

11.1

## Радиофизический метод исследования деформации сверхширокополосных импульсов при распространении в атмосфере

© В.В. Букин<sup>1</sup>, Т.В. Долматов<sup>1</sup>, М.В. Ефанов<sup>2</sup>, Е.Ф. Лебедев<sup>2</sup>, В.Е. Осташев<sup>2</sup>,  
А.В. Ульянов<sup>2</sup>, В.М. Федоров<sup>2</sup>, М.А. Шурупов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: lebedev@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 21 июля 2022 г.

В окончательной редакции 28 сентября 2022 г.

Принято к публикации 29 сентября 2022 г.

Проведены полевые эксперименты по измерению во временной области сверхширокополосных суб-наносекундных импульсов излучения с учетом влияния отражения от земной поверхности, результаты которых позволяют подготовить опыты в свободной атмосфере на реальных трассах длиной 10 км и более. Обосновано оптимальное по массогабаритным характеристикам и подъему на высоты до 1000 м техническое решение применения одноканального сверхширокополосного излучателя с длительностью импульсов около 50 ps и специально разработанной измерительной антенны в виде пассивной антенной решетки с высокой чувствительностью в качестве приемного измерительного канала.

**Ключевые слова:** сверхширокополосные импульсы, распространение в атмосфере, влияние отраженного сигнала.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.22.53801.19318

В последние годы благодаря усилиям инженеров и исследователей, в том числе электрофизиков Санкт-Петербургской и Томской школ, получили заметное развитие наносекундные коммутаторы мощных импульсов электрического тока [1–8]. Расширенному применению таких приборов нового поколения для запитки лазеров и сверхширокополосных (СШП) излучающих антенн способствует серийное производство широкой номенклатуры генераторов высоковольтных импульсов напряжения с длительностью фронта от десятков пикосекунд до единиц наносекунд [5].

Основная цель настоящей работы — проведение полевых экспериментов по исследованию распространения СШП-сигналов в реальных средах с учетом влияния отраженных от земли сигналов на малых дистанциях (до 100 м), а также сравнение полученных экспериментальных данных с разработанной расчетной моделью.

Масса излучающего СШП-модуля, построенного на современных генераторах напряжения (вместе с рупорной антенной, аккумулятором на 1200 с автономной работы и блоком управления), составляет около 10 кг. Такие удельно-весовые параметры СШП-излучателей позволяют размещать их на легких носителях для проведения самых различных экспериментов. Основные сведения о созданных и проектируемых СШП-излучателях, в том числе объединенных в синхронизированные активные антенные решетки, изложены в публикациях [8,9].

На основе таких приборов может быть создан излучающий СШП-модуль с длительностью импульсов около 50 ps, который необходим для проверки результатов расчетной работы [10], в которой получены данные о

заметной деформации СШП-импульсов на протяженных атмосферных траекториях начиная с длительностей менее 50 ps и дальностей 10 км и более. Объяснение данного эффекта связывается с наличием резонансной частоты поглощения в районе 22 GHz, что требует подтверждения, поскольку выше 10–12 GHz такие составляющие в спектре СШП-сигналов при длительности импульсов 50 ps очень малы.

Однако как раз такие длительности (50 ps и менее) имеют значение для практических приложений, в частности для зондирования почвенного покрова и льда с больших высот, а также из-за малых размеров апертур излучающих антенн. Прямые эксперименты по исследованию распространения таких СШП-импульсов в атмосфере отсутствуют.

Постановка и реализация экспериментов в атмосфере на многокилометровых расстояниях представляют собой достаточно сложную и дорогостоящую задачу. Последнее связано с необходимостью исключить (или по возможности уменьшить) влияние земной поверхности и ее неоднородностей на регистрируемые сигналы, что требует подъема оборудования и операторов на высоту в десятки и сотни метров.

Основные технические проблемы создания такой аппаратуры решены в работе [9]. Для использования в экспериментах в атмосфере и ионосфере созданы синхронизированные сборки СШП-модулей в виде активных антенных решеток размерностью  $1 \times 1$  (одиночный модуль, масса 10 кг),  $2 \times 2$  (четыре модуля, масса 50 кг) и  $3 \times 3$  (девять модулей, масса 100 кг) и специально разработанный измерительный квазирупор с чувстви-

тельностью, на два порядка большей, чем у широко известного [6] измерительного преобразователя на основе полосковой линии (ИППЛ). Созданное оборудование позволяет проводить эксперименты на дальностях 100 km и более.

В связи со стратификацией параметров атмосферы Земли с высотой первоначальные исследования целесообразно проводить вдоль земной поверхности по траектории с параметрами атмосферы, близкими к однородным. Возможно несколько альтернативных вариантов постановки экспериментов на километровые расстояния: с горы на другую гору (необходима организация экспедиции), с высоких зданий на высокие (необходимо разрешение на применение излучателя в городских условиях) и с применением аэростата в малонаселенной местности (этот вариант принят для дальнейшей реализации).

Необходимость одновременного подъема на двух аэростатах излучателя и измерителя на заметные высоты, на которых влияние земной поверхности было бы практически исключено, вносит дополнительные трудности взаимной юстировки диаграмм направленности излучателя и измерителя. Однако этот вариант обладает минимальными затратами и обеспечивает (что является главным в поставленной задаче корректного сравнения расчетных и экспериментальных данных) чистый из-за отсутствия влияния земли эксперимент.

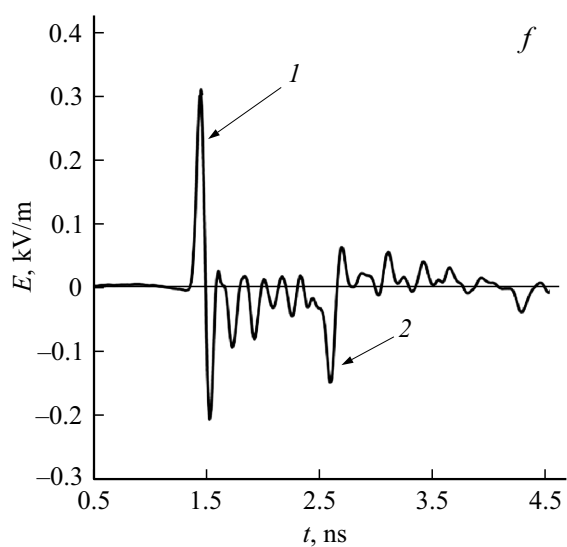
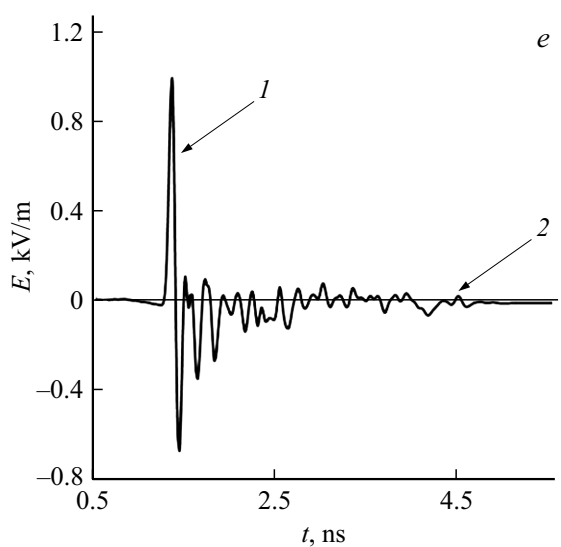
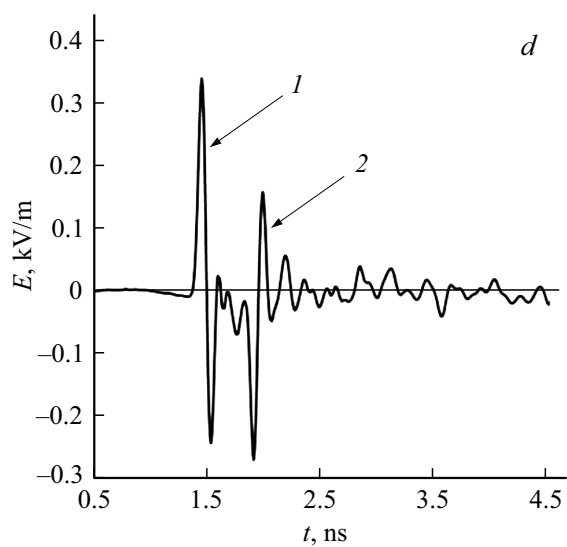
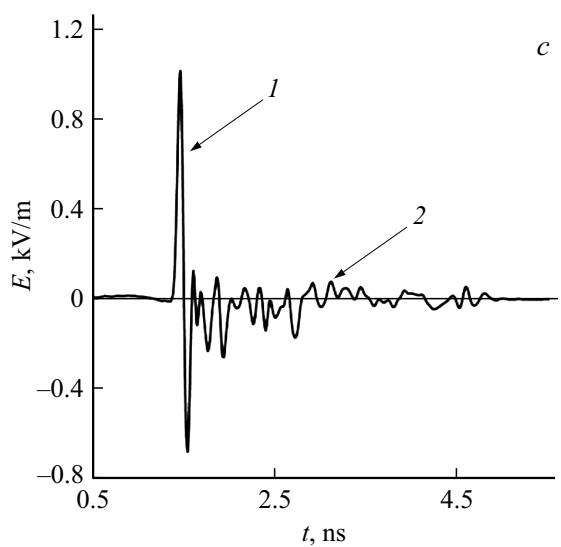
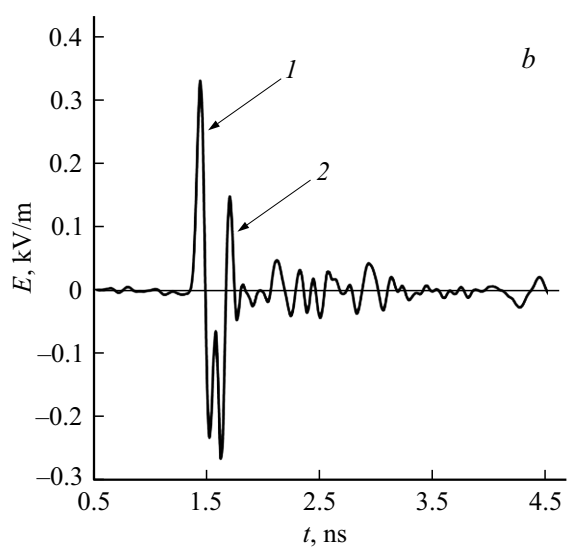
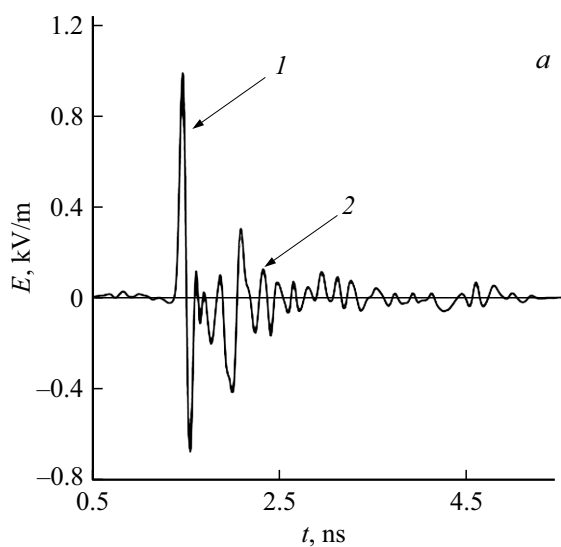
Основной задачей представленных далее экспериментов, проведенных в полевых условиях, являлось экспериментальное исследование влияния земной поверхности на регистрируемые сигналы в различных постановках (расстояние, высота расположения элементов, углы наклона и т. д.). Эти эксперименты являются предварительными перед проведением запланированных экспериментов на дистанцию 10 km, которые требуют дополнительного обоснования условий проведения опытов вследствие наличия не только расположенных вдоль трассы препятствий (лес, строения), но и кривизны поверхности земли. Для корректного сравнения с расчетами только натурный эксперимент сможет дать окончательный ответ на вопрос о том, насколько реальные условия соответствовали условиям прохождения СШП-импульсов в свободной атмосфере. Выполненные в настоящей работе опыты вдоль поверхности земли, проведенные в полевых условиях, даже на доступных дистанциях до сотни метров дали полезную информацию, поскольку можно было достаточно просто менять угол наклона продольных осей приемника и излучателя по отношению к горизонту, а также расстояние между элементами и высоту их расположения. Эксперименты проводились на ровном поле с очень редкой травой высотой до 0.2 m. Расстояние менялось от  $20.0 \pm 0.1$  до  $60.0 \pm 0.1$  m с шагом 10 m с юстировкой совмещения осей диаграмм направленности излучателя и измерителя. Изменение угла возвышения над горизонтом излучателя составляло от  $0.036 \pm 0.002$  rad на дистанции  $60.0 \pm 0.1$  m до  $0.107 \pm 0.002$  rad на дистанции  $20.0 \pm 0.1$  m. На основе осциллограмм полученных сигналов рассчитывались

спектральные характеристики импульсов излучения и их изменение в зависимости от условий опыта.

На рисунке приведено сравнение зарегистрированных осциллограмм импульсов СШП-излучения для разных условий, в том числе при одинаковой высоте размещения по отношению к поверхности земли приемника и излучателя:  $1.0 \pm 0.1$  m (максимальное влияние земли) и  $3.0 \pm 0.1$  m (минимальное влияние земли). Расчетное положение отраженного от земли сигнала (см. рисунок, *a, c, e*) определялось с помощью двумерного компьютерного кода разработки Осташева [11]. Данный код предназначен для прогноза основных параметров и характеристик СШП-излучений, генерируемых плоскими апертурными раскрывами с неоднородным и несинхронным возбуждением, в том числе многоэлементными синхронными антенными решетками. Код дополнен блоком расчета излучений с учетом отражения от плоских подстилающих поверхностей с электрической проницаемостью, большей единицы. Этот блок учитывает особенности формирования отраженных СШП-сигналов и позволяет оценить их влияние на сигналы, регистрируемые на оси диаграммы СШП-излучения.

При регистрации осциллограмм в качестве первичного датчика использован датчик типа ИППЛ с чувствительностью  $0.38 \pm 0.01$  V/(kV · m). Регистрация осциллограмм проводилась с использованием усреднения по 1000 захватам. Из осциллограммы, показанной на рисунке, *a*, видно, что отраженный от земли сигнал отрицательной полярности на дистанции  $20.0 \pm 0.1$  m имеет амплитуду около 40% от прямого сигнала, а по расчетной модели отстает от него на время около 1 ns. С дальнейшим увеличением расстояния отраженный импульс продолжает „догонять“ передний фронт импульса и сначала приводит к увеличению отрицательной полуволны по отношению к положительной, а затем начинает уменьшать амплитуду положительной полуволны, как это видно из осциллограммы на рисунке, *b*. При реализуемом на дальности 20 m угле возвышения около  $0.107 \pm 0.002$  rad (см. рисунок, *c*) диаграмма направленности излучателя располагается достаточно высоко над поверхностью земли и сигнал содержит незначительную информацию об отраженном сигнале (два отрицательных всплеска с задержкой 0.5 и 1 ns с амплитудами 20 и 10%). Во всех трех режимах на дальности 20 m амплитуды прямых сигналов практически одинаковы и составляют  $1.00 \pm 0.05$  kV/m. Расчетные спектры сигналов отличаются незначительно.

При увеличении дистанции облучения до  $60.0 \pm 0.1$  m (см. рисунок, *b, d, f*) амплитуда сигналов естественно уменьшается до  $0.30 \pm 0.05$  kV/m. При угле возвышения  $0.036 \pm 0.002$  rad, реализуемом на этой дистанции (см. рисунок, *d*), отраженный сигнал, несмотря на возросшую до 80% амплитуду, не мешает регистрации прямого сигнала, располагаясь на оси времени примерно на 0.2 ns позднее. В то же время при размещении излучателя и измерителя на высоте  $1.0 \pm 0.1$  m (см. рисунок, *b*) отраженный сигнал уже начинает искажать



Зарегистрированные на дистанциях 20 (a, c, e) и 60 м (b, d, f) импульсы напряженности электрического поля при следующих высотах расположения излучателя  $h_R$  и сенсора  $h_S$ : a, b —  $h_R = h_S = 1$  м; c, d —  $h_R = 1$  м,  $h_S = 3$  м; e, f —  $h_R = h_S = 3$  м. 1 — прямой сигнал, 2 — отраженный (для дистанции 20 м расчетное положение).

прямой сигнал, мешая корректной регистрации. При прохождении сигнала на высоте  $3.0 \pm 0.1$  м отраженный сигнал отстоит от прямого на 0.5 ns.

Несмотря на возможность регистрации основного импульса СШП-сигнала без значительных искажений, описанная конфигурация существенно влияет на спектральные характеристики регистрируемых импульсов. Наличие даже незначительного отраженного сигнала (30–40% от максимальной амплитуды) трансформирует спектр из широкополосного в полосо-линейчатый. При распространении излучения на высоте  $1.0 \pm 0.1$  м начинают формироваться высокочастотные (6–9 GHz) составляющие спектра. При излучении на высоте  $3.0 \pm 0.1$  м формируется до десятка полос шириной около 500 MHz каждая. Последнее является следствием появления на временной оси отдельно расположенного отраженного сигнала, что, как указано выше, приводит к модификации спектра из сплошного в полосатый. Расстояние между спектральными линиями обратно пропорционально их периоду во временной области.

Полученные данные позволяют скорректировать постановку эксперимента на больших дальностях в части, касающейся расположения излучателя и приемника, а также высот возвышения системы излучатель–приемник, с целью минимизации влияния отраженного от земли сигнала и внушают оптимизм при реализации полевых опытов на дальность 10 km. Влияние земли может быть заметно уменьшено при угле возвышения 0.1 rad и более, что на практике может реализоваться при подъеме излучателя на высоту 1000 м. Для экспериментов на больших расстояниях влияние будет оказывать также естественный рельеф местности. Все это предстоит предусмотреть и уточнить в подготовленных полевых экспериментах.

## Финансирование работы

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

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] И.В. Грехов, Г.А. Месяц, УФН, **175** (7), 735 (2005). DOI: 10.3367/UFN.0175.200507c.0735 [I.V. Grekhov, G.A. Mesyats, Phys. Usp., **48** (7), 703 (2005). DOI: 10.1070/PU2005v048n07ABEH002471].
- [2] И.В. Грехов, А.Ф. Кардо-Сысоев, Письма в ЖТФ, **5** (15), 950 (1979). [I.V. Grekhov, A.F. Kardo-Sysyoev, Sov. Tech. Phys. Lett., **5** (8), 395 (1979).].
- [3] G.A. Mesyats, S.N. Rukin, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, in *Ultra-wideband, short-pulse electromagnetics 4*, ed. by E. Heyman, B. Mandelbaum, J. Shiloh (Plenum, N.Y., 1999), p. 1.
- [4] W.D. Prather, C.E. Baum, R.J. Torres, F. Sabath, D. Nitsch, IEEE Trans. Electromagn. Compat., **46** (3), 335 (2004). DOI: 10.1109/TEMC.2004.831826
- [5] V.M. Efanov, in *Proc. on 14th IEEE Int. Pulsed Power Conf.* (Dallas, TX, USA, 2003), p. 100.
- [6] К.Ю. Сахаров, *Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров* (МИЭМ, М., 2006).
- [7] V.I. Koshelev, V.P. Gubanov, A.M. Efremov, S.D. Korovin, B.M. Kovalchuk, V.V. Plisko, A.S. Stepchenko, K.N. Sukhushinin, in *Proc. of 13th Int. Symp. on high current electronics* (Tomsk, Russia, 2004), p. 258.
- [8] V.M. Fedorov, M.V. Efanov, V.Ye. Ostashev, V.P. Tarakanov, A.V. Ul'yanov, Electronics, **10** (9), 1011 (2021). DOI: 10.3390/electronics10091011
- [9] М.В. Ефанов, Е.Ф. Лебедев, А.В. Ульянов, В.М. Федоров, М.А. Шурупов, Теплофизика высоких температур, **59** (6), 877 (2021). DOI: 10.31857/S0040364421060028
- [10] А.М. Стадник, Г.В. Ермаков, Радиотехника и электроника, **40** (7), 1009 (1995).
- [11] В.Е. Осташев, А.В. Ульянов, В.М. Федоров, Радиотехника и электроника, **65** (3), 234 (2020). DOI: 10.31857/S0033849420030134 [V.E. Ostashev, A.V. Ul'yanov, V.M. Fedorov, J. Commun. Technol. Electron., **65**, 234 (2020). DOI: 10.1134/S1064226920030134].