ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. ФИЗИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ, 2023, том 509, с. 9–14

ФИЗИКА

УДК 537.8

ПРЯМОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПРОХОЖДЕНИЮ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ СУБНАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2023 г. Член-корреспондент РАН С. В. Гарнов[1], член-корреспондент РАН В. Д. Селемир[2], В. В. Букин[1], Д. А. Горбенко[3], Т. В. Долматов[1], В. С. Жданов[2], М. В. Ефанов[3], Е. Ф. Лебедев[3,*], В. Е. Осташев[3], А. В. Семенов[2], А. В. Ульянов[3], В. М. Федоров[3], М. А. Шурупов[3]

Поступило 23.11.2022 г.
После доработки 23.11.2022 г.
Принято к публикации 25.11.2022 г.

Представлены результаты первых прямых экспериментов по прохождению импульсов сверхширокополосного излучения субнаносекундной длительности в атмосфере Земли на дистанции более 10 км. В отличие от расчетных работ показано сохранение амплитудно-временной формы импульсов в процессе увеличения дистанции. Установление этого факта имеет определяющее значение при практическом применении сверхширокополосных импульсов в новых технологических разработках.

Ключевые слова: сверхширокополосные импульсы излучения, распространение в атмосфере, деформация формы импульсов

DOI: 10.31857/S2686740023020062, **EDN:** UPHAAP

За последние 30 лет в единственной расчетной работе [1] был установлен факт значительной деформации амплитудно-временной формы сверхширокополосных (СШП) импульсов излучения с длительностью 50 пс и менее. Расчеты были выполнены с привлечением современных данных о спектральных свойствах паров воздушных масс и устанавливали факт заметного, до 30%, уширения таких импульсов на дистанции 10 км и почти вдвое больше на дистанции 20 км. Уширение импульса означает смещение высокочастотной границы его спектра в низкочастотную область. Одной из особенностей результата расчетов были незначительные колебания в течение 100 пс до и после появления основного сигнала, что, по-видимому, было обусловлено свойствами расчетной модели (рис. 1).

Экспериментальная проверка этих результатов оказалась возможной лишь в настоящее время, когда, благодаря усилиям инженеров и исследователей, в основном санкт-петербургской, уральской и томской школ электрофизиков, заметное развитие получили разработки быстродействующих полупроводниковых коммутаторов, мощных генераторов высоковольтных импульсов напряжения и излучателей на их основе [2–8]. Расширенному применению таких прибо-

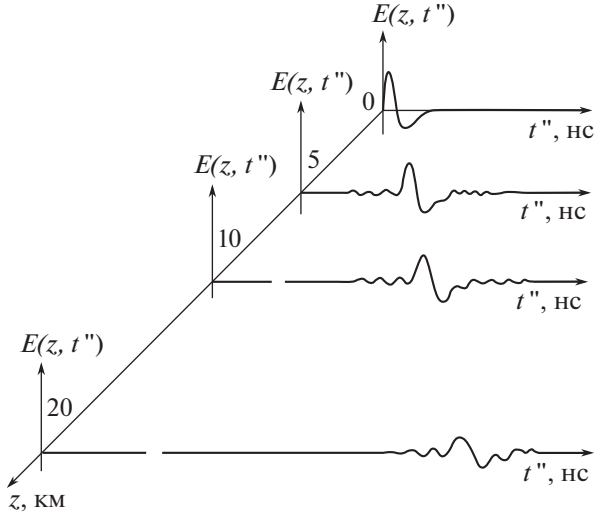

Рис. 1. Деформация импульса с начальной длительностью 50 пс при прохождении им атмосферы Земли в зависимости от расстояния до излучателя.

[1] *Федеральный исследовательский центр "Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук", Москва, Россия*
[2] *Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия*
[3] *Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия*
*****E-mail: lebedev@ihed.ras.ru*

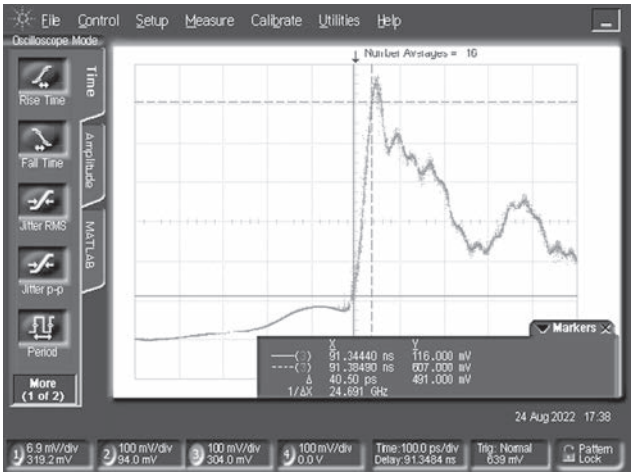

Рис. 2. Импульс напряжения генератора возбуждения СШП-антенны для полетных экспериментов.

ров для запитки лазеров и сверхширокополосных излучающих антенн способствовало серийное производство широкой номенклатуры генераторов высоковольтных импульсов с характерной скоростью изменения напряжения ~10^{15} В/с [9].

Масса модуля СШП-излучателя, построенного на основе генератора с пиковым напряжением 10 кВ и мощностью 2 МВт, составляет около 10 кг (вместе с антенной, аккумулятором на 20 мин автономной работы и блоком управления). Высокие удельно-весовые параметры СШП-излучателей позволяют размещать их на легких носителях для различных целей. Именно такой модуль оказался пригодным для использования в описываемом эксперименте. Основные сведения о созданных и проектируемых СШП-излучателях, в том числе объединенных в синхронизированные активные антенные решетки, изложены в [7, 8].

Из нескольких практически доступных вариантов реализации эксперимента по исследованию прохождения СШП-излучения в свободной атмосфере с минимальным влиянием земной поверхности при дальности наблюдения ~10 км, изложенных в [10], был выбран подъем СШП-излучателя на воздушном шаре. Шар перемещался воздушными потоками и удалялся от точки наблюдения параметров излучения.

Регистрация импульсов излучения осуществлялась двумя СШП-приемниками и цифровыми осциллографами реального времени типа с шириной частотной полосы регистрации до 16 ГГц. Один приемник размещался в 2 м от поверхности земли, другой – на привязном воздушном шаре. В процессе проведения эксперимента высота размещения этого приемника изменялась от 50 до 100 м в зависимости от силы ветра.

В состав канала регистрации импульсов излучения входили приемная СШП-антенна (длительность фронта переходной характеристики ≈27 пс, чувствительность 35 В/кВ/м), осциллограф (≈26 пс), N-разъем в тракте регистрации (≈20 пс), кабель связи антенны и осциллографа. Таким образом, длительность переходной характеристики использованного тракта регистрации напряженности импульсного поля СШП-излучения была на уровне 42–45 пс, т.е. имела значение,

Рис. 3. СШП-излучатели в корзине полетного шара.

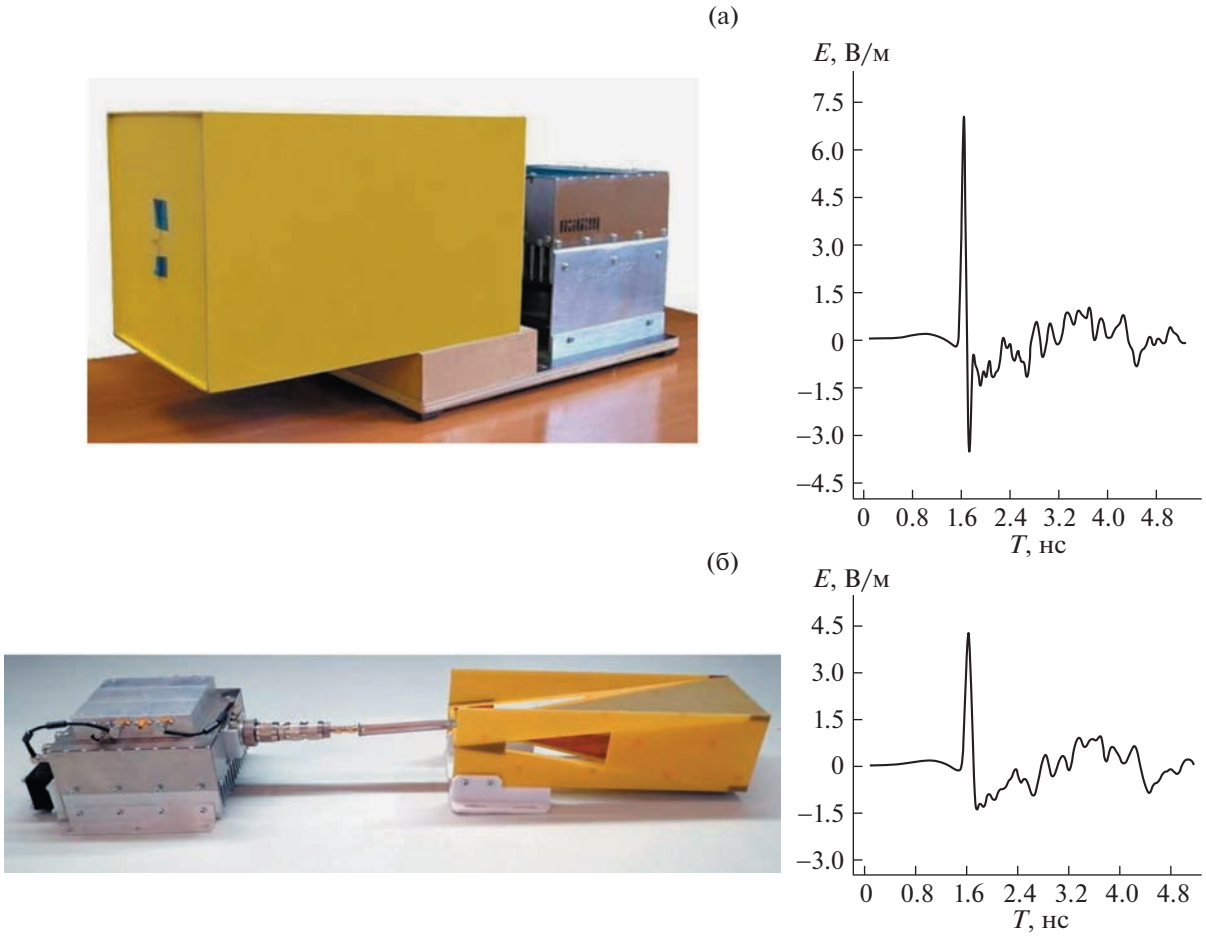

Рис. 4. СШП-излучатели и осциллограммы напряженности импульсного электрического поля излучения на дальности 2.8 км: *а* – излучатель № 1; *б* – излучатель № 2.

близкое к значению фронта импульса возбуждения антенн (≈50 пс). Если фиксировать длительность импульса излучения как длительность его фронтальной части на уровне половины амплитудного значения, то данный канал регистрации должен был отображать импульс длительностью 50 пс как импульс с длительностью 60–65 пс.

Генераторы сверхкоротких импульсов возбуждения на основе полупроводниковых коммутаторов генерировали выходные импульсы напряжения с длительностью фронта нарастания не более 50 пс. Типичный импульс выходного напряжения генератора с амплитудой ≈15 кВ показан на рис. 2.

В корзине полетного шара размещались два излучателя на двухосной поворотной платформе (рис. 3).

В предполетном тесте при точной взаимной ориентации осей диаграммы направленности антенн излучателя и приемника импульсы излучения действительно регистрировались как импульсы с длительностью 60–65 пс. В полете ориентиром прицеливания (визирования), как для антенны излучателя, так и для антенны приемника излучения, являлись воздушные шары и их корзины.

Фотографии СШП-излучателей и запись импульсов их излучения на удалении 2.8 км приведены на рис. 4.

Обработка осциллограмм, зарегистрированных средством измерения на основе СШП-антенны и быстродействующего цифрового осциллографа, размещенного на привязном шаре, показала, что статистически значимое отклонение ширины импульсов излучения наблюдается в пределах ±6% при удалении излучателя от регистратора на расстояние до 15 км. А в соответствии с [1], на расстояниях свыше 10 км уширение импульса должно быть не менее 30% (рис. 5).

Сигналы излучения с неизмененной длительностью фронтальной части импульса также были зарегистрированы и вторым СШП-приемником, расположенным в 2 м от поверхности земли, вплоть до нарушения прямой видимости излучателя из точки наблюдения.

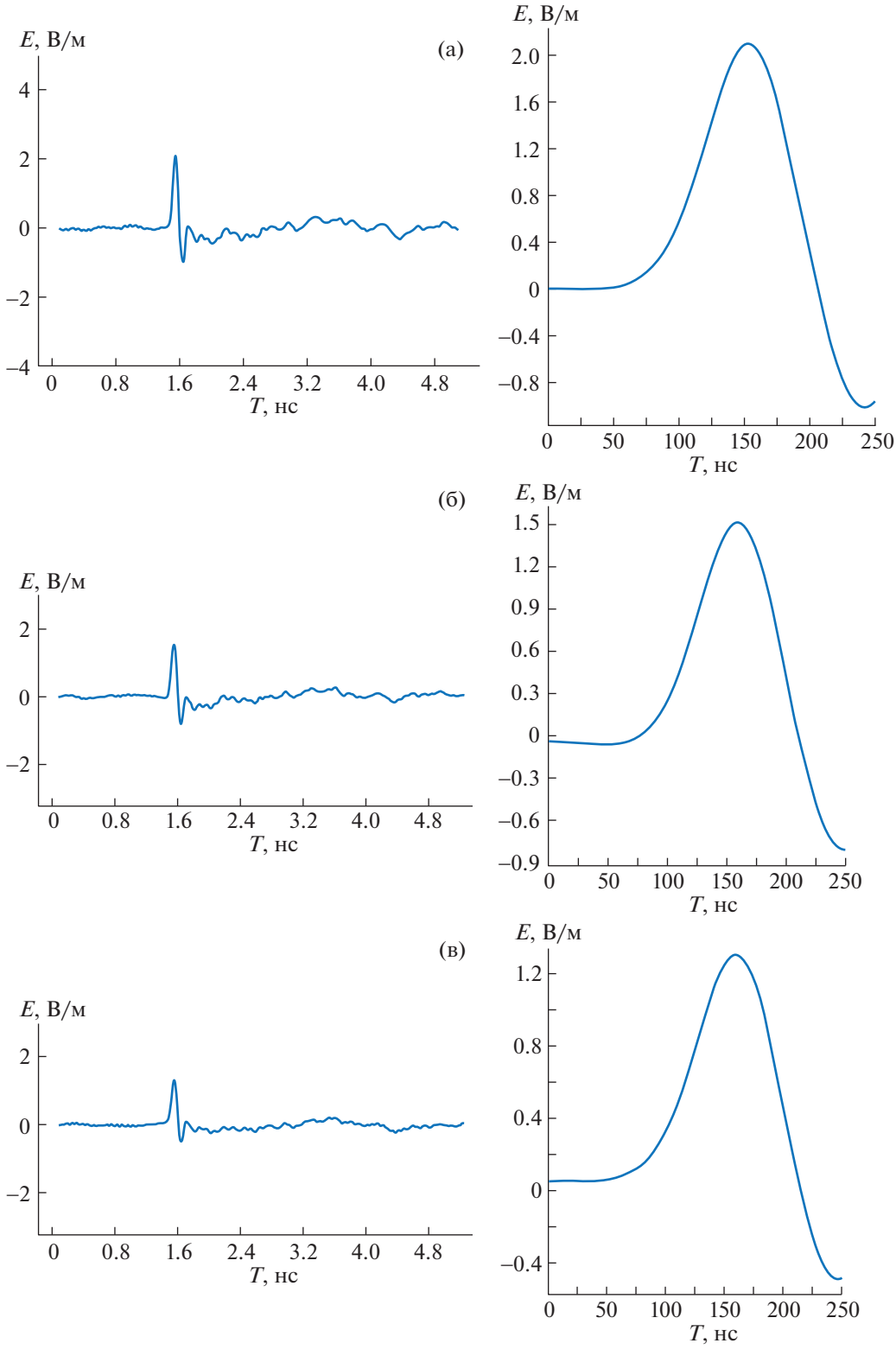

Рис. 5. Осциллограммы напряженности импульсного электрического поля излучения вертикальной поляризации на дальности 5.6 км и высоте подъема излучателей на 1 км (а); 10.3 км и 880 м (б); 13.5 км и 800 м (в); 14.3 км и 750 м (г). На (г) заметна синусоидальная помеха с периодом 2 нс (500 МГц) от какого-то радиотехнического средства. Слева – регистрация на осциллографе; справа – фронтальная часть сигнала в увеличенном масштабе.

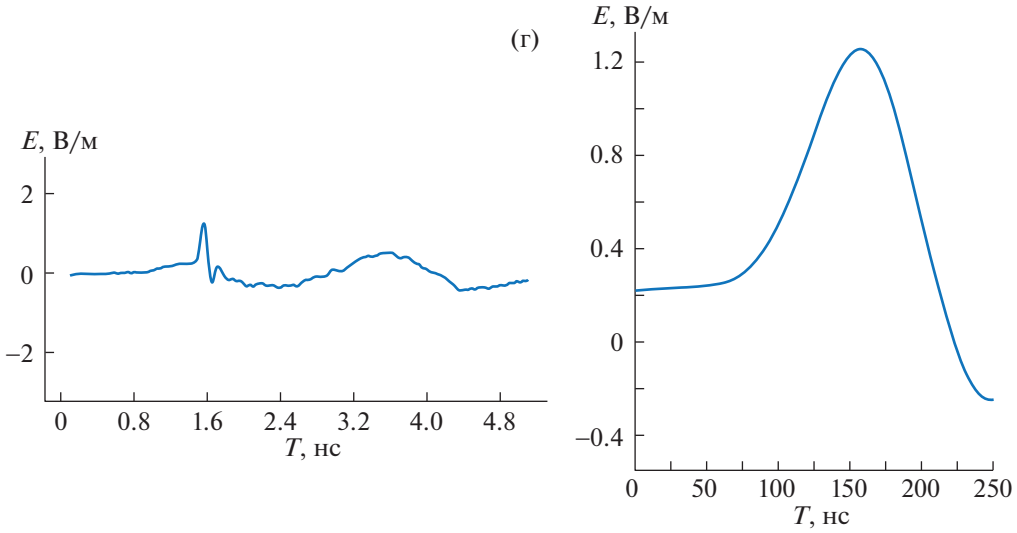

Рис. 5. Окончание

На рис. 6 представлены сводные экспериментальные данные, аналогичные тем, что представлены на рис. 5 (справа), от обоих излучателей по зарегистрированным импульсам излучения в терминах электродинамического потенциала $E \times R$, где E – напряженность электрического поля на расстоянии R. Все полученные результаты удовлетворяли каноническому критерию $E \times R =$ = const (в дальней зоне свободного пространства потенциал $E \times R$ не зависит от R). Фронтальные части импульсов были центрированы по максимальным значениям амплитуды $E \times R$ и нормированы на это значение.

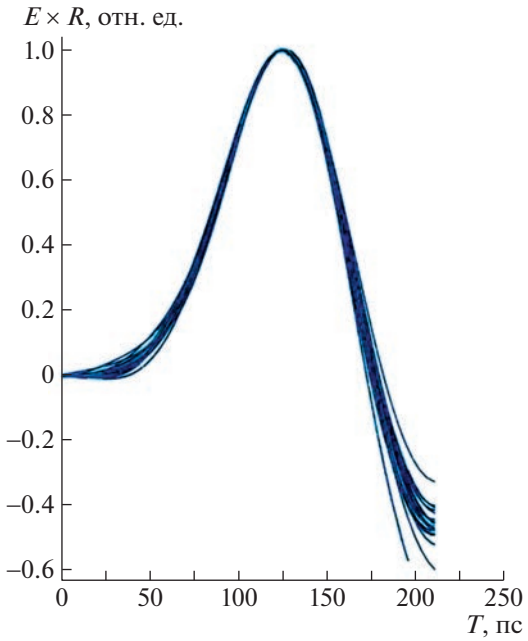

Рис. 6. Фронтальная часть сигналов излучения, зарегистрированных в полетных экспериментах на дальности от 0.6 до 14.3 км до излучателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально установлено, что СШП-импульсы излучения с фактической длительностью ≈50 пс (регистрируемая длительность 65–70 пс) не изменяют свою форму и длительность на расстоянии до 15 км от источника излучения. Полученный опыт может быть использован при практической постановке задачи по прохождению СШП-излучения сквозь слой ионосферы к земле с высоты порядка 300 км.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность старшему научному сотруднику РФЯЦ-ВНИИЭФ В.А. Логунову, ведущим инженерам ОИВТ РАН А.М. Мореву, П.А. Арсенову и к.т.н. В.Н. Воробьеву за подготовку эксперимента и его реализацию.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2020-790.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стадник А.М., Ермаков Г.В.* Искажения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в атмосфере Земли // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. Вып. 7. С. 1009–1016.
2. *Mesyats G.A., Rukin S.N., Shpak V.G., Yalandin M.I.* Generation of High-Power Sub-Nanosecond Pulses // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4 / Ed. E. Heyman, B. Mandelbaum, J. Shiloh. N.Y.: Plenum, 1999. P. 1–9.
3. *Грехов И.В., Месяц Г.А.* Полупроводниковые наносекундные диоды для размыкания больших токов // УФН. Т. 175. № 7. 2005. С. 735–744. https://doi.org/10.3367/UFNr.0175.200507c.0735
4. *Koshelev V.I., Gubanov V.P., Efremov A.M. et al.* High-Power Ultrawideband Radiation Source with Multielement Array Antenna // Proc. 13th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. 25–29 July. 2004. P. 258–261.
5. *Prather W.D., Baum C.E., Torres R.J. et al.* Survey of Worldwide High-Power Wideband Capabilities // IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. 2004. V. 46. № 3. P. 335–344. https://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831826
6. *Yalandin M.I., Luybutin S.K., Rukin S.N. et al.* Formation of Nano- and Subnanosecond Width High-PRF Powerful Voltage Pulses by Using a Hybrid Modulator Schemes // Proc. 13th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. 25–29 July. 2004. P. 153–156.
7. *Сахаров К.Ю.* Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров. М.: Моск. гос. ин-т электр. и мат., 2006. 159 с.
8. *Fedorov V.M., Efanov M.V., Ostashev V.Ye. et al.* Antenna Array with TEM-Horn for Radiation of High-Power Ultra Short Electromagnetic Pulses // Electronics. 2021. V. 10 (9). P. 1011. https://doi.org/10.3390/electronics10091011
9. *Efanov V.M.* Gigawatt All Solid State Nano- and Picosecond Pulse Generators for Radar Applications // Proc. 14th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Dallas, TX, 2003. P. 100.
10. *Ефанов М.В., Лебедев Е.Ф., Ульянов А.В. и др.* Излучательно-измерительный комплекс для исследования прохождения сверхширокополосных сигналов в атмосфере и ионосфере земли // Теплофиз. выс. темп. 2021. Т. 59. № 6. С. 877–884. https://doi.org/10.31857/S0040364421060028

DIRECT EXPERIMENT ON THE PASSAGE OF ULTRA-WIDEBAND PULSES OF SUBNANOSECOND DURATION IN THE EARTH'S ATMOSPHERE

Corresponding Member of the RAS S. V. Garnov[a], Corresponding Member of the RAS V. D. Selemir[b], V. V. Bukin[a], D. A. Gorbenko[c], T. V. Dolmatov [a], V. S. Zhdanov[b], M. V. Efanov[c], E. F. Lebedev[c], V. E. Ostashev[c], A. V. Semenov[b], A. V. Ulianov[c], V. M. Fedorov[c], and M. A. Shurupov[c]

[a] *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[b] *Russian Federal Nuclaer Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russia*

[c] *Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The results of the first direct experiments on the passage of pulses of ultra-wideband radiation of subnanosecond duration in the Earth's atmosphere at a distance of more than 10 km are presented. In contrast to the calculated work, the preservation of the amplitude-time shape of the pulses in the process of increasing the distance is shown. The establishment of this fact is of decisive importance in the practical application of ultra-wideband pulses in new technological developments.

Keywords: ultra-wideband radiation pulses, propagation throw the atmosphere, deformation of the pulse shape