

УДК 533.9.07,537.874

## ИДЕЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ “ГИГАНТСКОЙ” КОАКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ С ПЛАЗМЕННЫМ ЗАПОЛНЕНИЕМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ЧАСТИЧНО ИОНИЗИРОВАННОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДОЙ

© 2022 г. М. Б. Гойхман<sup>1</sup>, А. В. Громов<sup>1</sup>, В. И. Гундорин<sup>1</sup>, М. Е. Гущин<sup>1,\*</sup>, И. Ю. Зудин<sup>1</sup>,  
С. Ю. Корнишин<sup>1</sup>, С. В. Коробков<sup>1</sup>, А. В. Котов<sup>1</sup>, А. В. Кузин<sup>1</sup>, К. Н. Лоскутов<sup>1</sup>, А. В. Палицин<sup>1</sup>,  
А. В. Стриковский<sup>1</sup>, член-корреспондент РАН Е. А. Мареев<sup>1</sup>

Поступило 23.12.2021 г.  
После доработки 23.12.2021 г.  
Принято к публикации 28.12.2021 г.

Для лабораторного моделирования явлений, возникающих при распространении сверхширокополосных электромагнитных импульсов (СШП ЭМИ) в атмосфере и ионосфере Земли, предложена и реализована концепция крупномасштабной (“гигантской”) коаксиальной линии, которая заполняется частично ионизированной плазмой и возбуждается генератором наносекундных импульсов. Линия позволяет воспроизводить эффекты трансформации формы СШП ЭМИ за счет дисперсии и нелинейных эффектов в плазме, в том числе при наличии внешнего магнитного поля. Характеристики линии продемонстрированы в вакуумной камере крупномасштабного плазменного стенда “Крот”.

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

**DOI:** 10.31857/S2686740022020067

Вопросы взаимодействия электромагнитных импульсов (ЭМИ) с плазмой [1] представляют большой интерес, в первую очередь в связи с явлениями, которые могут развиваться в верхних слоях атмосферы и ионосфере при быстропротекающих геофизических событиях, служащих источниками ЭМИ, включая молниевые разряды [2–4]. Влияние плазмы на распространение ЭМИ (такие как дисперсия, рассеяние на неоднородностях фоновой ионизации и нестационарная дополнительная ионизация в поле мощных ЭМИ) необходимо учитывать при разработке перспективных систем сверхширокополосной (СШП) радиосвязи с ионосферными каналами, космических систем мониторинга электромагнитной обстановки и т.д.

Лабораторное моделирование считается одним из перспективных подходов, позволяющих не только определить качественную картину физических явлений, но и верифицировать разрабо-

тываемые модели за счет использования должным образом обоснованного набора критериев подобия [5]. Сегодня наносекундный диапазон длительностей достаточно хорошо освоен технически и обеспечен приборами для возбуждения и осциллографической регистрации СШП ЭМИ, включая датчики для прямых измерений электрических и магнитных полей. Вместе с тем, необходимость воспроизведения в лаборатории условий распространения ЭМИ, близких к распространению в околоземной среде в широком диапазоне давлений и концентраций электронов, накладывает жесткие (или даже экстремальные) ограничения на минимальный размер вакуумной камеры. Чтобы приблизить условия взаимодействия ЭМИ с лабораторной плазмой к таковым в ионосфере, необходимо, с одной стороны, организовать большую трассу прохождения ЭМИ через ионизированный газ, с другой – обеспечить достаточную протяженность и однородность фоновой ионизации в плоскости поляризации ЭМИ, распространяющегося в форме квазипоперечной электромагнитной волны.

Согласно оценкам из работы [6], для наблюдения дисперсионной трансформации ЭМИ с дли-

<sup>1</sup>Институт прикладной физики  
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия  
\*E-mail: mguschin@ipfran.ru

тельностью порядка 1 нс длина лабораторной плазмы должна составлять не менее нескольких метров. Но даже при наличии плазменного столба требуемой длины и диаметра возбудить ЭМИ в форме плоской, слаборасходящейся волны в плазме очень трудно. Например, поперечная неоднородность плазмы, облучаемой СШП ЭМИ из рупорной антенны, приводит к сильной рефракции электромагнитного излучения. Навязываемая вакуумной камерой волноводная дисперсия искажает спектр и форму СШП ЭМИ; также трудно бороться с переотражениями ЭМИ на стенках камеры, поскольку широкополосные радиопоглощающие материалы, эффективные на частотах ниже 1 ГГц и допустимые к применению в вакууме, должны занимать слишком большой объем. Возможно, в будущем будут созданы плазменные камеры объемом порядка 1000 м<sup>3</sup> и более, в которых эти проблемы удастся решить, в том числе за счет применения новых технологий безэхового покрытия. В более же компактных объемах, чтобы моделировать взаимодействия ЭМИ с предварительно ионизированной газовой средой на протяженной трассе, предпочтительней использовать направляющие структуры – передающие линии, поддерживающие распространение ЭМИ в ТЕМ моде. Передающая линия, в зазоре которой создается плазма, 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, которые могут быть воспроизведены в передающих линиях, относятся квазипоперечная поляризация ЭМИ, наличие плоского фронта, распространение со скоростью света в отсутствие плазмы. Такой подход был предложен в 1970-е годы в США и подтвердился успешными экспериментами с симметричными полосковыми линиями на небольших установках [7]. 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.

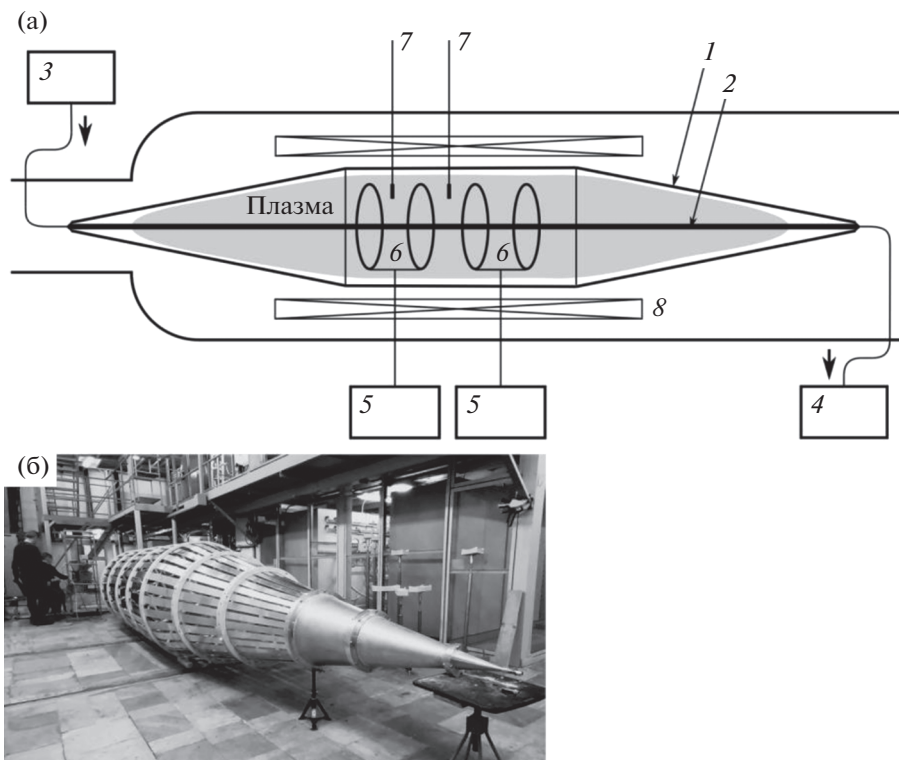
Крупномасштабный стенд “Крот” (ИПФ РАН) является одной из крупнейших плазменных установок России и мира [8]. На стенде возможно создание квазиоднородной плазмы в объеме до нескольких десятков кубических метров. Диаметр камеры стенда – 3 м; длина плазменной трассы, которую можно организовать для распространения электромагнитных волн – более 10 м. Начатые на стенде несколько лет назад эксперименты по моделированию взаимодействия СШП ЭМИ с плазмой позволили, с одной стороны, получить обнадеживающие результаты, с другой – выявили проблемы, включая нежелательные искажения формы ЭМИ и рефракционные потери энергии, возникающие при облучении попереч-

но ограниченного плазменного столба. Эта работа привела нас к концепции крупномасштабной (или “гигантской”) коаксиальной линии (ГКЛ) с плазменным заполнением, которая была создана на стенде “Крот” в 2021 г. (рис. 1).

Изготовленная ГКЛ имеет внешний диаметр 1.4 м и общую длину 10 м. Линия состоит из центральной (рабочей) секции цилиндрической геометрии длиной 3 м и двух секционированных конических переходов длиной 3.5 м каждый. Внешний проводник выполнен из продольных алюминиевых полос шириной 7.5 см, установленных в рабочей секции со щелями шириной 5 см. Внутренний проводник выполнен из дюралюминиевой трубы диаметром 8 см в центральной секции, соединяемой с коническими медными электродами в трансформирующих переходах. Импеданс рабочей секции линии в вакууме составляет 170 Ом. Жесткость линии обеспечивает каркас из капролоновых колец и спиц; всего в состав линии входит несколько сотен деталей. Выбор такой конструкции облегчает линию и предупреждает ее деформацию под собственным весом. При сборке линия тщательно юстируется. Щелевая геометрия внешнего проводника позволяет вводить в рабочее пространство линии индукторы для генерации плазмы и средства диагностики.

Линия возбуждается генератором наносекундных импульсов. Полностью собранные конические переходы заканчиваются адаптерами на соединители международного (N-тип) или отечественного (тип IV по ГОСТ 20265-83) стандартов с волновым сопротивлением 50 Ом, с использованием которых производится проверка и настройка линии, а также ее запитка наносекундными генераторами с умеренным (до 50 кВ) уровнем амплитуды выходного напряжения [9, 10]. Секционированное исполнение конических переходов позволяет подключать к линии импульсное оборудование на напряжение порядка и выше 100 кВ с коаксиальными линиями увеличенного диаметра, такое как, например, наносекундный генератор РАДАН [11]. Для устройств с выходным импедансом около 50 Ом коаксиальная линия служит повышающим трансформатором с коэффициентом трансформации по напряжению около 1.8. В зависимости от амплитуды напряжения, для регистрации параметров прошедшего ЭМИ выход линии подключается к регистрирующей аппаратуре либо напрямую, либо через широкополосный высоковольтный аттенюатор, либо через ответвитель той или иной конструкции.

Для пробоя напускаемого в камеру рабочего газа и заполнения линии плазмой используется система из четырех кольцевых антенн-индукторов диаметром 90 см, установленных по всей длине рабочего отрезка линии с интервалами 75 см. Индукторы подключаются к импульсным ВЧ-ге-

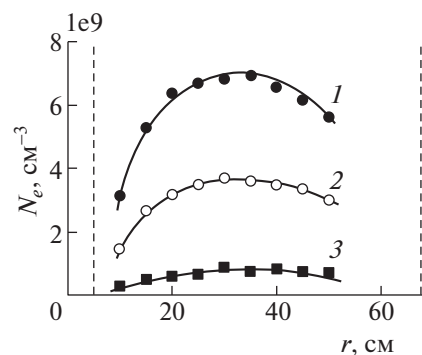


**Рис. 1.** а – Схема коаксиальной линии в камере стенда “Крот”: 1 – внешний проводник, 2 – внутренний проводник, 3 – генератор наносекундных импульсов, 4 – широкополосный осциллограф, 5 – ВЧ-генераторы плазмы, 6 – индукторы для пробоя рабочего газа, 7 – зонды, 8 – соленоид для создания внешнего магнитного поля; б – фотография коаксиальной линии перед ее установкой в вакуумную камеру.

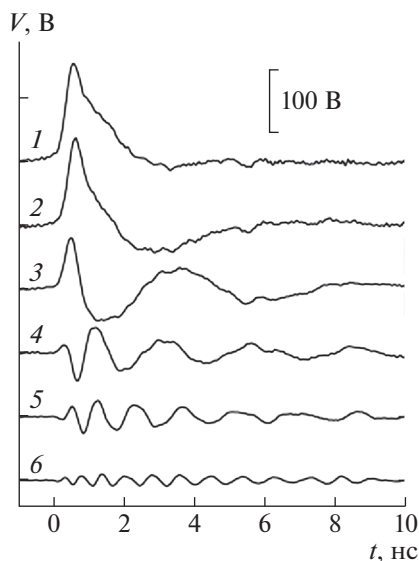
нераторам стенда “Крот”, работающим на частоте 5 МГц в импульсе длительностью 1 мс. Для создания плазмы с требуемыми для данной работы параметрами достаточно мощности генератора уровня 100 кВт. Периодичность включения системы создания плазмы – 1 раз в 20 с. Рабочая секция ГКЛ установлена в соленоид длиной 3.5 м и диаметром 1.5 м, позволяющий замагничивать плазму полем с индукцией до 1 кГс.

Эксперименты удобно проводить в распадающейся плазме, после выключения плазмозадающих генераторов. Приводимые в статье экспериментальные результаты были получены в аргоне при давлении  $5 \times 10^{-4}$  Торр. Для импульсов напряжения с длительностью порядка 1 нс концентрация электронов, при которых плазма оказывается прозрачной для сигнала, не превышает  $n_e \sim 5 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Без внешнего магнитного поля такие значения концентрации достигаются через несколько миллисекунд после окончания ионизирующего импульса. За это время плазма успевает достаточно однородно заполнить линию по всему ее сечению (рис. 2), температура электронов составляет порядка 0.2 эВ. На рис. 3 показаны сигналы на выходе ГКЛ при ее возбуждении однополярным импульсом амплитудой около 150 В (длительность по полувысоте 800 пс, фронт на-

растания 300 пс) для различных концентраций плазмы. Хорошо видна дисперсионная трансформация импульса в плазме, при которой низкочастотные составляющие задерживаются относительно высокочастотных. Представленные на рис. 4 спектры принимаемых сигналов демонстрируют, с



**Рис. 2.** Поперечное распределение концентрации распадающейся аргонной плазмы, заполняющей коаксиальную линию, полученное с помощью зонда с СВЧ-резонатором, в различные моменты времени после окончания ионизирующего импульса: 1 – 1.2, 2 – 1.7, 3 – 3.2 мс. Пунктиром указаны границы центрального и внешнего проводников коаксиальной линии.

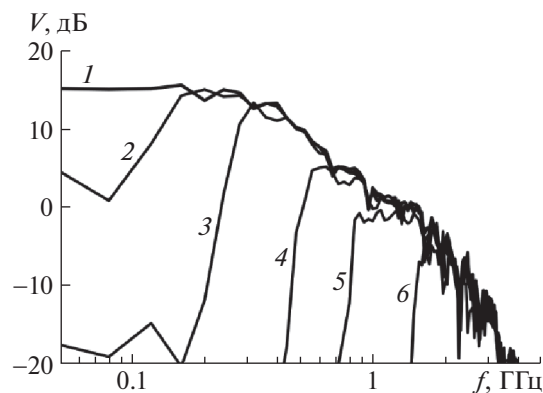


**Рис. 3.** Волновые формы ЭМИ после прохождения коаксиальной линии при различных значениях концентрации плазмы в рабочей секции ( $\text{см}^{-3}$ ): 1 – без плазмы, 2 –  $1.6 \times 10^8$ , 3 –  $4.3 \times 10^8$ , 4 –  $1.4 \times 10^9$ , 5 –  $3 \times 10^9$ , 6 –  $8.4 \times 10^9$ .

одной стороны, эффект отсечки, или запираания плазмой составляющих с частотами ниже плазменной частоты, с другой – отсутствие существенных потерь энергии импульса в полосе прозрачности плазмы для электромагнитного излучения, т.е. выше частоты отсечки. Другими словами, в полосе прозрачности плазма практически не отражает ЭМИ с заданными характеристиками и не поглощает его энергию.

В научном плане наибольший интерес представляют возможности ГКЛ как нового инструмента в части лабораторного моделирования нелинейных эффектов, развивающихся в поле мощных ЭМИ в наносекундном диапазоне длительностей на рекордно больших – до 10 м – пространственных масштабах.

Размеры линии позволяют исследовать трансформацию формы ЭМИ в частично ионизированном газе, обусловленную и дисперсией, и нелинейными эффектами. При высоких уровнях амплитуды ЭМИ – от нескольких единиц до нескольких сотен киловольт ГКЛ будет использоваться для моделирования процессов нестационарной ионизации газовых сред [12, 13] в зависимости от их состава, давления и начальной концентрации электронов, включая верификацию соответствующих моделей [14]. ГКЛ имеет перспективы применения в качестве плазменной дисперсионной линии для управления формой и амплитудой ЭМИ при испытаниях техники.



**Рис. 4.** Частотные спектры ЭМИ, представленные на рис. 3, для тех же значений концентрации плазмы в линии.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы работы выражают благодарность В.А. Терехину за поддержку идеи ГКЛ и ценные дискуссии, А.С. Белову, А.Г. Люблинскому и В.В. Неуструеву за предоставленную аппаратуру и ценные консультации, А.А. Батурину, А.Г. Галке и М.А. Гурьяшову за сборку изделия, а также И.М. Вершинину, А.Н. Каткову, В.В. Кочедыкову и И.А. Петровой за помощь в проведении эксперимента.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев Ю.В., Стрелков Г.М. Распространение сверхширокополосного радиоимпульса в холодной плазме // ДАН. 2006. Т. 408. № 6. С.754–757.
2. Rowland H.L., Fernsler R.F., Huba J.D., Bernhardt P.A. Lightning driven EMP in the upper atmosphere // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22. № 4. P. 361–364.
3. 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.
4. 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.
5. Альев Г., Фельтхаммар К. Космическая электродинамика. Основные принципы. М.: Мир, 1967. 260 с.
6. 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-wide-band electromagnetic pulse in the process of its propagation through a large laboratory plasma // AIP Advances. 2019. V. 9. № 12. P. 125051–1 – 125051–6.
7. Carlile R., Cavalli A., Cramer W., Hyde R., Seidler W. Absorption of energy from a large amplitude electro-

- magnetic pulse by a collisionless plasma // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1979. V. 27. № 5. P. 596–603.
8. 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 аэрономия. 2018. Т. 58. № 3. С. 331–342.
  9. Lyublinsky A.G., Korotkov S.V., Aristov Y.V., Korotkov D.A. Pulse power nanosecond-range DSRD-based generators for electric discharge technologies // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. V. 41. № 10. P. 2625–2629.
  10. Efanov V.M., Efanov M.V., Komashko A.V., Kriklenko A.V., Yarin P.M., Zazoulin S.V. High-voltage and high-PRF FID pulse generators // Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics. 2010. V. 9. P. 301–305.
  11. Mesyats G.A., Korovin S.D., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I. The RADAN series of compact pulsed power generators and their applications // Proc. of the IEEE. 2004. V. 92. № 7. P. 1166–1179.
  12. Solovyev 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.
  13. 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.
  14. 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. Iss. 20. P. 11884–11899.

## IDEA AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE “GIGANTIC” PLASMA FILLED COAXIAL LINE FOR MODELING THE INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC PULSES WITH IONIZED GAS MEDIUM

**M. B. Goykhman<sup>a</sup>, A. V. Gromov<sup>a</sup>, V. I. Gundorin<sup>a</sup>, M. E. Gushchin<sup>a</sup>, I. Yu. Zudin<sup>a</sup>, S. Yu. Kornishin<sup>a</sup>, S. V. Korobkov<sup>a</sup>, A. V. Kotov<sup>a</sup>, A. V. Kuzin<sup>a</sup>, K. N. Loskutov<sup>a</sup>, A. V. Palitsin<sup>a</sup>, A. V. Strikovskiy<sup>a</sup>, and Corresponding Member of the RAS E. A. Mareev<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

The concept of a large-scale (“gigantic”) coaxial line, which is filled with partially ionized plasma and excited by a nanosecond pulse generator, is proposed and implemented. The line is developed for the laboratory modeling of the propagation of ultra-wideband electromagnetic pulses (UWB EMP) in the atmosphere and ionosphere of the Earth. The line makes it possible to study UWB EMP transformation effects due to dispersion and nonlinear effects in plasma, including in the presence of an external magnetic field. The characteristics of the line are demonstrated in the vacuum chamber of a large-scale “Krot” device.

*Keywords:* ultra-wideband electromagnetic pulse, plasma, laboratory simulation, ionosphere