

# ПОЛЕВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЮСТИРОВКИ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ И ПРИЕМНИКА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДЕФОРМАЦИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В АТМОСФЕРЕ НА ДИСТАНЦИЯХ В ДЕСЯТЬ И БОЛЕЕ КИЛОМЕТРОВ

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

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

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

Статья поступила в редакцию 25.10.2022

Одобрена после рецензирования 26.12.2022

Принята к публикации 28.12.2022

## Аннотация

Проведены полевые эксперименты с целью обоснования допустимых углов рассогласования главных осей диаграмм направленности антенн излучателя и приемника при постановке прямых опытов по деформации сверхширокополосных субнаносекундных сигналов на дистанциях около десяти километров в свободной от влияния земной поверхности атмосфере. Установленные допустимые значения углов рассогласования до 5 градусов, а также данные о положениях помеховых сигналов, отраженных от земли, позволили принять необходимые конструктивные и организационные решения при проведении прямого эксперимента в атмосфере.

**Ключевые слова:** сверхширокополосный, прохождение сквозь атмосферу, влияние отраженного сигнала

---

## Введение

В подготовленных прямых экспериментах по деформации (изменению формы) сверхширокополосных (СШП) субнаносекундных импульсов при распространении в свободной от влияния земной поверхности атмосфере запланирован подъем приемника и излучателя на высоты до 100 и 1000 метров при дистанциях десять и более километров соответственно. Предварительные обоснования постановки такого эксперимента изложены в работе [1].

Кроме того, на результативность выполнения поставленной задачи влияют допустимые углы взаимной юстировки (рассогласования главных осей) диаграмм направленности излучателя и приемника сигналов. Также в связи с разными высотами их подъема необходимо экспериментально смоделировать и подкрепить расчетом формирование и положение на временной оси отраженного от земной поверхности импульса, который может помешать верной регистрации прямого сигнала.

Самые общие сведения о распространении субнаносекундных электромагнитных импульсов вдоль атмосферных трасс содержатся, в частности, в классических работах [2, 3, 4]. Некоторые разработки изложены в расчетных работах [5] - [8]. Однако они не имеют экспериментального подтверждения. Наиболее близкой по постановке к подготовленному эксперименту является расчетная работа [7], в которой после учета всех линий поглощения в стандартной атмосфере констатируется, что импульсы длительностью 50 пс начинают увеличивать свою длительность на дистанции 5-10 км и более из-за наличия линии поглощения на частоте 22 ГГц. Проверку этого важного для ряда практических приложений результата (в том числе измерения толщины ледового покрова и радиолокации высокого разрешения) предстоит провести в подготовленном высотном прямом эксперименте с постепенным увеличением дистанции с единиц до десятка километров.

---

\* Автор, ответственный за переписку: Евгений Фёдорович Лебедев, lebedev@ihed.ras.ru

## Постановка экспериментов и влияние земли

Описываемые в данной статье модельные полевые эксперименты проводились на ровном поле размером 100 x 60 м с редкой растительностью. Поверхность земли представляла собой относительно ровный практически горизонтальный участок, заросший разнородной травяной растительностью, скошенной на высоте 5-10 см от земли. Земля и растительность были достаточно влажными, так как накануне прошли небольшие дожди, а температура ночью и днем не поднималась выше точки росы. Излучатель с полушириной длительности импульса 70 пс и датчик импульсного электрического поля (измерительный преобразователь на основе полосковой линии – ИППЛ) вместе с осциллографическим приемником, имеющим полосу 16,5 ГГц, устанавливались на высоты до 3 метров.

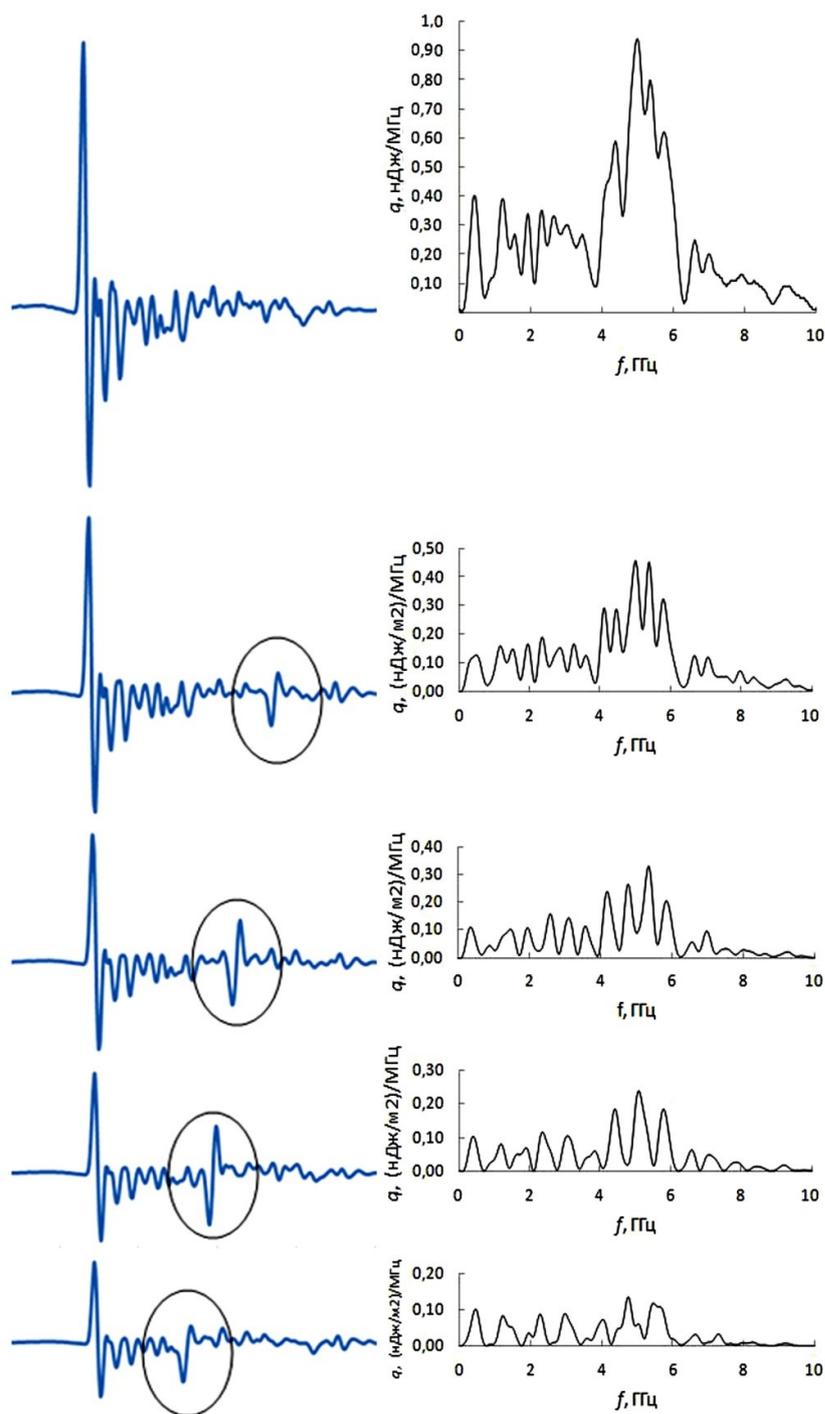
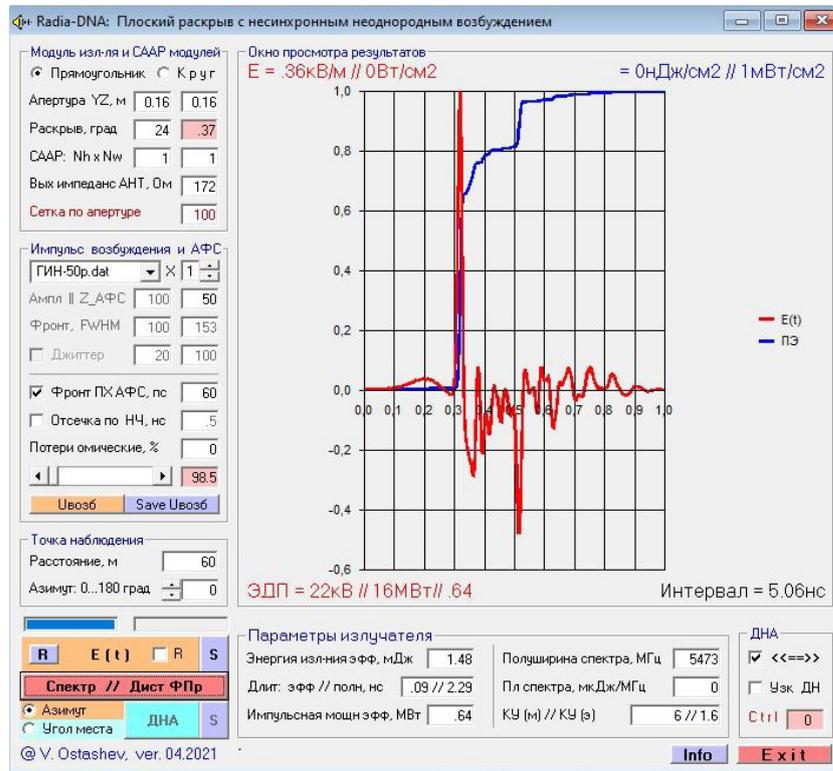


Рисунок 1 – Динамика формирования отраженного сигнала в импульсе излучения и соответствующие изменения в спектральной плотности энергии излучения с увеличением расстояния от 20 м последовательно до 30, 40, 50 и 60 м между излучателем и приемником при высоте их подъема над уровнем земли 3 м (выделен отраженный сигнал, временные и амплитудные масштабы для каждой осциллограммы одинаковы)

Дистанция между приемником и излучателем менялась от 20 до 60 метров с шагом 10 метров. Это позволило получить наглядную демонстрацию взаимного расположения на оси времени интересующего нас прямого сигнала и сигнала, отраженного от поверхности земли (рисунок 1). Из этих опытов следует, что на дистанции 20 метров отраженный импульс едва различим среди малых пульсаций общего сигнала, на 30 метрах он отчетливо регистрируется, а далее с ростом дистанции приближается к прямому сигналу и может помешать полезной регистрации.

Обработка полученных осциллограмм и сравнение с результатами расчетов доработанного компьютерного кода «Radia-DN», созданного В.Е. Осташевым для работы [1] на основе представлений геометрической оптики, показала хорошее совпадение. Данный код предназначен для расчета характеристик СШП-излучений, генерируемых плоскими апертурными раскрытиями с неоднородным и несинхронным возбуждением, в том числе многоэлементными синхронными антенными решетками. Проведенная доработка касалась введения блока расчета излучений с учетом отражения от поверхностей с коэффициентом относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  больше единицы. Этот блок учитывает особенности формирования отраженных СШП-сигналов и оценки их влияния на сигналы, регистрируемые по оси диаграммы СШП-излучения.



(а)



(б)

Рисунок 2 – Окна программы для ввода исходных данных для расчета и вывода результата вычислений напряженности электрического поля импульса излучения по оси диаграммы направленности на расстоянии 60 м (а) и окно учета отражений при высоте подъема излучателя и сенсора 3 м и  $\epsilon = 10$

Для верификации достоверности результатов вычислений с использованием вышеописанного блока программы расчета параметров сверхширокополосного излучения было проведено сравнение части экспериментальных данных натуральных измерений СШП-излучений от макета будущего излучателя, запланированного к использованию в летном эксперименте с аэростатом (воздушным шаром). Экспериментально на местности были зарегистрированы осциллограммы импульсного электрического поля на дальности от 20 до 60 м с шагом 10 м. При этом оси излучателя и приемника системы регистрации совпадали по направлению, были нацелены друг на друга и располагались на высоте 3 м от поверхности земли.

Ниже приведены основные результаты численного моделирования одного их сверхширокополосных сигналов, создаваемых СШП-излучателем на дальности 60 м при высоте 3 метра подъема излучателя и приемника. На Рис. 2 приведены рабочие окна программы расчета, на Рис. 3 – результаты расчета с различными значениями относительной диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности  $\varepsilon = 1, 7, 10$  и 30, на Рис. 4 – сравнение результатов расчета с отражением от поверхности с  $\varepsilon = 10$  и экспериментальных данных.

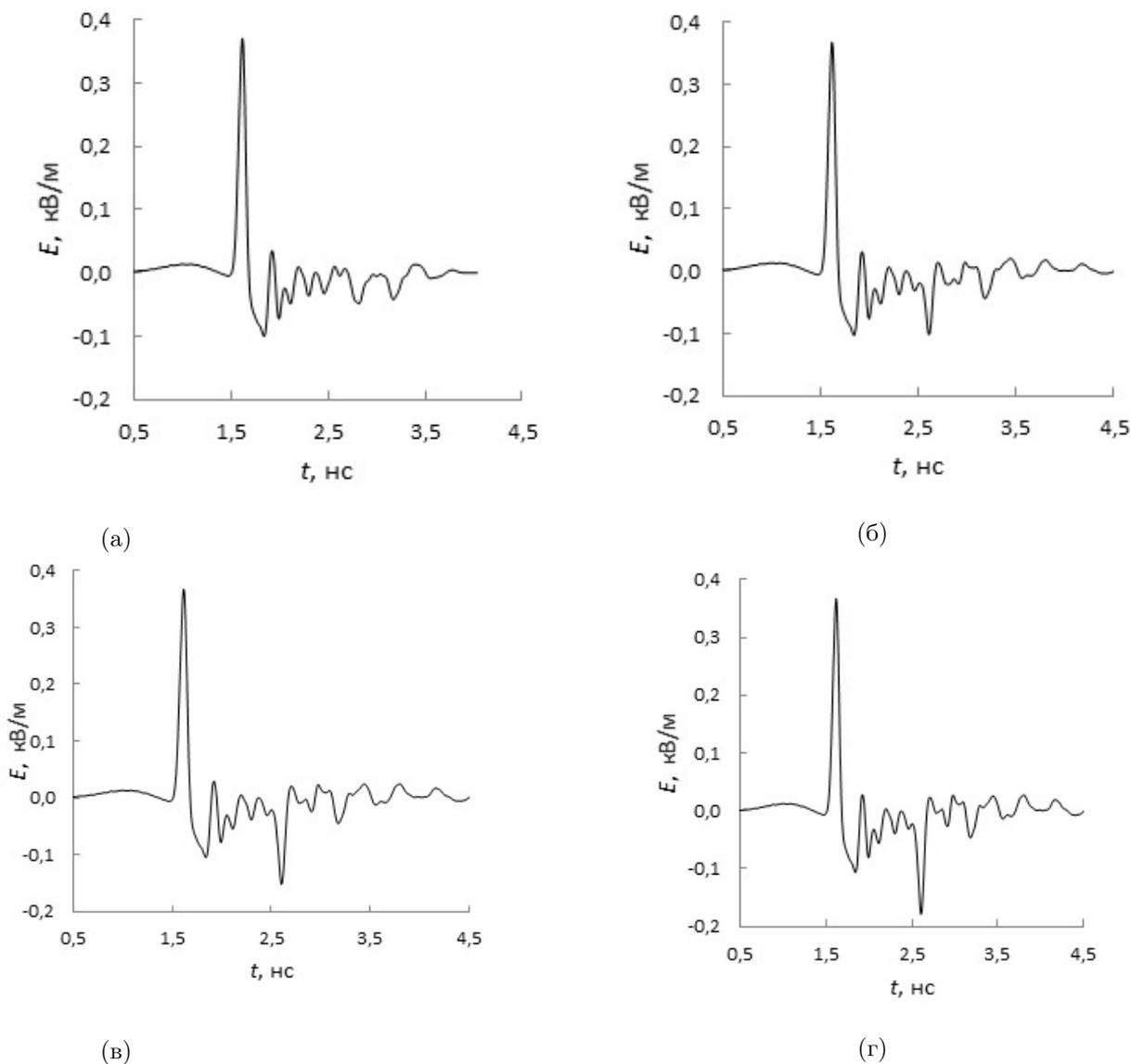


Рисунок 3 – Расчетная форма напряженности электрического поля импульса излучения по оси ДНА на расстоянии 60 м при высоте подъема излучателя и сенсора 3 м (а) – без отражения; (б) – с отражением,  $\varepsilon = 7$ ; (в) – с отражением,  $\varepsilon = 10$ ; (г) – с отражением,  $\varepsilon = 10$

В окне учета отражений сообщаются сведения о коэффициенте отражения, времени задержки отраженного сигнала, местоположении и размерах пятна проекции излучающей апертуры на отражающей поверхности.

Из сравнительного анализа приведенных расчетных и экспериментальных данных можно сделать

следующие выводы:

- время появления отраженного сигнала на соответствующих шкалах и характер этого сигнала как в расчетных вариантах, так и в эксперименте практически совпадают;

- наиболее близким к эксперименту по критерию равенства соотношения амплитуд первой (положительной) полуволны прямого сигнала и отраженного сигнала можно считать расчеты со значениями коэффициента относительной диэлектрической проницаемости земли от 10 до 15, что соответствует нижнему порогу для табличных величин коэффициента относительной диэлектрической проницаемости влажной почвы (10...30), а также соответствует реальным условиям эксперимента.

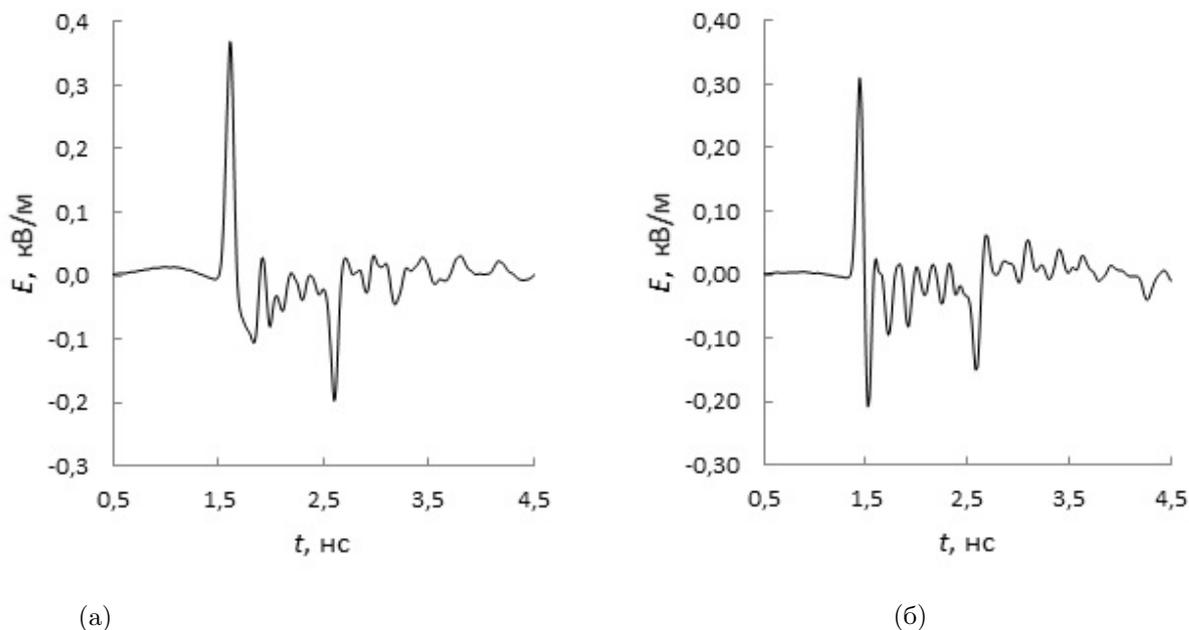


Рисунок 4 – Расчетная (а) для  $\epsilon = 15$  и зарегистрированная экспериментально (б) формы напряженности электрического поля импульса излучения по оси ДНА на расстоянии 60 м при высоте подъема излучателя и приемника 3 м

В дальнейших расчетах для почвенного слоя земли принято  $\epsilon = 12$ . Некоторые различия в амплитудных значениях и форме расчетных и экспериментальной кривых на Рис. 3 и Рис. 4 объясняются тем, что в модели не в полной мере учитываются потери в антенно-фидерном тракте. Модель дает завышенные примерно на 10 % значения величины электродинамического потенциала ( $E \times R$ ) излучателя по сравнению с экспериментом, где  $E$  – амплитуда напряженности импульсного электрического поля, а  $R$  – расстояние между излучателем и приемником. Также не в полной мере учитывается реальный профиль электродов рупора.

Представленные данные позволили дать обоснование постановке прямого эксперимента по выявлению истинной деформации импульса длительностью 70 пс на дистанции 10 км и более. Выбран вариант подъема приемника на высоту 100 метров и излучателя до 1000 метров (с шагом 100 метров на каждый километр дистанции), обеспечивающие условия свободного от влияния земной поверхности прохождения СШП-сигнала.

### Допустимые расхождения осей диаграмм направленности антенн излучателя и приемника

Представленные выше результаты позволили поставить специальный дополнительный эксперимент и получить обоснованный ответ на ключевой для экспериментов в реальной атмосфере вопрос о допустимом угле расхождения между осями диаграмм направленности излучателя и приемника. Он решался прямым измерением изменения амплитуды сигнала при отклонении антенн по горизонтали и по вертикали. Установлено, что при рассогласовании осей на углы до 5 градусов изменения формы сигналов и их амплитуды на осциллографе не были зарегистрированы, в связи с чем в полетных экспериментах применялись простые визирные трубы с углом разрешения 3 градуса.

## Заключение

В данной работе рассмотрены вопросы подготовки к проведению прямого полетного эксперимента с двумя воздушными шарами для проверки влияния приземной атмосферы на прохождение сверхширокополосных сигналов сверхкороткой длительности (около 60-70 пс на полувывоте от максимальной амплитуды). За основу взяты результаты полевых наземных измерений сигналов СШП-излучения на высотах размещения излучателя и приемника 3 м и дальностях от 20 до 60 м.

Было установлено, что при рассогласовании осей диаграмм направленности излучателя и приемника на углы не более 5 градусов, изменения формы сигналов и их амплитуды не были зарегистрированы. Такое же условие, обеспечивающее необходимую точность прицеливания, должно быть реализовано в подготавливаемом прямом эксперименте на дальность 10 км.

Полученные в представленных экспериментах данные позволяют обосновать решение о проведении прямых опытов при следующих условиях:

- расстояние между излучателем и приемником излучения от 1 км до 10 км;
- высота размещения осциллографического приемника – до 100 м;
- высота подъема шара с СШП-излучателем с удалением от шара с осциллографией должна пропорционально увеличиваться от 100 м до 1000 м для уменьшения влияния отраженного от земли сигнала;
- для юстировки осей диаграмм направленности излучателя и приемника можно использовать простейшие визирные трубы.

## Финансирование работы

Работе оказана финансовая поддержка грантом Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2020-790.

## Список литературы

- [1] 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 // Теплофизика высоких температур, 2021, том 59, вып.6, С. 877-884.
- [2] Розенберг В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. М.: Росгидромет, 1972. 348 с.
- [3] Кузелев М.В., Рухадзе А.А. К вопросу о расплывании импульсов в диссипативных и неравновесных средах // Известия Вузов, Радиофизика, т. 22, вып. 10, 1999. С. 1223.
- [4] Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. М.: Радио и связь, 1983. 223 с.
- [5] Наумов Н.Д., Никольский В.А. Влияние дождя на распространение радиоимпульсов // Успехи прикладной физики, 2017, вып.5 (общая физика), №1. С. 41-44.
- [6] Вечерук Г.В., Кондранин Т.В., Журавлев А.В. Исследование взаимодействия сверхширокополосных электромагнитных импульсов с вертикально стратифицированной атмосферой // Исследовано в России. Электр. журн. 2002. С. 1489.
- [7] Стадник А.М., Ермаков Г.В. Искажения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в атмосфере Земли // Радиотехника и электроника, 1995, том 40, вып.7. С.1009 – 1016.
- [8] Иванченко В.А., Николаев В.В. Особенности распространения сверхкоротких импульсов в среде загрязнитель-атмосфера // Письма в ЖТФ, 2000, том 26, вып.19. С. 96.

**Field experiments to substantiate the conditions of adjusting the radiation patterns of the radiator and receiver for studying of the deformation of ultra-wide-band subnanosecond pulses in the atmosphere at distances of ten kilometers or more**

**Bukin V.V.<sup>1</sup>, Dolmatov T.V.<sup>1</sup>, Efanov M.V.<sup>2</sup>, Lebedev E.F.<sup>2\*</sup>, Ostashev V.E.<sup>2</sup>, Ulianov A.V.<sup>2</sup>, Fedorov V.M.<sup>2</sup>, Shurupov M.A.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Academician A.M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\* lebedev@ihed.ras.ru

**Abstract**

Field experiments have been carried out to substantiate the permissible mismatch angles of the radiation patterns of the emitter antennas and the receiver. These data are needed when direct experiments on the deformation of ultra-wide-band subnanosecond signals at distances of tens of kilometers in an atmosphere free from the influence of the Earth's surface will be conducted. The set values of the permissible mismatch angles up to 5 degrees, as well as data on the positions of interference signals reflected from the ground, make it possible to make the necessary design and organizational solutions .

**Key words:** ultra-wideband pulses, propagation through atmosphere, reflected signal influence

**Founding source**

This work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No 075-15-2020-790.