

УДК 537.52; 537.53

СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ, СОЗДАВАЕМОГО МИНИАТЮРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИСКРОЙ

Е. В. Паркевич¹, А. И. Хирьянова¹, Т. Ф. Хирьянов¹, И. С. Байдин¹,
К. В. Шпаков¹, А. А. Родионов¹, Я. К. Болотов^{1,2}, В. А. Рябов¹,
С. А. Амброзевич³, А. В. Огинов¹

В работе исследованы спектральные характеристики сверхвысокочастотного радиоизлучения (в диапазоне 1–6 ГГц), порождаемого импульсной электрической искрой в миллиметровом воздушном промежутке, а также его временная корреляция с поведением тока и напряжения разряда в наносекундном масштабе времени. Обсуждены закономерности эмиссии СВЧ-излучения и общая картина возможных явлений в искровом промежутке.

Ключевые слова: электрическая искра, электрический пробой, СВЧ-излучение, временные корреляции.

Введение. Импульсные искровые разряды в газообразной среде представляют интерес для многих фундаментальных и прикладных направлений физики газового разряда [1]. Благодаря разнообразным характеристикам генерируемой плазмы [2] такие разряды нашли приложение в плазменном горении, синтезе наночастиц, обработке материалов, сильноточной коммутации, спектроскопии и многих других. Интересной особенностью импульсных искровых разрядов, как и многих других газоразрядных явлений, является их способность порождать жесткое рентгеновское излучение [3, 4] и радиоизлучение в сверхширокой полосе частот [5, 6]. Последний эффект оказывается нежелательным явлением при проведении исследований динамики плазмы и электрофизических изменений характеристик разряда, ассоциируемым в первую очередь с появлением сильных наводок в электрической цепи высоковольтной установки. Такие наводки оказывают пагубное влияние на работу чувствительного измерительного оборудования, что особенно

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: parkevich@phystech.edu.

² МФТИ, 141701 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005 Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1.

характерно для ГГц диапазона частот. В связи с этим возникает необходимость в умении не только подавить соответствующие потоки сверхвысокочастотного радиоизлучения, но и определить важные временные этапы развития разряда, когда эмиссия такого излучения наиболее интенсивная. К сожалению, на сегодня практически отсутствует литература обзорного характера, которая должным образом раскрывала бы ключевые характеристики сверхширокополосного радиоизлучения, создаваемого импульсной электрической искрой. В частности это касается временных корреляций эмиссии высокочастотного радиоизлучения с поведением таких электрофизических характеристик разряда, как ток и напряжение. Знание данной информации может быть полезным для создания систем защиты измерительного оборудования от высокочастотных наводок и проведения прецизионных чувствительных исследований генерации плазмы на ранней стадии эволюции разряда.

Данная работа нацелена на формирование основополагающих представлений о характеристиках сверхвысокочастотного радиоизлучения, порождаемого импульсной электрической искрой, а также его временной корреляции с поведением тока и напряжения разряда в наносекундном масштабе времени.

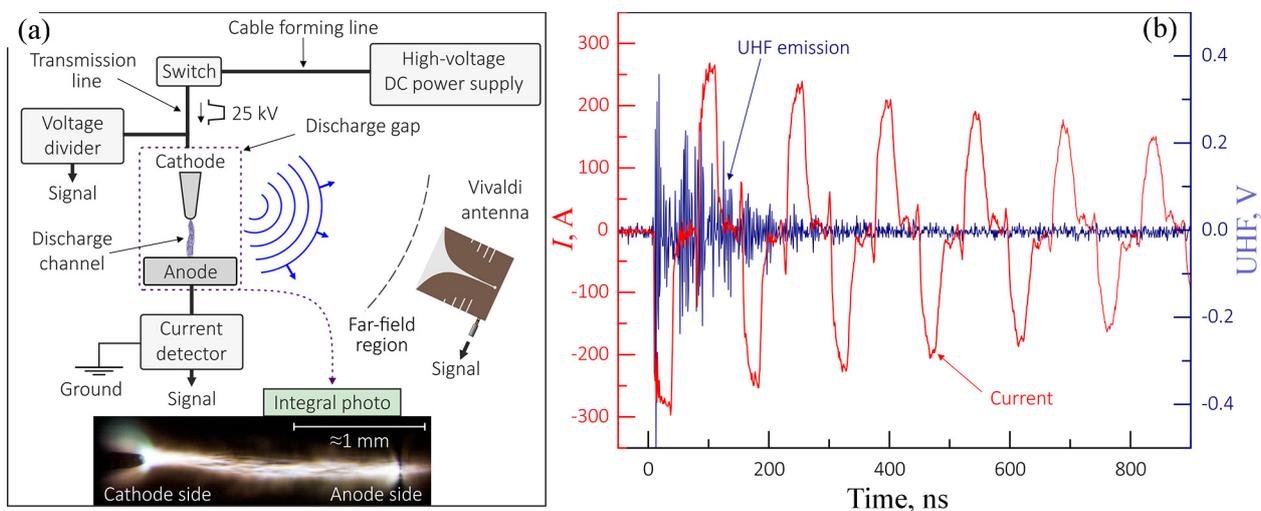


Рис. 1: Блок-схема эксперимента (а). Типичные сигналы СВЧ-излучения и тока через разрядный промежуток (б).

Постановка эксперимента. Исследования проводились с использованием небольшого кабельного генератора импульсов напряжения, см. рис. 1(а). Генератор включал с себя формирующую линию – отрезок кабеля РК-75-9-11 длиной примерно 2 м (импеданс 75 Ом), заряжаемую до 50 кВ (отрицательная полярность) от источника по-

стоянного напряжения через балластное сопротивление (1 ГОм). Формирующая линия стыковалась с управляемым разрядником (ключ) и согласованной передающей линией длиной 1 м. На конце передающей линии размещался катодный узел, к центральной жиле которого была припаяна высокоомная часть резистивного делителя напряжения. Вблизи данного крепления располагался острый катод с малым радиусом скругления вершины. Напротив катода был установлен анод цилиндрической формы, торец которого имел диаметр 10 мм. Анод был установлен на токовый шунт (детектор тока), который замыкался на земляную часть катодного узла через четыре металлических стержня, расставленных на некотором расстоянии относительно области с разрядным промежутком. Расстояние от вершины катода до анода в экспериментах составляло ≈ 2 мм. Разрядной средой служил воздух при атмосферном давлении. При срабатывании ключа формирующая линия выдавала высоковольтный импульс амплитудой до 25 кВ, фронтом ≈ 4 нс, длительностью импульса порядка 40 нс. Данный импульс подавался на разрядный промежуток и инициировал в нём разряд. Предельный ток разряда достигал величины порядка 300 А. Развитие разряда в промежутке сопровождалось генерацией плазмы, а также эмиссией сверхвысокочастотного радиоизлучения. Для его регистрации в дальней зоне (на расстоянии нескольких метров от промежутка) устанавливалась сверхширокополосная антенна Вивальди (рабочий диапазон более 1 ГГц) [6]. Сигналы с антенны, детекторов напряжения и тока разряда (оба с разрешением не хуже 1 нс) записывались цифровым осциллографом (6 ГГц, 20 Гвыб/сек). При синхронизации сигналов детекторов учитывались все геометрические задержки и задержки в кабельных трактах.

Чтобы убедиться в том, что регистрируемое СВЧ-излучение исходит только от рассматриваемого разрядного промежутка, а не от промежуточного управляемого разрядника и источника питания, были проведены калибровочные эксперименты. Измерялись все возможные наводки и шумы при работе кабельного генератора в режиме закороченной нагрузки (искровой промежуток на рис. 1(а) закорачивался на землю массивным металлическим стержнем) и без нагрузки (полностью извлекался анодный узел). В результате было уточнено, что уровень шумов от высоковольтной установки на два порядка ниже характерных амплитуд сигналов СВЧ-излучения, наблюдаемых во время инициирования искры в исследуемом промежутке. При этом никакой эмиссии СВЧ-излучения от выходной части установки в отмеченных режимах работы генератора не наблюдалось.

Обсуждение результатов. При разрядке кабельного генератора на разрядный промежуток последний пробивался спустя некоторое время, и через него начинал протекать ток. Поскольку при пробое разрядный промежуток оказывался закороченным на землю, подаваемый высоковольтный импульс отражался от разрядного промежутка с инвертированной амплитудой и распространялся далее в тракте “передающая линия – формирующая линия”. Отраженный импульс частично терял в своей амплитуде ввиду затухания в линии и потерь из-за сопротивления плазмы в области с управляемым разрядником и разрядным промежутком. Доходя до балластного сопротивления на выходе высоковольтного источника, высоковольтный импульс отражался без инвертирования своей амплитуды и вновь поступал на закороченный разрядный промежуток, вследствие чего наблюдалось протекание тока через промежуток с полярностью обратной той, которая была при токе от самого первого подаваемого импульса. Описанный процесс распространения высоковольтного импульса, будучи периодическим, имел затухающий характер в масштабе времени порядка 1 мкс, см. рис. 1(b). Примечательно, что генерация СВЧ-излучения (в диапазоне 1–6 ГГц) наблюдалась в течение первых нескольких актов подачи высоковольтного импульса на разрядный промежуток и протекании через него тока, а также в интервалах времени между ними, когда многократно отраженный импульс еще не достигал промежутка. Эмиссия СВЧ-излучения также носила затухающий характер, но более быстрый. Генерация СВЧ-излучения не наблюдалась уже после третьего – четвертого акта прихода многократно отраженного импульса. При этом максимальная амплитуда сигналов СВЧ-излучения достигалась, как правило, в пределах только первого акта подачи высоковольтного импульса.

На рис. 2(a) и (b) представлены сигналы СВЧ-излучения, напряжения и тока разряда во время подачи самого первого высоковольтного импульса на разрядный промежуток. Из рис. 2(b) видно, что на развитие пробоя промежутка, сопровождающегося синхронным резким ростом тока и спадом напряжения, уходит ≈ 3 нс.

Пробой происходит при напряжении ≈ 25 кВ. Эффект удвоения амплитуды импульса напряжения не успевает развиваться. Примечательно, что по мере приближения момента пробоя промежутка скорость роста фронта напряжения меняется, что совпадает по времени с появлением слабого предимпульса СВЧ-излучения. Амплитуда предимпульса постепенно нарастает за ≈ 1 нс. Момент наступления пробоя промежутка сопровождается резким ростом амплитуды сигналов СВЧ-излучения, которая держится на высоком уровне в течение последующих ≈ 10 – 20 нс.

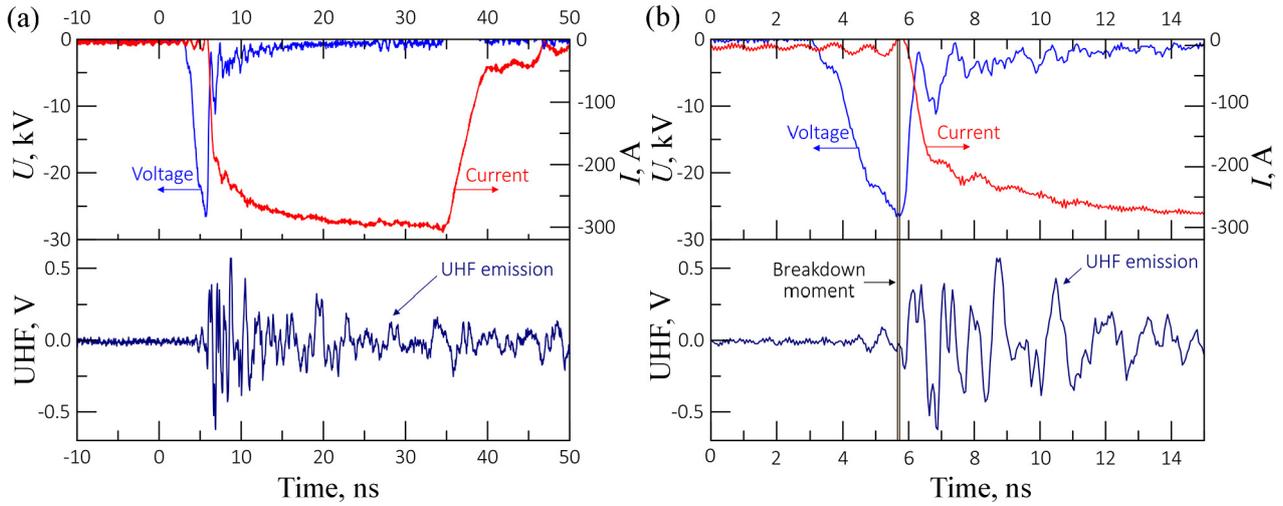


Рис. 2: Сигналы напряжения, тока разряда и СВЧ-излучения в первом импульсе на рис. 1(b) на масштабе времени 60 нс (a) и 15 нс (b).

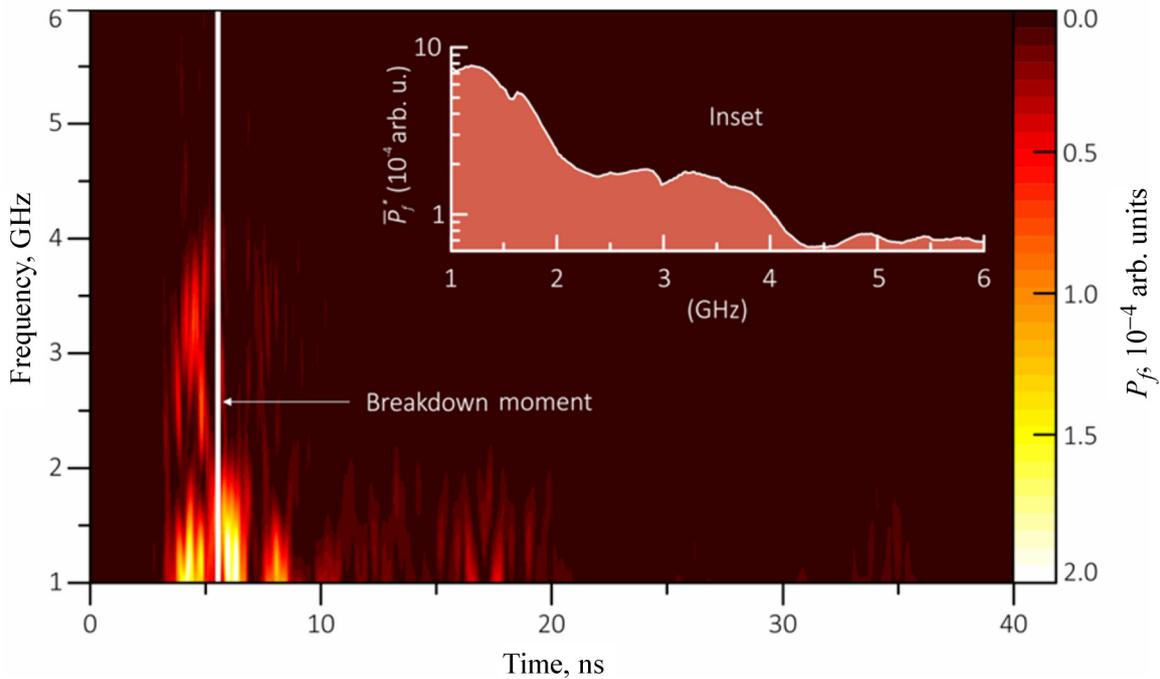


Рис. 3: Спектрально-временная карта мгновенной мощности СВЧ-сигнала, приведенного на рис. 2. Вставка к рисунку демонстрирует усредненное по многим событиям распределение максимальной мощности вспышки СВЧ-излучения по частоте.

Хотя всё регистрируемое СВЧ-излучение характеризуется частотами в диапазоне 1–6 ГГц, значения мгновенной мощности излучения (квадрат амплитуды сигнала) на

данных частотах распределены крайне неоднородно по времени и частоте. Наглядно это демонстрируют спектрально-временная карта на рис. 3 и усредненный профиль одиночной вспышки СВЧ-эмиссии на вставке к данному рисунку, построенные с использованием методов, описанных в работе [6].

Наибольшая мощность СВЧ-излучения на высоких частотах (более 2 ГГц) достигается в первые несколько наносекунд после момента пробоя промежутка, а также на стадии предымпульса эмиссии СВЧ-излучения. В данных интервалах времени наблюдаются спектральные компоненты осцилляций сигнала вплоть до 6 ГГц. После наступления пробоя, несмотря на то что амплитуда СВЧ-сигнала резко возрастает и держится значительной в течение последующих 10–20 нс, основная мощность осцилляций сигнала сосредоточена лишь в интервале 1–2 ГГц. Заметим также, что в самом сигнале СВЧ-излучения прослеживаются осцилляции с частотой чуть ниже 1 ГГц, которые попадают в диапазон чувствительности используемой антенны. При построении карты на рис. 3 мы, однако, использовали локальную информацию о сигнале только при рассмотрении интервалов времени длительностью 1 нс, что ограничивает её содержимое снизу на частоте 1 ГГц.

Обсудим характерную картину развития искрового разряда в малом воздушном промежутке. Всесторонние исследования показывают, что уже в течение первых наносекунд до момента пробоя промежутка в последнем формируется столб слабоионизованной плазмы [7]. На этой же стадии можно ожидать активное развитие электронных лавин, генерацию убегающих электронов, усиление эмиссии электронов с катода, способствующих повышению степени ионизации плазмы в столбе разряда [8]. Момент пробоя в малых искровых промежутках совпадает по времени с появлением на катоде пятна сильноионизованной плазмы, обладающей высокой эмиссионной способностью [9]. На коротких временах такая плазма выступает в качестве высокоэффективного эмиттера электронов с большой плотностью тока. Последующее распространение плазмы с катода, а также с анода приводят к образованию в промежутке протяженного искрового канала [10]. За время порядка 10 нс канал, как правило, успевает закоротить весь разрядный промежуток. Особенностью формирования такого канала является появление в нем сложной внутренней микроструктуры [11], которая, будучи пороговым эффектом [12], продолжает развиваться даже на временах порядка 100 нс [13]. С течением времени канал расширяется, а внутренняя микроструктура становится менее выраженной, появляются гидродинамические потоки и завихрения разогретого воздуха [14]. Поэтому спустя сотни наносекунд можно ожидать, что плазменного канала в

коротком промежутке уже не существует как такового, а имеется некоторая обширная зона с пониженной плотностью и возможно остаточной ионизацией среды [15].

Многие модели процессов в высоковольтном разряде, сопровождающемся эмиссией широкополосного радиоизлучения, используют представление о динамическом диполе [16–19]. Такая модель используется, например, для описания соударения встречных стримеров противоположной полярности [18] или их одиночного взаимодействия с поверхностью электродов [17]. Однако в условиях, когда весь разрядный промежуток замкнут плазмой, усиление генерации СВЧ-излучения сложно объяснить в рамках дипольной модели, даже если она базируется на временных изменениях тока в плазме [19]. На наш взгляд, правдоподобным кажется идея возбуждения поверхностных и объёмных плазменных волн [20], которые будучи естественными волновыми процессами, могут распространяться вдоль плазменного канала, многократно отражаться от электродов и излучать радиоизлучение в широкой полосе частот. Такой подход, в частности, объясняет продолжение генерации СВЧ-излучения во временных интервалах, когда до промежутка еще не дошел многократно отраженный высоковольтный импульс. В то же время мы не исключаем, что могут быть иные переходные процессы, связанные с развитием различных пучково-плазменных неустойчивостей в слабоионизованной плазме [21, 22]. При определенных условиях развитие пучковых неустойчивостей также может сопровождаться эмиссией широкополосного радиоизлучения, хотя скорее это носит более стохастический характер, чем регулярный.

Заключение. Изучена временная корреляция эмиссии СВЧ-излучения (в диапазоне 1–6 ГГц), создаваемого электрической искрой, с напряжением и током разряда. Искра создавалась в 2-мм воздушном промежутке при воздействии на него 25 кВ импульсом с фронтом ≈ 4 нс и длительностью ~ 40 нс. После наступления пробоя промежутка и его закорачивания на землю возникал режим многократного отражения высоковольтного импульса в тракте “передающая линия – формирующая линия”. Данный режим носил затухающий характер в масштабе ~ 1 мкс. Генерация СВЧ-излучения наблюдалась в течение первых нескольких актов подачи высоковольтного импульса на промежутки и протекании через него тока, а также в интервалах времени между ними, когда многократно отраженный импульс еще не достигал промежутка. Максимальная амплитуда сигналов СВЧ-излучения достигалась в пределах только первого акта подачи высоковольтного импульса. Обнаружено, что за ≈ 1 нс до наступления пробоя промежутка появляется предимпульс эмиссии СВЧ-излучения небольшой амплитуды, характеризуемый частотами более 2 ГГц. Показано, что момент наступления пробоя со-

проводяется резким ростом амплитуды сигналов СВЧ-излучения, которая держится на высоком уровне в течение последующих 10–20 нс. Установлено, что высокая мощность СВЧ-излучения на высоких частотах (вплоть до 6 ГГц) помимо предымпульса достигается в первые несколько наносекунд после момента пробоя промежутка. После наступления пробоя основная мощность осцилляций сигнала сосредоточена лишь в интервале 1–2 ГГц. Проанализирована картина возможных явлений в канале разряда, начиная с момента подачи высоковольтного импульса. Выдвинута гипотеза о возбуждении поверхностных и объёмных плазменных волн, которые могут распространяться вдоль плазменного канала разряда и многократно отражаться от электродов, провоцируя тем самым эмиссию радиоизлучения в широкой полосе частот.

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-19-00524.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] I. Adamovich, S. Agarwal, E. Ahedo, et al., *Journal of Physics D: Applied Physics* **55**(37), 373001 (2022). DOI: 10.1088/1361-6463/ac5e1c.
- [2] Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц, *Физика импульсного пробоя газов* (М., Наука, 1991), 224 с.
- [3] А. А. Родионов, А. В. Агафонов, В. А. Рябов и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **49**(7), 38 (2022). <https://elibrary.ru/contents.asp?id=48649071>.
- [4] E. V. Parkevich, K. V. Shpakov, I. S. Baidin, et al., *Physical Review E* **105**(5), L053201 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevE.105.L053201.
- [5] E. V. Parkevich, A. I. Khirianova, T. F. Khirianov, et al., *Physical Review E* **106**(4), 045210 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevE.106.045210.
- [6] E. V. Parkevich, A. I. Khirianova, T. F. Khirianov, et al., *Physical Review E* **108**(2), 025201 (2023).
- [7] N. Minesi, S. A. Stepanyan, P. B. Mariotto, et al., 2019 On the arc transition mechanism in nanosecond air discharges AIAA Scitech 2019 Forum AIAA SciTech Forum (San Diego, CA) (American Institute of Aeronautics and Astronautics). DOI: 10.2514/6.2019-0463.
- [8] Н. М. Зубарев, Г. А. Месяц, *Письма в ЖЭТФ* **113**(4), 256 (2021). DOI: 10.1134/S0021364021040123.

- [9] E. V. Parkevich, G. V. Ivanenkov, M. Medvedev, et al., *Plasma Sources Science and Technology* **27**(11), 11LT01 (2018). DOI: 10.1088/1361-6595/aaebdb.
- [10] E. V. Parkevich, M. A. Medvedev, A. I. Khirianova, et al., *Plasma Sources Science and Technology* **28**(12), 125007 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab518e.
- [11] E. V. Parkevich, M. Medvedev, G. V. Ivanenkov, et al., *Plasma Sources Science and Technology* **28**(9), 095003 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3768.
- [12] Е. В. Паркевич, А. И. Хирьянова, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **49**(9), 47 (2022). <https://elibrary.ru/contents.asp?id=49311569>.
- [13] К. И. Алмазова и др., *Журнал технической физики* **89**(1), 69 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219010043.
- [14] C. Dumitrache, A. Gallant, N. Minesi, et al., *Journal of Physics D: Applied Physics* **52**(36), 364001 (2019). DOI: 10.1088/1361-6463/ab28f9.
- [15] Nicolas Minesi, Thermal spark formation and plasma-assisted combustion by nanosecond repetitive discharges: Ph.D. thesis / Université Paris-Saclay. 2020. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03155208>.
- [16] Б. М. Болотовский, А. В. Серов, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **34**(3), 13 (2007). <https://elibrary.ru/contents.asp?id=33186218>.
- [17] I. Zudin, M. Gushchin, I. Vershinin, et al., *Energies* **15**(24), 9425 (2022). DOI: 10.3390/en15249425.
- [18] J. Koile, N. Liu, J. Dwyer, *Geophysical Research Letters* **48**(24), e2021GL096214 (2021). DOI: 10.1029/2021GL096214.
- [19] P. F. Wilson, A. R. Ondrejka, M. T. Ma, et al., *NASA STI/Recon Technical Report N.* **89**, 13680 (1988).
- [20] М. В. Кузелев, А. А. Рухадзе, *Успехи физических наук* **188**(8), 831 (2018). DOI: 10.3367/UFNe.2017.10.038214.
- [21] М. В. Кузелев, А. А. Рухадзе, *Успехи физических наук* **152**(6), 285 (1987). DOI: 10.1070/PU1987v030n06ABEH002853.
- [22] М. В. Кузелев, А. А. Рухадзе, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **32**(2), 3 (2005). <https://ksf.lebedev.ru/contents.php?post=1&year=2005&number=02&z=0>.

Поступила в редакцию 21 июля 2023 г.

После доработки 28 сентября 2023 г.

Принята к публикации 29 сентября 2023 г.