

Поступила в редакцию29.03.2021 г.Опубликована05.05.2021 г.

ISSN 2304-7380

УДК 551.510.535

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО РЕГИСТРАЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ВЫДЕЛЕНИЮ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИОНОЗОНДА С ЗАДАННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

А.В. Кузьмин¹, С.В. Журавлев¹, Н.Г. Котонаева¹, В.Б. Лапшин¹

¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

Разработан программно-аппаратный комплекс зондирования ионосферы в декаметровом диапазоне радиоволн, позволяющий генерировать волновой фронт сложной структуры, в том числе с орбитальным моментом импульса. Экспериментальные исследования с использованием комплекса показали наличие в составе спектра принятого сигнала дополнительных частот. Прием отраженных сигналов от мелкомасштабных и крупномасштабных неоднородностей ионосферы, образованных в спорадическом слое Es, показал наличие в составе отраженного сигнала спектральных составляющих со смещением по отношению к несущей частоте. В случае излучения полоской электромагнитной волны такие эффекты не наблюдались.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ, ЗОНДИРУЮЩИЙ СИГНАЛ, АНТЕННАЯ РЕШЕТКА, ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ, ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

DOI: 10.54252/2304-7380_2021_29_38

1. ВВЕДЕНИЕ

Под опасным гелиогеофизическим явлением (ОГЯ) [1] понимается процесс или явление, возникающее в околоземном космическом пространстве, которое по своей интенсивности, масштабу и продолжительности оказывает или может оказать поражающее воздействие на функционирование технических и биологических систем как на Земле, так и в околоземном космическом пространстве. Как правило ОГЯ связаны с ионосферными возмущениями и образованием спорадических слоев. Ионосферное возмущение – изменение параметров ионосферы под действием внешних факторов, не связанное с суточными или сезонными вариациями. Если оно сопровождается возмущениями магнитного поля, то говорят об ионосферной буре. Нерегулярные (спорадические) слои появляются в ионосфере на высоте слоев Е и F. Наиболее часто возникает спорадический слой Es, который представляет собой сравнительно тонкую область с повышенной электронной концентрацией. Он обычно состоит из отдельных "облаков" с повышенной ионизацией. Модель образования слоя Es окончательно не установлена. Спорадические слои Es имеют структуру облаков повышенной концентрации электронов, возникающие на высотах 90-140 км, имеющие большие размеры по горизонтали, но малые по вертикали, состоящие, как правило, из металлических ионов. Слои Es обычно связывают с явлением ветрового сдвига на высотах, где локальные зональные ветры меняют направление с западного на восточное. Заряженные частицы концентрируются в точке, где скорость ветра равна нулю, что приводит к образованию спорадического слоя. Горизонтальные размеры Es образований составляют сотни километров.

ФГБУ «ИПГ» 129128; Россия, Москва ул. Ростокинская, 9.

Электронная почта авторов для переписки:

Кузьмин Александр Васильевич, , e-mail: kuzminalv2010@yandex.ru Журавлев Сергей Владимирович e-mail:zhuravlev@ipg.geospace.ru Котонаева Надежда Геннадьевна, e-mail: kotonaeva@ ipg.geospace.ru Лапшин Владимир Борисович, e-mail: lapshin-vb1@mail.ru

Спорадический слой Es в стандартном представлении описывается четырьмя параметрами: предельной частотой обыкновенной радиоволны, отражающейся от спорадического слоя Es (foEs), частотой экранирования (fbEs), высотой и типом. Мелкомасштабную неоднородность слоя обычно характеризуют коэффициентом полупрозрачности Q, который определяется как

$$Q = (foEs - fbEs) / fbEs.$$

Характеристикой крупномасштабных в (сотни метров) неоднородностей в *Es* принято считать *Es*-рассеяние (*Es-spread*), которое проявляется как диффузность следа отражений от *Es* на ионограммах вертикального радиозондирования. Предполагают [2], что как мелкомасштабные, так и крупномасштабные неоднородности вызываются акустическими импульсами, распространяющимися в атмосфере. Поэтому эксперименты в этом направлении актуальны.

В работе рассмотрены результаты экспериментов по приему сигналов, отраженных от слоя Е в при вертикальном зондировании (ВЗ) ионосферы. Для ВЗ использовался передатчик ионозонда Парус-А с штатной передающей двойной ромбической антенной и передающая система комплекса Радуга [З], использующая фазированную антенную решетку (АР) с задаваемыми характеристиками волнового фронта. Прием сигналов осуществлялся приемной АР комплекса Радуга, позволяющей изменять и измерять направление приема сигналов. Эксперименты проводились на полевой экспериментальной базе (ПЭБ) Института прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова (ИПГ) (окрестности деревни Тимохово Ногинского района Московской области) в 2019 году.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА

Для экспериментов привлекался опытный образец комплекса Радуга, включающий приемную AP из 8-ми антенных элементов (АЭ), и передающую AP из 4-х длинных диполей с заземлением и 4-х укорочниных диполей [3]. Комплекс включал 16-ти канальное радиоприемное и 16-ти канальное передающее устройства. Вид размещения передающих (символ "П") и приемных (символ "A") АЭ на территории ПЭБ дан на рис. 1. Длинные диполи: П2,П4, П5 и П7, укороченные – П1,П3,П6 и П8.



Рис.1. Схема размещения передающих и приемных АЭ на территории ПЭБ ИПГ. П – обозначает передающий АЭ, А – соответствует приемному АЭ, ФЦ – фазовый центр АР.

Дополнительно при проведении экспериментов использовались сигналы передатчика ионозонда Парус-А, установленного на ПЭБ и функционирующего в штатном режиме в составе ионосферной сети Росгидромета. Размещение комплекса Радуга на одной территории с ионозондом Парус-А позволило реализовать режим ВЗ ионосферы при котором сигналы, излучаемые ионозондом Парус-А, принимались и обрабатывались приемным трактом комплекса Радуга в синхронном режиме. За счет мощного передающего тракта ионозонда Парус-А энергетический потенциал такого измерительного комплекса увеличивается на ~13 дБ (в 20 раз), что дало дополнительные возможности для анализа.

Процесс измерений был организован следующим образом. Ионозонд Парус-А выполнял каждые 15 мин стандартный цикл ВЗ ионосферы. С началом цикла приемный тракт комплекса Радуга осуществлял прием сигналов, излученных передатчиком ионозонда Парус-А с параметрами: длительность зондирующего импульса 100 мкс, период повторения 20 мс, число когерентно излучаемых импульсов на частоте равно четырем, начальная частота зондирования 1,0 МГц, шаг изменения частоты 20 кГц, конечная частота зондирования 8,0 МГц. Радиоприёмный тракт комплекса Радуга устанавливался в режим приема гладких импульсов длительностью 100 мкс (полоса пропускания радиоприемного устройства 10 кГц), период повторения 20 мс, число когерентно накапливаемых импульсов равно четырем, направление приема вертикальное, шаг перестройки по частоте 20 кГц, начальная частота приема 1,0 МГц, при синхронизации ионозонда и комплекса Радуга по сигналам GPS с точностью не более 1 мкс. Сигналы принимались и обрабатывались программным обеспечением комплекса Радуга с записью первичных и обработанных данных в архив. Начиная с ХХ.01:00 мин каждого часа и 16, 31 или 46 мин каждого часа, проводился цикл ВЗ комплексом Радуга с параметрами: комплементарный 2×16 фазоманипулированный сигнал с длительность дискрета 30 мкс, периодом повторений 10 мс, числом когерентных посылок 32, полоса приема 20 кГц, начальная частота зондирования 1,0 МГц, шаг по частоте 20 кГц.

При проведении экспериментов с заданными характеристиками волнового фронта основное внимание уделялось приему радиоволн с орбитальным моментом импульса (ОМИ). В [4] математическим моделированием была исследована возможность формирования и приема волн с ОМИ с помощью AP, составленной из двух концентрических окружностей. Внутренняя состояла из 8-ми AЭ радиусом λ , равным длине волны, внешняя из 16-ти AЭ радиусом 2 λ . Использовались триангулярные AЭ в виде скрещенных диполей на высоте 0,25 λ над землей. Исследования проводились в миллиметровом диапазоне волн. ОМИ создавался путем формирования фаз излучателей круговой эквидистантной AP с разницей азимутальных углов между соседними АЭ равным φ . Сумма всех разниц азимутальных углов между АЭ равна 2 π . Антенны излучают один и тот же сигнал, но с последовательной задержкой фазы относительно друг друга равной $l\varphi$. После полного оборота вокруг фазового центра фаза будет увеличена на $2\pi l$, *где* $l \in N$.

В экспериментах [5] в КВ диапазоне для формирования радиолуча с ОМИ использовалась фазированная AP HAARP, в которой фаза и амплитуда формируемого поля контролировалась индивидуально в каждом AЭ. Антенная решетка состояла из 180 AЭ в виде скрещенных диполей, расположенных в прямоугольной плоской матрице 12×15. Максимум формируемого ОМИ (при $l = \pm$ 3) был ограничен наводками между соседними AЭ. При $l = \pm$ 3 использовался каждый шестой передатчик, чтобы избежать наводки между соседними АЭ. Излучалась обыкновенная мода волна круговой поляризации. Прием радиосигнала осуществлялся с помощью анализатора Hewlett-Packard E1437A, подключенного к широкополосному высокочастотному каналу вибраторной антенны и обеспечивающего аналого-цифровое преобразование в 20 МГц. Были получены доплеровские спектры принимаемого сигнала для l = 0 и l = +3. Спектры получены в диапазоне ±45 кГц вокруг излучаемой частоты $f_0 = 4.5$ МГц. Представленные результаты указывают на реальную возможность созданий электромагнитных (ЭМ) волн с ОМИ не только в оптическом и гигагерцовом диапазонах, но и в КВдиапазоне. Там же показано, что ЭМ волна с ОМИ создается не только при использовании AP из триангулярных АЭ, но и обычными скрещенными диполями.

В данной работе проведено математическое моделирование ЭМ волн с ОМИ антенной решеткой с дипольным АЭ в КВ диапазоне. Рассматривалась АР из 24-х АЭ расположенных в соответствии с рис. 2 согласно [4]. Каждый АЭ представлял симметричный четверть волновой горизонтальный вибратор, поднятый на высоту 1/8 длины волны над землей. На частоте 5 МГц эта высота составила 7,5 м длинна плеча вибратора 15 м. Результаты расчета ДН такой АР для l = 0, 1 и 2 даны на рис.2. Расчет проводился с использованием программы ММАNA [6].

Сравнение изображений рис. 2 и приведенных в [4] показывает их идентичность в области главных лепестков ДН. Боковые лепестки на рис. 2 более изрезаны, что очевидно связано с использованием диполей в КВ АР вместо триангулярных антенн в [4].

Для обоснования возможности проведения натурного эксперимента по созданию волны с ОМИ были рассчитаны ДН АР в виде окружности радиусом λ из восьми таких же горизонтальных вибраторов программой MMANA на частоте 5 МГц, представленные на рис. 3 для l = 0, 1 и 2.

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова



Рис. 2. Диаграммы направленности AP в виде двух концентрических окружностей радиусами λ и 2λ из горизонтальных вибраторов в KB-диапазоне, изображенных штрихами. Левая ДН соответствует *l* = 0, средняя *l* = 1, правая получена при *l* = 2.



Рис. 3. Диаграммы направленности AP в виде окружности радиусом λ из горизонтальных вибраторов в KB-диапазоне, изображенных штрихами. Левая ДН соответствует l = 0, средняя l = 1, правая получена при l = 2.

Сравнение ДН, представленных на рис. 3 и рис. 2, подтверждает ожидаемую при уменьшении апертуры AP картину. Главные лепестки расширяются, коэффициент усиления падает. Максимумы излучения при l = 1 образуют конус, с углом между осью и образующей ~9°. При l=2 угол между осью и образующей становится ~16°. При l=2 и восьми АЭ края ДН имеют волнообразный характер. Данный результат подтверждает возможность создания волны с ОМИ и при количестве АЭ в составе AP равном восьми. На рис. 4 даны ДН передающей антенной решетки комплекса Радуга, развернутого на ПЭБ ИПГ (рис.1). В условиях экспериментов не было возможности разместить АЭ на имеющихся площадях оптимальным образом, в частности по кругу.



Рис. 4. ДН комплекса Р на частоте 5 МГц *l*=0 (слева), при *l*=1 (в центре) и на частоте 2.5 МГц при *l*=1 (справа). На рисунке АЭ изображены схематически крестообразными знаками.

ДН на частоте 5 МГц и l=0 имеет коэффициент усиления 10,8 дБ в вертикальном направлении. При l=1 коэффициент усиления в вертикальном направлении падает на 13 дБ, максимальное усиление составляет 7,4 дБ под углом места 32°. ДН АР на этой частоте изрезаны и имеют большое количество боковых лепестков. На частоте 2,5 МГц при l=1 ДН менее изрезана, максимум коэффициента усиления составляет 9,6 дБ при угле места 44°. Однако симметрии ДН не наблюдается, как в случае рис.3. Это связано не только с расположением АЭ, но и со взаимным влиянием передающих АЭ комплекса Радуга. Расчеты ДН АР проводились с учетом токов, наведенных в АЭ соседними АЭ. Сложная форма показанных на рис. 4 ДН не позволяет в настоящее время провести расчет требуемого амплитуднофазового распределения (АФР), создаваемого комплексом Радуга, так, чтобы на выходе АР была бы создана симметричная волна с ОМИ заданного порядка. Для этого необходимо решить обратную задачу определения АФР. Задача сложна не только из-за взаимного влияния АЭ друг на друга в составе АР, но и из-за наличия внешних переотражений за счет других антенн, деревьев и строений на площадке проведения экспериментов (ПЭБ ИПГ). Это затрудняет анализ полученных данных и отработку режимов излучения волн сложной пространственной структуры.

Структурная схема комплекса Радуга, использованного в экспериментальных работах, дана на рис.5.



Рис. 5. Структурная схема комплекса Радуга, задействованного в экспериментальных работах.

На схеме введены следующие обозначения: УМ – усилитель мощности, ПАЭ – передающий АЭ, МФЗС – модуль формирования зондирующих сигналов, МУФИС – модуль управления и формирования имитационных сигналов, РПДУ – радиопередающее устройство, СП – секция приема, МОСИС – модуль опорных сигналов и синхронизации,

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

МП – модуль процессора,
ШАУ – широкополосный антенный усилитель,
БП – блок питания,
МАП – модуль аналогово приема,
МЦП – модуль цифрового приема,
МРОС – модуль разветвления опорных сигналов,
УВК – управляющий вычислительный комплекс,
АФС – антенно-фидерная система.

Передающая AP включала восемь AЭ, в верхней части которых установлены по два УМ в 5 Вт каждый с 2-мя фазовращателями на 180°, обеспечивающими излучение четырех плеч AЭ. Питание УМ осуществляется по фидерам, подключенным к МФЗС, в которых формируются зондирующие сигналы с требуемой для работы УМ амплитудой и фазой, необходимых для формирования волны с ОМИ. В устройстве ввода питания осуществляется разводка напряжения 12 В от БП01. Каждый МФЗС имеет восемь выходов и представляет собой 8-ми канальный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) с усилителем, преобразующий цифровой сигнал возбуждения, поступающий с МУФИС РПДУ, в аналоговый с нужной амплитудой и фазой по каждому каналу излучения.

Синхронизация работы блока зондирующих сигналов осуществляется путем привязки к сигналам ГЛОНАСС и GPS, принимаемым СП, по которым в МОСИС формируется сетка синхронизации и опорные сигналы, которые, в свою очередь, через МРОС разводятся на модули комплекса Радуга. МУФИС РПДУ программным способом формирует излучаемые сигналы, осуществляет управление работой модуля возбудителя зондирующих сигналов, отрабатывает команды и задания от УВК, поступающие по интерфейсу USB 2.0. Прием сигнальной информации в УВК от МП осуществляется по интерфейсу Ethernet.

Первые лучи приемных АЭ ориентированы на север, вторые в широтном направлении. Лучи передающих АЭ сдвинуты на 45° относительно приемных.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рисунке 6 представлена ионограмма ВЗ, полученная при излучении сигналов передающим трактом ионозонда Парус-А и обработанная приемным трактом комплекса Радуга 2.04.2019 года в 8:14:57 UT.



Рис. 6. Ионограмма ВЗ, полученная с использованием передающего тракта ионозонда Парус-А и приемного тракта комплекса Радуга 4.02.2019 года в 8:14:57UT.



На рисунке 7 представлена ионограмма при излучении сигналов передающим трактом комплекса Радуга с фазами, создающими ОМИ, полученная 2.04.2019 года в 8:05:29 UT.

Рис. 7. Ионограмма ВЗ полученная с использованием комплекса Радуга 4.02.2019 года в 8:05:29 UT при создании ОМИ.

Коэффициент полупрозрачности слоя Es в этом случае составил 0,67. Справа от ионограмм на рис. 6 и 7 даны амплитудно-дальностные характеристики (АДХ) принимаемых сигналов на частоте 2940 кГц. Максимальный уровень сигнала, отраженного от слоя Es, на рис. 6 превышает на 26 дБ сигнал на рис.7. Это хорошо согласуется с различием энергетических потенциалов используемых средств зондирования. В первом случае излучаемая импульсная мощность Р составляет 10 кВт (40 дБ), число периодов когерентного накопления сигнала Ткн = 2 (З дБ), коэффициент усиления передающей антенны G~6 дБ. Энергетический потенциал за вычетом площади приемной антенны в этом случае равен

$$\Pi_1 = P + T_{KH} + G = 40 + 3 + 6 = 49$$
дБ.

Во втором случае суммарная импульсная мощность излучения 80 Вт (19 дБ), число периодов когерентного накопления сигнала 32. С учетом весовой обработки 0.63×32 (13дБ), реальных потерь и коэффициента усиления АР (5дБ) потенциал составит

Энергетический потенциал передающего тракта ионозонда Парус-А больше потенциала передающего тракта комплекса Радуга на $\Delta \Pi = \Pi_1 - \Pi_2 = 49-37 = 12$ дБ.

Сигналы, отраженные от ионосферы, приходят с вертикального направления. Выше отмечалось (см. рис. 4), при создании поля с l=1 коэффициент усиления в вертикальном направлении падает на 10-13 дБ, отсюда следует ожидать снижение уровня сигнала на $\Delta\Pi$ +(10...13) дБ или, учитывая что $\Delta\Pi$ = 12 дБ, на 22-25 дБ, что и наблюдается. Поэтому на ионограмме, полученной комплексом Радуга, рис.7 видны только наиболее мощные сигналы, отраженные от слоя Es.

Комплекс Радуга использует для ВЗ ионосферы когерентную последовательность 32 разрядных фазокодоманипулированных (ФКМ) сигналов с комплементарным кодом, имеющим длительность дискрета 30 мкс, а Парус-А когерентную последовательность импульсов длительностью 100 мкс, этим объясняется разница длительности сигналов на приведенных ионограммах в три раза.

На рис.8 приведены зависимости относительной фазы принимаемых сигналов от времени их прихода (задержки) на частотах 2980 кГц (а), 3640 кГц (б) и 4200 кГц (в) для первого случая (рис.6), а на рис. 9 для случая, приведенного на рис. 7 на тех же частотах. На рис. 8 и 9 зона сигнала выделена

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

прямоугольной рамкой, ось абсцисс в миллисекундах (*ms*) направлена вверх. Диапазон оси ординат от -180° до +180°. Зависимости фазы во всех показанных случаях построены для 10-го канала относительно 9-го канала приемного тракта на выходе цифрового приемника.

После цифрового преобразования частоты и фазового детектирования зависимость фазы в *i*-ом канале приема и *k*-ом канале дальности представляется в виде

$$\varphi_{ki} = 2\pi (\Delta f + \Delta_{fi}) \Delta_{\tau} \cdot k + \psi_i ,$$

где Δf – остаток преобразования частоты за счет отличия частоты, излучаемой передатчиком, и центральной частой настройки приемника,

 Δ_{fi} – доплеровское смещение частоты принятого сигнала,

 Δ_{τ} – дискрет квантования по дальности,

 $\Delta_{\tau} \cdot k$ – время прихода сигнала,

 ψ_i – начальная фаза.



Рис. 8. Зависимости относительных фаз сигналов ВЗ от времени прихода сигнала ($\Delta_{\tau} \cdot k$) на частотах 2980кГц (а), 3640кГц (б) и 4200кГц (в), полученные в сеансе ВЗ 4.02.2019 года в 8:14:57UT.



Рис. 9. Зависимости от задержки относительных фаз сигналов ВЗ на частотах 2980 кГц (а), 3640 кГц (б) и 4200 кГц (в) полученные в сеансе ВЗ 4.02.2019 года в 8:05:29 UT.

При $\Delta_{\tau} = 10$ мкс и $\Delta f = 10$ кГц разность фазы между соседними каналами дальности составит 0,1 периода повторения (0.1×2 π). Визуализировать такие изменения сложно, поэтому анализировалась относительная фаза $\Delta \varphi_{ki} = \varphi_{ki} - \varphi_{k9}$, т.е. фаза относительно девятого канала. В этом случае

$$\Delta \varphi_{ki} = 2\pi \Delta_{fi} \Delta_{\tau} k + \psi_{ni} - \psi_{n9}.$$

При анализе результатов такой подход позволяет избавиться от погрешностей, обусловленных разными схемами формирования частот опорными генераторами средств зондирования.

Анализ значений относительных фаз ($\Delta \varphi_{ki}$) в пределах длительности сигналов ВЗ, полученных при приеме сигналов, излученных передатчиком Парус-А, показал, что значения $\Delta \varphi_{ki}$ не имеют статистически значимого наклона по каналам дальности

$$\overline{\Delta_{f\iota}} = \frac{\overline{d\Delta\varphi_{k\iota}}}{2\pi\Delta_{\tau}dk} = 0.$$

Отклонения $\Delta \varphi_{ki}$ лежат в пределах 20°, что связано с неидентичностью тракта приема, включающего АЭ, широкополосный антенный усилитель (ШАУ), фидерный тракт и канал приемника. Так как перед проведением эксперимента приемные каналы калибровались и выравнивались по амплитуде и фазе с точностью не хуже 1° по фазе и 1 дБ по амплитуде, основной вклад в данный разброс вносят АЭ, ШАУ и фидерный тракт. Согласно технических условий на комплекс Радуга точность настройки этих составляющих лежит в пределах $\pm 10^\circ$, что хорошо согласуется с полученными результатами. Отсюда можно утверждать, что при излучении линейно поляризованного сигнала передатчиком Парус-А и приеме сигналов, отраженных от неоднородностей слоя Es, радиоприемным трактом комплекса Радуга принималась плоская волна двух магнитоионных компонент, что видно по амплитудам обыкновенной и необыкновенной компонент волн, представленных на рис. 6 и 7 красным и зеленым цветом.

При генерации волны с ОМИ среднее значение $\overline{\Delta \varphi_{kl}}$ и $\overline{\Delta_{fl}}$. во всех случаях отличалось от нуля. Среднее (по каналам дальности) значение относительной доплеровской частоты в *i*-ом канале приема оценивалось согласно методу максимального правдоподобия по изменению фазы

$$\overline{\Delta_{f\iota}} = 6 \frac{\sum_{k=1}^{K} \Delta \varphi_{ki} (k - \frac{K}{2})}{\pi \Delta_{\tau} K (K^2 - 1)},$$

где *К* – число отсчетов сигнала, использованных для оценки (выделено прямоугольником на рис. 8 и 9).

Смещение частоты для 10-го приемного канала составило минус 1.9 кГц на частоте 2980 кГц (рис.9а), 0.9 кГц на частоте 3640 кГц (рис.9 б) и минус 3,2 кГц на частоте 4200 кГц (рис.9 в).

На рисунках 10 и 11 даны примеры ионограмм ВЗ полученных 21.03.19 г. в 9:00 UT в присутствии слоя Es при коэффициенте полупрозрачности Q = 0.38.

В данном случае наблюдается более высокий уровень поглощения сигнала. Минимальная частота отражений fmin =1.23 МГц против ~1.0 МГц в предыдущем случае (рис.6). Однако, на ионограмме, полученной с использованием волны с ОМИ, наблюдаются отражения от слоев F1 и F2, что не наблюдалось в предыдущем случае. Уровень сигнала, отраженного от слоя Es, на 25 дБ меньше, чем в предыдущем случае (рис. 6), а при волне с ОМИ уровни совпадают. Как и в предыдущем случае, при волне с ОМИ зависимости относительных фаз сигналов B3 от задержки на частотах указывают на наличие дополнительных спектральных составляющих в спектре сигнала. Они равны минус 4,67 кГц на частоте 2920 кГц (рис. 12 слева) и минус 1,19 кГц на частоте 3280 кГц (рис. 12 справа).

Это свидетельствует о различных механизмах отражений от ионосферы в области Е. Для получения дополнительной информации средствами комплекса Радуга было проведено измерение углов прихода сигналов. Результаты измерений на сетке частот даны в таблице 1.

В сеансе 4.02.2019 г. при приеме сигналов передатчика Парус-А среднее значение азимута прихода составило 132.3° при СКО 0.00° и угле места 83.05° с СКО 0.07°. При волне с ОМИ (4.02.2019 г.) среднее значение азимута прихода составило 148.4° при СКО 0.8° и угле места 69.2° при СКО 0.4°. В этом случае отражающую поверхность можно представить в виде шероховатой плоскости с наклоном ~7° от вертикали. Максимум индикатрисы рассеяния поверхности соответствует углу падения. Поэтому сигналы, излученные передатчиком Парус-А в вертикальном направлении, не попадают сразу на приемную антенну, а фокусируются на расстоянии ~ 205 км, что соответствует

кратному отражению от Es на рис. 6. Максимум сигнала принимается с угла места 83.05° под азимутом, соответствующим юго-восточному направлению, что близко с направлением движения терминатора. При волне с ОМИ и l=1 излучаемая ДН имеет вид "чаши" (см. рис. 3 и 4) с внутренними углами максимума ДН относительно нормали $10-12^{\circ}$. Поэтому максимум принимаемых сигналов наблюдается под углами места ~ 69° и азимутами, соответствующими максимуму ДН. Т.е. характер отражений можно объяснить наличием мелкомасштабных неоднородностей слоя Es, которые можно сравнить в этом диапазоне длин радиоволн с шероховатой поверхностью.



Рис. 10. Ионограмма ВЗ, полученная с использованием передающего тракта ионозонда Парус-А и приемного тракта комплекса Радуга 20.03.2019 года в 8:59:57UT.



Рис. 11. Ионограмма ВЗ, полученная с использованием комплекса Радуга 20.03.2019 года в 9:01:00 UT при создании ОМИ.



Рис. 12. Зависимости относительных фаз сигналов ВЗ от задержки на частотах 2920 кГц (слева) и 3280 кГц (справа), полученные в сеансе ВЗ 20.03.2019 года в 9:01:00UT

	Парус-А 4.02.2019 г. 8:14:57		Сигнал с ОМИ		Парус-А 20.03.2019 г.	
Частота,	UT		4.02.2019 г. 8:05:29UT		8:59:57 UT	
кГц	Азимут, град.	Угол места,	Азимут, град.	Угол места,	Азимут,	Угол места,
		град.		град.	град.	град.
1500	132,3	83,0	148,9	69,2	166,4	84,1
2000	132,3	82,9	148,9	69,2	154,7	83,2
2500	132,3	83,1	148,9	69,2	159,5	83,2
2980	132,3	83,1	148,9	70,1	159,5	83,8
3640	132,3	83,1	147,2	68,8	166,4	85,2
4200	132,3	83,1	147,2	68,8	166,4	84,1
5000	132,3	83,1	148,9	69,2	166,4	83,9

Таблица 1. Углы прихода сигналов ВЗ

Во 2-ом случае (20.03.2019 г.) при приеме сигналов передатчика Парус-А среднее значение азимута прихода составило 162.7° при СКО 4.8° и угле места 83.9° с СКО 0.7°. Измерения, как и в предыдущем случае, проводились в период прохода терминатора. Направление приема сигналов по азимуту сместилось на ~ 30° при том же угле места, а ошибки измерений возросли на порядок. Кратные отражения от спорадического слоя выражены слабо. При этом измерение углов прихода в случае волны с ОМИ штатной программой комплекса Радуга ни на одной частоте и задержке, соответствующих отражениям от слоя Еѕ, выполнить не удалось.

В данном случае в области Е наблюдаются крупномасштабные неоднородности. При облучении плоской волной, как и в предыдущем случае, сигнал принимается под углом места ~83.9°, однако ошибки измерений (СКО) на порядок выше. Отражающий объем состоит из крупномасштабных неоднородностей, что определяет с одной стороны его прозрачность, а с другой – повышенный уровень поглощения за счет многократных переотражений. Наблюдается приоритетное направление прихода ЭМ волн, что позволяет измерить углы, хотя и с возросшими ошибками.

При приеме сигналов с ОМИ за счет когерентного сложения отражений от большого количества крупномасштабных неоднородностей уровень принимаемого сигнала соизмерим с предыдущим случаем (рис. 7). Принятый сигнал складывается из близких по энергетике сигналов, отраженных от отдельных неоднородностей, случайным образом расположенных в пространстве. Измерительный тракт комплекса Радуга не имеет возможности различать больше двух подобных сигналов с измерением их углов прихода.

Можно констатировать, что в спектре принятых сигналов, сформированных излученной ЭМ волной с ОМИ и отраженных от мелкомасштабных и крупномасштабных ионосферных

48

неоднородностей слоя Es, наблюдается ряд дополнительных частот. Использование ЭМ волн с ОМИ дает дополнительные возможности для исследования перечисленных выше эффектов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения работ по разработке программно-аппаратного комплекса зондирования ионосферы создан стенд в декаметровом диапазоне радиоволн, позволяющий генерировать волновой фронт сложной структуры в том числе с орбитальным моментом импульса.

Проведена серия экспериментов вертикального радиозондирования неоднородной ионосферы с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса, излучающего и принимающего импульсный зондирующий сигнал с волновым фронтом различной структуры.

Экспериментальные исследования показали наличие в составе спектра принятого сигнала дополнительных частот.

Прием отраженных сигналов от мелкомасштабных и крупномасштабных неоднородностей ионосферы, образованных в спорадическом слое Es, показал наличие в составе отраженного сигнала спектральных составляющих со смещением по отношению к несущей частоте от минус 4, 67 до 0,9 кГц. В случае излучения полоской электромагнитной волны такие эффекты не наблюдались.

Измерения углов прихода отраженных от ионосферы сигналов ВЗ дает дополнительные возможности для мониторинга опасных явлений в ионосфере.

Полученная структура принятого ЭМ поля требует дальнейших исследований для диагностики и описания характеристик ионосферных возмущений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-80023.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Рук. ИПГРД 52.26.817-2015 "Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть І. Ионосферные наблюдения"
- 2. Гершман Б.Н., Игнатьев Ю.А., Каменецкая Г.Х. Механизмы образования ионосферного спорадического слоя Es на различных широтах. М. Наука, 1976.-108с.
- 3. Кузьмин А. В., Кучерина В. М., Ражев А. Н. Ионосферный комплекс Радуга. В сборнике научных трудов "Системный мониторинг ионосферы" под редакцией Н.Г. Котонаевой, М. ФИЗМАТЛИТ, 2019 с. 81-105
- 4. B. Thide, H. Then, J. Sjoholm, K. Palmer, J.Bergman, T.D. Carozzi, Ya.N. Istomin, N.H. Ibragimov, and R.Khamitova6. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain. ArXiv:0705.1208v3 [astro-ph] 2 May 2009.
- 5. T. B. Leyser, L. Norin, M. McCarrick, T. R. Pedersen and B. Gustavsson5. Radio Pumping of Ionospheric Plasma with Orbital Angular Momentum. PHYSICAL REVIEW LETTE. SPRL 102, 065004 (2009).
- 6. И. Гончаренко. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе ММАNA. РадиоСофт М. 2002.

EXPERIMENTS ON REGISTRATION OF IONOSPHERIC PARAMETERS AND REVEALING DANGEROUS EVENTS IN THE IONOSPHERE USING IONOSONDE WITH GIVEN CHARACTERISTICS OF THE WAVE FRONT

A.V. Kuz'min, S. V. Zhuravlev, N. G. Kotonaeva, V. B. Lapshin

A program-equipment installation for ionospheric sounding in the decameter radio-wave range is developed. The installation makes it possible to generate a wave front with a complicated structure, including the orbital pulse momentum. The experimental study using this installation have shown the presence of additional frequencies in the received signal spectrum. The reception of the signals reflected from the small-scale and large-scale ionospheric irregularities formed in the Es sporadic layer have revealed the presence within the reflected signal of components with a shift relatively to the carrier. No such effects have been observed in the case of transmitting a plane electromagnetic wave.

KEYWORDS: FIELD STRENGTH, SOUNDING SIGNAL, ANTENNA ARRAY, IONOSPHERIC SOUNDING, DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS