

УДК 533.9.07, 537.874

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ В КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ В ГАЗЕ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

© 2023 г. С. В. Коробков¹, М. Е. Гушин^{1,*}, А. В. Стриковский¹, И. М. Вершинин¹,
И. Ю. Зудин¹, К. Н. Лоскутов¹, А. С. Николенко¹, А. В. Палицин¹, А. В. Громов¹,
М. Б. Гойхман¹, академик РАН Е. А. Мареев¹

Поступило 26.12.2022 г.

После доработки 26.12.2022 г.

Принято к публикации 11.01.2023 г.

Эксперименты по распространению мощных высоковольтных импульсов длительностью порядка и меньше наносекунды в крупномасштабных передающих линиях в атмосфере различных газов позволяют решать широкий спектр фундаментальных и прикладных задач, от моделирования прохождения электромагнитных импульсов (ЭМИ) через атмосферу до оценки электропрочности элементов импульсных высоковольтных систем с газовым заполнением. В ИПФ РАН эксперименты с полосковыми линиями длиной до 5 м проводятся на установках “Крот” и “Спрайт”. При распространении ЭМИ с уровнем напряженности электрического поля до 100 кВ/м в разреженном газе исследуются такие эффекты, как формирование неоднородных и существенно нестационарных структур свечения, нелинейное поглощение и дисперсионная трансформация формы импульсов высокой мощности, обусловленные ионизацией газа в поле ЭМИ.

Ключевые слова: сверхширокополосный электромагнитный импульс, плазма, лабораторное моделирование, атмосфера, ионосфера

DOI: 10.31857/S2686740023030100, EDN: OYVART

В экспериментах, нацеленных на изучение эффектов нестационарной ионизации газов мощными нано- и субнаносекундными импульсами, используются, как правило, такие конфигурации полеобразующих систем, в которых электромагнитное поле существенно неоднородно в пространстве, и значительную (если не определяющую) роль играют приэлектродные явления (см., например, [1, 2]). Вместе с тем большой интерес представляют нелинейные эффекты в поле мощных электромагнитных импульсов (ЭМИ), распространяющихся в открытом пространстве, заполненном газовой средой при том или ином давлении. Такая конфигурация задачи характерна в первую очередь для атмосферы и ионосферы Земли, где мощные СВЧ-импульсы и, в частности, мощные сверхширокополосные (СШП) ЭМИ могут использоваться для локации и радиосвязи [3], а также для управления химическим составом

среды [4, 5]. Явления нестационарной ионизации, развивающиеся в поле ЭМИ, могут приводить к нелинейному затуханию и трансформации формы сигнала при распространении по длинной трассе [6, 7]. Знание особенностей взаимодействия ЭМИ с частично ионизированным газом важно для развития моделей влияния на ионосферу и атмосферу импульсного излучения техногенных событий [8, 9] и молниевых разрядов [10].

Естественно, отдельные процессы в мощных импульсных полях, такие как генерация потоков убегающих электронов, можно изучать и в конфигурациях с неоднородным электромагнитным полем, наиболее распространенными вариантами которых являются “острие–плоскость” или “острие – корпус камеры” (см., например, [2]). В то же время моделирование эффектов нелинейной трансформации формы ЭМИ или пространственно-неоднородных структур ионизации, которые развиваются в большом объеме на трассе распространения ЭМИ в околоземном пространстве, требует иных постановок лабораторного эксперимента, в которых поляризация и динамика поля максимально близки к структуре электро-

¹ Институт прикладной физики

Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: mguschin@ipfran.ru

магнитной волны в прозрачной, безграничной газовой среде, в идеале — с возможностью создания и контроля начального уровня ионизации.

Чтобы приблизить условия взаимодействия ЭМИ со средой к таковым в атмосфере или ионосфере, необходимо, во-первых, организовать достаточно большую трассу прохождения ЭМИ через газовую среду, во-вторых — обеспечить распространение ЭМИ в форме квазипоперечной (ТЕМ) электромагнитной волны. Согласно различным оценкам, для наблюдения эффектов трансформации формы наносекундного ЭМИ из-за нелинейного поглощения или дисперсии необходима трасса порядка 1 м и более в вакуумной камере соответствующих размеров [11, 12]. Однако даже в очень большой вакуумной камере — такой, как, например, камера стенда “Крот” диаметром 3 м [13], возбудить ЭМИ в форме плоской, слаборасходящейся волны очень трудно. Диаграмма направленности антенн [3], используемых для излучения ЭМИ в свободное пространство, слишком широка, чтобы обеспечить слабое затухание амплитуды импульса вдоль трассы распространения. Более того, навязываемая вакуумной камерой волноводная дисперсия искажает спектр и форму ЭМИ [12]; также трудно бороться с переотражениями ЭМИ на стенках камеры, поскольку широкополосные радиопоглощающие материалы должны занимать слишком большой объем.

Другой подход заключается в использовании, в целях моделирования взаимодействия ЭМИ с частично ионизированными газовыми средами на протяженной трассе, направляющих структур — передающих линий, поддерживающих распространение ЭМИ в ТЕМ-моду. Передающая линия, зазор которой однородно заполняется газом или плазмой, позволяет локализовать электромагнитное поле в поперечном направлении, в целом сохраняя свойства распространяющейся в ней ТЕМ-моды близкими к свойствам волны в свободном пространстве. К ключевым свойствам ЭМИ в атмосфере, которые могут быть воспроизведены в передающих линиях, относятся квазипоперечная поляризация, наличие плоского фронта, распространение со скоростью света в отсутствие плазмы. Такой подход был предложен в 1970-е годы в США и был реализован экспериментально с симметричными полосковыми линиями на небольших установках [11]. В дальнейшем эта концепция длительное время не получала развития, в первую очередь из-за отсутствия в распоряжении экспериментаторов плазменных камер необходимой (не менее нескольких метров) длины.

Недавно на крупномасштабных установках “Крот” [13] и “Спрайт” [15] были начаты эксперименты с двумя вариантами исполнения передающих линий, размещаемых в больших вакуумных

объемах. Во-первых, это “гигантская” коаксиальная линия (ГКЛ) длиной 10 м и диаметром 1.5 м, в которой с помощью дополнительного высококачественного источника можно контролировать начальный уровень ионизации [14]. Во-вторых, это размещаемые в вакуумных камерах крупномасштабные полосковые линии, имеющие длину до 5 м и описанные ниже в работе. Достоинством полосковых линий является открытая геометрия зазора, в котором распространяется ЭМИ, которая, наряду с регистрацией формы ЭМИ, позволяет проводить оптические измерения и фотосъемку разрядных процессов, в том числе с помощью современных ICCD камер с быстрым затвором.

Типичная схема эксперимента с полосковой линией, возбуждаемой генератором высоковольтных наносекундных импульсов, приводится на рис. 1. На стенде “Спрайт” нами использовались линии длиной около 1 м, симметричные и несимметричные, с шириной электродов от 5 мм до 30 см и зазором от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, волновой импеданс применяемых линий изменялся в пределах от 40 до 200 Ом. На стенде “Крот” проводились эксперименты с симметричной секционированной полосковой линией длиной до 5 м, с зазором между проводниками 6 см и волновым импедансом 100 Ом. Возбуждение линий и вывод сигнала осуществлялись через согласующие пирамидальные переходы, к которым коаксиальными кабелями с волновым сопротивлением 50 Ом подключались, соответственно, генераторы субнаносекундных импульсов напряжения и измерительная аппаратура.

Для возбуждения ЭМИ использовались твердотельные генераторы субнаносекундных импульсов моделей ГИН-40, ГИН-60-01 (производитель — ООО “ФИД Техника” и РРМ0731 (производитель — ООО “Мегаимпульс”), рассчитанные на активную нагрузку сопротивлением 50 Ом, с максимальной амплитудой напряжения 50, 60 и 6 кВ соответственно. При подключении к полосковым линиям все генераторы обеспечивали возбуждение импульсов с длительностью по полувысоте около 1 нс при длительности фронта 100–150 пс.

Регистрация формы ЭМИ на выходе передающей линии осуществлялась, в зависимости от уровня напряжения, либо напрямую через широкополосный высоковольтный аттенюатор, либо с использованием ответвителя на основе полоскового преобразователя типа ИППЛ [3], подключаемых к входу цифрового осциллографа Tektronix MSO64 с полосой 8 ГГц. Через боковые фланцы вакуумных камер осуществлялась скоростная фотосъемка зазора линии с помощью ICCD камеры 4 Picos. Интенсивность оптического излучения газа в зазоре полосковых линий регистрировалась с помощью фотоэлектронного умножителя

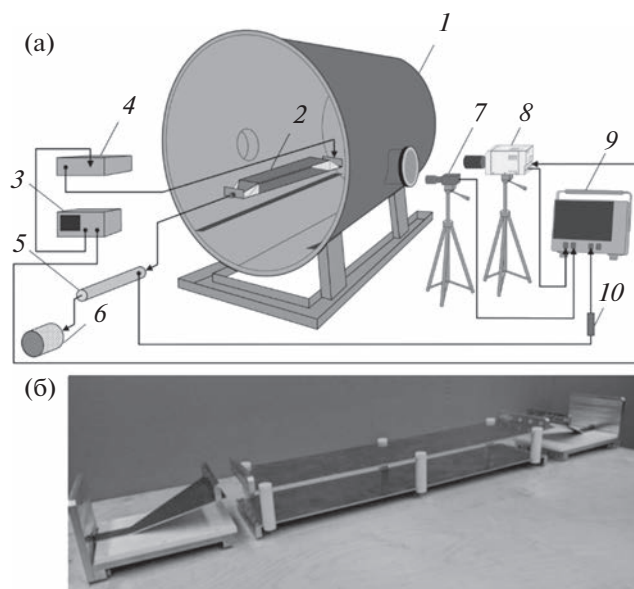


Рис. 1. а — Типичная схема эксперимента с крупномасштабной полосковой линией в большой вакуумной камере: 1 — камера, 2 — полосковая линия, 3 — задающий генератор системы синхронизации, 4 — генератор наносекундных высоковольтных импульсов, 5 — измерительный преобразователь типа ИППЛ, 6 — согласованная нагрузка, 7 — ФЭУ, 8 — ICCD фотокамера, 9 — широкополосный осциллограф, 10 — аттенюатор; б — фотография секции полосковой линии с пирамидальными согласующими переходами.

ФЭУ-84-3 с длительностью переходной характеристики около 20 нс при включении на согласованную нагрузку (50 Ом). Задержки и импульсные характеристики оптических датчиков, включая ФЭУ и фотокамеру, определялись в ходе калибровки импульсным лазером с длительностью импульса излучения не более 1 нс.

Эксперименты проводились в атмосфере неосушенного воздуха, азота, аргона, гелия, а также в водяных парах, напускаемых в откачанную вакуумную камеру из герметичной емкости с дистиллированной водой, в диапазоне рабочих давлений от 10^{-3} торр до атмосферного. В зависимости от уровня выходного напряжения, импеданса и зазора линий, напряженность электрического поля между электродами линии составляла $E \sim 10\text{--}1000$ кВ/м. Для всех газов в экспериментах выполнялось условие малости длины свободного пробега электронов с характерной энергией $W \sim 1$ эВ по сравнению с шириной межэлектродного зазора.

На рис. 2 приводятся серии фотографий свечения воздуха в линии, возбуждаемой генератором высоковольтных импульсов при различных давлениях и частотах повторения ЭМИ. Объемное свечение в зазоре передающих линий регистрируется в определенном диапазоне давлений, зависящем от сорта газа, амплитуды напряжения и ча-

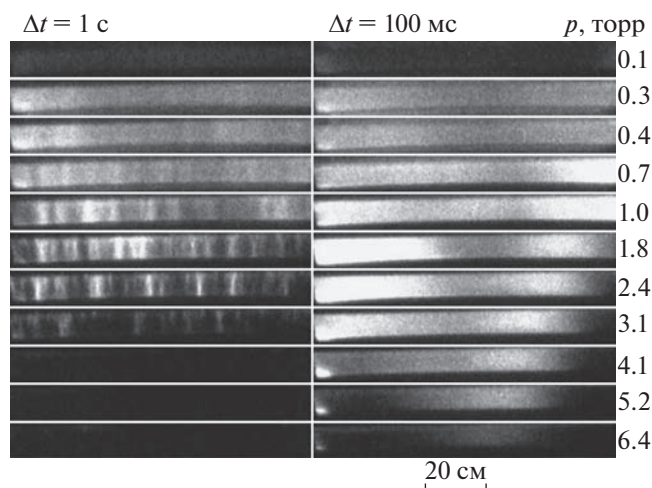


Рис. 2. Фотографии свечения воздуха в полосковой линии с зазором 6 см, возбуждаемого ЭМИ амплитудой 50 кВ, полученные на выдержках 500 нс при различных давлениях и двух частотах повторения ЭМИ в последовательности: слева — 1 Гц, справа — 10 Гц.

стоты следования ЭМИ; для воздуха этот диапазон простирается от 10^{-2} до 10 торр. При высоких частотах повторения импульсов в пачке свечение носит диффузный характер, при частотах повторения порядка 1 Гц и ниже (включая режим разовых импульсов) вспышка света при прохождении ЭМИ состоит из отдельных филаментов, ориентированных вдоль вектора электрического поля. Филаменты не связаны с неоднородностями электродов; в режимах разовых или “редких” ЭМИ они каждый раз появляются в разных местах полосковой линии. Такую структуру свечения, стимулированное прохождением ЭМИ, имеет во всех использованных газах, включая воздух, аргон и гелий. Свечение водяного пара, возбуждаемого ЭМИ, оказывается очень слабым, но в режиме “редких” или разовых (реже одного раза в секунду) ЭМИ оно также имеет филаментированную структуру.

Примеры осциллограмм с ФЭУ в интегральном свете приводятся на рис. 3. В целом во всем диапазоне давлений характерная длительность свечения газа, стимулированного прохождением ЭМИ, — до 1 мкс; длительность вспышки света в парах воды не превышает 200 нс. В области низких давлений вспышка видимого света возникает с заметной задержкой относительно момента прохождения ЭМИ вдоль линии, до 300–500 нс (см. рис. 3в). В воздухе и в парах воды вспышка оптического излучения может включать два, иногда три пика, отстоящих друг от друга на 50–100 нс (рис. 3б). Наблюдаемая картина согласуется с представлением о генерации оптического излучения в результате возбуждения газа электронами, рождающимися и ускоряемыми в поле ЭМИ.

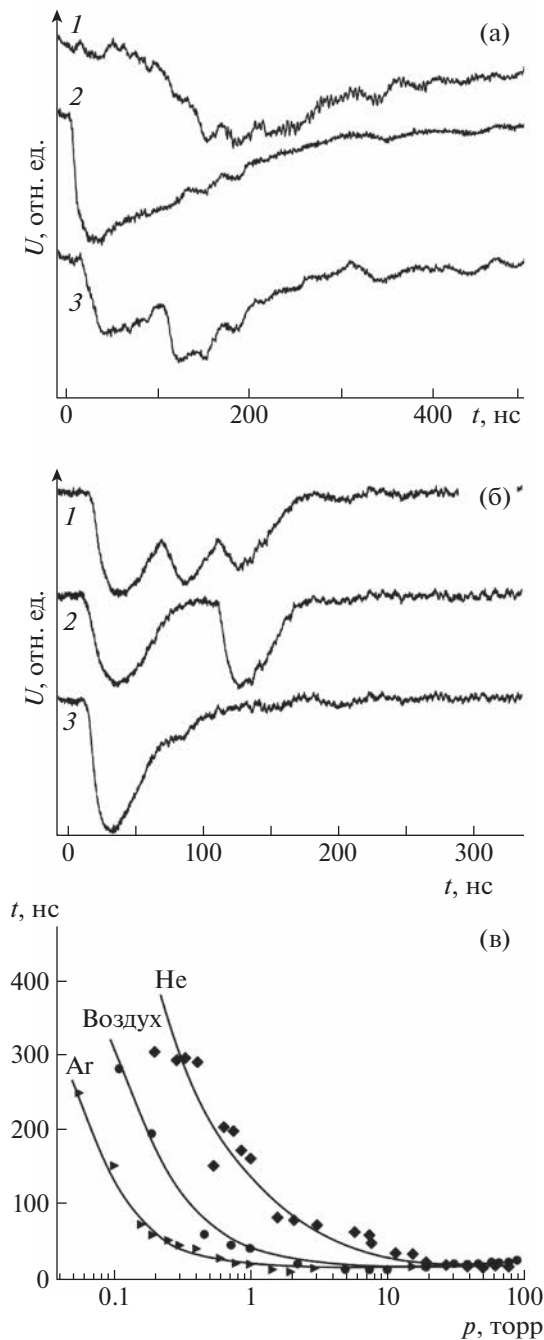


Рис. 3. Формы сигналов с ФЭУ при прохождении пачки ЭМИ в полосковой линии: а – воздух при различных давлениях, амплитуда импульса 50 кВ, интервал следования импульсов 500 мкс, 2-й импульс в пачке; 1 – 0.03 торр, 2 – 0.3 торр, 3 – 3 торр; б – пары воды при давлении 3 торр, амплитуда импульса 33 кВ: 1 – интервал следования импульсов 100 мс, 10-й импульс в пачке; 2 – интервал следования импульсов 2 мс, 9-й импульс в пачке; 3 – интервал следования импульсов 2 мс, 6-й импульс в пачке; в – задержка начала свечения в различных газах в зависимости от давления.

В частности, в молекулярном азоте характерное время потерь энергии электронами в широком диапазоне от 1 до 100 эВ, согласно табличным дан-

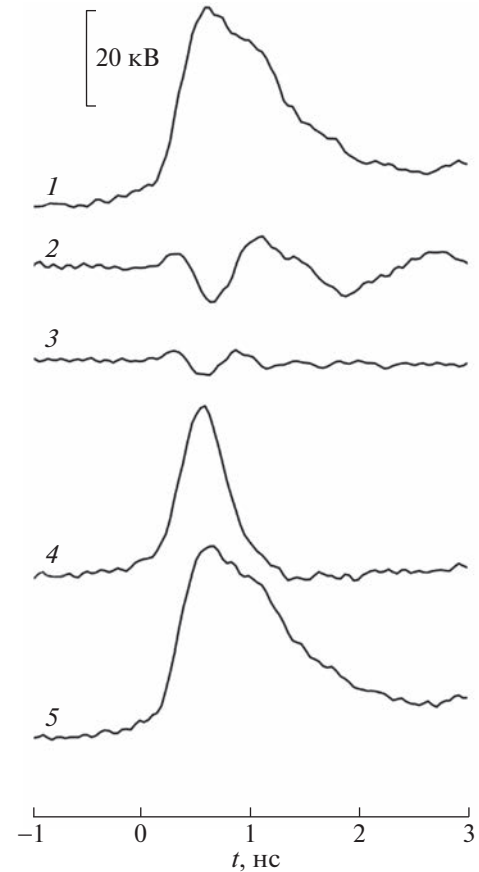


Рис. 4. Волновые формы ЭМИ с начальной амплитудой 50 кВ после прохождения полосковой линии длиной 4 м при различных давлениях воздуха (торр): 1 – 0.003, 2 – 0.03, 3 – 0.3, 4 – 3, 5 – 30. Интервал следования импульсов 500 мкс.

ным по сечениям столкновений [16], при типичных для эксперимента давлениях уровня 1 торр составляет величину порядка 1 мкс. В парах воды при тех же давлениях электроны теряют энергию как минимум на порядок быстрее.

Эффекты сильной трансформации формы ЭМИ, распространяющегося в разреженном газе, удастся наблюдать в экспериментах с линиями большой длины на стенде “Крот” при частотах повторения ЭМИ уровня 1 кГц и выше. Эти эффекты, подобно оптическому излучению, наблюдаются в определенном диапазоне давлений. На рис. 4 приводятся осциллограммы ЭМИ после прохождения трассы длиной 4 м в воздухе. Сопоставление экспериментальных результатов с проведенным методом конечных разностей во временной области (FDTD) численным моделированием показывает, что изменение формы ЭМИ в плазме, нарабатываемой в зазоре передающей линии, при давлениях уровня 10^{-2} – 10^{-1} торр обусловлено главным образом эффектами частотной дисперсии и отсечки. Для воздуха определяемая

из сопоставления результатов моделирования и эксперимента максимальная концентрация плазмы — около 10^9 см^{-3} при амплитуде импульса 50 кВ на входе в линию — достигается при давлениях порядка 0.3 торр. При более высоких давлениях (1–10 торр) искажения формы и потери энергии ЭМИ обусловлены в большей степени электронными столкновениями и изменением параметров плазмы в течение импульса; при этом, в частности, может наблюдаться заметное укорочение ЭМИ без существенного изменения амплитуды (см., например, кривую 4 на рис. 4).

Таким образом, полосковые линии являются достаточно удобными инструментами для экспериментального изучения нелинейных явлений, обусловленных, в первую очередь, ускорением электронов и нестационарной ионизацией в поле нано- и субнаносекундных импульсов, распространяющихся в форме ТЕМ электромагнитных волн, т.е. в условиях, приближенных к режиму их прохождения через атмосферу и ионосферу Земли. Эффекты нестационарной ионизации в поле мощных ЭМИ необходимо учитывать при разработке перспективных систем СШП радиосвязи с ионосферными каналами, космических систем мониторинга электромагнитной обстановки и т.д. Получаемые на лабораторных установках результаты можно использовать для развития моделей взаимодействия ЭМИ от природных и техногенных источников с околоземной средой, как на основе преобразований подобия [17], так и на прямую (без масштабирования), например — при моделировании перспективных излучателей ЭМИ для проведения натурных экспериментов в верхней атмосфере.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы работы выражают благодарность В.А. Терехину за поддержку работ в области взаимодействия мощных ЭМИ с газами и ценные дискуссии, М.В. Ефанову, А.Г. Люблинскому и А.С. Белову за предоставленную аппаратуру и ценные консультации, С.Ю. Корнишину, А.В. Котову, А.В. Кузину и В.Б. Воробьеву за изготовление полосковых линий, А.А. Шайкину за помощь в калибровке оптических датчиков, А.Н. Каткову за помощь в проведении измерений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект № 075-15-2020-790).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Starikovskaia S.M., Anikin N.B., Pancheshnyi S.V., Zatsepin D.V., Starikovskii A.Y.* Pulsed breakdown at high overvoltage: Development, propagation and ener-

gy branching // *Plasma Sources Science and Technology*. 2001. V. 10. № 1. P. 344–355.

2. *Белолютов Д.В., Тарасенко В.Ф., Сорокин Д.А.* Убегающие электроны при формировании положительной волны ионизации в азоте и воздухе // *Письма в ЖЭТФ*. 2022. Т. 116. № 5. С. 284–291.
3. *Ефанов М.В., Лебедев Е.Ф., Ульянов А.В., Федоров В.М., Шурупов М.А.* Излучательно-измерительный комплекс для исследования прохождения сверхширокополосных сигналов в атмосфере и ионосфере Земли // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 6. С. 877–884.
4. *Vikharev A.L., Ivanov O.A., Litvak A.G.* Nonequilibrium plasma produced by microwave nanosecond radiation // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1996. V. 24. № 2. P. 460–477.
5. *Гуревич А.В., Литвак А.Г., Вихарев А.Л., Иванов О.А., Борисов Н.Д., Сергейчев К.Ф.* Искусственная ионизованная область как источник озона в стратосфере // *УФН*. 2000. Т. 170. № 11. С. 1181–1202.
6. *Soloviyev A.A., Terekhin V.A., Tikhonchuk V.T., Altgilbers L.L.* Electron kinetic effects in atmosphere breakdown by an intense electromagnetic pulse // *Phys. Rev. E*. 1999. V. 60. № 6. P. 7360–7368.
7. *Golubev A.I., Sysoeva T.G., Terekhin V.A., Tikhonchuk V.T., Altgilbers L.L.* Kinetic model of the propagation of intense subnanosecond electromagnetic pulse through the lower atmosphere // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2000. V. 28. № 1. P. 303–311.
8. *Pusateri E.N., Morris H.E., Nelson E., Ji W.* Comparison of equilibrium ohmic and nonequilibrium swarm models for monitoring conduction electron evolution in high-altitude EMP calculations. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2016. V. 121. Issue 20. P. 11,884–11,899.
9. *Gombosi T.I., Baker D.N., Balogh A., Erickson P.J., Huba J.D., Lanzerotti L.J.* Anthropogenic space weather // *Space Science Reviews*. 2017. V. 212. Issue 3–4. P. 985–1039.
10. *Rodger C.J., Cho M., Clilverd M.A., Rycroft M.J.* Lower ionospheric modification by lightning-EMP: Simulation of the night ionosphere over the United States // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. № 2. P. 199–202.
11. *Carlile R., Cavalli A., Cramer W., Hyde R., Seidler W.* Absorption of energy from a large amplitude electromagnetic pulse by a collisionless plasma // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1979. V. 27. № 5. P. 596–603.
12. *Gushchin M.E., Korobkov S.V., Strikovskiy A.V., Aidakina N.A., Zudin I.Yu., Terekhin V.A., Terekhin A.V., Soldatov A.V., Belov A.S.* Transformation of an ultra-wideband electromagnetic pulse in the process of its propagation through a large laboratory plasma // *AIP Advances*. 2019. V. 9. № 12. P. 125051-1–125051-6.
13. *Айдакина Н.А., Галка А.Г., Гундорин В.И., Гуцин М.Е., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Костров А.В., Лоскутов К.Н., Могилевский М.М., Привер С.Э., Стриковский А.В., Чугунин Д.В., Янин Д.В.* Моделирование физических явлений в ионосфере и магнитосфере Земли на крупномасштабном плазменном стенде “Крот”: некоторые результаты и перспективы // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2018. Т. 58. № 3. С. 331–342.

14. Гойхман М.Б., Громов А.В., Гундорин В.И., Гуцин М.Е., Зудин И.Ю., Корнишин С.Ю., Коробков С.В., Котов А.В., Кузин А.В., Лоскутов К.Н., Палицин А.В., Стриковский А.В., Мареев Е.А. Идея и практическая реализация “гигантской” коаксиальной линии с плазменным заполнением для моделирования эффектов взаимодействия электромагнитных импульсов с частично ионизированной газовой средой // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 503. С. 3–7.
15. Евтушенко А.А., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Стриковский А.В., Мареев Е.А. Моделирование высотных разрядов на большой плазменной установке // Геомагнетизм и аэронавигация. 2020. Т. 60. № 3. С. 365–374.
16. Itikawa Y. Cross sections for electron collisions with nitrogen molecules // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2006. V. 35. № 1. P. 31–53.
17. Альвен Г., Фельтхаммар К. Космическая электродинамика. Основные принципы. М.: Мир, 1967. 260 с.

NONLINEAR PHENOMENA DURING THE PROPAGATION OF POWERFUL NANOSECOND ELECTROMAGNETIC PULSES IN A LARGE-SCALE STRIPE LINES WITH A GAS AT REDUCED PRESSURE

S. V. Korobkov^a, M. E. Gushchin^a, A. V. Strikovskiy^a, I. M. Vershinin^a, I. Yu. Zudin^a,
K. N. Loskutov^a, A. S. Nikolenko^a, A. V. Palitsin^a, A. V. Gromov^a,
M. B. Goykhman^a, and Academician of the RAS E. A. Mareev^a

^a Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Experiments of propagation of the high-power high-voltage nanosecond and subnanosecond pulses in large-scale transmitting lines in various gases make it possible to solve a wide range of fundamental and applied problems, from simulating the propagation of electromagnetic pulses (EMP) through the atmosphere to estimating the electrical strength of elements of pulsed high-voltage gas-filled systems. At the IAP RAS, experiments with stripe lines up to 5 m in length are performed in Krot and Sprite devices. During the propagation of EMP with an electric field strength up to 100 kV/m in a low pressure gas, the effects are observed such as the formation of non-uniform and essentially non-stationary glow, nonlinear absorption and dispersion transformation of the shape of high-power pulses, due to gas ionization in the EMP field.

Keywords: ultrawideband electromagnetic pulse (UWB EMP), plasma, laboratory, simulation, atmosphere, ionosphere