покажем, что для изготовления источника высокогенеретических затраточных быстрых электронов и реализации пробоя на убегающих электронах достаточно использовать нить длинной 30–50 м с фрактальными наноструктурами (нанокапель) алюминия с размером 10–30 нм.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00129, <https://rscf.ru/project/24-29-00129/>.

REFERENCES

1. Gurevich A V, Milikh G A, Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Physics Letters A*. 1992; 165(5–6): 463–468. DOI:10.1016/0375-9601(92)90348-p.
2. Gurevich A. V., Zybina K. P. Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms. *Phys. Usp.* 2001;44: 1119–1140. DOI: 10.1070/PU2001v044n11ABEH000939
- Гуревич А. В., Зыбина К. П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы. Успехи физических наук. 2001; 171(11):1177–1199.
3. Physical quantities: Handbook / [A. P. Babichev, etc.]; Edited by I. S. Grigoriev, E. Z. Meilikhov. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1231 p.
4. Bragin I. V., Chebotarev A. S., Elizavetov E. P., Ist'yakov I. V., Mikhailov V. F. Space-based radiometric equipment for measuring the parameters of high-altitude lightning discharges – alphas and jets. *Proceedings of the Russian universities. Radioelectronics*. 2012; 2: 75–78.
- Брагин И. В., Чеботарев А. С., Елизаветов Е. П., Истяков И. В., Михайлов В. Ф. Радиометрическая аппаратура космического базирования для измерения параметров высотных грозовых разрядов – альфов и джетов. Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2012; 2:75–78.
5. Blokhin M. A. X-ray radiation. *Physical encyclopedia*: [in 5 volumes] / Ch. ed. A. M. Prokhorov. – Moscow: Great Russian Encyclopedia, 1994; 4: 375–377.
6. Grechukhin D. P. Gamma radiation. *Physical encyclopedia*: [in 5 volumes] / Ch. ed. A. M. Prokhorov. – Moscow: Great Russian Encyclopedia, 1994; 4: 377–379.

АВТОР

Мальцев Петр Павлович, д. т. н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва, Россия.

1. the spectrum has a standard form with a typical maximum in the region of 50–60 keV;
2. an intense radiation can be observed only within 1–1.5 km at a height from the electric field maximum.

The optical radiation from the Sprite high-altitude discharges (Red Sprite) has the shape of a cone (Fig. 1). However, there is a peculiarity, since the cone of radiation is predominantly directed towards the source of high-energy seed particles (cosmic rays), i.e. it is a reciprocal vector to the direction of particle propagation, rather than along the flow of particles towards the Earth.

It should be noted that the Sprite high-altitude discharges observed in the upper atmosphere differ not only in the optical glow color at various altitudes (Red Sprite and Blue Jet), but also in the glow cone direction in relation to the flow of seed cosmic particles that depends on the properties of fractals in which the MRB occurs.

It should be emphasized that currently the unambiguous connection of high-altitude discharges with the powerful gamma radiation pulses is only a hypothesis, although a very plausible one. Any findings about the direct and simultaneous observations of optical and gamma radiation of the high-altitude discharges are not yet available. The RB existence is confirmed by the cyclotron researches, but with due regard to some limitations during the experiment.

The question arises about possible development of the nature-like “fractals” for the formation and study of high-altitude discharges in the laboratory conditions on Earth.

In the continuation of the review (Part II), the properties of metamaterials will be considered, and an analysis of publications that indicate the possibility of low-field emission of various semiconductor and polymer materials at the size of nanogrooves or points 20–30 nm is carried out. We will show that for the manufacture of a source of high-energy seed fast electrons and the realization of breakdown on escaping electrons, it is sufficient to use a thread 30–50 m long with fractals of aluminum nanostructures (nanodrops) with a size of 10–30 nm.

FINANCING OF THE STUDY

The study was supported by the grant provided by the Russian Science Foundation No. 24-29-00129, <https://rscf.ru/project/24-29-00129/>.

AUTHOR

Maltsev Petr P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, V. G. Mokrov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (IUFSE RAS), Moscow, Russia.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ МИРА

Шпак В.В.

М: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 128 с.
ISBN 978-5-94836-656-2

Цена 840 руб.

В монографии рассмотрены две глобальных задачи: во-первых, провести макроэкономический анализ и дать оценку состояния и перспектив развития электронной промышленности в части процессов разработки, производства и реализации электронной продукции, а также в части развития электронного машиностроения, системы управления отраслью и кадрового обеспечения развития отрасли. Во-вторых, сформировать обоснованные предложения по развитию отрасли в контексте утвержденных стратегических целей, необходимости адаптации электронной промышленности под новый технологический уклад, а также с учетом научно-технологического прогноза развития отрасли.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; sales@technosphera.ru

Новые компоненты для ИК спектроскопии

1000 - 5000 нм

- Светодиоды и фотодиоды
 
- Многоэлементные светодиодные и фотодиодные сборки (матрицы)
 
- Сопутствующая электроника

 Произведено в России

Преимущества

- ✓ низкое энергопотребление;
- ✓ высокое быстродействие;
- ✓ миниатюрные размеры;
- ✓ большой срок службы;
- ✓ отсутствие необходимости частой перекалибровки

Области применения

- газоанализ (детектирование CH₄ и др. углеводородов, CO₂);
- определение содержания воды/ влажности;
- контроль состава материалов/ продуктов на основе анализа ИК спектров поглощения



ООО «ЛЕД Микросенсор НТ», 194223, Россия,
г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д. 10, лит. А
info@lmsnt.ru, info@lmsnt.com; www.lmsnt.ru