

УДК 533.951+537.868

СКОРОСТЬ ДРЕЙФА МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО ДАННЫМ МНОГОЧАСТОТНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО РАДАРА. II. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Г. Г. Вертоградов¹, В. П. Урядов^{2*}, В. Г. Вертоградов¹, Е. Г. Вертоградова¹,
С. В. Кубатко¹

¹ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;

² Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты наблюдений доплеровского смещения частоты для рассеянных мелкомасштабными искусственными ионосферными неоднородностями радиосигналов вещательных станций и станции точного времени РВМ. Результаты получены с помощью многочастотного коротковолнового радара по методике, изложенной в статье [1]. Выполнены оценки трёхмерного вектора скорости дрейфа неоднородностей. Показано, что скорость дрейфа неоднородностей может заметно изменяться как по величине, так и направлению в течение небольших промежутков времени. Величина скорости лежит в широком интервале значений 20÷270 м/с, иногда встречаются скорости, превышающие 500÷700 м/с. Наиболее вероятная скорость дрейфа составляет 40÷70 м/с.

ВВЕДЕНИЕ

Доплеровский метод характеризуется высоким частотным и временным разрешением. Поэтому он широко используется для изучения быстрых процессов в ионосфере, связанных с эффектами рентгеновских вспышек, геомагнитных возмущений, землетрясений, воздействия мощного декаметрового радиоизлучения на ионосферную плазму и другими явлениями. В данной работе доплеровский метод используется для оценки вектора скорости дрейфа мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей на основе многолетних наблюдений доплеровского смещения частоты рассеянных неоднородностями сигналов радиовещательных станций и станций точного времени РВМ. Наблюдения проводились с помощью многочастотного доплеровского коротковолнового радара. Результаты измерений вектора скорости дрейфа неоднородностей сопоставляются с традиционно измеряемыми скоростями их дрейфа в плоскости, ортогональной геомагнитному полю. Сам метод расчёта и его аппаратная реализации изложены в работе [1]. Здесь мы представляем результаты наблюдений и моделирования.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ СКОРОСТИ ДРЕЙФА МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО ДАННЫМ МНОГОЧАСТОТНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО РАДАРА

1.1. Описание экспериментов

В данном разделе представлены результаты расчётов скорости дрейфа мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, выполненные по измерениям доплеровского смещения частоты радиосигналов. Измерения проводились в 2009–2013 годах с помощью многоканального доплеровского коротковолнового радара. Во всех экспериментах возмущение ионосферы

* uryadovvp@nirfi.sci-nnov.ru

Таблица 1

Даты	Время (UT), ч:мин	$f_{ВН}$, кГц	Режим излучения, мин	Наклон диаграммы направленности антенны	Эффективная мощность излучения P_G , МВт
31.08–02.09.2009	12:50–15:10	4 300	20 мин нагрев 10 мин пауза	12° к югу от зенита	40
20–24.09.2010	12:50–17:40	4 740	20 мин нагрев 10 мин пауза	12° к югу от зенита (20–23.09.2010) 0° (24.09.2010)	80÷100 60
19–23.09.2011	12:50–17:40	5 828	20 мин нагрев 10 мин пауза	12° к югу от зенита	120
28–30.08.2012	12:00–20:00	4 785 5 828 6 720	30 мин нагрев 30 мин пауза 15 мин нагрев 15 мин пауза 5 мин нагрев 5 мин пауза 20 мин нагрев 10 мин пауза	12° к югу от зенита	80÷100
21–28.08.2013	12:00–20:00	4 785 5 455 (5 415) 5 828	15 мин нагрев 15 мин пауза 10 мин нагрев 10 мин пауза 5 мин нагрев 5 мин пауза 5 мин нагрев 10 мин пауза	12° к югу от зенита	80÷100

осуществлялось с помощью мощного радиоизлучения нагревного стенда «Сура» (56,1° с. ш., 46,1° в. д.) в режиме непрерывного излучения волны накачки с обыкновенной поляризацией. Частота волны накачки $f_{ВН}$ варьировалась и выбиралась так, чтобы она была меньше критической частоты F_2 -слоя ионосферы ($f_{ВН} \leq f_{0F_2}$). Конкретные режимы работы стенда в различных кампаниях приведены в табл. 1. Приёмный пункт размещался в г. Ростов-на-Дону на полигоне Южного федерального университета (47,239° с. ш., 39,642° в. д.).

Состояние ионосферы контролировалось по данным станций вертикального зондирования DPS (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Троицк, г. Москва) и SADI (находящейся в месте расположения нагревного стенда «Сура»). Кроме того, для контроля состояния ионосферы на прямой трассе Москва—Ростов-на-Дону в ИЗМИРАН работал передатчик с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Приём ЛЧМ-сигналов от этого передатчика осуществлялся с помощью ионозонда-радиопеленгатора [2, 3]. Как следствие, контролировался не только приём прямого сигнала, но также фиксировался и ракурсно рассеянный сигнал на трассе Москва—«Сура»—Ростов-на-Дону во всём частотном диапазоне его существования. Доступными для дальнейшего анализа были дистанционно-частотные, амплитудно-частотные и двумерные угловые частотные характеристики прямых и рассеянных мод распространения сигнала.

В приёмном пункте работал многочастотный доплеровский радар. В каждой экспериментальной кампании для контроля и регистрации сигналов использовался набор из тридцати частот, включая частоты волны накачки стенда «Сура» и частоты диагностических передатчиков подсветки возмущённой области. В качестве диагностических средств использовались передатчик станции точного времени РВМ ($56,743^\circ$ с. ш., $37,643^\circ$ в. д., г. Москва), $f = 9\,996$ и $14\,996$ кГц, и следующие широкоэвещательные передатчики: г. Урумчи ($43,583^\circ$ с. ш., $87,500^\circ$ в. д., Китай), $f = 13\,650$; $13\,790$ и $17\,630$ кГц; г. Самара ($53,283^\circ$ с. ш., $50,250^\circ$ в. д.), $f = 12\,010$; $12\,055$ и $15\,510$ кГц; г. Москва ($55,75^\circ$ с. ш., $37,3^\circ$ в. д.), $f = 12\,040$; $13\,855$; $15\,465$; $15\,605$ и $15\,640$ кГц; г. Серпухов ($55,9^\circ$ с. ш., $37,417^\circ$ в. д.), $f = 11\,985$ и $15\,340$ кГц; г. Вуфертон ($52,317^\circ$ с. ш., $2,717^\circ$ з. д., Англия), $f = 15\,510$; $15\,700$ и $17\,630$ кГц; г. Ноблехас ($39,95^\circ$ с. ш., $3,45^\circ$ з. д., Испания), $f = 15\,585$ и $21\,610$ кГц; г. Санкт-Петербург ($59,65^\circ$ с. ш., $30,7^\circ$ в. д.), $f = 12\,065$ кГц; г. Кашгар-Сайбах ($39,35^\circ$ с. ш., $75,45^\circ$ в. д., Китай), $f = 17\,490$ и $17\,650$ кГц; г. Кашгар ($39,35^\circ$ с. ш., $75,75^\circ$ в. д., Китай), $f = 17\,490$ кГц; г. Талдом ($56,733^\circ$ с. ш., $37,633^\circ$ в. д.), $f = 13\,735$ кГц; г. Исудан ($46,095^\circ$ с. ш., $1,963^\circ$ в. д., Франция), $f = 15\,300$; $15\,690$; $17\,620$ и $17\,850$ кГц; г. Кимджае ($40,083^\circ$ с. ш., $125,083^\circ$ в. д., Северная Корея), $f = 15\,245$ кГц; г. Новосибирск-Ояш ($55,483^\circ$ с. ш., $83,683^\circ$ в. д.), $f = 15\,670$ кГц; станция «Радио Ватикана» ($42,050^\circ$ с. ш., $12,317^\circ$ в. д., Италия), $f = 15\,570$ кГц.

Обработка записей квадратурных компонент сигналов позволила осуществить в каждой кампании селекцию сигналов по спектрограммам и выделить частоты диагностических передатчиков, на которых наблюдался эффект ракурсного рассеяния. Различие в доплеровских сдвигах частоты для прямого и рассеянного сигналов в несколько герц позволяет уверенно разделять эти сигналы при спектральной обработке. При оценке скорости дрейфа неоднородностей по данным доплеровских измерений рассеянных сигналов необходимо иметь в виду следующее. Наряду с доплеровским смещением частоты, вызванным регулярным дрейфом неоднородностей, могут наблюдаться квазипериодические вариации смещения частоты, связанные с распространением из магнитосферы интенсивных магнитогидродинамических (МГД) волн [4–6].

Для того, чтобы выделить регулярную составляющую скорости дрейфа неоднородностей, мы проводили усреднение доплеровского смещения частоты на интервалах времени $3 \div 5$ мин, включающих несколько квазипериодов флуктуаций смещения частоты. Обработка данных наблюдений выполнялась многооконным МТМ-методом спектрального анализа с шириной временного окна порядка 10 с и со сдвигом окна по времени с шагом 1 с. В процессе обработки на участках, где наблюдалось ракурсное рассеяние, для каждого сеанса анализа с длительностью 10 с вычислялся эффективный доплеровский сдвиг частоты (т. е. средневзвешенное значение смещения частоты) с шагом по времени 1 с. Дальнейший анализ спектрограмм и записей эффективного доплеровского сдвига частоты от времени позволил отобрать ситуации, в которых эффект ракурсного рассеяния фиксировался не менее, чем на двух частотах от различных диагностических передатчиков. При этом из нескольких сеансов, на которых фиксировались указанные события, выбирался только один случай, если во время нескольких идущих подряд сеансов нагрева значения доплеровского смещения частоты существенно не изменялись. Если на протяжении одного сеанса нагрева эффективное доплеровское смещение на частотах всех или части диагностических передатчиков изменялось существенно, то фиксировались несколько показаний эффективного доплеровского смещения частоты для различных моментов времени для всех диагностических передатчиков, от которых наблюдались эффекты ракурсного рассеяния.

Результатом обработки множества записей квадратурных компонент сигналов диагностических передатчиков подсветки на различных частотах являлись следующие характеристики: частота диагностического передатчика f ; эффективное доплеровское смещение частоты δf (средневзвешенное значение смещения с весом, равным мощности, соответствующей спектральной гар-

Таблица 2

Дата	Время (УТ), ч:мин:с	$f_{ВН}$, кГц	f , кГц	δf , Гц	Передатчик	Координаты передатчика	
28.08.2012	12:53:57	5 828	15 510	4,03	г. Самара	53,283° с. ш.	50,250° в. д.
	12:53:57	5 828	17 490	3,66	г. Кашгар, Китай	39,350° с. ш.	75,75° в. д.
	14:54:55	5 828	12 015	1,18	г. Самара	53,283° с. ш.	50,250° в. д.
	14:54:55	5 828	14 996	1,0	РВМ, г. Москва	56,743° с. ш.	37,643° в. д.
	14:54:55	5 828	15 640	1,05	г. Москва	55,750° с. ш.	37,300° в. д.
	14:54:55	5 828	12 010	1,45	г. Самара	53,283° с. ш.	50,250° в. д.
	17:24:27	4 785	15 640	-5,47	г. Москва	55,750° с. ш.	37,300° в. д.
	17:24:27	4 785	21 610	-6,11	г. Ноблехас, Испания	39,950° с. ш.	3,450° з. д.
	17:24:27	4 785	15 465	-4,59	г. Москва	55,750° с. ш.	37,300° в. д.
	17:24:27	4 785	12 010	-4,86	г. Самара	53,283° с. ш.	50,250° в. д.
	19:03:22	4 785	14 996	-2,56	РВМ, г. Москва	56,743° с. ш.	37,643° в. д.
	19:03:22	4 785	12 040	-1,88	г. Москва	55,750° с. ш.	37,300° в. д.
19:03:22	4 785	15 465	-3,02	г. Москва	55,750° с. ш.	37,300° в. д.	
29.08.2012	11:53:21	6 720	15 510	2,67	г. Самара	53,283° с. ш.	50,250° в. д.
	11:53:21	6 720	17 490	2,77	г. Кашгар, Китай	39,350° с. ш.	75,750° в. д.
	17:50:57	5 828	14 996	-2,02	РВМ, г. Москва	56,743° с. ш.	37,643° в. д.
	17:50:57	5 828	15 640	-3,49	г. Москва	55,750° с. ш.	37,300° в. д.
	17:50:57	5 828	15 465	-1,95	г. Москва	55,750° с. ш.	37,300° в. д.
30.08.2012	17:50:26	5 828	14 996	1,81	РВМ, г. Москва	56,743° с. ш.	37,643° в. д.
	17:50:26	5 828	21 610	3,24	г. Ноблехас, Испания	39,950° с. ш.	3,450° з. д.
	17:50:26	5 828	15 640	2,93	г. Москва	55,750° с. ш.	37,300° в. д.
	17:50:26	5 828	15 465	1,89	г. Москва	55,750° с. ш.	37,300° в. д.
	18:23:59	5 828	14 996	2,54	РВМ, г. Москва	56,743° с. ш.	37,643° в. д.
	18:23:59	5 828	21 610	4,54	г. Ноблехас, Испания	39,950° с. ш.	3,450° з. д.
18:23:59	5 828	15 465	3,55	г. Москва	55,750° с. ш.	37,300° в. д.	

монике); время фиксации значения эффективного доплеровского смещения частоты; город, в котором размещён диагностический передатчик, или название передатчика и его географические координаты (широта и долгота). Название широкополосного передатчика, его рабочая частота, географические координаты и расписание работы выбирались из международных баз данных [7], которые публикуются и обновляются два раза в год (летнее и зимнее расписание работы).

Для каждой экспериментальной кампании проводилась обработка данных по указанной в [1] схеме. Из-за большого объёма данных мы приводим только типичные результаты обработки.

Результаты измерений эффективного доплеровского смещения частоты δf одновременно на нескольких частотах для различных радиовещательных станций в кампании 28–30 августа 2012 года представлены в табл. 2.

1.2. Геофизические и ионосферные условия наблюдений

Значения геофизических индексов D_{st} и K_p в дни наблюдений приведены в табл. 3.

В кампаниях 19–23 сентября 2011 года и 28–30 августа 2012 года наблюдения проводились в спокойной геомагнитной обстановке, в кампании 20–24 сентября 2010 года — в умеренно спокойной.

В кампании 31 августа–2 сентября 2009 года наблюдения проводились в фазе восстановления небольшой магнитной бури. Начало магнитной бури в виде роста индекса D_{st} с максимумом 17 нТл имело место в 03:00 UT 30 августа 2009 года [8]. Главная фаза бури продолжалась до 17:00 UT 30 августа, когда индекс D_{st} достиг минимального значения -29 нТл. Затем началась фаза восстановления бури, значения индексов в период наблюдений приведены в табл. 3.

Кампания 21–28 августа 2013 года проходила в условиях умеренно-возмущённой геомагнитной обстановки. Начало наблюдений пришлось на фазу восстановления небольшой магнитной бури, которая началась в 24:00 UT 20 августа 2013 года. Главная фаза бури продолжалась до 06:00 UT 21 августа, когда индекс D_{st} достиг минимального значения -20 нТл. Затем началась фаза восстановления бури (см. табл. 3). 26 августа была вторая магнитная буря с началом в 17:00 UT. Главная фаза бури продолжалась до 21:00 UT 26 августа, когда индекс D_{st} достиг минимального значения -54 нТл. Затем началась фаза восстановления бури.

Таким образом, во всех кампаниях наблюдения проходили, в основном, в условиях умеренно спокойной геофизической обстановки.

Анализ ионосферной обстановки по данным станций высотного зондирования DPS-4 и CADI показал, что во всех экспериментах, кроме кампании 31 августа–2 сентября 2009 года, до прохождения терминатора (примерно соответствующего 15:00–16:00 UT) критические частоты f_{oF_2} и высоты максимума h_{mF_2} в среднем лежали в пределах $5,8 \div 7,2$ МГц и $240 \div 270$ км соответственно; после прохождения терминатора эти параметры были в пределах $4,7 \div 6,6$ МГц и $270 \div 320$ км. Во время эксперимента 31 августа–2 сентября 2009 года критические частоты были низкие и стенд «Сура» работал на частоте 4,3 МГц, близкой к частоте f_{oF_2} . В зависимости от частоты волны накачки $f_{вн}$, высоты её отражения лежали в пределах $200 \div 240$ км до прохождения терминатора и в пределах $240 \div 300$ км после прохождения терминатора.

1.3. Результаты оценки вектора скорости дрейфа искусственных мелкомасштабных неоднородностей

Результаты оценки вектора скорости дрейфа ориентированных вдоль магнитного поля искусственных мелкомасштабных неоднородностей по разработанной и описанной в работе [1] методике

Таблица 3

Даты	D_{st} , нТл	K_p
31.08–02.09.2009	$-9 \div -5$	$1 \div 2$
20–22.09.2010	$-4 \div 4$	$1 \div 2$
23–24.09.2010	$-13 \div 22$	$2 \div 3$
19–23.09.2011	$-11 \div 5$	$1 \div 2$
28–30.08.2012	$-11 \div 8$	$1 \div 2$
21.08.2013	$-15 \div 10$	$3 \div 4$
22.08.2013	$-14 \div -10$	$3 \div 4$
23.08.2013	$-21 \div -17$	$3 \div 4$
24.08.2013	$-16 \div -10$	$1 \div 2$
25.08.2013	$-20 \div -18$	$1 \div 2$
27.08.2013	$-15 \div 6$	$3 \div 5$
28.08.2013	$-24 \div -21$	$1 \div 2$

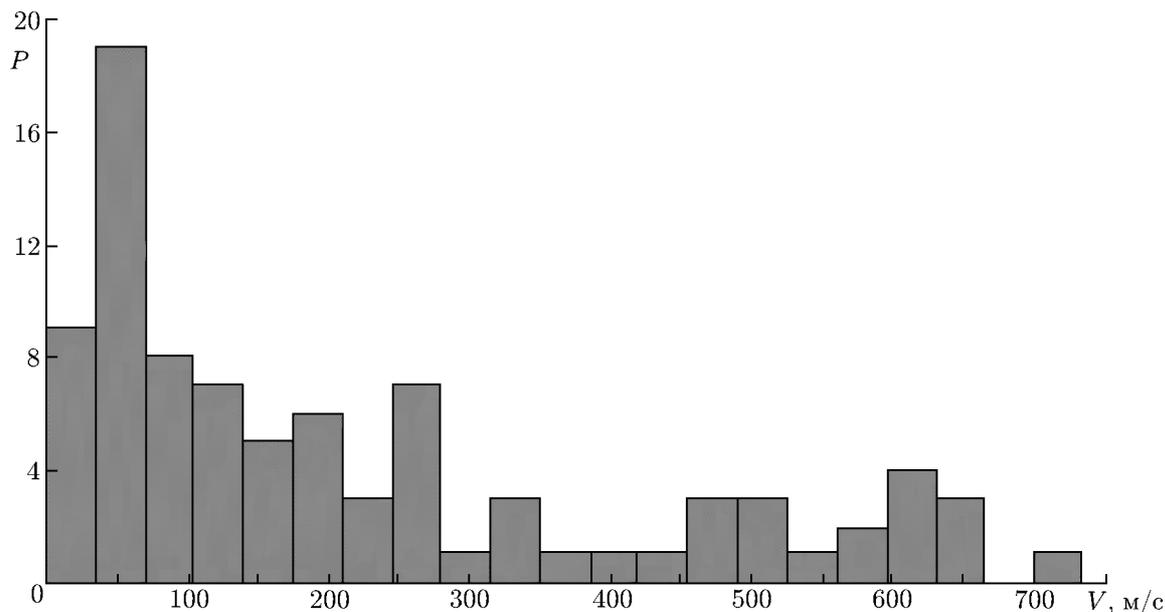


Рис. 1. Распределение величины полной скорости дрейфа ориентированных вдоль магнитного поля мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей за все кампании экспериментов (P — число соответствующих сеансов наблюдений)

приведены в табл. 4. Из-за большого объема данных в таблице показаны результаты только для отдельных дней наиболее продолжительной кампании 21–28 августа 2013 года. Результаты измерений для остальных кампаний носят подобный характер и включены в суммарный график распределения скоростей дрейфа неоднородностей (см. рис. 1). Всего по измерениям вектора скорости дрейфа во всех кампаниях (2009–2013 годы) получены данные в 100 сеансах наблюдений. В табл. 4 все обозначения соответствуют тем, которые были введены в работе [1]. Компоненты вектора скорости \mathbf{V} (V_x , V_y , V_z) определены в системе координат (x, y, z) , где (x, y) — декартовы координаты в горизонтальной плоскости, Δ — угол, составляемый вектором \mathbf{V} с горизонтальной плоскостью, β — азимутальный угол, отсчитываемый от направления на географический север (ось y) по часовой стрелке, V_H — компонента вектора скорости \mathbf{V} в направлении магнитного поля \mathbf{H}_0 , $V_{H\perp}$ — проекция вектора \mathbf{V} на плоскость, ортогональную \mathbf{H}_0 . Четыре последних столбца табл. 4 относятся к расчётам, выполненным по формулам (10)–(15) статьи [1], где $(V_{x'}, V_{y'})$ — значения компонент скорости дрейфа неоднородностей в плоскости, ортогональной магнитному полю в системе координат (x', y') , $V' = (V_{x'}^2 + V_{y'}^2)^{1/2}$, β' — азимутальный угол вектора скорости дрейфа \mathbf{V}' , отсчитываемый от направления оси y' по часовой стрелке. В табл. 4 также показаны относительные среднеквадратичные погрешности δ решения переопределённой системы уравнений для оценки вектора скорости неоднородностей. Как видно, погрешности δ редко превышают 15 %.

Распределение погрешности δ по измерениям во всех кампаниях приведено в табл. 5, где P — число соответствующих сеансов наблюдений. Из табл. 5 видно, что в 73 % случаев погрешность δ составляет меньше 10 %.

Таким образом, можно утверждать, что оценки скорости дрейфа искусственных неоднородностей по разработанной методике на основе измерений эффективного доплеровского смещения частоты на нескольких частотах от различных диагностических передатчиков заслуживают доверия. Сделанные при разработке указанной методики предположения не противоречат результатам измерений эффективного доплеровского смещения частоты. При этом одно из важнейших предположений заключалось в том, что скорость дрейфа остаётся постоянной во всей интересую-

Таблица 4

Дата	Время (UT), ч:мин	V_x , м/с	V_y , м/с	V_z , м/с	V , м/с	Δ , градусы	β , градусы	δ , %	V_H , м/с	$V_{H\perp}$, м/с	$V_{x'}$, м/с	$V_{y'}$, м/с	V' , м/с	β' , градусы
21.08.2013	13:27	-67,3	17,3	-14,8	71,0	-12,0	-75,6	0,1	15,6	69,3	-68,2	12,5	69,4	-79,6
	14:04	-29,2	-66,1	146,9	163,7	63,8	-156,2	12,7	-161,6	26,1	-19,9	-19,1	27,6	-133,7
	14:59	42,1	36,8	-87,2	103,5	-57,3	48,9	0,7	96,5	37,5	36,6	8,9	37,7	76,4
	17:31	67,9	311,8	-1107,3	1152,4	-73,9	12,3	15,6	1151,2	51,8	-3,9	-40,2	40,4	-174,5
	18:03	45,6	-100,9	30,4	114,8	15,3	155,7	0,7	-57,8	99,1	47,4	-90,9	102,5	152,5
	18:11	-336,6	457,1	50,3	569,9	5,1	-36,4	0,5	76,7	564,7	-316,0	447,1	547,5	-35,2
22.08.2013	14:04	-29,6	-24,3	36,9	53,2	43,9	-129,4	1,4	-44,2	29,5	-27,2	-12,6	30,0	-114,7
	14:33	-6,1	-50,7	42,9	66,7	40,1	-173,1	3,1	-56,9	34,8	-3,6	-36,4	36,6	-174,3
	15:31	-25,3	-37,5	43,6	62,8	43,9	-146,0	1,2	-54,5	31,2	-22,5	-23,5	32,5	-136,2
	17:31	35,0	-186,1	138,8	234,8	36,2	169,4	0,5	-188,0	140,7	44,5	-143,4	150,1	162,8
	18:01	-64,2	44,1	-6,4	78,1	-4,7	-55,5	0,1	16,3	76,4	-64,6	42,1	77,1	-56,9
	18:11	-29,3	-28,1	-5,2	40,9	-7,3	-133,8	0,0	-5,5	40,5	-29,6	-29,7	42,0	-135,1
	18:21	-279,5	384,4	-18,9	475,6	-2,3	-36,0	0,1	122,7	459,5	-280,7	378,4	471,1	-36,6
23.08.2013	14:46	-4,8	-13,4	-3,2	14,6	-12,6	-160,3	0,1	-1,4	14,6	-5,0	-14,5	15,3	-161,0
	14:55	4,6	-20,1	-7,6	22,0	-20,2	167,1	0,1	1,1	21,9	4,2	-22,6	23,0	169,5
24.08.2013	12:55	-19,3	-230,5	600,7	643,6	68,9	-175,2	12,4	-642,7	34,6	14,3	-32,0	35,0	156,0
	13:23	-17,4	-128,6	294,5	321,8	66,2	-172,3	6,4	-320,4	29,6	-0,9	-31,3	31,3	-178,3
	16:35	-29,0	29,9	-14,9	44,2	-19,7	-44,1	0,2	21,9	38,5	-29,9	25,0	39,0	-50,0
	17:05	-43,0	55,1	-23,5	73,7	-18,6	-38,0	0,3	37,1	63,7	-44,4	47,3	64,9	-43,2
	17:35	-28,3	39,5	-15,9	51,1	-18,1	-35,6	0,4	25,8	44,2	-29,2	34,3	45,1	-40,4
	18:03	5,0	-2,4	2,2	6,0	21,7	115,9	0,1	-2,6	5,5	5,2	-1,7	5,4	108,4
	18:21	-12,5	-73,5	143,5	161,7	62,6	-170,4	1,3	-159,7	25,0	-3,5	-27,4	27,6	-172,8
	18:33	-37,9	92,4	-26,4	103,3	-14,8	-22,3	1,2	51,8	89,4	-39,5	83,7	92,6	-25,3
	18:36	30,9	-59,6	19,4	69,9	16,1	152,6	0,9	-35,4	60,3	32,0	-53,2	62,1	149,0
25.08.2013	13:36	28,4	21,1	-187,3	190,6	-79,3	53,4	6,0	185,8	42,7	17,8	-40,5	44,3	156,3
	13:51	-9,3	-74,8	115,4	137,9	56,9	-172,9	2,4	-133,4	34,8	-2,9	-36,6	36,8	-175,6
	16:05	3,2	75,5	-233,9	245,8	-72,1	2,4	13,8	245,6	10,8	-13,7	3,7	14,2	-74,8
27.08.2013	12:08	-25,1	-20,6	-43,9	54,6	-53,5	-129,5	0,3	33,7	42,9	-29,2	-35,5	45,3	-141,5
	15:36	53,4	137,8	-587,9	606,2	-75,9	21,2	15,3	603,5	57,2	18,2	-56,0	58,9	162,0
	15:52	2,9	-53,2	56,2	77,5	46,5	176,9	1,6	-69,8	33,6	6,3	-34,7	35,3	169,8
	16:04	-51,2	-14,4	19,0	56,5	19,7	-105,7	7,1	-25,4	50,4	-49,9	-8,3	50,6	-99,4
	16:08	-56,6	-8,5	26,7	63,1	25,0	-98,4	11,7	-31,1	54,9	-54,8	0,1	54,8	-89,9
	16:33	-54,4	16,3	13,8	58,5	13,6	-73,4	4,7	-11,0	57,4	-53,6	20,8	57,5	-68,7
28.08.2013	14:36	-44,4	-3,9	13,7	46,6	17,1	-95,0	1,6	-16,7	43,5	-43,6	0,7	43,6	-89,1
	16:33	17,9	-6,5	7,6	20,5	21,9	110,0	0,1	-8,3	18,7	18,3	-4,0	18,7	102,3
	17:16	457,9	-670,4	-78,4	815,6	-5,5	145,7	1,1	-110,1	808,2	425,8	-654,8	781,0	147,0

Таблица 5

$\delta, \%$	P
0÷5	51
5÷10	22
10÷15	18
15÷20	7
20÷25	2

щей нас области высот (т. е. той области, где происходит рассеяние диагностического излучения).

Как показывают наши измерения, в ряде случаев угол Δ между вектором \mathbf{V} и горизонтальной плоскостью достаточно велик ($60^\circ \div 80^\circ$). При этом компонента V_z заметно превышает компоненты V_x, V_y в горизонтальной плоскости.

Сравним величины V_x, V_y, β и $V_{x'}, V_{y'}, \beta'$. Как видно из табл. 3, их значения могут заметно отличаться. Эти отличия могут быть вызваны как различием систем координат (x, y, z) и (x', y', z') , так и другими причинами. Одной из них является влияние на выполнение ракурсных

условий рассеяния крупно- и среднемасштабных флуктуаций электронной концентрации, которые не учитываются в регулярной модели ионосферы IRI-2012 при имитационном моделировании.

В то же время, как видно из табл. 4, величина V' всегда близка по значению к $V_{H\perp}$ (т. е. к проекции вектора скорости дрейфа на плоскость, ортогональную вектору геомагнитного поля). Таким образом, для определения скорости дрейфа искусственных неоднородностей в плоскости, ортогональной магнитному полю, можно использовать расчёты по формулам (10)–(15) работы [1]. Наиболее вероятные значения проекции $V_{H\perp}$ изменяются в диапазоне $20 \div 50$ м/с. В редких случаях значения $V_{H\perp}$ превышают 100 м/с.

Проекция вектора скорости дрейфа на поверхность земли наиболее часто ориентирована вдоль линии север–юг. При этом если вектор \mathbf{V} направлен на север, то наблюдается небольшое отклонение проекции скорости на восток от магнитного меридиана. Если вектор \mathbf{V} направлен на юг, то проекция отклоняется на запад.

В вертикальной плоскости вектор скорости дрейфа \mathbf{V} , как правило, направлен под углами в диапазоне $60^\circ \div 80^\circ$ к плоскости горизонта, т. е. направление скорости дрейфа в этих случаях близко к направлению геомагнитного поля. При этом, если вектор \mathbf{V} ориентирован на север, то он направлен вниз. Если вектор ориентирован на юг, то он направлен вверх. В некоторых случаях вектор \mathbf{V} почти горизонтален.

На рис. 1 приведена гистограмма распределения модуля скорости дрейфа по всем экспериментальным данным. Из него видно, что величина скорости лежит в широком интервале значений. Обычно она находится в пределах $20 \div 270$ м/с, но иногда встречаются скорости, превышающие $500 \div 700$ м/с. Скорости такого порядка могут быть связаны с проникновением электрических полей из магнитосферы и с другими причинами. Наиболее вероятная скорость составляет величину порядка $40 \div 70$ м/с.

Заметим, что в некоторых случаях наблюдаются скорости дрейфа, превышающие 1000 м/с и даже достигающие значений 3000 м/с. При этом погрешности δ решения переопределённой системы уравнений (6) в работе [1] не превышают типичных величин $15 \div 20\%$, т. е. полученные оценки следует признать достоверными.

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты измерений доплеровского смещения частоты рассеянных радиосигналов и основанные на них расчёты вектора скорости \mathbf{V} дрейфа мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей. Показано, что вектор скорости дрейфа имеет значительную вертикальную составляющую. Так, во многих случаях угол $\Delta \approx 60^\circ \div 80^\circ$ и компонента V_z заметно превышает компоненты в горизонтальной плоскости V_x и V_y .

Согласно полученным данным, скорость дрейфа может заметно изменяться как по величине,

так и направлению в течение небольших промежутков времени, что согласуется с измерениями скорости дрейфа естественных неоднородностей в F -области ионосферы [9]. При этом во всех кампаниях не наблюдалось какого-либо преимущественного и устойчивого изменения скорости дрейфа со временем суток. По-видимому, большую роль играют пространственно-временные флуктуации параметров ионосферной плазмы и окружающего электромагнитного поля, которые оказывают существенное влияние на измеряемые характеристики радиосигналов.

Остаётся открытым вопрос о причинах и условиях возникновения в ряде случаев больших значений вертикальной скорости дрейфа неоднородностей. Следует отметить, что в эксперименте по просвечиванию возмущённой области ионосферы сигналами геостационарного спутника ATS-6 были обнаружены большие ($V \geq 0,5 \div 1,0$ км/с) эффективные скорости вертикального перемещения источника, ответственного за генерацию искусственных неоднородностей [10, 11].

В то же время в плоскости, ортогональной магнитному полю, значения скоростей дрейфа $V_{H\perp}$ (или V') в основном лежат в пределах $20 \div 50$ м/с (см. табл. 4), что соответствует многочисленным измерениям данной проекции скорости дрейфа (см., например, работы [12, 13] и цитируемую в них литературу), но иногда встречаются скорости, превышающие $100 \div 200$ м/с.

В заключение заметим, что полученные результаты содержат, на наш взгляд, ценную информацию о скорости дрейфа искусственных неоднородностей и могут быть использованы в задачах изучения динамических процессов в ионосфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и РФФИ (проект 12-02-00177-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 5. С. 339.
2. Пат. 2399062 РФ, МПК G01S 1/08. Ионосферный зонд-радиопеленгатор / Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г., Кубатко С. В. Заявл. 15.07.2009. Оpubл. 10.09.2010; Бюл. № 25.
3. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 287.
4. Ponomarenko P. V., Yampolski Yu. M., Zalizovsky A. V., et al. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, No. A1. P. 171.
5. Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 9. С. 722.
6. Черногор Л. Ф., Вертоградов Г. Г., Урядов В. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 12. С. 766.
7. www1/s2/starcat.ne.jp/ndxc/news.htm .
8. swdc234.kugi.kyoto-u.ac.jp .
9. Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Движения в ионосфере. Новосибирск: Наука, 1979. 344 с.
10. Ерухимов Л. М., Митякова Э. Е., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 12. С. 1814.
11. Филипп Н. Д., Блаунштейн Н. Ш., Ерухимов Л. М. и др. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев: Штиинца, 1991. 287 с.
12. Беленов А. Ф., Богута Н. М., Урядов В. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 5. С. 662.

13. Насыров А. М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1991. 150 с.

Поступила в редакцию 18 декабря 2014 г.; принята в печать 5 февраля 2015 г.

**DRIFT VELOCITY OF SMALL-SCALE ARTIFICIAL IONOSPHERIC
IRREGULARITIES ACCORDING TO A MULTIFREQUENCY HF DOPPLER
RADAR. II. OBSERVATION AND MODELING RESULTS**

G. G. Vertogradov, V. P. Uryadov, V. G. Vertogradov, E. G. Vertogradova, and S. V. Kubatko

We present the results of observations of the Doppler frequency shift for the multifrequency Doppler radar radio signals of broadcast and exact-time RVM stations, which are scattered by small-scale artificial ionospheric irregularities. By the method described in our previous paper [1], estimates were made for a three-dimensional vector of the drift velocity of irregularities. It is shown that the drift velocity of irregularities can vary considerably both in magnitude and direction for short periods of time. The velocity lies in a wide range of values, 20–270 m/s, but sometimes it exceeds 500–700 m/s. The most probable drift velocity is from 40 to 70 m/s.