

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕКТОРА СКОРОСТИ
ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
ПО ДАННЫМ ДОПЛЕРОВСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
МЕТОДОМ РАКУРСНОГО РАССЕЯНИЯ КВ-РАДИОСИГНАЛОВ,
РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ НА ПРОТЯЖЕННЫХ РАДИОТРАССАХ**

**DETERMINATION OF THE VECTOR VELOCITY
OF ARTIFICIAL IONOSPHERIC IRREGULARITIES BASED ON
DOPPLER MEASUREMENTS BY THE BISTATIC SCATTER METHOD
OF HF RADIO SIGNALS PROPAGATING OVER LONG RADIO PATHS**

Т.Д. Борисова *Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, borisova@aari.ru***Н.Ф. Благовещенская** *Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, nataly@aari.nw.ru***А.С. Калишин** *Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, askalishin@aari.ru***А.С. Ковалев***Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, askovalev@aari.ru***T.D. Borisova***Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia,
borisova@aari.ru***N.F. Blagoveshchenskaya***Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia,
nataly@aari.nw.ru***A.S. Kalishin***Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia,
askalishin@aari.ru***A.S. Kovalev***Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia,
askovalev@aari.ru*

Аннотация. В периоды экспериментов 2013, 2016 и 2019 г. по модификации высокоширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами обыкновенной или необыкновенной поляризации нагревного стенда EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия) выполнены доплеровские измерения диагностических КВ-радиосигналов на протяженных радиотрассах методом ракурсного рассеяния. Исследованы характеристики вариации доплеровской частоты ракурсно-рассеянных радиосигналов по результатам экспериментальных измерений на радиотрассах различной протяженности (до ~8500 км) и ориентации. Рассмотрены численные зависимости изменения доплеровской частоты радиосигнала f_D от азимута волнового вектора радиоволны, падающей на искусственно возмущенную область, от угла ракурсного рассеяния и от азимутального направления движения неоднородностей в искусственно возмущенной области ионосферы. По данным одновременных измерений доплеровской частоты радиосигнала f_D на двух диагностических трассах проведены численные оценки вектора скорости движения неоднородностей в искусственно возмущенной области ионосферы. Расчет вектора скорости движения искусственных ионосферных неоднородностей возможен по данным измерений смещения доплеровской частоты на многоскачковых диагностических радиотрассах большой протяженности при условии предварительного анализа данных экспериментальных наблюдений с привлечением

Abstract. During experiments on the modification of the high-latitude ionosphere by high-power HF radio waves of ordinary or extraordinary polarization of the EISCAT/Heating facility (Tromsø, Norway) in 2013, 2016, and 2019, Doppler measurements of diagnostic HF radio signals over long radio paths were carried out by the bistatic scatter method. We studied characteristics of Doppler frequency variations in bistatic scattered radio signals, using the experimental results obtained along radio paths of different lengths (up to ~8500 km) and orientation. We examined numerical dependences of the Doppler frequency variations in a radio signal on the azimuth of the wave vector of a radio wave incident onto an artificially disturbed region, on the bistatic scattering angle, and on the azimuthal direction of irregularity motion in an artificially disturbed region of the ionosphere. From simultaneous measurements of the Doppler frequency f_D of the radio signal along two diagnostic radio paths, we numerically estimated the velocity vector of irregularities in the artificially disturbed region of the ionosphere. The total vector velocity of artificial ionospheric irregularities can be calculated from measurements of the Doppler frequency shift along several long diagnostic radio paths after preliminary analysis of experimental observations with the results of trajectory modeling of diagnostic HF radio signals.

результатов траекторного моделирования диагностических КВ-радиосигналов.

Ключевые слова: распространение радиоволн, мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности, доплеровские наблюдения, нагревный комплекс EISCAT, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

При модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами (КВ) обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (Х-мода) поляризации на высотах, близких к отражению волны накачки, в ионосферной плазме формируется ряд неустойчивостей, которые вызывают существенные изменения параметров ионосферной плазмы [Гуревич, 2007; Фролов, 2017; Blagoveshchenskaya, 2020; Fejer, 1979; Robinson, 1989]. При воздействии мощных КВ-радиоволн на частоте накачки f_H обыкновенной поляризации возбуждается тепловая параметрическая (резонансная) неустойчивость (thermal (resonance) parametric instability, TPI) [Грач, Трахтенгерц, 1975; Грач и др., 1977, 2016; Димант, 1977; Васьков, Гуревич, 1975, 1979; Ерухимов и др., 1987; Fejer, 1979]. Развитие TPI приводит к генерации мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) электронной концентрации, вытянутых вдоль геомагнитного поля, с поперечным размером $l_{\perp} \leq \lambda_0 \approx 30 \div 100$ м (λ_0 — длина волны нагревного радиоизлучения в вакууме). МИИН формируются вблизи высот верхнего гибридного резонанса волны накачки h_{UH} , на которой выполняется условие

$$f_H \approx f_{UH} = \sqrt{f_{pe}^2 + f_{ce}^2},$$

где f_{UH} — частота верхнего гибридного резонанса, f_{ce} — гирочастота электронов.

В ионосфере КВ-радиоволна необыкновенной поляризации отражается на высоте, на которой для локальной плазменной частоты f_{pe} выполняется условие $f_{pe}^2 = f_H(f_H - f_{ce})$. Высота отражения волны накачки с Х-модой поляризации ниже высот возбуждения верхнегибридных f_{UH} -колебаний, следовательно, искусственные неоднородности при Х-нагреве, вследствие развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости, возбуждаться не могут [Stubbe, Корка, 1983; Robinson, 1989; Гуревич, 2007]. В экспериментах на высокоширотном нагревном стенде EISCAT/Heating при излучении волны накачки с Х-модой в направлении магнитного зенита в спокойных геомагнитных условиях были впервые зарегистрированы МИИН, ориентированные вдоль силовой линии магнитного поля Земли [Blagoveshchenskaya et al., 2011]. В дальнейших экспериментах на стенде EISCAT/Heating с использованием волн накачки с Х-модой получен большой объем данных наблюдений генерации МИИН. Установлено, что в высокоширотной F-области ионосферы при Х-нагреве она наблюдается в условиях слабой геомагнитной возмущенности при излучении мощной КВ-радиоволны в направлении ориентации магнитного поля Земли

Keywords: Radio wave propagation, small-scale artificial ionospheric irregularities, Doppler observations, the EISCAT heating facility, modeling.

(магнитный зенит) [Благовещенская и др., 2018, 2019; Blagoveshchenskaya, 2020; Blagoveshchenskaya et al., 2022, 2023 и цитируемая в них литература]. По данным измерений с помощью радара CUTLASS (SuperDARN) (Ханкасалми, Финляндия, 62.3° N, 26.6° E) [Greenwald et al., 1995; Lester et al., 2004] выполнено сравнение характеристик и параметров возбуждения МИИН высокоширотной ионосферы с поперечными к магнитному полю размерами $l_{\perp} \approx 7.5 \div 12$ м при О- и Х-нагреве: в зависимости от соотношения между частотой нагрева f_H и критической частотой f_oF2 слоя F2; в поведении уровней мощности $P_{МИИН}$ ракурсно-рассеянных сигналов при переходе режима генерации МИИН от О-к Х-нагреву; в изменении значений времен нарастания $t_{нар}$ и времен релаксации $t_{рел}$ МИИН с учетом значений частоты нагрева f_H ; влияния поперечных размеров l_{\perp} рассеивающих МИИН при Х-нагреве на характер исчезновения/наблюдения МИИН [Благовещенская и др., 2018, 2019].

Возможная генерация искусственных ионосферных неоднородностей при Х-нагреве может быть объяснена теорией обобщенной неустойчивости Рэля-Тейлора [Kelley, 1989], которая возбуждается при наличии сильных горизонтальных градиентов электронной плотности, в присутствии электрического поля мощной волны накачки (Х-моды), направленного перпендикулярно магнитному полю (градиенту электронной плотности) [Blagoveshchenskaya et al., 2023].

Возмущения в ионосфере существенным образом влияют на распространение электромагнитных волн в широком диапазоне частот. В КВ-диапазоне такое влияние приводит, например, к изменению фазового пути радиосигнала и, как следствие, доплеровскому смещению частоты. При распространении КВ-радиосигналов через искусственно возмущенную область (ИВО) ионосферы, заполненную искусственными неоднородностями, наблюдается эффект ракурсного рассеяния, впервые отмеченный в [Thome, Blood, 1974]. Исследования явления ракурсного рассеяния диагностических КВ-радиосигналов на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях, вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн О-поляризации, являются эффективным методом диагностики и экспериментального исследования ионосферных неоднородностей [Намазов и др., 1975; Насыров, 1991; Афраймович, 1982; Мясников и др., 2001; Урядов и др., 2008; Фролов и др., 2012; Фролов, 2017; Гершман и др., 1984; Калишин и др., 2021; Robinson, 1989; Yeoman et al., 1997; Frolov et al., 1997]. В экспериментах с использованием нагревных стендов в высоких и средних широтах EISCAT/Heating (Тромсё)

и СУРА (Нижний Новгород) показано, что сочетание КВ-нагрева ионосферы волнами накачки О-поляризации и доплеровских измерений на диагностических трассах протяженностью до 3000 км является результативным методом исследований и диагностики МИИН и среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) [Blagoveshchenskaya et al., 2006].

При ракурсном рассеянии движение ионосферных неоднородностей вызывает смещение частоты рассеянного сигнала. В измерениях доплеровским методом на одной диагностической частоте $f_{\text{диагн}}$ можно определить проекцию на направление вектора рассеяния $\Delta \mathbf{k} = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_0$ (разность между волновыми векторами падающей \mathbf{k}_0 и рассеянной \mathbf{k}_s КВ-радиоволн) скорости ионосферных неоднородностей $V_{\Delta k}$, движущихся в искусственно возмущенной области ионосферы [Гершман и др., 1984]. Оценки скоростей МИИН при О-нагреве F-области по данным измерений диагностических КВ-радиосигналов доплеровским методом на радиотрассах протяженностью до 3000 км выполнялись неоднократно (например, [Беленов и др., 1977; Ерухимов и др., 1979; Насыров, 1991; Колосков и др., 1999; Урядов и др., 2004; Borisova et al., 2002]).

Выполнены одновременные наблюдения фазовой скорости МИИН и скорости дрейфа плазмы в экспериментах [Eglitis et al., 1998] с одновременным использованием нагревного стенда EISCAT/Heating (Тромсё) [Rietveld et al., 2016]; трехпозиционных радаров некогерентного рассеяния сверхвысоких частот EISCAT UHF (European Incoherent SCATter Ultra High Frequency) в Тромсё, оборудованных передатчиком и приемником; радаров в Кируне и Соданкюле [Rishbeth, van Eyken, 1993], оснащенных только приемниками, а также когерентных КВ-радаров CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия) и Пикквйаер (Исландия) [Greenwald et al., 1995]. Установлено хорошее соответствие между наблюдаемыми фазовыми скоростями неоднородностей, генерируемых нагревным стендом, и составляющей скорости дрейфа плазмы в зоне прямой видимости радара CUTLASS. Скорости дрейфа плазмы по данным измерений радаром некогерентного рассеяния EISCAT UHF [Eglitis et al., 1998] располагались в широком интервале значений 20–270 м/с, иногда встречались скорости, превышающие 500–700 м/с.

В работах [Беленов и др., 1977; Авдеев и др., 1994] представлены оценки полного вектора скоростей дрейфа МИИН по данным измерений доплеровского смещения ракурсно-рассеянных радиосигналов при пространственно-разнесенном приеме на взаимно ортогональных диагностических радиотрассах. Методы расчета разрабатывались в работах [Blagoveshchenskaya et al., 2006; Борисова и др., 2007; Вертоградов и др., 2015]. Результаты вычислений сравнивались с данными трехпозиционных измерений фазовой скорости ионосферной плазмы радаром некогерентного рассеяния EISCAT [Борисова и др., 2007]. В периоды нагревных циклов (19 ноября 2003 г.) излучения мощной КВ-радиоволны стендом EISCAT/Heating МИИН создавались

на высотах 220–250 км. Измерения дрейфа плазмы радаром EISCAT проведены на высотах 160–170 км. Получено удовлетворительное соответствие динамики направлений движений МИИН в F-области, рассчитанных по доплеровским КВ-измерениям и по данным измерений радаром EISCAT. Отличия значений азимутальных направлений составили 4–15 и 15–30 %, а большие отклонения значений можно объяснить разными высотами проводимых измерений в ионосфере.

Целью работы является определение по экспериментальным данным вектора скорости движения МИИН, вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн О- или Х-поляризации на высокоширотную F-область. Используются данные многоканальных доплеровских КВ-измерений в периоды экспериментов на нагревном стенде EISCAT/Heating в феврале 2013, октябре 2016 и октябре 2019 г.

В результате исследований 1) рассмотрены особенности поведения МИИН, создаваемых мощным КВ-радиоизлучением О- или Х-поляризации (времена нарастания и релаксации МИИН, особенности развития МИИН во времени) по данным доплеровских наблюдений на протяженных диагностических радиотрассах и выполнено сравнение с характеристиками МИИН, измеренными по результатам наблюдений радаром CUTLASS; 2) проведено моделирование траекторных характеристик распространения диагностических КВ-радиосигналов на протяженных трассах ракурсного рассеяния передатчик — искусственно возмущенная область (ИВО) ионосферы — приемник; 3) реализованы расчеты скоростей движений МИИН с использованием данных доплеровских измерений диагностических КВ-радиосигналов на протяженных диагностических радиотрассах в периоды нагревных экспериментов.

1. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Эксперименты по воздействию мощных КВ-радиоволн О- или Х-поляризации выполнялись на нагревном стенде EISCAT/Heating, расположенном в Норвегии недалеко от Тромсё (69.6° N, 19.2° E, $L=6.2$) [Rietveld et al., 2016], 25 февраля 2013, 20 октября 2016 и 21 октября 2019 г.

Наблюдения искусственных неоднородностей в ионосфере над Тромсё проводились на диагностических радиотрассах методом ракурсного рассеяния диагностических КВ-радиосигналов многоканальным доплеровским комплексом [Калишин и др., 2021]. В табл. 1 приведены характеристики диагностических радиотрасс: названия и географические координаты пунктов приема и передачи, частоты передатчиков излучения $f_{\text{диагн}}$, протяженности диагностических трасс (передатчик—приемник (прямая трасса); передатчик—ИВО над Тромсё; ИВО—приемник и передатчик—ИВО—приемник (трасса ракурсного рассеяния)).

Регистрация диагностических КВ-радиосигналов осуществлялась 20 октября 2016 и 21 октября 2019 г. на НИС «Горьковская» вблизи Санкт-Петербурга и 25 февраля 2013 г. в Санкт-Петербурге и Ловозеро.

Таблица 1

Характеристики диагностических КВ-радиотрасс: названия и географические координаты пунктов приема и передачи, частоты диагностических передатчиков, протяженности диагностических трасс (передатчик—приемник, передатчик—ИВО, передатчик—ИВО—приемник).

Приемник широта, долгота	Передатчик широта, долгота	$f_{\text{диагн.}}$, МГц	Трасса передатчик—приемник D , км	Трасса передатчик—ИВО D , км	Трасса ИВО—приемник D , км	Трасса PP передатчик— ИВО—приемник D , км
ст. «Горьков- ская» (вблизи С-Петербурга) 59.9° N; 30.3° E	Нашвилл 36.2° N; -86.9° W.	13.845 15.825	7850	6830	1150	7980
	Хайалиа Гарденс 25.9° N; -80.37° W	15.770 21.675	8570	7662	1150	8810
	Иркутск 52° N; 104° E	21.800	4380	4515	1150	5660
Ловозеро 68° N; 35° E	Москва 55.7° N; 37.6° E	12.075	1370	1800	670	2470

Для передатчиков, расположенных в Нашвилл и Хайалиа Гарденс, (далее — расположенных в Америке).

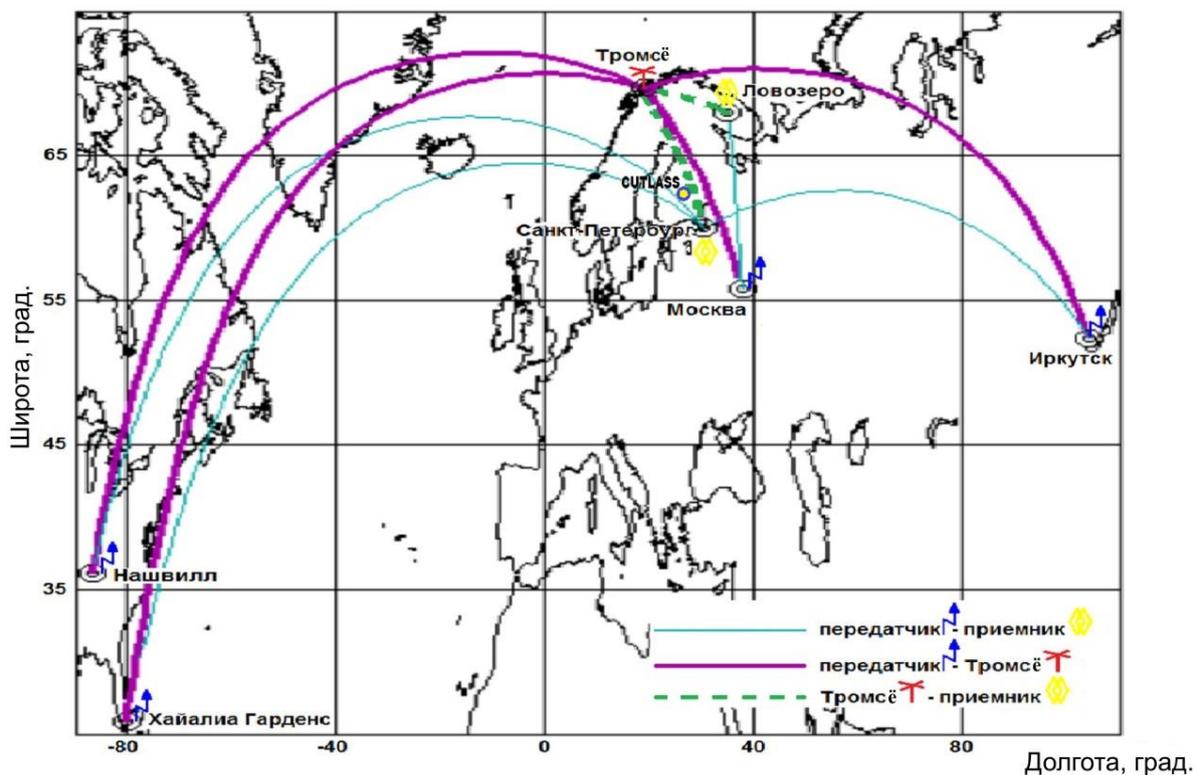


Рис. 1. Геометрия экспериментов

Карта, поясняющая геометрию экспериментов 2013, 2016 и 2019 г., показана на рис. 1.

Излучение мощной КВ-радиоволны О-поляризации 25 февраля 2013 г. проводилось в утренние часы на частоте $f_H = 5.423$ МГц в направлении магнитного зенита в режиме 10-минутный нагрев / 5-минутная пауза. Процесс возбуждения МИИН регистрировался с 08:30 до 09:15 UT (LT=UT+2 ч) методом ракурсного рассеяния на двух диагностических трассах, оборудованных передатчиками и приемниками в разных пунктах: Иркутск — Tromsø — Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 21.8$ МГц) и Москва — Tromsø — Ловозеро ($f_{\text{диагн}} = 12.075$ МГц).

EISCAT/Heating 21 октября 2019 г. излучал на частоте $f_H = 4.2$ МГц с О-поляризацией в 15:00–15:34 UT и Х-поляризацией в 15:35–15:48 UT в направ-

лении магнитного зенита (LT=UT+1 ч). Циклы излучения составляли 3-минутный нагрев / 2-минутная пауза. В Санкт-Петербурге методом ракурсного рассеяния выполнялись одновременные измерения на диагностических КВ-трассах Хайалиа Гарденс — Tromsø — Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 15.770$ МГц); Нашвилл — Tromsø — Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 15.825$ и $f_{\text{диагн}} = 13.845$ МГц), передатчики которых расположены в Северной Америке.

EISCAT/Heating 20 октября 2016 г. излучал на частоте $f_H = 4.543$ МГц с О- или Х-модой поляризации с 14:16 до 16:00 UT (LT=UT+1 ч). Регистрация возбуждения МИИН в данном эксперименте проводилась одновременно КВ-радаром CUTLASS и методом ракурсного рассеяния диагностических КВ-радиосигналов в Санкт-Петербурге. Доплеров-

ские наблюдения выполнялись на трассе Хайалиа Гарденс — Тромсё — Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}}=17.750$ и $f_{\text{диагн}}=21.675$ МГц).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

2.1. Эксперимент 20 октября 2016 г.

Модификация ионосферы в эксперименте 20 октября 2016 г. проводилась с использованием стенда EISCAT/Heating в спокойных геомагнитных условиях и при низкой солнечной активности (трехчасовой индекс магнитной активности $K_p=0$, число Вольфа $W=31$). Во время эксперимента значения критических частот слоя F2 ионосферы, f_oF2 и f_xF2 (обыкновенной и необыкновенной поляризации), по данным наблюдений станции вертикального зондирования (ВЗ) в Тромсё постепенно уменьшались от 5.5 и 6.2 МГц в 14:15 UT до 4.5 и 5.2 МГц в 15:30 UT (LT=UT+1 ч) и далее до 16:00 UT значения f_oF2 и f_xF2 снизились до значений 4.1 и 4.8 МГц.

С 14:15 до 16:00 UT мощная КВ-радиоволна нагревного стенда EISCAT/Heating на частоте $f_H=4.543$ МГц обыкновенной или необыкновенной поляризации излучалась в направлении магнитного зенита фазированной антенной решеткой № 2 (ФАР-2), имеющей ширину диаграммы направленности антенны $\sim 15^\circ$ (на уровне 3 дБ), обеспечивающей эффективную мощность излучения $P_{\text{эфф}}=150$ МВт. В 14:15–14:30 UT излучение проводилось с О-модой, в 14:30–16:00 UT — с Х-модой. Передатчик работал циклами 10-минутный нагрев — 5-минутная пауза. До 15:30 UT частота накачки была ниже критической частоты слоя F2 (обыкновенной поляризации), $f_H < f_oF2$. После 15:30 UT нагрев выполнялся в условиях $f_H > f_oF2$ и $f_H < f_xF2$.

Измерения КВ-радаром CUTLASS характеристик МИИН 20 октября 2016 г. проводились в нестандартном режиме [Lester et al., 2004]. Радар CUTLASS излучал на узконаправленную антенну в режиме стереомоды с шириной луча примерно 3.3° , ориентированную на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсё (луч 5) на трех частотах, лежащих в диапазоне от 10–20 МГц. Временное разрешение измерений составляло 3 с, разрешение по дальности «ворота» — 15 км, при этом первые ворота начинались с дальности 480 км. Диапазон частот излучения радара CUTLASS составлял 8–20 МГц, следовательно, возможны наблюдения МИИН с поперечными масштабами 7.5–18.75 м.

Исследование и анализ данных измерений МИИН по данным измерений радаром CUTLASS в эксперименте 20 октября 2016 г. опубликованы в [Благовещенская и др., 2018]. В настоящем исследовании проводится сопоставление характеристик развития МИИН по результатам их одновременных регистраций радаром CUTLASS и методом ракурсного рассеяния диагностических КВ-радиосигналов на протяженных трассах.

Измерения характеристик МИИН методом ракурсного рассеяния диагностических КВ-радиосигналов 20 октября 2016 г. проводились на станции НИС «Горьковская» на трассе Хайалиа Гарденс — Тромсё — Санкт-Петербург на двух диагностических

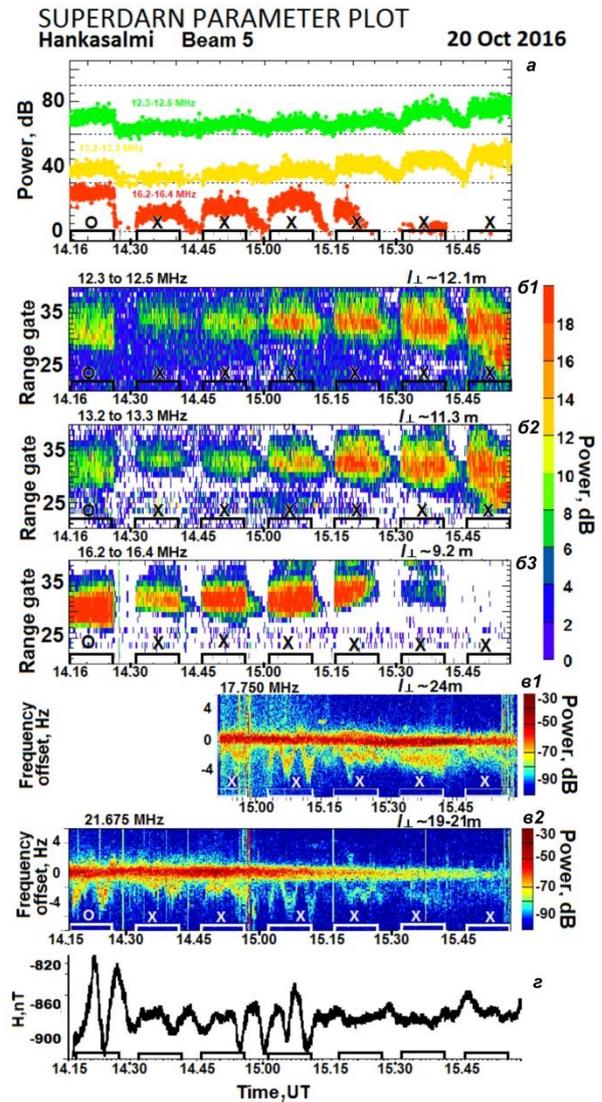


Рис. 2. Данные наблюдений (а, б1–б3) с помощью когерентного доплеровского КВ-радар CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 5, ориентированный на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсё); измерения (е1, е2) методом ракурсного рассеяния диагностических КВ-радиосигналов (сонограммы) на трассе Хайалиа Гарденс — Тромсё — Санкт-Петербург, ($f_{\text{диагн}}=17.750$ и 21.675 МГц); H -компонента (с) магнитного поля Земли магнитовариационной станции Тромсё. Циклы нагрева и используемая поляризация мощной КВ-радиоволны отмечены на оси времени нижней панели

частотах $f_{\text{диагн}}=17.750$ и 21.675 МГц. Ранее результаты наблюдения МИИН методом ракурсного рассеяния на протяженных радиотрассах в экспериментах с Х-нагревом не представлялись.

На рис. 2 показаны результаты наблюдений МИИН 20 октября 2016 г. в 14:15–16:00 UT радаром CUTLASS и методом ракурсного рассеяния для сопоставления параметров МИИН, измеренных разными методами в периоды циклов нагрева.

На рис. 2, а, б1–б3 показаны данные измерений радара, заимствованные из работы [Благовещенская и др., 2018]. Циклы нагрева и поляризация частоты накачки f_H отмечены на оси времени. Усредненные мощности рассеянных на МИИН сигналов $P_{\text{МИИН}}$ в искусственно возмущенной области (ИВО) ионо-

сферы на трех частотах 12.4, 13.3 и 16.3 МГц, показанные на рис. 2, а, обнаруживают изменение $P_{\text{МИИН}}(t)$ от цикла к циклу за весь период наблюдений. На рис. 2, б1–б3 показаны перемещения $P_{\text{МИИН}}$ в зависимости от дальности (range gate) и времени UT на трех частотах 12.4, 13.3 и 16.3 МГц, соответствующих обратному рассеянию от МИИН с поперечными масштабами l_{\perp} от 12.1 до 9.2 м. Регистрация рассеянных на МИИН сигналов проводилась в диапазоне дальностей 780–1080 км, соответствующих измерениям в номерах ворот от 20 до 40. Результаты измерений радара CUTLASS позволяют оценить пространственные размеры ИВО в ионосфере $D_{\text{ИВО}}$ в направлении луча радара. Для циклов О-нагрева $D_{\text{ИВО}}$ меняется от 180 км для МИИН с масштабом $l_{\perp} \sim 9.2$ м до 165 км для $l_{\perp} \sim 12.1$ м. При X-нагреве (в первом цикле после О-нагрева) $D_{\text{ИВО}} \sim 150$ км для $l_{\perp} \sim 9.2$ м и $D_{\text{ИВО}} \sim 120$ км для $l_{\perp} \sim 12.1$ м. В последующих циклах X-нагрева $D_{\text{ИВО}}$ увеличивается.

Минимальный поперечный размер МИИН, ответственных за ракурсное рассеяние радиоволн, определяется выражением [Ерухимов и др., 1979; Насыров, 1991]

$$l_{\perp} = \lambda / 2 \sin(\theta / 2), \quad (1)$$

где $\lambda = f_{\text{диагн}} / c$ — длина волны диагностической КВ-радиоволны; θ — угол ракурсного рассеяния между волновыми векторами падающей \mathbf{k}_0 на МИИН и рассеянной \mathbf{k}_s волнами; c — скорость света. Рассчитанные значения l_{\perp} и θ для условий экспериментов, представленных в данной работе, показаны в табл. 2, формулы для вычислений — в разделе 3.2. На рис. 2, в1, в2 показаны динамические доплеровские спектры (сонограммы) диагностических КВ-радиосигналов на трассе Хайалиа Гарденс—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 17.750$ МГц и 21.675 МГц), измеренные 20 октября 2016 г. методом ракурсного рассеяния диагностических КВ-радиосигналов одновременно с наблюдениями, проводимыми радаром CUTLASS. Показаны также минимальные поперечные размеры рассеивающих МИИН $l_{\perp} = 24$ и 19–21 м для частот 17.750 и 21.675 МГц соответственно, рассчитанные по (1) с учетом углов ракурсного рассеяния θ диагностических радиосигналов в ИВО над Тромсё для условий эксперимента 20 октября 2016 г. (см. табл. 2). Нулевое значение сдвига доплеровской частоты $f_D = 0$ соответствует измерениям диагностических КВ-радиосигналов, распространяющихся от передатчика до приемника по дуге большого круга (прямой сигнал) на трассе Хайалиа Гарденс—Санкт-Петербург. Из рис. 2, в1, в2 можно видеть, что в период измерений во всех циклах О- и X-нагрева регистрировались ракурсно-рассеянные сигналы, смещенные от нуля преимущественно в отрицательную часть доплеровского спектра и формирующие на сонограммах треки доплеровской частоты f_D . Доплеровскими измерениями регистрируется структура поведения МИИН в цикле нагрева. Наблюдались волновые вариации в поведении доплеровской частоты f_D с периодами 2–3.5 мин, которые совпадали

с периодами колебаний H -компоненты магнитного поля (рис. 2, з), измеренные магнитовариационной станцией Тромсё [<https://flux.phys.uit.no/ArcMag/>].

В табл. 3 приведены некоторые характеристики МИИН, измеренные 20 октября 2016 г. во время нагревного эксперимента на стенде EISCAT/Heating радаром CUTLASS и методом ракурсного рассеяния диагностических КВ-радиосигналов на протяженной радиотрассе.

Сравнение характеристик МИИН, генерируемых мощной радиоволной с X-модой поляризации стенда EISCAT/Heating 20 октября 2016 г., одновременно измеренных КВ-радаром CUTLASS и методом ракурсного рассеяния (см. рис. 2 и табл. 3), показало соответствие характера возбуждения и развития МИИН, а также близкие значения следующих параметров МИИН.

- При X-нагреве времена нарастания МИИН имели одинаковую величину $t_{\text{нар}} < 30$ с.

- Время релаксации ракурсно-рассеянных на МИИН сигналов совпадали и имели значения $t_{\text{рел}} = 60$ –120 с в условиях $f_H < f_o F2$ и $t_{\text{рел}} \sim 120$ –180 с, если $f_H > f_o F2$ и $f_H < f_x F2$.

- Наблюдались подобное характерное изменение уровней мощностей $P_{\text{МИИН}}$ ракурсно-рассеянных сигналов при переходе режима генерации МИИН от О- к X-нагреву, а также снижение $P_{\text{МИИН}}$ в первом цикле X-нагрева после О-нагрева и возрастание $P_{\text{МИИН}}$ в последующих циклах.

- Отмечается характерная особенность при X-нагреве исчезновения/наблюдения МИИН в условиях $f_H > f_o F2$ и $f_H < f_x F2$ в зависимости от поперечных размеров l_{\perp} рассеивающих неоднородностей. Сначала исчезают неоднородности с меньшими размерами l_{\perp} . В 15:30 UT начали исчезать МИИН с $l_{\perp} \sim 9.2$ м.

Отметим, что обратное рассеяние ($\theta = 180^\circ$) на частотах $f_{\text{диагн}} = 17.750$ и 21.675 МГц происходит на МИИН с поперечными размерами $l_{\perp} \sim 6.9$ и 8.4 м. Диагностические КВ-радиосигналы с частотами $f_{\text{диагн}} = 17.750$ и 21.675 МГц 20 октября 2016 г. регистрировались до 16 UT. Рассеяние радиосигналов на данных частотах происходило на МИИН с существенно большими размерами $l_{\perp} \sim 19$ –20 и 24 м соответственно (см. табл. 2). Данный факт согласуется с установленными закономерностями исчезновения МИИН при X-нагреве в условиях $f_H > f_o F2$ и $f_H < f_x F2$ в зависимости от размера l_{\perp} по данным радара CUTLASS [Благовещенская и др., 2018].

Одновременные наблюдения МИИН 20 октября 2016 г. радаром CUTLASS и методом ракурсного рассеяния продемонстрировали одинаковые характеристики поведения МИИН, созданных мощным КВ-радиоизлучением с X-модой, такие как времена нарастания и релаксации $P_{\text{МИИН}}$, поведение $P_{\text{МИИН}}$ во времени в зависимости от соотношения между f_H , $f_o F2$ и $f_x F2$.

Регистрация в Санкт-Петербурге КВ-радиосигналов передатчиков из Америки ракурсно-рассеянных на МИИН, возбуждаемых стендом EISCAT/Heating, позволяет регистрировать МИИН с поперечными размерами l_{\perp} , в 2–3 раза большими, чем на таких же

Таблица 2

Рассчитанные значения углов рассеяния θ и поперечные размеры ионосферных неоднородностей l_{\perp} , рассеивающих диагностические сигналы с частотой $f_{\text{диагн}}$ на исследуемых трассах и азимут разностного вектора $\Delta\mathbf{k}=\mathbf{k}_0-\mathbf{k}_s$ в экспериментах 2016, 2019 и 2013 г.

Передатчик	Приемник	$f_{\text{диагн}}$, МГц	l_{\perp} , м с учетом Θ	Θ , град для условий эксперимента	Азимут разностного вектора $\Delta\mathbf{k}$	$\Delta\Lambda z_{\text{ко}}$, град
С	С	12.400	12.10	180		
Москва	Ловозеро	12.075	13.80	134	138	± 5
С	С	13.300	11.28	180		
Нашвилл	С.Пб	13.845	21–22	30	42	± 2.5
Хайалиа Гарденс	С.Пб	15.770	27–28	40	38	± 2.5
Нашвилл	С.Пб	15.825	18–19	30	42	± 2.5
С	С	16.300	9.20	180		
С	С	16.600	9.04	180		
Хайалиа Гарденс	С.Пб	17.750	24	40	38	± 2.5
Хайалиа Гарденс	С.Пб	21.675	19–21	40	38	± 2.5
Иркутск	С.Пб	21.800	7.00	102	108	± 3

С — обозначение передатчика и приемника доплеровского КВ-радар CUTLASS

Таблица 3

Характеристики МИИН, измеренные 20 октября 2016 г. радаром CUTLASS и методом ракурсного рассеяния на радиотрассе Хайалиа Гарденс — Тромсё — Санкт-Петербург на диагностических частотах $f_{\text{диагн}}=17.750$ МГц и $f_{\text{диагн}}=21.675$ МГц при О- и Х-нагреве в период 14:16 до 16:00 UT.

Время, соотношение между f_{H} , $f_{\text{O}}F2$ и $f_{\text{X}}F2$	Наблюдения радара CUTLASS	Доплеровские измерения
14:16–14:26 UT (LT=UT+1 ч) О-нагрев, $f_{\text{H}} < f_{\text{O}}F2$	Наблюдается генерация МИИН. Время нарастания $t_{\text{нар}}$ ракурсно-рассеянных сигналов в цикле О-нагрева не определяется по техническим причинам. Время релаксации ракурсно-рассеянных сигналов $t_{\text{рел}}$ менее 30 с.	Наблюдается генерация МИИН (по данным $f_{\text{диагн}}=21.675$ МГц) $t_{\text{нар}} < 30$ с, $t_{\text{рел}}$ не определяется из-за наложения f_{D} смещенного и основного треков.
14:31–16:00 UT Х-нагрев; до 15:30 UT $f_{\text{H}} < f_{\text{O}}F2$, после 15:30 UT $f_{\text{H}} > f_{\text{O}}F2$ и $f_{\text{H}} < f_{\text{X}}F2$	Наблюдается генерация МИИН. При Х-нагреве времена нарастания МИИН $t_{\text{нар}} < 30$ с.	Наблюдается генерация МИИН $t_{\text{нар}} < 30$ с.
14:31–14:41 UT первый цикл Х-нагрева после О-нагрева $f_{\text{H}} < f_{\text{O}}F2$	Снижение $P_{\text{МИИН}}$ на 4–15 дБ и уменьшение размера $D_{\text{ИВО}}$.	Уменьшение $P_{\text{МИИН}}$ на 10 дБ для $f_{\text{диагн}}=21.675$ МГц. Размер $D_{\text{ИВО}}$ по данным доплеровских измерений не определяется.
14:31–15:30 UT Х-нагрев по мере приближения f_{H} к $f_{\text{O}}F2$, $f_{\text{H}} < f_{\text{O}}F2$ и $f_{\text{H}} < f_{\text{X}}F2$	Значение $P_{\text{МИИН}}$ (в среднем) возрастает на ~10–12 дБ за период.	Уровень мощности прямого сигнала $P_{\text{ПС}}$ диагностической КВ-радиоволны оказывает влияние на изменение $P_{\text{МИИН}}$ (*). Для $f_{\text{диагн}}=17.750$ МГц до 15:41 UT уровни $P_{\text{ПС}}$ и $P_{\text{МИИН}}$ не изменяются. Для $f_{\text{диагн}}=21.675$ МГц до 14:56 UT уровни $P_{\text{ПС}}$ и $P_{\text{МИИН}}$ сохраняются. После 15:01 UT при снижении $P_{\text{ПС}}$ на 20 дБ $P_{\text{МИИН}}$ уменьшается на 10–15 дБ
	Время релаксации ракурсно-рассеянных сигналов $t_{\text{рел}} \sim 60\text{--}120$ с.	$t_{\text{рел}} \sim 60\text{--}120$ с.
15:31–16:00 UT Х-нагрев $f_{\text{H}} > f_{\text{O}}F2$ и $f_{\text{H}} < f_{\text{X}}F2$	Сначала ослабевают, а затем исчезают МИИН с более мелкими масштабами ($l_{\perp}=9.2$ м — рис. 2, а и б3), но увеличивается $P_{\text{МИИН}}$ и размер $D_{\text{ИВО}}$. МИИН более крупных размеров ($l_{\perp}=11.3$ и 12.1 м)	МИИН с размерами $l_{\perp} \sim 19\text{--}20$ и 24 м (табл. 3) регистрировались до 16 UT. Для $f_{\text{диагн}}=17.750$ МГц уменьшение $P_{\text{МИИН}}$ на 15 дБ наблюдается при снижении $P_{\text{ПС}}$ на 30 дБ и для $f_{\text{диагн}}=21.675$ МГц. $P_{\text{МИИН}}$ уменьшается на 10 дБ при снижении $P_{\text{ПС}}$ на 20 дБ.
	$t_{\text{рел}} \sim 120\text{--}180$ с.	$t_{\text{рел}} \sim 120\text{--}180$ с

Снижение уровней мощности прямого $P_{\text{ПС}}$ и рассеянных $P_{\text{МИИН}}$ сигналов на частоте $f_{\text{диагн}}=21.675$ МГц (рис. 2, в2) после 15:10 UT объясняется изменением числа скачков траектории распространения диагностических сигналов на протяженной трассе, пересекающей семь часовых поясов в направлении полдень — вечер. Закономерное суточное изменение параметров слоя F2 в распределении ионосферы вдоль трассы (уменьшение электронной концентрации N_e и возрастание высоты максимума слоя h_mF2) приводят к увеличению числа скачков и, следовательно, уменьшению мощностей радиосигналов, падающих на ИВО в ионосфере над Тромсё и принимаемых в Санкт-Петербурге (см. разд. 3).

диагностических частотах передатчиков из Европы или Азии благодаря углу ракурсного рассеяния $\theta < 40^\circ$.

2.2. Эксперимент 21 октября 2019 г.

Нагревный стенд EISCAT/Heating 21 октября 2019 г. излучал волны накачки на частоте $f_H = 4.2$ МГц обыкновенной поляризации в 15:00–15:34 UT и необыкновенной поляризации в 15:35–15:48 UT ($LT = UT + 1$ ч) в направлении магнитного зенита. Циклы излучения 3-минутный нагрев — 2-минутная пауза. В экспериментах использовалась ФАР-2, имеющая ширину диаграммы направленности антенны $\sim 15^\circ$ (на уровне 3 дБ). Мощность излучения стенда $P_{\text{эфф}} \sim 200$ МВт. Уровень напряженности электрического поля волны накачки на высотах 200–220 км составил $E \sim 0.6\text{--}0.67$ В/м. Экспериментальные пороговые значения напряженности электрического поля E волн накачки стенда EISCAT/Heating, необходимые для генерации МИИН, составляют $E \sim 0.29$ В/м при излучении с О-модой поляризации и $E \sim 0.53\text{--}0.6$ В/м при излучении волн с Х-модой [Борисова и др., 2017], следовательно уровня излучаемой энергии на высоте ионосферы достаточно для генерации МИИН. Поперечный размер ИВО, определяемый по пороговой мощности КВ-радиоволны нагревного стенда, составлял ~ 50 км для Х-нагрева и ~ 90 км — для О-нагрева. Эксперимент выполнялся при низкой солнечной и спокойной магнитной активности ($W = 0$, $K_p = 1$). Критические частоты f_oF_2 в 15–16 UT по данным ионозонда вертикального зондирования в Тромсё изменялись от 4.3 МГц до 4.0 МГц. Для частоты накачки f_H мощной КВ-радиоволны при излучении радиоволн с О-модой наблюдались условия $f_H \leq f_oF_2$ и при переключении поляризации волны накачки на Х-моду выполнялись условия $f_oF_2 < f_H < f_xF_2$, где f_oF_2 и f_xF_2 — критические частоты обыкновенной и необыкновенной компонент слоя F2. Следовательно, в рассматриваемых условиях возможна генерация МИИН как при О-, так и Х-нагреве высокоширотной F-области над нагревным стендом EISCAT/Heating.

С 15:20 до 15:50 UT проводились измерения доплеровским методом диагностических КВ-радиосигналов, распространяющихся на трассах Нашвилл—Тромсё—Санкт-Петербург на двух частотах $f_{\text{диагн}} = 13.845$ и 15.825 МГц и Хайалиа Гарденс—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 15.770$ МГц) (см. рис. 1, табл. 1).

На рис. 3 приведены сонограммы диагностических КВ-радиосигналов, измеренных 21 октября 2019 г. с 15:18 до 15:58 UT на трассах: Нашвилл—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 15.825$ МГц (рис. 3, а) и $f_{\text{диагн}} = 13.845$ МГц (рис. 3, в)) и Хайалиа Гарденс—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 15.770$ МГц) (рис. 3, б), отмечены диагностическая частота $f_{\text{диагн}}$ и минимальный поперечный размер l_\perp рассеивающих МИИН, рассчитанные для условий эксперимента 21 октября 2019 г. (см. табл. 2). Циклы нагрева и поляризация частоты накачки f_H показаны на осях времени. Нулевое значение сдвига доплеровской частоты

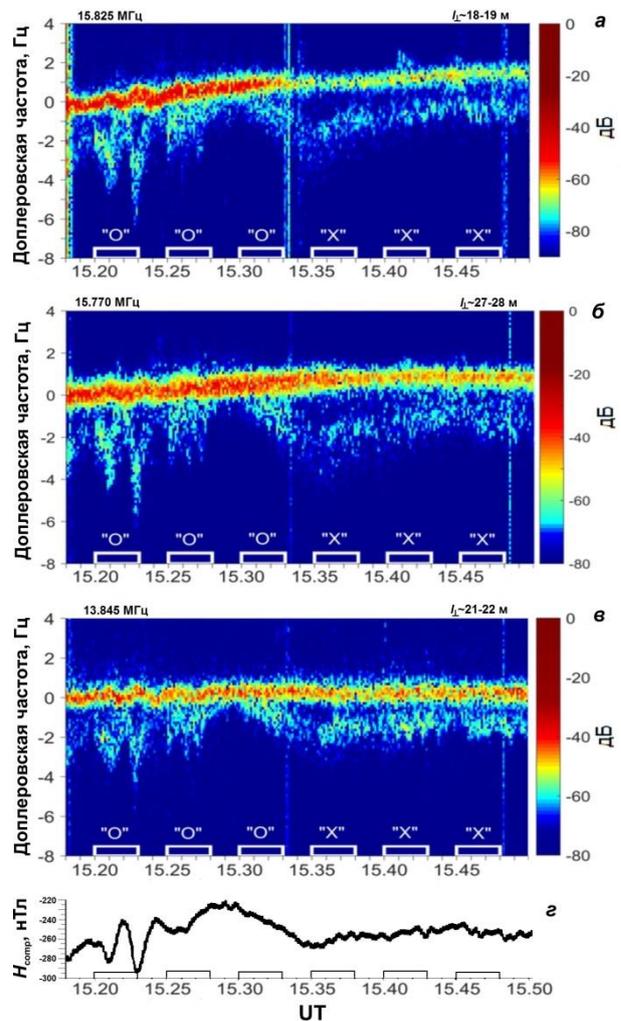


Рис. 3. Сонограммы диагностических КВ-радиосигналов во время нагревного эксперимента 21 октября 2019 г.: трасса Нашвилл—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 15.825$ МГц (а) и $f_{\text{диагн}} = 13.845$ МГц (в)); трасса Хайалиа Гарденс—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 15.770$ МГц) (б); H -компонента магнитного поля Земли магнитовариационной станции Тромсё (г). Отмечены интервалы работы нагревного стенда и поляризация волны накачки

$f_D = 0$ соответствует прямому сигналу. Помехи на сонограммах в виде вертикальных полос в 15:33:30 и 15:48:30 UT связаны с работой передатчиков наклонного ЛЧМ и вертикального зондирования ионосферы, расположенных непосредственно на территории НИС «Горьковская» вблизи многоканального доплеровского комплекса.

В циклах работы передатчика стенда EISCAT/Heating на всех диагностических радиотрассах регистрировались ракурсно-рассеянные сигналы на частотах f_D , смещенных в отрицательную сторону доплеровского спектра. На сонограммах доплеровские рассеянные сигналы формировали треки с шириной спектрального рассеяния 1.5–2.5 Гц и волновыми вариациями $f_D(t)$ с периодами 2–3 и 14 мин. Периоды колебаний f_D совпадали с периодами колебаний H -компоненты магнитного поля, измеренными магнитовариационной станцией Тромсё [<https://flux.phys.uit.no/ArcMag/>] (рис.3, г).

В целом, на сонограммах выделяется по одному треку $f_D(t)$. Отслеживается корреляция между вариациями $f_D(t)$ на трех диагностических трассах. Данный факт позволяет предполагать, что рассеяние КВ-радиосигналов на трех частотах происходит на МИИН одной пространственной области ионосферы, возмущенной мощным КВ-радиоизлучением стенда EISCAT/Heating. Рисунок 3 показывает уменьшение мощностей прямых сигналов $P_{ПС}$ около нулевой частоты и ракурсно-рассеянных $P_{МИИН}$ на смещенных частотах f_D для сигнала из Нашвилла ($f_{\text{диагн}} = 15.825$ МГц) после 15:33 UT (см. рис. 3, а) и для радиосигнала передатчика из Хайалиа Гарденс ($f_{\text{диагн}} = 15.770$ МГц) после 15:37 UT (см. рис. 3, б) (объясняется увеличением скачков траекторий распространения диагностических КВ-радиосигналов в течение суток на трассах, пересекающих семь часовых поясов в направлении полдень—вечер, см. рис. 5). На частоте $f_{\text{диагн}} = 13.845$ МГц количество скачков траектории распространения до 16:00 UT остается неизменным.

По данным доплеровских измерений 21 октября 2019 г. на протяженных трассах регистрировались параметры поведения ракурсно-рассеянных сигналов на МИИН, генерируемых в циклах нагрева.

Времена нарастания мощностей $P_{МИИН}$ от начала цикла нагрева 21 октября 2019 г. составляли $t_{\text{нар}} \sim 10$ с при излучении частоты накачки f_H с О-модой и при использовании волны накачки с Х-модой поляризации $t_{\text{нар}} \geq 30$ с.

В первом цикле Х-нагрева 15:35–15:38 UT (после цикла О-нагрева) в условиях $f_H > f_oF2$ и $f_H < f_xF2$ ракурсно-рассеянные сигналы достигли максимальной мощности через $t_{\text{нар}} \sim 40$ –50 с после начала излучения стенда. В последующих циклах Х-нагрева при наличии слабых ракурсно-рассеянных сигналов в периоды пауз усиление мощности $P_{МИИН}$ наблюдалось раньше — через 30–50 с после начала нагревного цикла.

По данным доплеровских измерений $f_D(t)$ на частоте $f_{\text{диагн}} = 13.845$ МГц в цикле О-нагрева 15:30–15:33 UT и в последующих циклах Х-нагрева 15:35–15:38 UT и 15:40–15:43 UT наблюдались уровни мощности ракурсно-рассеянных сигналов $P_{МИИН_O} = -48$ дБ; $P_{МИИН_X} = -55$ дБ и $P_{МИИН_X} = -50$ дБ соответственно (см. рис. 3, в). Изменения $P_{МИИН}$ для $f_{\text{диагн}} = 15.825$ МГц для трех циклов имели значения $P_{МИИН_O} = -63$ дБ, $P_{МИИН_X} = -75$ дБ и $P_{МИИН_X} = -65$ дБ (см. рис. 3, а).

Таким образом, можно видеть уменьшение мощности ракурсно-рассеянных сигналов $P_{МИИН}$ при переключении режима излучения волны накачки от О-моды к Х-моды в первом цикле и увеличение $P_{МИИН}$ в последующем цикле Х-нагрева (выбраны условия постоянства уровня $P_{ПР}$ при Х-нагреве).

С началом излучения передатчика в циклах Х-нагрева мощность рассеянного сигнала $P_{МИИН}$ превышает естественный уровень шума через $t_{\text{нар}}$. Далее в цикле нагрева $P_{МИИН}$ продолжает расти до какого-то максимального уровня. В период цикла Х-нагрева наблюдается сильная изменчивость уровня $P_{МИИН}$. В зависимости от продолжительности периода цикла может регистрироваться несколько максимумов $P_{МИИН}$.

На смещенных частотах $f_D(t)$ 21 октября 2019 г. (см. рис. 3) наблюдалось время релаксации искусственных неоднородностей после окончания циклов Х-нагрева $t_{\text{рел}} \sim 120$ с. Время релаксации неоднородностей в этот день ограничивалось длительностью пауз между излучением передатчика стенда.

Следовательно, по данным доплеровских измерений при Х-нагреве наблюдались параметры МИИН, совпадающие с зарегистрированными радаром CUTLASS:

- увеличенные времена нарастания $t_{\text{нар}}$ и релаксации $t_{\text{рел}}$;
- характерное поведение $P_{МИИН}(t)$ при переключении цикла О-нагрева на Х-нагрев и далее в последующих циклах нагрева.

В этот день регистрировалось также увеличенное время релаксации $P_{МИИН}$ и после окончания циклов О-нагрева $t_{\text{рел}} = 60$ –100 с. В [Ямпольский, 1989; Насыров, 1991; Благовещенская и др., 2007; Фролов и др., 2008; Hysell et al., 1996] выполнены исследования времени релаксации искусственных неоднородностей, возбуждаемых излучением волн накачки О-моды поляризации нагревным стендом СУРА. По данным измерений диагностических КВ-сигналов, рассеянных на искусственных неоднородностях (с поперечными размерами от единиц метров до нескольких километров), после выключения передатчика нагрева ионосферы зарегистрировано наличие двух стадий релаксации МИИН — так называемой быстрой релаксации длительностью 10–20 с и медленной релаксации продолжительностью до нескольких минут. Исследовались эффекты ракурсного рассеяния диагностических КВ-сигналов на ионосферных неоднородностях с масштабами $l_{\perp} \sim 8$ –20 м, диффузией которых объясняется быстрая стадия релаксации МИИН. Медленная стадия релаксации искусственных неоднородностей регистрировалась в условиях освещенности ионосферы над стендом СУРА и близости вечернего терминатора на ионосферных высотах к магнитосопряженной точке. Одним из возможных объяснений предполагалось формирование волноводного канала распространения электромагнитных волн между сопряженными областями (вдоль магнитной силовой линии) благодаря процессам в области терминатора [Ямпольский, 1989; Насыров, 1991; Благовещенская и др., 2007; Фролов и др., 2008; Hysell et al., 1996]. Регистрируемые волновые процессы с периодами, лежащими в диапазоне магнитных пульсаций Pc3-4 [Благовещенская и др., 2007], указывают на наличие альфвеновских волн в магнитной силовой трубке, которые могут вызвать генерацию вторичной неустойчивости над стендом СУРА. Развитием вторичной неустойчивости можно объяснить изменения свойств генерируемой искусственной турбулентности и усиление естественных ионосферных неоднородностей с масштабами $l_{\perp} > 100$ м.

Вечерний терминатор 21 октября 2019 г. в 15:00–16:00 UT располагался вдоль геодезической линии, соединяющей Тромсё (69.6° N, 19.2° E) и магнитно-сопряженную точку (61.2° S, 66.7° E на высотах от поверхности Земли до 100 км в ионосфере).

Ионосфера слоя F2 над Тромсё была освещена, следовательно, можно предполагать, что большие времена релаксации МИИН в ИВО над Тромсё при О-нагреве 21 октября 2019 г. (более 10–20 с) можно объяснить влиянием процессов взаимодействия между ионосферными областями над Тромсё и сопряженной к ней области ионосферы в условиях, когда они расположены вблизи границ солнечного терминатора.

2.3. Эксперимент 25 февраля 2013 г.

Излучение стенда EISCAT/Heating 25 февраля 2013 г. проводилось в утренние часы на частоте $f_H=5.423$ МГц обыкновенной (О-мода) поляризации в направлении магнитного зенита в режиме 10-минутный нагрев — 5-минутная пауза. Использовалась фазированная антенная решетка № 1 с шириной диаграммы направленности $\sim 5-7^\circ$. Мощность излучения стенда $P_{эфф} \sim 450$ МВт. Горизонтальный размер ИВО на высотах F2-слоя по пороговой мощности КВ-радиоволны нагревного стенда составлял ~ 75 км. Эксперимент проводился в период низкой солнечной и спокойной магнитной ($W=25$, $K_p=1$) активности. Наблюдения возбуждений МИИН в ионосфере над Тромсё проводились с 08:30 до 09:15 UT (LT=UT+2 ч) методом ракурсного рассеяния на диагностических трассах Иркутск—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{диагн}=21.8$ МГц) и Москва—Тромсё—Ловозеро ($f_{диагн}=12.075$ МГц) (карта на рис. 1). В эксперименте использованы диагностические радиотрассы с различными пунктами приема и передачи. Обе трассы полностью освещены. Значения f_oF2 над нагревным стендом в этот период составили 5.7–6.0 МГц, $f_H < f_oF2$, следовательно, в ионосфере в циклах излучения мощной КВ-радиоволны возможна генерация МИИН.

На рис. 4 показаны сонограммы, измеренные доплеровским методом 25 февраля 2013 г. с 08:30 до 09:15 UT на двух диагностических трассах (рис. 4, а, б). На оси времени отмечены циклы излучения передатчика стенда. Приведены минимальные поперечные размеры l_\perp рассеивающих МИИН для условий проведенных измерений на трассах Иркутск—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{диагн}=21.8$ МГц, $l_\perp \sim 7$ м) и Москва—Тромсё—Ловозеро ($f_{диагн}=12.075$ МГц, $l_\perp \sim 13.8$ м). В периоды работы нагревного стенда EISCAT/Heating в отрицательной части доплеровского спектра регистрировались ракурсно-рассеянные сигналы на частотах f_D , смещенные в отрицательную сторону от $f_D=0$, соответствующей прямому сигналу распространения на трассе передатчик—приемник. Отметим большое количество внешних помех, зарегистрированных во время проведения измерений, вызванных работой передатчиков станций вертикального и наклонного ЛЧМ-зондирования, расположенных непосредственно на территориях приемных станций «Горьковская» и Ловозеро. Передающие и приемные антенны комплексов на территориях станций находятся в непосредственной близости от многоканальных доплеровских комплексов. На сонограммах ракурсно-рассеянные сигналы характеризовались шириной доплеровского спектра 1.3–1.5 Гц и волновыми

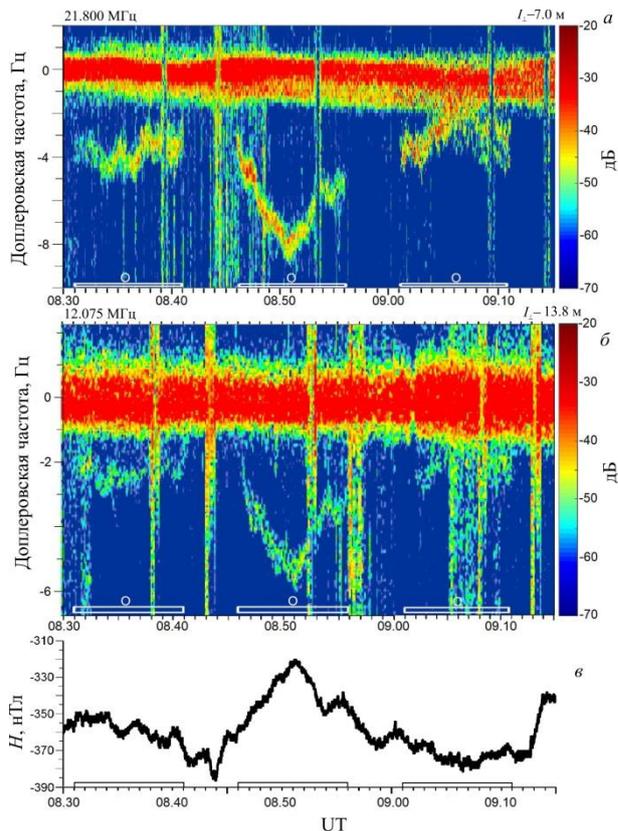


Рис. 4. Сонограммы, измеренные 25 февраля 2013 г. в 08:30–09:15 UT на диагностических трассах Иркутск—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{диагн}=21.8$ МГц) (а); Москва—Тромсё—Ловозеро ($f_{диагн}=12.075$ МГц) (б); H -компонента магнитного поля Земли магнитовариационной станции Тромсё (в)

вариациями f_D с периодами $\sim 3-4$ и 17 мин. Наблюдается корреляция между вариациями $f_D(t)$ на обеих диагностических трассах, которые совпадали с периодами колебаний H -компоненты магнитного поля (рис. 4, в), измеренными магнитовариационной станцией Тромсё [<https://flux.phys.uit.no/ArcMag/>].

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

3.1. Траекторные характеристики

Для анализа результатов измерений по модели КВ-радиоканала [Borisova et al., 2002] выполнены расчеты лучевых траекторий распространения диагностических КВ-сигналов на трассах передатчик—ИВО над Тромсё—приемник с учетом ракурсного рассеяния на мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностях в ионосфере над нагревным стендом EISCAT/Heating. Модель КВ-радиоканала разработана для решения волнового уравнения и расчета траекторий распространения сигнала в анизотропной неоднородной и нестационарной среде. Интегрирование вдоль луча распространения радиосигнала проводится с использованием метода геометрической оптики, учитывающего плавные горизонтальные неоднородности ионосферы, в рамках приближения двухмасштабного разложения. Пространственно-временные изменения электронной концентрации ионосферы N_e вдоль трассы распространения

радиоволн описываются глобальной моделью ионосферы, построенной на основе объединения известных глобальных моделей ионосферных слоев E, F1, F2 и межслоевых долин, описывающих регулярные зависимости изменений N_e от широты, долготы, высоты, времени суток, дня года, солнечной и магнитной активности, заданных числом Вольфа W и трехчасовым индексом K_p [Чернышев, Васильева, 1975; Ануфриева, Шапиро, 1976; Rawer et al., 1978]. В модели учтены также особенности высокоширотной ионосферы: главный ионосферный провал и спорадическая ионизация на высотах E- и F-слоев [Благовещенский, Жеребцов, 1987]. Входными параметрами модели являются W , K_p , время суток t , день года, географические координаты передатчика и приемника диагностических сигналов, частота диагностического сигнала $f_{\text{диагн}}$, географические координаты расположения КВ нагревного стенда, частота накачки f_H . Распределения электронной концентрации с высотой $N_e(h)$ представлены набором девяти отрезков квази-парабол с непрерывными значениями в местах соединения как самих функций $N_e(h)$, так и первых ее производных $dN_e(h)/dh$. Введенная квазипараболическая аппроксимация $N_e(h)$ -профиля допускает точное интегрирование уравнения эйконала. При моделировании на заданном шаге интегрирования параметры ионосферы считаются постоянными. Шаг интегрирования в продольном направлении вдоль дуги большого круга составляет 10–100 км и 5–30 км по высоте в ионосфере. При отражении от Земли рассматривается влияние на коэффициент отражения подстилающей поверхности суша— море.

На каждом шаге интегрирования рассчитываются следующие характеристики радиоволны: траектории лучей (координаты луча, мода, вертикальный и азимутальный углы и т. д.), групповой и фазовый пути, вариации доплеровской частоты и составляющие волнового вектора.

Вычисление характеристик распространения на последовательных трассах ракурсного рассеяния передатчик—ИВО—приемник разделено на поиск решения двух задач распространения: передатчик—ИВО и ИВО—приемник. В ионосфере на высотах расположения ИВО над нагревным стендом (в данной работе EISCAT/Heating) происходит ракурсное рассеяние падающих волн диагностических сигналов на МИИН и дальнейшее распространение до приемника. Граничным условием соединения решений двух задач распространения является выполнение условий образования конуса зеркального рассеяния падающей и рассеянной волнами, для которых справедливо соотношение [Гершман и др., 1984]

$$\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{H} = \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{H}, \quad (2)$$

где \mathbf{k}_0 и \mathbf{k}_s — волновые вектора падающей и рассеянной волн соответственно; \mathbf{H} — вектор магнитного поля Земли. Поиск траекторий, реализующих прием диагностических КВ-радиосигналов в приемнике, осуществляется методом перебора углов излучения. Результаты трехмерного моделирования траектории распространения радиосигнала на трассе передатчик—ИВО—приемник на рис. 5, 6 показаны в единой координатной плоскости дальность — высота

с местом соединения на дальности расположения ИВО. На этих же рисунках показаны изолинии плазменных частот ионосферы вдоль радиотрасс.

Расчеты траекторных характеристик КВ-радиосигналов выполнены для гелиогеофизических условий, имевших место во время проведения нагревных экспериментов. Примеры моделирования траекторий распространения диагностических сигналов передатчиков, расположенных в Северной Америке, для геофизических условий 21 октября 2019 г. ($W=0$, $K_p=1$, $t=15.20$ UT) показаны на рис. 5. С учетом распределения естественных градиентов ионосферы вдоль радиотрасс возможно распространение диагностических КВ-радиосигналов от передатчика до ИВО многоскачковой траекторией с отражением от слоя F2. Для передатчика Нашвилл на частоте $f_{\text{диагн}}=15.825$ МГц распространение до ИВО реализуется модами 3F2 с отражением от слоя F2 и модами 3F2 с «провисанием» (без промежуточного отражения от Земли). Для передатчика Хайалиа Гарденс (15.770 МГц) возможны моды с провисанием 3F2 и скачковые моды 4F2. Для сигнала Нашвилл с $f_{\text{диагн}}=13.845$ МГц распространение до ИВО возможно модами 3-4F2, волноводным механизмом в канале E–F и модами с «провисанием» с отражением от слоя F2. После ракурсного рассеяния на ионосферных неоднородностях до приемника (Санкт-Петербург) сигналы распространяются без промежуточного отражения.

Рассчитанные в ИВО значения вертикальных углов направлений волнового вектора \mathbf{k}_0 диагностических сигналов 21 октября 2019 г. изменялись от 80° до 90° (от вертикали). В условиях регулярных вечерних градиентов распределения электронной концентрации слоя F2 вдоль радиотрасс возможны траектории распространения КВ-сигналов передатчиков Нашвилл и Хайалиа Гарденс с провисанием. Такой тип распространения обеспечивает более высокий уровень поля волны, падающей на ИВО и соответственно уровень $P_{\text{мин}}$ ракурсно-рассеянных сигналов. Одновременное рассеяние нескольких (двух-трех) мод на протяженных радиотрассах с близкими направлениями падающих волновых векторов \mathbf{k}_0 на ИВО приводит к увеличению разброса доплеровской частоты f_D и невозможности выделить на сонограммах треки отдельных мод. В случае разделения углов падения волновых векторов отдельных мод распространения на сонограммах наблюдаются несколько треков f_D , соответствующих различным модам распространения и регистрируемых методом ракурсного рассеяния, например на трассах менее 3000 км (например, [Беленов и др., 1977; Борисова и др., 2007, 2009; Blagoveshchenskaya et al., 2006]). В данном эксперименте вертикальные углы падения \mathbf{k}_0 различных многоскачковых траекторий на ИВО были близки ~80–90° и не позволяли выделить отдельные «треки» ракурсно-рассеянных сигналов и составляющую вертикального движения неоднородностей вдоль магнитного поля.

Уменьшение мощностей прямых сигналов $P_{\text{ПС}}$ и на смещенных частотах $P_{\text{мин}}$ для передатчиков из Америки 21 октября 2019 г. с частотами $f_{\text{диагн}}=15.825$ МГц

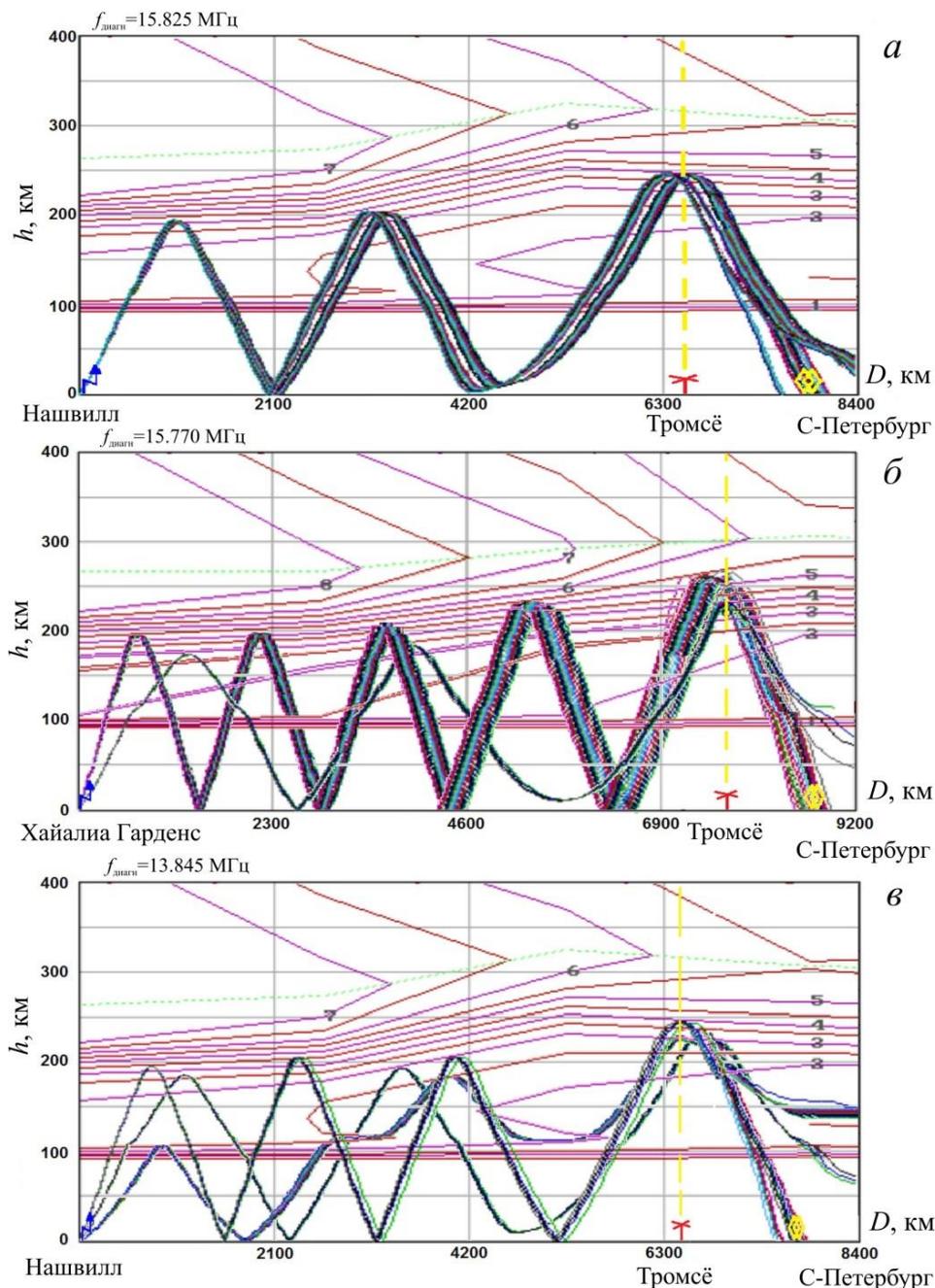


Рис. 5. Траектории распространения диагностических КВ-сигналов во время нагревного эксперимента 21 октября 2019 г.: трасса Нашвилл—Тромсё—Санкт-Петербург, $f_{\text{диагн}} = 15.825$ МГц (а) и $f_{\text{диагн}} = 13.845$ МГц (в); трасса Хайалиа Гарденс—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 15.77$ МГц) (б);

после 15:33 UT (см. рис. 3, а) и $f_{\text{диагн}} = 15.770$ МГц после 15:37 UT (см. рис. 3, б) объясняется данными моделирования. Для выполнения условия образования конуса зеркального рассеяния над Тромсё для падающей радиоволны и рассеянной в направлении Санкт-Петербурга в период подъема высоты максимума слоя F2 для сигналов на частотах выше 15.5 МГц необходимо увеличение высоты отражения от F2-слоя. Следовательно, меняются траектории распространения КВ-радиоволн (в данном эксперименте на трассе заданной протяженности исчезают траектории с провисанием и появляются с большим количеством скачков, что приводит к уменьшению уровня сиг-

нала). При этом механизм распространения на частоте 13.845 МГц до 16 UT сохраняется.

Результаты траекторного моделирования для условий эксперимента 25 февраля 2013 г. показаны на рис. 6. Несмотря на различие протяженностей трасс ракурсного рассеяния (2470 и 5660 км) и значений диагностических частот, распространение радиосигналов из Москвы в Ловозеро ($f_{\text{диагн}} = 12.075$ МГц) и из Иркутска в Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 21.8$ МГц) осуществляется одинаковыми траекторными модами 2F2. Рисунок 6 показывает возможность приема ракурсно-рассеянных сигналов скачковыми траекториями распространяющихся до ИВО над Тромсё и далее

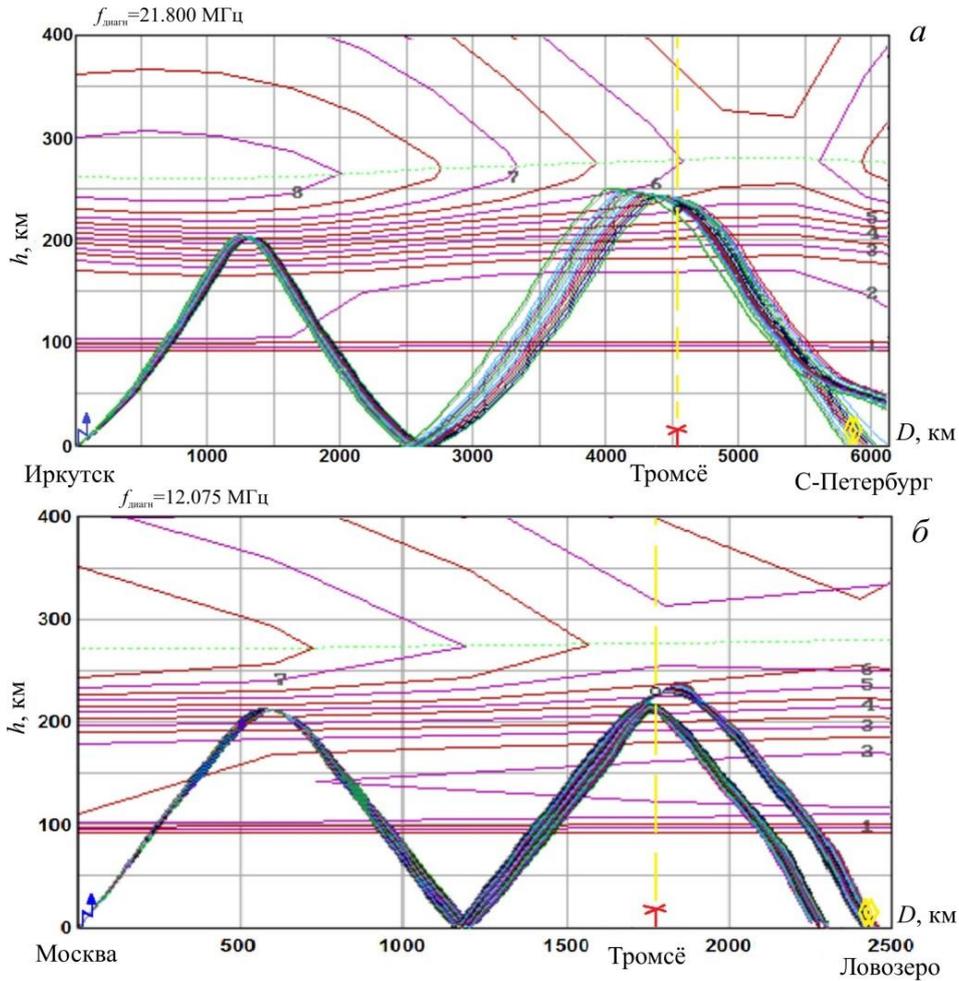


Рис. 6. Траектории распространения диагностических сигналов 25 февраля 2013 г. в 08.30 UT. Образование ИВО происходит на высотах F-слоя в области отражения мощной волны накачки ($f_H=5.423$ МГц)

после ракурсного рассеяния до приемника. С учетом распределения естественных градиентов слоя F2 вдоль радиотрасс в дневные часы, диапазон высот попадания диагностических КВ-радиосигналов на ионосферные неоднородности над Tromsø соответствовал 200–220 км в F-слое. Значения вертикальных углов ориентации волновых векторов \mathbf{k}_0 диагностических сигналов в ИВО для траекторий, реализующих прием ракурсно-рассеянных сигналов в пунктах приема, изменялись от 85° до 90° .

Результаты моделирования показали, что для имеющейся геометрии расположения экспериментальных радиотрасс в октябре 2019 и феврале 2013 г. возможен устойчивый прием ракурсно-рассеянных сигналов при условии развития искусственных неоднородностей на высотах F-слоя.

3.2. Движение ионосферных неоднородностей в ИВО

При вычислении вектора скорости МИИН предполагается, что область рассеяния является единой для различных диагностических радиосигналов.

Проекция скорости \mathbf{V} МИИН на направление вектора разности $\Delta\mathbf{k}$ волновых векторов падающей \mathbf{k}_0 и рассеянной \mathbf{k}_s волн $\Delta\mathbf{k}=\mathbf{k}_s-\mathbf{k}_0$ определяется выражением [Гершман и др., 1984]

$$V_{\Delta k} = \frac{f_D}{f_{\text{диагн}}} \frac{c}{2 \sin(\theta/2)}, \quad (3)$$

где f_D — доплеровское смещение частоты; $f_{\text{диагн}}$ — частота диагностической радиоволны, c — скорость света; θ — угол ракурсного рассеяния; γ_0 и γ_s — вертикальные углы; Az_{k_0} , Az_{k_s} — азимуты волновых векторов \mathbf{k}_0 и \mathbf{k}_s ; для угла рассеяния справедливо выражение

$$\cos \theta = \cos \gamma_0 \cos \gamma_s \cos(Az_{k_0} - Az_{k_s}) + \sin \gamma_0 \sin \gamma_s. \quad (4)$$

По данным ракурсных измерений смещений доплеровской частоты f_D на двух диагностических радиотрассах рассчитываются две проекции скорости движения неоднородностей $V_{\Delta k1}$ и $V_{\Delta k2}$. С использованием значений $V_{\Delta k1}$ и $V_{\Delta k2}$ определяются амплитуда V и азимутальное направление Az_V вектора скорости ионосферных неоднородностей \mathbf{V} при условии пренебрежения размерами ИВО [Blagoveshchenskaya et al., 2006; Борисова и др., 2007]

$$V = V_{\Delta k2} / \cos \{ \arctg [(\cos \alpha - \beta) / \sin \alpha] \}, \quad (5)$$

$$Az_V = Az_{k1} - \arctg [(\cos \alpha - \beta) / \sin \alpha],$$

где $\beta = V_{\Delta k1} / V_{\Delta k2}$, $\alpha = Az_{k1} - Az_{k2}$ — углы между азиму-

тальными направлениями разностных векторов $\Delta \mathbf{k}_1$ и $\Delta \mathbf{k}_2$ (Az_{k1} и Az_{k2}) на первой и второй диагностической трассах соответственно.

3.2.1. Численные оценки влияния угла рассеяния радиосигналов и азимута движения ионосферных неоднородностей в ИВО на расчет амплитуды скорости

Значения параметров α и β в (5) определяются по экспериментальным измерениям f_D и результатам вычислений азимутальных направлений волновых векторов \mathbf{k}_0 , \mathbf{k}_s и $\Delta \mathbf{k}$ (Az_{k0} , Az_{ks} , θ , Az_{k1} и Az_{k2}) на высоте ракурсного рассеяния. Величина параметра β зависит от экспериментальных значений смещения доплеровской частоты f_D и угла рассеяния θ . Принимаем, что наблюдаемое значение f_D определено только влиянием движущихся неоднородностей в ИВО.

На рис. 7 показаны изменения проекции скоростей неоднородностей на разностный вектор в процентах $dV_{\Delta k}(\Delta\theta)$ в зависимости от отклонения реального $\theta_{\text{реал}}$ и рассчитанного $\theta_{\text{расч}}$ углов рассеяния $\Delta\theta = \theta_{\text{реал}} - \theta_{\text{расч}}$ для рассматриваемых диагностических трасс (см. табл. 1). Для условий $\Delta\theta > 0.5^\circ$ зависимости $dV_{\Delta k}(\Delta\theta)$ близки к линейным аппроксимациям. Отклонения угла рассеяния $\Delta\theta$ на $1^\circ - 5^\circ$ для передатчиков, расположенных в Америке, приводят к существенным ошибкам определений $V_{\Delta k}$ и, следовательно, параметров α и β . Погрешность определения $V_{\Delta k}$ резко уменьшается до 3 %, если отклонения $\Delta\theta < 0.3^\circ$.

Азимутальный угол распространения ракурсно-рассеянной на ионосферных неоднородностях радиоволны в направлении Санкт-Петербурга $Az_{ks} \sim 147^\circ$ (или 98° в Ловозеро). Значение его может изменяться в пределах от 145° до 150° с учетом горизонтальных размеров ИВО ~ 55 км при использовании ФАР-2 21 октября 2019 г. В эксперименте 25 февраля 2013 г. при излучении станда на ФАР-1 изменения Az_{ks} в направлении Санкт-Петербурга составят от 146° до 148° и $97^\circ - 99^\circ$ в направлении Ловозера. На расстоянии 1150 км (670 км до Ловозера) этими вариациями можно пренебречь и для ракурсно-рассеянного сигнала азимут распространения Az_{ks} до приемного пункта можно считать постоянным.

Неоднородности ионосферы N_e вдоль протяженного пути распространения диагностического сигнала могут привести к существенным отклонениям азимутального угла Az_{k0} радиоволны в области ИВО от дуги большого круга. Рассчитанные значения углов рассеяния θ и погрешности Az_{k0} волновых векторов для ракурсно-рассеянных радиоволн в условиях рассматриваемых экспериментов 2019 и 2013 г. приведены в табл. 2. С учетом (4), принимая во внимание, что в рассматриваемых экспериментах вертикальные углы γ_0 и γ_s меньше 10° , получаем, что ошибки вычисления угла рассеяния θ определяются ошибками определения азимута падающей на ИВО диагностической волны $\Delta\theta \sim \Delta Az_{k0}$. Следовательно, изменения угла рассеяния θ определяются в первую очередь вариациями азимута волны Az_{k0} , падающей на ИВО.

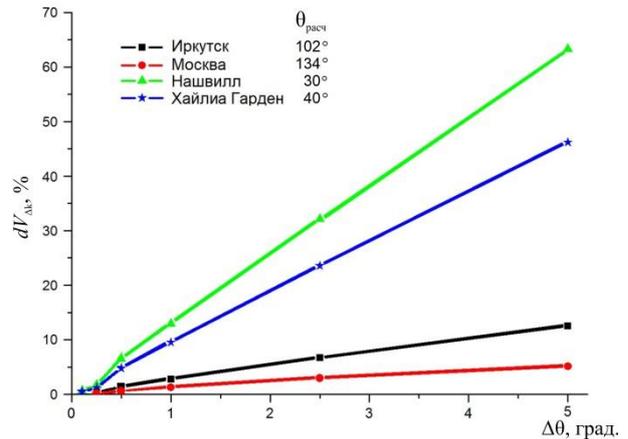


Рис. 7. Зависимости изменения проекции скорости МИИН на разностный вектор рассеяния $dV_{\Delta k}(\Delta\theta)$ от отклонения реального угла рассеяния $\theta_{\text{реал}}$ от рассчитанного $\theta_{\text{расч}}$, $\Delta\theta = \theta_{\text{реал}} - \theta_{\text{расч}}$ для диагностических трасс ракурсного рассеяния с различными углами ракурсного рассеяния θ

В [Благовещенская и др., 1991] по экспериментальным измерениям в Санкт-Петербурге диагностических КВ-радиосигналов передатчиков, расположенных в Северной Америке (дальности трасс больше 6000 км), исследованы закономерности азимутальных отклонений от дуги большого круга. Прием диагностических КВ-радиосигналов проводился в вечернее время зимнего сезона. Результаты исследований показали, что в спокойных геомагнитных условиях наблюдаются азимутальные отклонения $\sim 5^\circ - 10^\circ$. В условиях средней возмущенности отклонения могут достигать $20^\circ - 30^\circ$.

Для конкретного расположения нагревного станда и приемника азимутальный угол Az_{ks} вектора рассеяния \mathbf{k}_s определен. Углы γ_0 , γ_s , Az_{k0} , Az_{ks} связаны уравнением конуса ракурсного рассеяния (2). Угол ракурсного рассеяния θ вычисляется согласно (4). Результаты расчетов показывают, что в спокойных геомагнитных условиях отклонения ΔAz_{k0} на $5^\circ - 10^\circ$ приведут к изменениям угла $\theta \sim \pm 0.25^\circ$. С учетом данных, показанных на рис. 7, погрешность вычисления модуля скорости движения МИИН (при условии $\Delta Az_{k0} \sim 5^\circ - 10^\circ$) по данным доплеровских измерений передатчиков из Северной Америки будет меньше 2–3 %.

Таким образом, в октябре 2019 г. в период 15:20–15:48 UT (в спокойных геомагнитных условиях), вычисления амплитуды $|V|$ с использованием (5) в основном определялись точностью измерения f_D . Погрешность определения доплеровского смещения частоты $\Delta f_D \sim 1.5 \div 2.5$ Гц для наблюдаемых значений $f_D \sim 2 \div 4$ Гц может привести к ошибкам вычисления проекции скорости перемещения $|V|$ МИИН на направление вектора разности $V_{\Delta k} \sim 40 \div 100$ %.

Наибольшие изменения параметра β наблюдаются, если движение МИИН направлено перпендикулярно одному из разностных векторов $\Delta \mathbf{k}$ (т. е. $f_D \sim 0$) или значения диагностических частот $f_{\text{диагн1}}$ и $f_{\text{диагн2}}$ близки. В этом случае уверенно рассчитывается азимут движения МИИН Az_V при минимальной достоверности расчета амплитуды V .

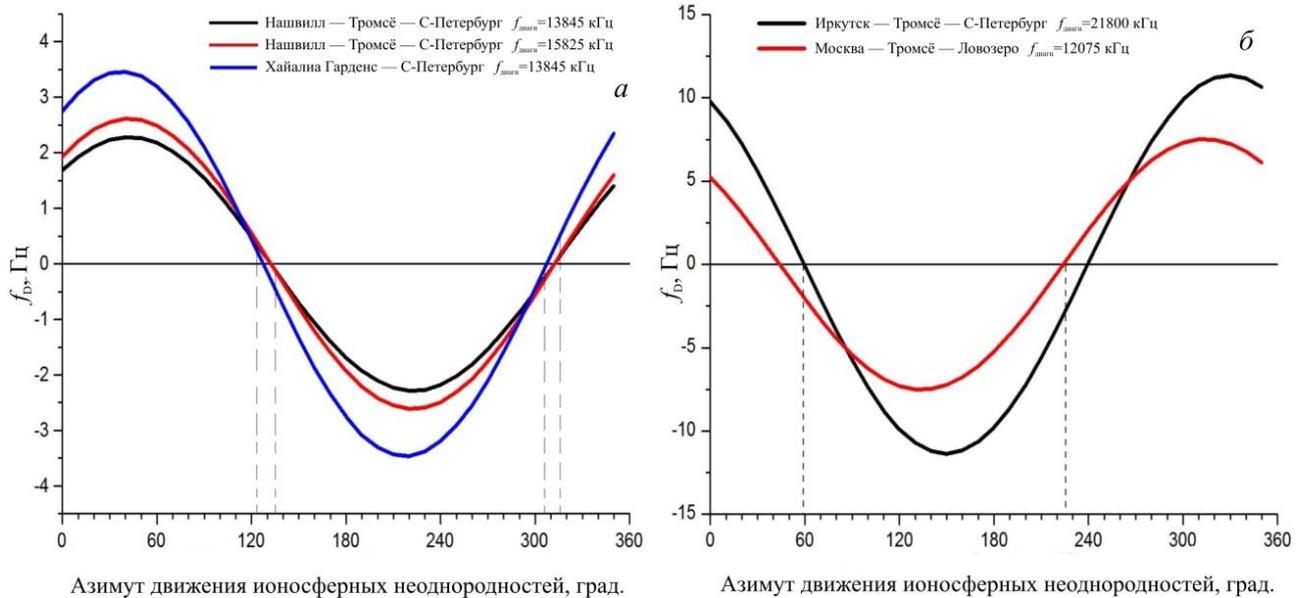


Рис. 8. Рассчитанные смещения доплеровской частоты f_D в зависимости от азимута движения неоднородностей в ИВО над Тромсё на диагностических трассах для экспериментов 21 октября 2019 г. (а) и 25 февраля 2013 г. (б). Скорость перемещения ионосферных неоднородностей $|V|=100$ м/с

Значение параметра α зависит от точности определения углов рассеяния θ_1 и θ_2 . Погрешность вычислений скорости неоднородностей V резко возрастает для трасс ракурсного рассеяния, если измерения выполнены на диагностических радиотрассах с близкими значениями углов рассеяния $\theta_1 \sim \theta_2$ и следовательно, $\alpha \sim 0$.

Для пояснения влияния азимута движения МИИН Az_V на изменение доплеровского смещения частоты f_D диагностических КВ-радиосигналов на трассах ракурсного рассеяния на рис. 8 показаны данные модельных расчетов $f_D = f_D(Az_V)$. Для диагностических КВ-радиотрасс наблюдений в эксперименте 21 октября 2019 г. Навшвилл—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 13.845$ МГц, 15.825 МГц) и Хайалиа Гарденс—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 15.77$ МГц) зависимости $f_D(Az_V)$ показаны на рис. 8, а. Для трасс Иркутск—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}} = 21.8$ МГц) и Москва—Тромсё—Ловозеро ($f_{\text{диагн}} = 12.075$ МГц) измерения, на которых проводились в эксперименте 25 февраля 2013 г., зависимости $f_D(Az_V)$ показаны на рис. 8, б. Вычисления $f_D(Az_V)$ проведены при условии постоянной амплитуды скорости ионосферных неоднородностей $V=100$ м/с. Изменение модуля $|V|$ приводит к пропорциональному изменению f_D . Данные рис. 8 показывают условия, когда на трассах ракурсного рассеяния в экспериментах 2013 и 2019 г. возможны наблюдения смещения f_D одновременно одного знака или разных в зависимости от направления движения неоднородностей в области ИВО. Например, для радиосигналов передатчиков Хайалиа Гарденс и Навшвилл, одновременно наблюдается отрицательный сдвиг f_D при движении МИИН в азимутальном секторе $135^\circ - 305^\circ$. Отрицательное смещение f_D на трассах Иркутск—Тромсё—Санкт-Петербург и Москва—Тромсё—Ловозеро одновременно регистрируется при условии перемещения МИИН в азимутальном секторе $60^\circ - 225^\circ$.

3.2.2 Определение вектора скорости движения ионосферных неоднородностей ИВО по результатам наблюдений

Для расчета вектора скорости V движений МИИН с использованием (3) и (5) предварительно по экспериментальным данным выделяются значения смещений доплеровской частоты f_D диагностических сигналов на интервале 30 с по наибольшему значению распределения спектральной мощности $P_{\text{МИИН}}(f_D)$, которые формировали треки $f_D(t)$ на сонограммах.

На рис. 9, а приведены медианные значения смещений $f_D(t)$ для сонограмм (см. рис. 3, а–в), измеренных 21 октября 2019 г. радиосигналов передатчиков Хайалиа Гарденс ($f_{\text{диагн}} = 15.77$ МГц) и Навшвилл ($f_{\text{диагн}} = 15.825, 13.845$ МГц). Вычисления V для периода 15:20–15:50 UT выполнены по данным измерений f_D на трассах Хайалиа Гарденс ($f_{\text{диагн}} = 15.77$ МГц) и Навшвилл ($f_{\text{диагн}} = 13.845$ МГц) — первая пара $f_{\text{диагн}} = 15.770$ МГц, $f_{\text{диагн}} = 13.845$ МГц; на трассах Хайалиа Гарденс ($f_{\text{диагн}} = 15.77$ МГц) и Навшвилл ($f_{\text{диагн}} = 15.825$) — вторая пара $f_{\text{диагн}} = 15.77$ МГц, $f_{\text{диагн}} = 15.825$ МГц (рис. 9, б1, б2).

Данные, показанные на рис. 9, б1, б2, показывают хорошее соответствие значений азимутальных направлений Az_V движений МИИН, расчеты которых выполнены по данным наблюдений f_D на двух парах диагностических трассах ракурсного рассеяния. Средние значения направления движения МИИН Az_V составили близкие значения: для первой пары $Az_V \sim (218 \pm 1)^\circ$ и для второй пары $Az_V \sim (217 \pm 6)^\circ$.

Средние значения амплитуды скорости перемещения МИИН $|V|$ и отклонения $\Delta|V|$ для шести циклов нагрева 21 октября 2019 г. составили $Az_V \sim 175 \pm 100, 150 \pm 70, 140 \pm 50, 130 \pm 50, 150 \pm 40$ и 130 ± 50 м/с. На рис. 9, в для двух пар вычислений показаны значения рассчитанных модулей $|V|$ МИИН и отклонений $\Delta|V| \sim 50 \div 100$ м/с.

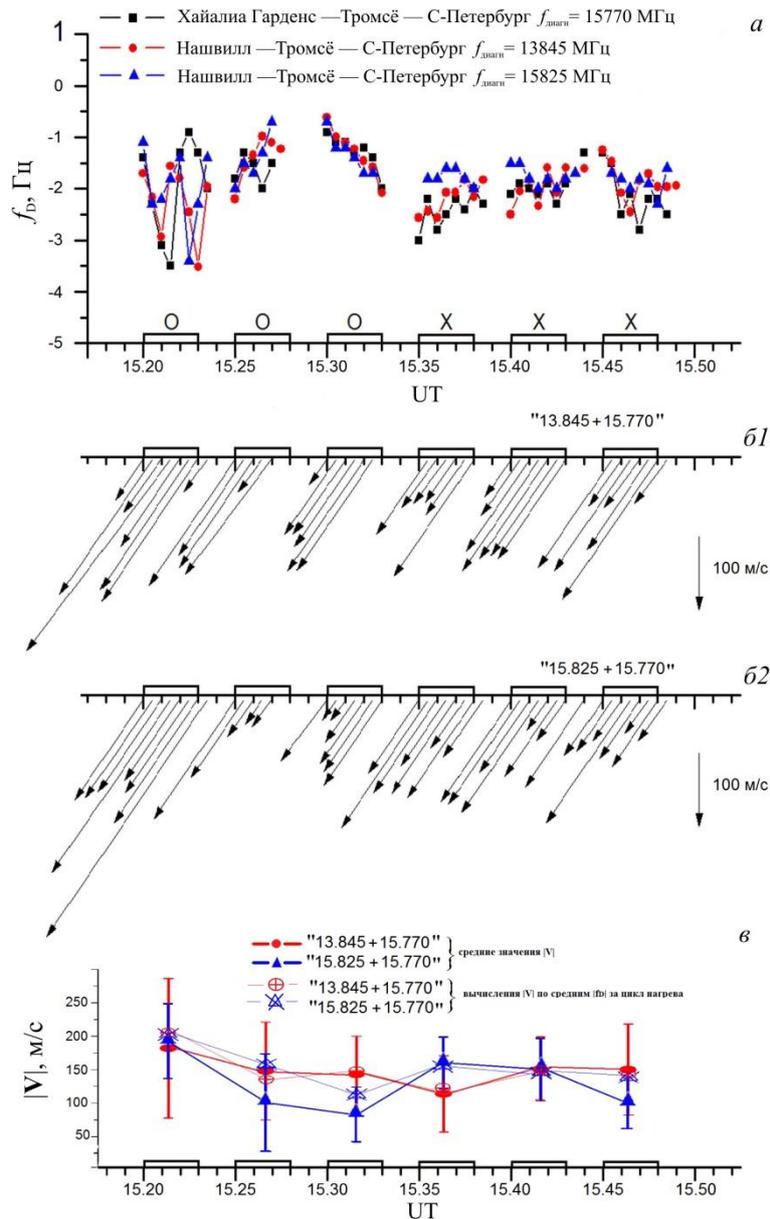


Рис. 9. Медианные значения доплеровского смещения частоты f_D диагностических КВ-сигналов, рассеянных неоднородностями ИВО 21 октября 2019 г. на трассах для передатчиков Северной Америки (а); рассчитанные вектора скорости движения МИИН по доплеровским измерениям на трассах Хайалиа Гарденс—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}}=15770$ кГц) и Нашвилл—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}}=13845$ кГц) (б1); Хайалиа Гарденс—Тромсё—Санкт-Петербург и Нашвилл—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}}=15825$ кГц) (б2); средние значения $|V|$ и вычисления $|V|$ по средним f_D за цикл нагрева (б). Периоды излучения КВ нагревного комплекса отмечены на оси времени

По данным наблюдений на трех трассах (см. рис. 9) регистрировались волновые колебаний $f_D(t)$ с периодами $\Delta t \sim 2 \div 3 \div 14$ мин, часть из которых была меньше или равна периоду нагревного цикла; размах колебаний составлял $\sim 1.5\text{--}2.5$ Гц и был близок к спектральной ширине смещенных доплеровских частот $\Delta f_D \sim 1.5 \div 2.5$ Гц. В подобном варианте изменений $f_D(t)$ погрешности определения одновременных значений f_D на разных диагностических радиотрассах могут привести к большому ошибкам. Расчет V МИИН в условиях наличия волновых вариаций $f_D(t)$ выполняли также по предварительно усредненным значениям f_D за цикл нагрева 180 с. Направления движения МИИН Az_V для обеих пар вычислений в этом

варианте составили $(217 \pm 1)^\circ$ и совпадали с результатами 217° и 218° , полученными по данным 30-секундного усреднения. Результаты вычислений модуля $|V|_{\text{МИИН}}$ показаны на рис. 9, з (перечеркнутыми значками при усреднении 180 с). Из данных, (рис. 9, з) можно видеть соответствие средних значений V , рассчитанных по данным f_D , усредненных по интервалам 30 или 180 с. При наличии волновых вариаций $f_D(t)$ с периодами, близкими к интервалам циклов нагрева оценка $|V|$ передвижения МИИН, можно проводить по средним значениям f_D за цикл.

Для эксперимента 25 февраля 2013 г. на рис. 10, а показаны медианные значения смещения доплеровской частоты f_D на интервале 30 с диагностических

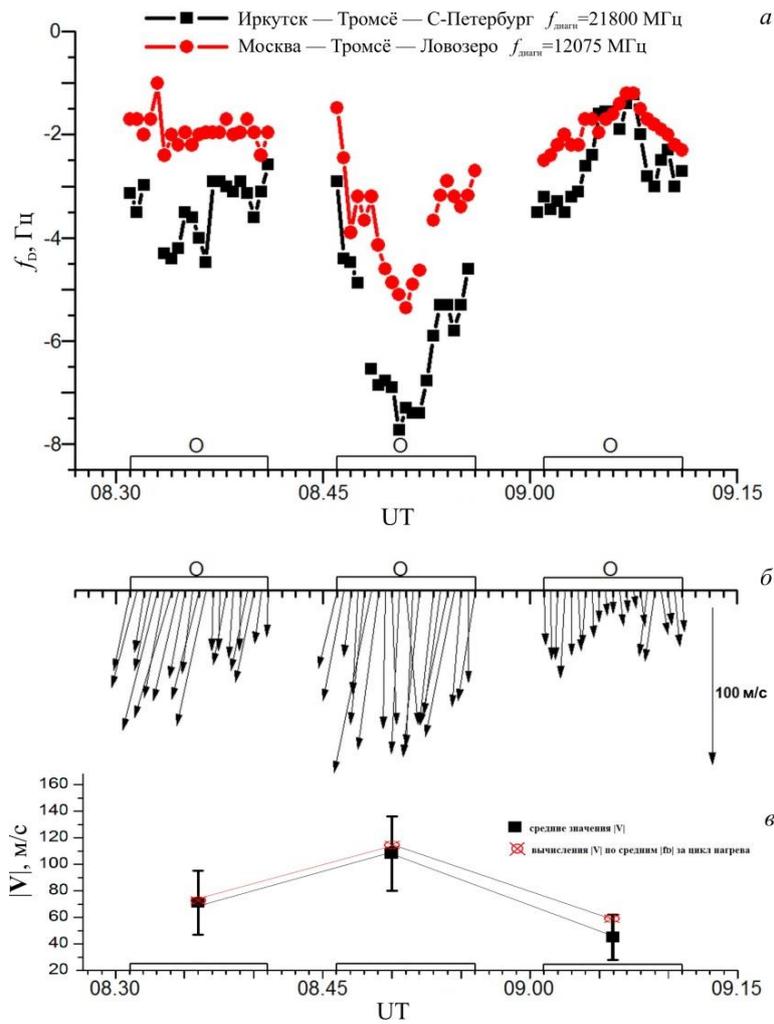


Рис. 10. Медианные значения доплеровского смещения частоты f_D диагностических КВ-сигналов в эксперименте 25 февраля 2013 г. (а); рассчитанные вектора скорости движения МИИН по доплеровским измерениям на трассах Иркутск—Тромсё—Санкт-Петербург и Москва—Тромсё—Ловозеро (б); средние значения $|V|$ и вычисления $|V|$ по средним значениям $|f_D|$ за цикл нагрева (в). Периоды излучения КВ нагревного стенда отмечены на оси времени

КВ-сигналов на трассах Иркутск—Тромсё—Санкт-Петербург ($f_{\text{диагн}}=21.8$ МГц) и Москва—Тромсё—Ловозеро ($f_{\text{диагн}}=12.075$ МГц). На рис. 10, б показаны результаты расчета вектора скорости V МИИН по данным доплеровских измерений 25 февраля 2013 г. на двух диагностических радиотрассах. Средние значения модуля скорости МИИН $|V|$ и отклонения $\Delta|V|$ для трех циклов нагрева 25 февраля 2013 г. показаны на рис.10, в. Периоды излучения КВ нагревного стенда EISCAT/Heating отмечены на оси времени.

По результатам расчетов МИИН перемещались в азимутальном направлении (184 ± 7)°. Для 25 февраля 2013 г. на рис. 10, в показаны средние значения $|V|$ скорости и отклонения $\Delta|V|$ для каждого цикла нагрева, которые составили 70 ± 20 , 110 ± 30 , 50 ± 15 м/с соответственно. Средние значения азимутального направления Az_V в трех циклах составили $Az_V\sim 225^\circ$, 228° и 230° .

25 февраля 2013 г. доплеровские рассеянные сигналы имели волновые вариации $f_D(t)$ с периодами 3–4–17 мин и размахом колебаний $f_D\sim 1.5\div 5.0$ Гц. Спектральная ширина сигналов составила $\Delta f_D\sim 1.0\div 2$ Гц. Вычисления среднего за цикл модуля

$|V|_{\text{МИИН}}$ показаны на рис. 10, в по значениям f_D , усредненным за 30 с и за цикл нагрева 600 с. Значения Az_V по данным f_D , усредненным за цикл нагрева 600 с, в трех циклах составили $Az_V\sim 223^\circ$, 226° и 230° .

Средние значения скоростей $|V|_{\text{МИИН}}$ составили 100–200 м/с в вечернее время 21 октября 2019 г., в утренние часы 25 февраля 2013 г. $|V|_{\text{МИИН}}\sim 50\div 110$ м/с. Рассчитанные значения $|V|_{\text{МИИН}}$ находятся в границах диапазона значений скоростей дрейфа неоднородностей 5–380 м/с, отмеченных, например, в работах [Борисова и др., 2007; Сивоконь, 2020; Eglitis et al., 1998; Blagoveshchenskaya et al, 2006; Yampolski et al., 2019].

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В периоды экспериментов 2013, 2016 и 2019 г. модификации высокоширотной ионосферы проводилась мощными КВ-радиоволнами обыкновенной или необыкновенной поляризации, излучаемых нагревным стендом EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия).

В экспериментах на стенде EISCAT/Heating 20 октября 2016 г. выполнены одновременные наблюде-

ния поведения МИИН КВ-радаром CUTLASS и доплеровскими измерениями на протяженных трассах 6000–9000 км. Сопоставление характеристик МИИН, одновременно измеренных при X-нагреве КВ-радаром CUTLASS и методом ракурсного рассеяния диагностических КВ-радиосигналов на протяженных радиотрассах (см. табл. 3) показало близкие параметры развития МИИН (времена нарастания и релаксации, мощность $P_{\text{МИИН}}$, поведение $P_{\text{МИИН}}$ во времени) в зависимости от соотношений между f_{H} , $f_{\text{O}}F2$ и $f_{\text{X}}F2$.

Диапазон частот излучения КВ-радаром CUTLASS составляет 8–20 МГц, следовательно, обратное рассеяние радиосигналов происходит на МИИН с минимальными поперечными масштабами l_{\perp} от 7.5 до 19 м. Доплеровские наблюдения диагностических частот 14–18 МГц на протяженных трассах ракурсного рассеяния передатчик Северной Америки—Тромсё—Санкт-Петербург с азимутальных направлений 280°–305° расширяют диапазон регистрации МИИН с поперечными масштабами l_{\perp} до 19–28 м (8–11 м при обратном рассеянии).

На сонограммах, измеренных в 2013, 2016 и 2019 г., ракурсно-рассеянные сигналы характеризовались волновыми вариациями $f_{\text{D}}(t)$ с периодами ~2–4 и 14–17 мин, которые совпадали с периодами колебаний H -компоненты магнитного поля Земли, измеренными на магнитовариационной станции Тромсё [<https://flux.phys.uit.no/ArcMag/>]. Следовательно, движение МИИН модулировано колебаниями силовых линий магнитного поля в ионосфере над Тромсё. Для проведения оценки скоростей перемещения V МИИН за период цикла в условиях наличия волновых вариаций $f_{\text{D}}(t)$ достаточно проводить вычисления по предварительно рассчитанным средним значениям f_{D} за период каждого цикла.

По результатам моделирования траекторных характеристик распространения диагностических КВ-радиосигналов на протяженных трассах с использованием модели ионосферного КВ-радиоканала показано, что в вечернее время эксперимента в октябре 2019 г. имели место траектории КВ-радиоволн без промежуточного отражения от поверхности Земли (с провисанием или волноводного характера). Данный факт существенно повышает уровень мощности радиоволн, падающих на рассеивающую область, и ракурсно-рассеянных сигналов. Определены вертикальные и азимутальные углы прихода волновых векторов на высотах ракурсного рассеяния в ИВО для вычисления углов ракурсного рассеяния θ .

По данным измерений доплеровских смещений f_{D} диагностических КВ-радиосигналов методом ракурсного рассеяния одновременно на нескольких трассах выполнены расчеты векторов скоростей V перемещений МИИН в ИВО ионосферы. Исследованы возможные ошибки вычислений модуля V и азимута Az_{V} движений ионосферных неоднородностей с использованием рассматриваемого метода.

По результатам моделирования и экспериментальным данным установлено, что в вечерние часы 21 октября 2019 г. средние скорости движения ионосферных неоднородностей изменялись от 100

до 200 м/с в юго-западном направлении. В утренние часы 25 февраля 2013 г. МИИН двигались в южном направлении. Скорости $|V|_{\text{МИИН}}$ изменялись в диапазоне 45–108 м/с.

Авторы благодарят международную научную ассоциацию EISCAT. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00020, [<https://rscf.ru/project/22-17-00020/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдеев В.Б., Белей В.С., Беленов А.Ф. и др. Обзор результатов по рассеянию КВ-сигналов на искусственной плазменной турбулентности, полученных при использовании УТР-2. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1994. Т. 37, № 4. С. 479–492.

Ануфриева Т.А., Шапиро Б.С. Геометрические параметры слоя F2 ионосферы. М.: Наука, 1976. 91 с.

Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М.: Наука, 1982. 198 с.

Беленов А.Ф., Бубнов В.А., Ерухимов Л.М. и др. О параметрах искусственных мелкомасштабных неоднородностей. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1977. Т. 20, № 12. С. 1805–1813.

Благовещенская Н.Ф., Баранец А.Н., Борисова Т.Д., Бубнов В.А. Эффекты отклонения декаметровых радиоволн от дуги большого круга в высоких широтах ионосферы. *Известия вузов. Радиофизика*. 1991. Т. 34, № 2. С. 119–122.

Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Корниенко В.А. и др. Особенности поведения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей в средних и высоких широтах. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007. Т. 50, № 8. С. 678–694.

Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С. и др. Сравнение эффектов воздействия мощных КВ-радиоволн обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризации на высокоширотную F-область ионосферы. *Космические исследования*. 2018. Т. 56, № 1. С. 17–32. DOI: [10.7868/S002342061801003X](https://doi.org/10.7868/S002342061801003X).

Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С. и др. Характеристики мелкомасштабных ионосферных неоднородностей в высокоширотной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн необыкновенной поляризации. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2019. Т. 59, № 6. С. 759–773. DOI: [10.1134/S001679401906004X](https://doi.org/10.1134/S001679401906004X).

Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.А. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. М.: Наука, 1987. 272 с.

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Корниенко В.А., Рьетвельд М.Т. Определение вектора скорости ионосферных неоднородностей по данным доплеровских измерений в искусственно модифицированной F-области полярной ионосферы. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2007. Т. 47, № 1. С. 80–89.

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Корниенко В.А. и др. Расщепление доплеровского смещения частоты ракурсно-рассеянных сигналов в период проведения экспериментов на стенде «СУРА». *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2009. Т. 49, № 4. С. 535–544.

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Йоман Т.К., Хагстром И. Влияние эффективной мощности излучения нагревного комплекса EISCAT/Heating на возбуждение искусственных ионосферных турбулентностей в высокоширотной F-области ионосферы. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2017. Т. 60, № 1. С. 305–325.

Васьков В.В., Гуревич А.В. Нелинейная резонансная неустойчивость плазмы в поле обыкновенной электромагнитной волны. *ЖЭТФ*. 1975. Т. 69, № 1. С. 176–178.

Васьков В.В., Гуревич А.В. Самофокусирующая и резонансная неустойчивость в F-области ионосферы. *Тепловые нелинейные явления в плазме*. Горький, 1979. С. 81–138.

Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г. и др. Скорость дрейфа мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей по данным многочастотного доплеровского коротковолнового радара. II. Результаты наблюдений и моделирования. 2015. Т. 58, № 6. С. 423–432.

Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984. 392 с.

Грач С.М., Трахтенгерц В.Ю. О параметрическом возбуждении ионосферных неоднородностей, вытянутых вдоль магнитного поля. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1975. Т. 18, № 9. С. 1288–1296.

Грач С.М., Караштин А.Н., Митяков Н.А. и др. Параметрическое взаимодействие электромагнитного излучения с ионосферной плазмой. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1977. Т. 20. С. 1827–1833.

Грач С.М., Сергеев Е.Н., Мишин Е.В., Шиндин А.В. Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированной воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения. *УФН*. 2016. Т. 186, № 11. С. 1189–1226. DOI: [10.3367/UFNr.2016.07.037868](https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.07.037868).

Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. *УФН*. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177. DOI: [10.3367/UFNr.0177.200711a.1145](https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200711a.1145).

Димант Я.С. Диссипативная параметрическая неустойчивость в сильно ионизованной плазме. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1977. Т. 20, № 12. С. 1834–1845.

Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митякова Э.Е. и др. Экспериментальные исследования искусственной ионосферной турбулентности. *Тепловые нелинейные явления в плазме*. Горький, 1979. С. 7–45.

Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н. и др. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор). *Изв. вузов. Радиофизика*. 1987. Т. 30, № 2. С. 208–225.

Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Рогов Д.Д. Дистанционные методы диагностики эффектов воздействия высокоширотных нагревных комплексов. *Метеорология и гидрология*. 2021. Т. 46, № 4. С. 22–36. DOI: [10.52002/0130-2906-2021-4-22-36](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-4-22-36).

Колосков А.В., Белей В.С., Лейзер Т.Б., Ямпольский Ю.М. Радиальный дрейф стимулированных мелкомасштабных ионосферных неоднородностей перпендикулярно геомагнитному полю. *Радиофизика и радиоастрономия*. 1999. Т. 4, № 3. С. 247–260.

Мясников Е.Н., Муравьева Н.В., Сергеев Е.Н. и др. О форме пространственного спектра искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых мощным КВ-радиоизлучением. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2001. Т. 44, № 11. С. 903–917.

Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий И.А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении дециметровых радиоволн. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1975. Т. 18, № 4. С. 473–500.

Насыров А.М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Казань: Изд-во Казанского университета, 1991. 149 с.

Сивоконь В.П. Новый метод исследования магнитоориентированных неоднородностей ионосферы с использованием программы определения радиосистем. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2020. Т. 60, № 2. С. 242–249. DOI: [10.31857/S0016794020020157](https://doi.org/10.31857/S0016794020020157).

Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. и др. Радарные наблюдения искусственной ионосферной турбулентности во время магнитной бури. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2004. Т. 47, № 9. С. 722–738.

Урядов В.П., Понятов А.А., Вертоградов Г.Г. и др. О структуре и динамике области ионосферы с искус-

ственными мелкомасштабными неоднородностями по данным комплексных измерений характеристик рассеянных радиосигналов. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008. Т. 51, № 12. С. 1011–1025.

Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета. 2017. 468 с. DOI: [10.31857/S0023420622040045](https://doi.org/10.31857/S0023420622040045).

Фролов В.Л., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. Об особенностях суточных вариаций характеристик диагностического радиоизлучения ионосферы и их связи с эволюцией искусственных ионосферных неоднородностей. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008. Т. 51, № 4. С. 273–286.

Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П. и др. Гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2012. Т. 55, № 6. С. 393–420.

Чернышев Д.В., Васильева Т.Н. Прогноз максимальных применимых частот: $W=10, 50, 150, 200$. М.: Наука, 1975. 54 с.

Ямпольский Ю.М. «Эхо-рассеяние» КВ-сигналов на искусственной ионосферной турбулентности. *Известия вузов. Радиофизика*. 1989. Т. 32, № 4. С. 519–521.

Blagoveshchenskaya N.F. Perturbing the high-latitude upper ionosphere (F region) with powerful HF radio waves: A 25-year collaboration with EISCAT. *URSI Radio Sci. Bull.* 2020. Iss. 373. P. 40–55. DOI: [10.23919/URSIRSB.2020.9318436](https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2020.9318436).

Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kornienko V.A., et al. Probing of medium-scale traveling ionospheric disturbances using HF-induced scatter targets. *Ann. Geophys.* 2006. Vol. 24. P. 2333–2345.

Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T., et al. Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave. *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38. L08802. DOI: [10.1029/2011GL046724](https://doi.org/10.1029/2011GL046724).

Blagoveshchenskaya N., Borisova T., Kalishin A., et al. Simultaneous Action of X- and O-Mode HF Pump Waves on the High-Latitude Upper (F-Region) Ionosphere at EISCAT. *Universe*. 2022. Vol. 8, no. 2. P. 91–111. DOI: [10.3390/universe8020091](https://doi.org/10.3390/universe8020091).

Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Egorov I.M. Artificial ducts created via high-power HF radio waves at EISCAT. *Remote Sens.* 2023. Vol. 15, iss. 10. P. 2300. DOI: [10.3390/rs15092300](https://doi.org/10.3390/rs15092300).

Borisova T.D., Blagoveshchenskaya N.F., Moskvina I.V., et al. Doppler shift simulation of scattered HF signals during the Tromsø HF pumping experiment on 16 February, 1996. *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 1479–1486. DOI: [10.5194/angeo-20-1479-2002](https://doi.org/10.5194/angeo-20-1479-2002).

Eglitis P., Robinson T.R., Rietveld M.T., et al. The phase speed of artificial field-aligned irregularities observed by CUTLASS during HF modification of auroral ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103, no. A2. P. 2253–2259. DOI: [10.1029/97JA03233](https://doi.org/10.1029/97JA03233).

Fejer J.A. Ionospheric Modification and Parametric Instabilities. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1979. Vol. 17, no. 1. P. 135–154. DOI: [10.1029/RG017i001p00135](https://doi.org/10.1029/RG017i001p00135).

Frolov V.L., Erukhimov L.M., Meteleev S.A., Sergeev E.N. Temporal behaviour of artificial small-scale ionospheric irregularities: Review of experimental results. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. Vol. 59, no. 18. P. 2317–2333. DOI: [10.1016/S1364-6826\(96\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00126-5).

Greenwald R.A., Baker K.B., Dudeney J.R., et al. DARN/SuperDARN: A global view of the dynamics of high-latitude convection. *Space Sci.: Space Sci. Rev.* 1995. Vol. 71. P. 761–796. DOI: [10.1007/BF00751350](https://doi.org/10.1007/BF00751350).

Hysell D.L., Kelley M.C., Yampolski Y.M., et al. HF radar observations of decaying artificial field-aligned irregularities. *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101. P. 26981.

Kelley M.C. The Earth's ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics. San Diego. CA. USA: Academic Press. 1989. 556 p.

Lester M., Chapman P.J., Cowley S.W.H., et al. Stereo CUTLASS: A new capability for the SuperDARN radars. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22, no. 2. P. 459–473.

Rawer K., Bilitza D., Ramakrishnan S. Goals and Status of the International Reference Ionosphere. *Rev. Geophys.* 1978. Vol. 16, no. 2. P. 177–181. DOI: [10.1029/RG016i002p0017](https://doi.org/10.1029/RG016i002p0017).

Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility. *Radio Sci.* 2016. Vol. 51, no.9. P. 1533–1546. DOI: [10.1002/2016RS006093](https://doi.org/10.1002/2016RS006093).

Rishbeth H., van Eyken A.P. EISCAT — early history and the first ten years of operation. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993. Vol. 55, no. 4-5. P. 525–542. DOI: [10.1016/0021-9169\(93\)90002-G](https://doi.org/10.1016/0021-9169(93)90002-G).

Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves. *Phys. Rep.* 1989. Vol. 179, no. 2-3. P. 79–209. DOI: [10.1016/0370-1573\(89\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0370-1573(89)90005-7).

Stubbe P., Kopka H. Summary of results obtained with the Tromso heating facility. *Radio Sci.* 1983. Vol. 18, no. 6. P. 831–834. DOI: [10.1029/RS018i006p00831](https://doi.org/10.1029/RS018i006p00831).

Thome G.D., Blood D.W. First observations of RF backscatter from field-aligned irregularities produced by ionospheric heating. *Radio Sci.* 1974. Vol. 9, no. 11. P. 917–921. DOI: [10.1029/RS009i011p00917](https://doi.org/10.1029/RS009i011p00917).

Yampolski Y., Milikh G., Zalizovski A., et al. Ionospheric Non-linear Effects Observed During Very-Long-Distance HF Propagation. *Front. Astron. Space Sci.* 2019. Vol. 6, no. 12. DOI: [10.3389/fspas.2019.00012](https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00012).

Yeoman T.K., Wright D.M., Robinson T.R, et al. High spatial and temporal resolution observations of an impulse-driven field line resonance in radar backscatter artificially generated with the Tromso heater. *Ann. Geophys.* 1997. Vol. 1, no. 5. P. 634–644. DOI: [10.1007/s00585-997-0634-9](https://doi.org/10.1007/s00585-997-0634-9).

URL: <https://flux.phys.uit.no/ArcMag/> (дата обращения 3 апреля 2024 г.).

URL: <https://rscf.ru/project/22-17-00020/> (дата обращения 3 апреля 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С., Ковалев А.С. Определение вектора скорости искусственных ионосферных неоднородностей по данным доплеровских измерений методом ракурсного рассеяния КВ радиосигналов, распространяющихся на протяженных радиотрассах. *Солнечно-земная физика.* 2024. Т. 10, № 2. С. 79–98. DOI: [10.12737/szf-102202408](https://doi.org/10.12737/szf-102202408).