

УДК 533.951+621.371

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАСТИ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НАД СТЕНДОМ «СУРА», ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА ГЕНЕРАЦИЮ СИГНАЛОВ РАКУРСНОГО РАССЕЯНИЯ НА КОРОТКОЙ ТРАССЕ

*Н. А. Погорелко*¹, *Е. Н. Сергеев*¹, *С. М. Грач*^{1*}, *В. А. Яшинов*¹, *А. В. Шиндин*¹,
*Е. Ю. Зыков*²

¹ Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

² Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

Проведено сопоставление данных экспериментов по ракурсному рассеянию на частотах 2÷7 МГц на короткой трассе Казань—Васильсурск—Казань, выполненных на стенде «Сура» в 2010 году, с результатами расчётов лучевых траекторий зондирующих и рассеянных сигналов. Определены положение и размеры области над нагревным стендом «Сура», ответственной за генерацию сигналов ракурсного рассеяния, характерные масштабы искусственных декаметровых рассеивающих неоднородностей и их динамические характеристики в зависимости от высоты области генерации и времени суток.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, при воздействии мощных коротких радиоволн на ионосферу Земли в области их отражения возникают неоднородности электронной концентрации, вытянутые вдоль геомагнитного поля \mathbf{B}_0 . Поперечные (по отношению к геомагнитному полю) масштабы данных неоднородностей составляют от нескольких сантиметров до сотен метров [1–5]. Такие неоднородности вызывают ракурсное, в том числе обратное, рассеяние радиоволн, распространяющихся через возмущённую область ионосферы. С помощью ракурсного рассеяния можно изучать пространственный спектр искусственных неоднородностей, а также структуру возмущённой области ионосферы. Большой объём данных по исследованиям возмущённой области ионосферы с помощью ракурсного рассеяния был накоплен для зондирующего излучения ультракоротковолнового и коротковолнового диапазонов в интервале частот 10÷30 МГц [1–8]. При этом в коротковолновом диапазоне для расчёта траекторий волн важным оказывается учёт их рефракции в неоднородной ионосфере и влияния геомагнитного поля. Длины трасс зондирующих/рассеянных сигналов в таких экспериментах превышают несколько сотен километров.

В данной работе на основе расчётов лучевых траекторий для ракурсного рассеяния радиоволн более низких частот (2÷7 МГц) на искусственно созданных неоднородностях над стендом «Сура» исследуется структура возмущённой области ионосферы: локализация и размеры области, ответственной за генерацию сигналов ракурсного рассеяния, характерные масштабы ответственных за рассеяние искусственных неоднородностей и их динамические характеристики в зависимости от высоты области генерации и времени суток. Сильная рефракция радиоволн таких частот в ионосфере позволяет проводить исследования на коротких трассах, при этом ионосферные условия вдоль трассы можно приближённо считать неизменными. Кроме того, на распространение радиоволн в этом частотном диапазоне более существенно влияет геомагнитное поле.

* sgrach@rf.unn.ru

Расчёты проводились для условий экспериментов, выполненных 14–15 мая и 6 сентября 2010 года для трассы распространения Казань—Васильсурск—Казань. Зондирование возмущённой области ионосферы и регистрация рассеянных сигналов проводились с помощью ионозонда «Циклон», расположенного в 172 км к востоку от стенда «Сура» на базе Казанского федерального университета (КФУ). Ионосферные условия во время экспериментов определялись с помощью ионозондов «Базис» (стенд «Сура») и «Циклон». Ранее серия подобных экспериментов проводилась на короткой трассе Зимёнки—Васильсурск—Зимёнки с длиной около 120 км [9]. В этих экспериментах, по-видимому, впервые было установлено, что в вечерние и ночные часы рассеивающие неоднородности оказываются вытянуты вниз от области эффективного взаимодействия волны накачки с ионосферной плазмой на большие расстояния (до 100 км), чем в дневные часы.

1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА РАСЧЁТА

Искусственные неоднородности концентрации плазмы, генерируемые во время воздействия мощного коротковолнового радиоизлучения на ионосферную плазму, сильно вытянуты вдоль геомагнитного поля \mathbf{B}_0 и при выполнении условий рассеяния Брэгга

$$\mathbf{k}_d = \mathbf{k}_s \pm \boldsymbol{\kappa} \quad (1)$$

вызывают ракурсное, в том числе обратное, рассеяние радиоволн, распространяющихся через возмущённую область ионосферы. Здесь \mathbf{k}_d и \mathbf{k}_s — волновые векторы падающей (диагностической) и рассеянной волн соответственно, $k_d = 2\pi f_d n/c \approx 2\pi f_s n/c = k_s$, $f_d \approx f_s$ — частоты соответствующих волн, n — модуль показателя преломления, c — скорость света, $\boldsymbol{\kappa}$ — волновой вектор неоднородности концентрации, $\boldsymbol{\kappa} \perp \mathbf{B}_0$. При обратном рассеянии (т. е., когда $\mathbf{k}_d = -\mathbf{k}_s$) $\boldsymbol{\kappa} = 2\mathbf{k}_d$.

Близкое к обратному рассеяние радиоволн в диапазоне частот 2–7 МГц на короткой трассе Казань—Васильсурск—Казань наблюдалось во время экспериментов по нагреву ионосферы над стендом «Сура» с наклоном его диаграммы направленности на 12° на юг в плоскости геомагнитного меридиана (т. е. в направлении магнитного зенита) 14–15 мая 2010 года с 22:30 до 24:00 MSK и при вертикальном нагреве ионосферы 6 сентября 2010 года с 14:00 до 22:00 MSK. Подробно результаты этих экспериментов опубликованы в работе [10]. Одновременно проводилось вертикальное (ионозонд «Базис») и возвратно-наклонное зондирование возмущённой области над стендом. Наклонное зондирование осуществлялось на 10 различных фиксированных частотах с помощью ионозонда «Циклон», расположенного вблизи Казани в обсерватории КФУ в 172 км к востоку от стенда «Сура» (Васильсурск, Нижегородская обл.). Там же регистрировались рассеянные сигналы, совпадающие по времени существования со временем излучения стенда «Сура».

На рис. 1 показаны примеры осциллограмм рассеянных сигналов, полученных вблизи Казани 14 мая 2010 года (время $t = 0$ соответствует 22:50 MSK), иллюстрирующие динамику сигналов вертикального зондирования ионозонда «Циклон» и ракурсно рассеянных сигналов от возмущённой области над стендом «Сура» на двух частотах $f_d = 2,01$ и $5,51$ МГц. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат — временная задержка для вертикально отражённых и рассеянных импульсных сигналов τ_{del} , равная половине времени распространения зондирующего сигнала до точки отражения/рассеяния и обратно. Воздействие на ионосферу осуществлялось на частоте $f_0 = 4,785$ МГц в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза.

Для условий эксперимента на основе лучевого подхода для сферически-слоистой магнитоактивной ионосферной плазмы рассчитывались траектории зондирующих и рассеянных сигналов с обыкновенной (o) и необыкновенной (x) поляризациями. При этом в качестве исходных

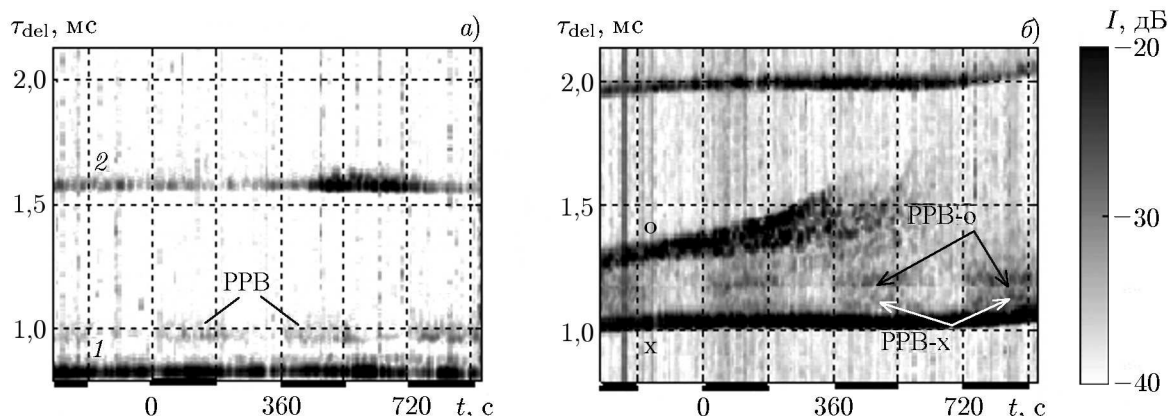


Рис. 1. Пример осциллограмм принимаемых импульсных диагностических сигналов на фиксированных частотах $f_d = 2010$ кГц (а) и 5510 кГц (б), отвечающих сигналам вертикального зондирования ионозонда «Циклон» (сигнал 1 на панели а соответствует первому отражению, сигнал 2 — второму, сигналы «о» и «х» на панели б — первому отражению обыкновенной и необыкновенной поляризации соответственно) и сигналам возвратно-наклонного ракурсного рассеяния радиоволн (РРВ). Циклы нагрева стэнда «Сура» показаны тёмными отрезками на оси времени

ионосферных параметров использовались реальные профили электронной концентрации, восстановленные по данным вертикального зондирования ионосферы с помощью ионозонда «Базис» в месте расположения нагревного стэнда «Сура» (вертикальное зондирование осуществлялось во время пауз в излучении стэнда).

За ракурсное рассеяние сигналов отвечает некоторая выделенная область внутри возмущённой мощным радиоизлучением области ионосферы, заполненной вытянутыми мелкомасштабными неоднородностями. Целью проведённых расчётов являлось определение параметров данной выделенной области (её высоты, горизонтальных координат в проекции на поверхность Земли, вертикальных и горизонтальных размеров). Горизонтальный размер возмущённой области определяется радиусом $R = h_d \operatorname{tg}(\beta/2)$, где $\beta = 9^\circ \div 12^\circ$ — угол раскрытия диаграммы направленности излучения стэнда «Сура» по уровню половинной мощности, h_d — высота центра области рассеяния. Расчёты проводились в лучевом приближении в рамках модели сферически слоистой магнитоактивной ионосферной плазмы [11] для семейства лучей, в точке излучения заполняющих конус с раскрытием 1° и центральным лучом, ориентированным по направлению на Казань — ожидаемое положение области рассеяния (выполнения условия Брэгга (1)) над стэндом «Сура». Угол падения центрального луча на ионосферу α варьировался в диапазоне $25^\circ \div 50^\circ$. Угол отклонения центрального луча от севера к западу в проекции на горизонтальную плоскость φ изменялся в пределах $77^\circ \div 85^\circ$ для вертикального воздействия ($\varphi = 80,5^\circ$ соответствует излучению диагностической волны поперёк плоскости геомагнитного меридиана) и в пределах $76^\circ \div 96^\circ$ при наклоне диаграммы направленности стэнда «Сура» на юг. При расчётах в соответствии с моделью геомагнитного поля IGRF [12] задавалось восточное склонение магнитного поля $10,7^\circ$ и наклонение $71,6^\circ$.

При попадании зондирующего луча в область рассеяния в соответствии с условием Брэгга определялось семейство рассеянных лучей, приходящих в зону приёма сигнала вблизи ионозонда «Циклон», приблизительно отвечающую нескольким первым зонам Френеля на соответствующей частоте [13, 14]. При этом рассчитанное время распространения сигнала по трассе возвратно-наклонного зондирования должно было совпадать с экспериментально наблюдаемым временем задержки τ_{del} , точнее попадать в интервал разброса $\Delta\tau_{\text{del}}$ наблюдаемых времён τ_{del} , $\Delta\tau_{\text{del}} \approx 50 \div 150$ мкс (см. рис. 1).

Заметим, что угол между магнитным полем и волновым вектором входящих в область рассеяния зондирующих лучей близок к 90° , а плоскость распространения ракурсно рассеянных волн при вертикальном воздействии на ионосферу расположена почти перпендикулярно плоскости магнитного меридиана.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Таблица 1

f_d , кГц	h_d , км	n	τ_{del} , мс	R , км
2010	188	0,571	0,97	19,7
2510	196	0,566	1,01	20,6
3010	202	0,564	1,06	21,2
3510	208	0,556	1,08	21,9
4010	214	0,549	1,11	22,5
4510	220	0,548	1,12	23,2
5010	227	0,543	1,13	23,9
5510	233	0,540	1,20	24,5
6510 (x)	240	0,539	1,30	25,4

В экспериментах 14.05.2010 воздействие на ионосферу на стенде «Сура» осуществлялось на частоте $f_0 = 4,785$ МГц. Наклонное зондирование осуществлялось на сетке из 10 фиксированных частот. Пример расчёта характеристик рассеянных сигналов для сеанса измерений в 22:50 MSK приведён в табл. 1. В ней даны частоты зондирующих сигналов f_d , высоты h_d , на которых происходит ракурсное рассеяние, показатель преломления зондирующей волны $n = c\kappa_d/(2\pi f_d)$ в точке, где происходит рассеяние, расчётное время задержки τ_{del} и радиус возмущённой области ионосферы R , определяемый диаграммой направленности стенда.

На осциллограммах рассеянного сигнала для этого сеанса не наблюдалось разделения магнитоионных компонент (сигналов с о- и х-поляризациями) для частот $f_d \leq 5010$ кГц. На частоте $f_d = 5510$ кГц регистрировалось расщепление рассеянного сигнала на о- и х-компоненты, расчёты проводились для о-компоненты. На частоте $f_d = 6510$ кГц рассеянный сигнал наблюдался (и, соответственно, проводился расчёт) только на х-компоненте, для о-компоненты эта частота превышала максимальную наблюдаемую частоту для ракурсного рассеяния, т. е. сигнал с о-поляризацией на этой частоте уходил во внешнюю ионосферу до того, как попадал в область рассеяния.

На рис. 2 для этого сеанса наблюдений более детально представлены результаты расчётов лучевых траекторий для углов падения центрального луча, когда центр области рассеяния был расположен ближе всего к оси диаграммы направленности стенда «Сура». На рис. 2а показаны проекции траекторий рассеянных сигналов на земную поверхность, а на рис. 2б, в — на взаимно перпендикулярные вертикальные плоскости (север—юг и восток—запад), одна из которых (север—юг) близка к плоскости магнитного меридиана. В используемой системе координат ось y соответствует линии север—юг, ось x — линии восток—запад, начало координат — положению стенда «Сура». Большой эллипс (часть его) на рис. 2а характеризует размеры области засветки (ширину диаграммы направленности нагретого стенда по уровню половинной мощности) в ионосфере на высоте отражения волны накачки. Цветом показан угол между волновым вектором зондирующей волны \mathbf{k} и магнитным полем \mathbf{B}_0 в области рассеяния при выполнении условий Брэгга (1) в случае попадания рассеянного сигнала в зону приёма. Высота отражения волны накачки с частотой $f_0 = 4785$ кГц составляла в этом сеансе $h_0 \approx 237$ км.

Расчёты показывают, что область рассеяния волн с различными частотами, т. е. область, занятая вытянутыми неоднородностями, ответственными за рассеяние, занимает достаточно большой интервал высот (порядка 55 км в данном сеансе), причём волны с более низкими частотами рассеиваются на более малых высотах. Показано, что вертикальный размер области рассеяния для конуса углов выхода зондирующих волн с раскрытием 1° вблизи центрального луча не превышает

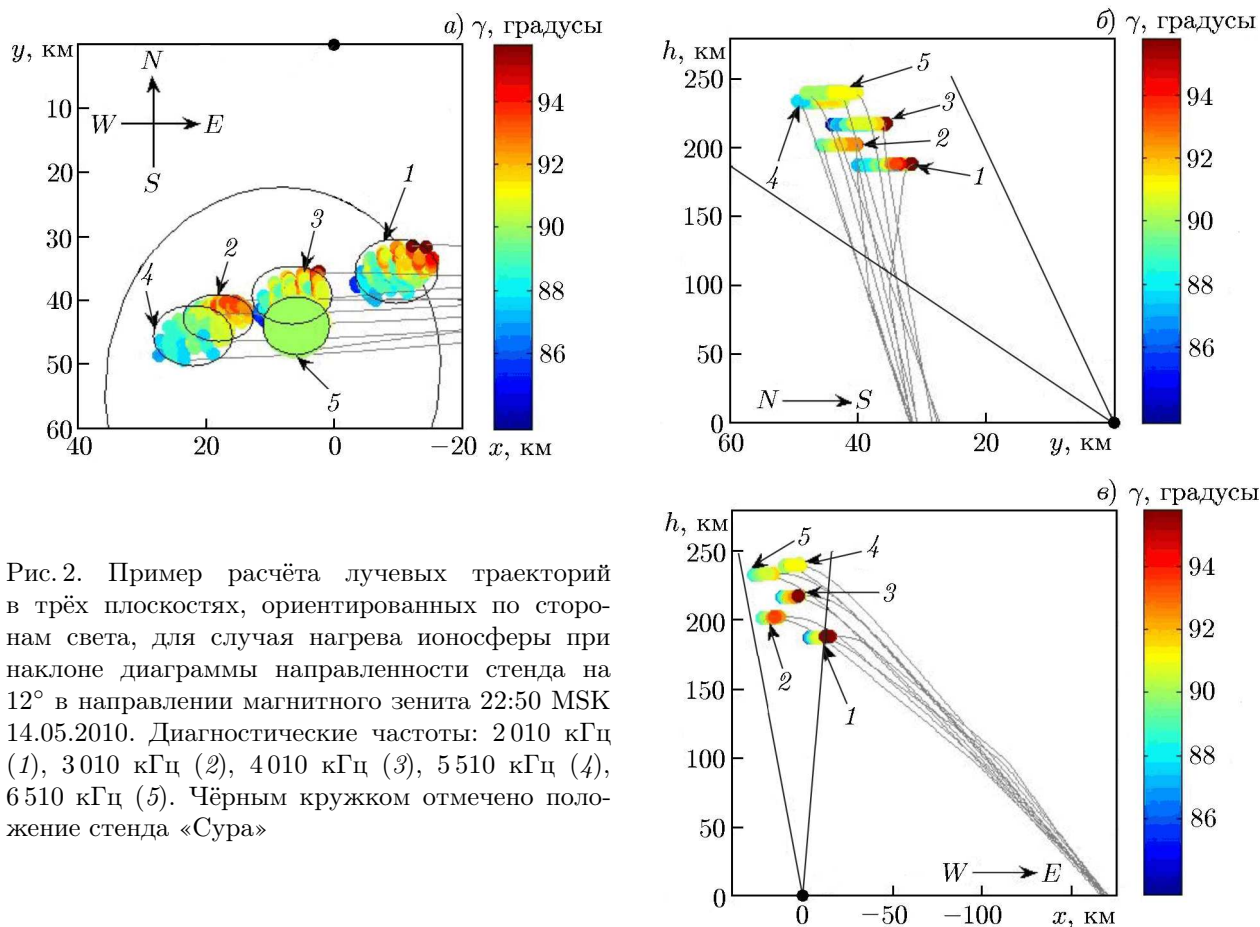


Рис. 2. Пример расчёта лучевых траекторий в трёх плоскостях, ориентированных по сторонам света, для случая нагрева ионосферы при наклоне диаграммы направленности стэнда на 12° в направлении магнитного зенита 22:50 MSK 14.05.2010. Диагностические частоты: 2010 кГц (1), 3010 кГц (2), 4010 кГц (3), 5510 кГц (4), 6510 кГц (5). Чёрным кружком отмечено положение стэнда «Сура»

5 км для каждой из частот. Высота этой области зависит от частоты зондирующего сигнала и изменяется от 185 до 240 км, т. е. расположена, в основном, ниже точки отражения волны накачки. Горизонтальный размер области рассеяния для определённого угла выхода центрального луча зондирующей волны составляет от 6 до 12 км.

Наблюдаемый в эксперименте интервал времён задержек ($\Delta\tau_{\text{del}} \approx 0,12 \div 0,15$ мс, см. рис. 1 в работе [10]) обеспечивается конечным интервалом углов выхода лучей зондирующих волн, при которых рассеянные сигналы попадают в зону приёма. При этом горизонтальные и вертикальные (согласно расчётам, в меньшей степени) размеры области, ответственной за генерацию принимаемых рассеянных сигналов, естественно, увеличиваются. Например, для рассматриваемого сеанса на частоте зондирования $f_d = 2010$ кГц область генерации рассеянных сигналов отвечает углам падения $\alpha = 30^\circ \div 34^\circ$. При этом область рассеяния вдоль линии восток–запад расположена в интервале $-38 < x[\text{км}] < 3$, т. е. смещена к востоку относительно центральной части диаграммы направленности стэнда «Сура» (см. рис. 2 для оптимального угла падения) и выходит за границу диаграммы направленности стэнда по уровню половинной мощности. Вдоль линии север–юг эта область находится в интервале $21 < y[\text{км}] < 38$, т. е. в центральной части диаграммы направленности стэнда. Высота области рассеяния варьируется в пределах $187 \div 189$ км. Для частоты $f_d = 5510$ кГц ($\tau_{\text{del}} \approx 1,10 \div 1,25$ мс) интервал углов падения, отвечающих области генерации рассеянных сигналов, составляет $\alpha = 34^\circ \div 49^\circ$, интервал азимутальных углов $\varphi = 77^\circ \div 96^\circ$. Координаты области, в которой генерируются принимаемые рассеянные сигналы $18 < x[\text{км}] < 94$ и $49 < y[\text{км}] < 91$, т. е. область рассеяния занимает юго-западную часть области засветки ионосферы стэндом и также выходит за границу диаграммы направленности стэнда по уровню

ню половинной мощности, но в направлении на юго-запад. Размеры отмеченных выше областей рассеяния для широкого интервала углов падения, естественно, превышают размеры эллипсов рассеяния для оптимального угла падения, приведённые, например, на рис. 2.

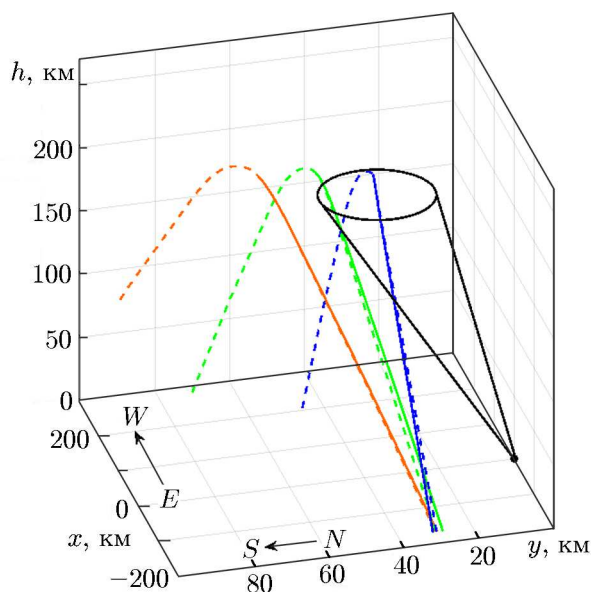


Рис. 3. Примеры траекторий зондирующего (штриховая линия) и рассеянного (сплошная линия) сигналов ионозонда «Циклон» на частоте $f_d = 5\,510$ кГц с углами падения $\alpha = 34,5^\circ$ (синяя линия, о-мода, $\tau_{del} = 1,1$ мс), $41,5^\circ$ (зелёная линия, о-мода, $\tau_{del} = 1,16$ мс) и 48° (оранжевая линия, о-мода, $\tau_{del} = 1,22$ мс). Чёрным кружком отмечено положение станда «Сура», чёрными линиями — его диаграмма направленности

сеть от времени суток. В данной работе выполнены расчёты траекторий рассеянных сигналов для эксперимента, выполненного в дневных условиях 06.09.2010 [10]. Воздействие на ионосферу осуществлялось на стенде «Сура» на частоте 5 600 кГц в режиме 1 мин — нагрев, 2 мин — пауза. В этом эксперименте диаграмма направленности нагревного станда была ориентирована вертикально. Пример расчёта характеристик рассеянных сигналов для сеанса измерений в 15:35 MSK (высота отражения волны накачки $h_0 = 232$ км) показан на рис. 4. Для расчётов траекторий и времён задержки использовались данные вертикального зондирования ионосферы, полученные на стенде «Сура» с помощью ионозонда «Базис» непосредственно перед началом воздействия. Для всех частот зондирующих волн показаны результаты расчётов для углов α и φ ($\varphi = 80,5^\circ$) центрального луча зондирующей волны, при которых рассеивающая область находилась ближе всего к оси диаграммы направленности станда. В этом эксперименте рассеянный сигнал наблюдался для зондирующих волн на частотах $f_d = 4\,700$ и $6\,100$ кГц (о- и х-компоненты, расчёт проводился для о-моды) и $f_d = 6\,600$ кГц (х-компонента), для них и проводилось сопоставление измеренных времён задержки с вычисленными. Для $f_d = 5\,600$ кГц сигнал оказался искажён помехой от волны накачки, для $f_d = 5\,000$ кГц — мощной внешней помехой, на частотах ниже 4 700 кГц рассеянные сигналы не наблюдались.

На рис. 4а показаны проекции траекторий рассеянных сигналов на земную поверхность, а на рис. 4б, в — на взаимно перпендикулярные вертикальные плоскости север—юг и восток—запад.

Расчитанные траектории зондирующих/рассеянных сигналов с о-поляризацией на частоте $f_d = 5\,510$ кГц, близкие к наибольшему, наименьшему и среднему значениям τ_{del} (1,22, 1,10 и 1,16 мс соответственно) показаны на рис. 3. Отметим, что первые два значения τ_{del} определяют протяжённость области рассеяния в направлении на Казань (ионозонд «Циклон»).

Высота области рассеяния в юго-западной части диаграммы направленности станда снижается приблизительно на 10 км по сравнению с центральной частью. Следует отметить также, что, согласно расчётам (см. рис. 2, 4, 5), заметный вклад в рассеянный сигнал вносят волны, проходящие в область рассеяния в интервале углов $\pm 5^\circ$ к направлению, поперечному геомагнитному полю \mathbf{B}_0 : $85^\circ < \gamma < 95^\circ$, где γ — угол между векторами \mathbf{k}_d и \mathbf{B}_0 . Размеры рассеивающих неоднородностей определялись согласно выражению

$$l_{\perp} = 2\pi/\kappa = \lambda_d/(2n) |\sin \gamma| \approx c/(2nf_d), \quad (2)$$

вытекающему из (1), и в данном сеансе составляли $45 \div 130$ м.

Как показано, например, в работах [5, 10], характеристики рассеивающих декаметровых неоднородностей могут существенным образом зави-

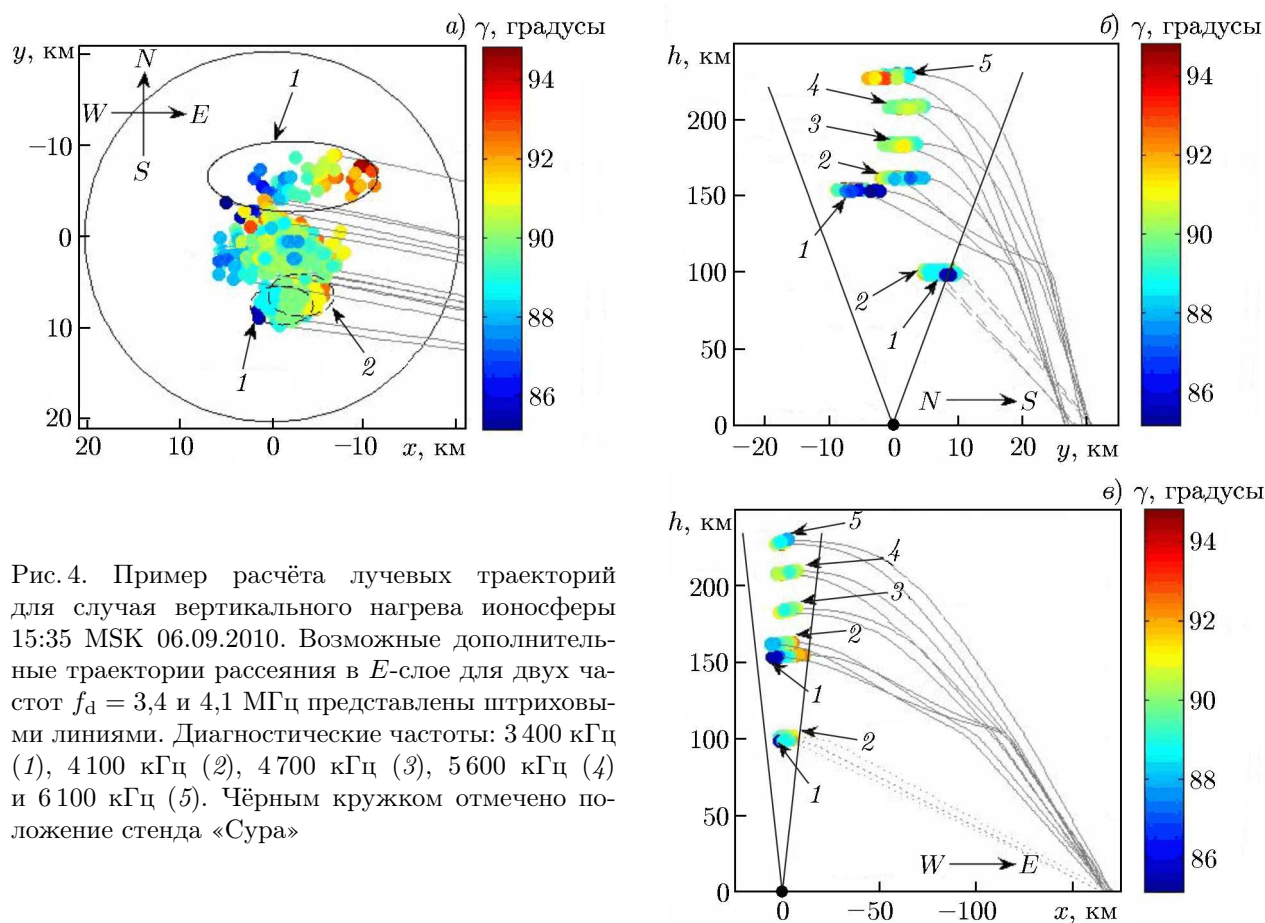


Рис. 4. Пример расчёта лучевых траекторий для случая вертикального нагрева ионосферы 15:35 MSK 06.09.2010. Возможные дополнительные траектории рассеяния в E -слое для двух частот $f_d = 3,4$ и $4,1$ МГц представлены штриховыми линиями. Диагностические частоты: 3 400 кГц (1), 4 100 кГц (2), 4 700 кГц (3), 5 600 кГц (4) и 6 100 кГц (5). Чёрным кружком отмечено положение стенда «Сура»

Окружность на рис. 4а характеризует размер области на высоте отражения волны накачки по уровню половинной мощности диаграммы направленности стенда.

Здесь, в отличие от наклонного нагрева в вечерние часы, наблюдаемая область рассеяния занимает меньший интервал высот (менее 40 км). Вертикальный размер области рассеяния для каждой частоты зондирующих волн по-прежнему не превышает 5 км, а горизонтальный для определённого угла выхода центрального луча с конусом 1° составляет от 5 до 15 км. Высота области рассеяния изменяется от 180 до 225 км в зависимости от частоты зондирующего сигнала, для которого в эксперименте наблюдалось рассеяние.

Из сопоставления рассчитанных и измеренных времён задержек τ_{del} с учётом конечного интервала $\Delta\tau_{del} \approx 0,10 \div 0,15$ мс следует, что генерация рассеянных сигналов на частоте $f_d = 4\,700$ кГц происходила в области $-33 < x[\text{км}] < -1$, $-2,5 < y[\text{км}] < 3$ приблизительно на одной высоте ($h_d \approx 188 \div 191$ км), т. е. эта область была смещена к востоку относительно диаграммы направленности стенда «Сура». На частоте $f_d = 6\,100$ кГц область рассеяния отвечала $9 < x[\text{км}] < 30$, $-4 < y[\text{км}] < 5$, т. е. была смещена к западу от оси диаграммы направленности. Высота области рассеяния уменьшается к западу приблизительно на 10 км. Размеры рассеивающих неоднородностей составили в данном сеансе $50 \div 65$ м.

Наличие в дневные часы достаточно интенсивного E -слоя приводит к появлению дополнительных возможных траекторий рассеянного сигнала вплоть до частот, несколько превышающих критическую частоту дневного E -слоя ($f_d = 3,4$ и $4,1$ МГц, см. штриховые линии траекторий на рис. 4). Высоты рассеяния при этом не превышают 100 км и находятся на уровне E -слоя. При

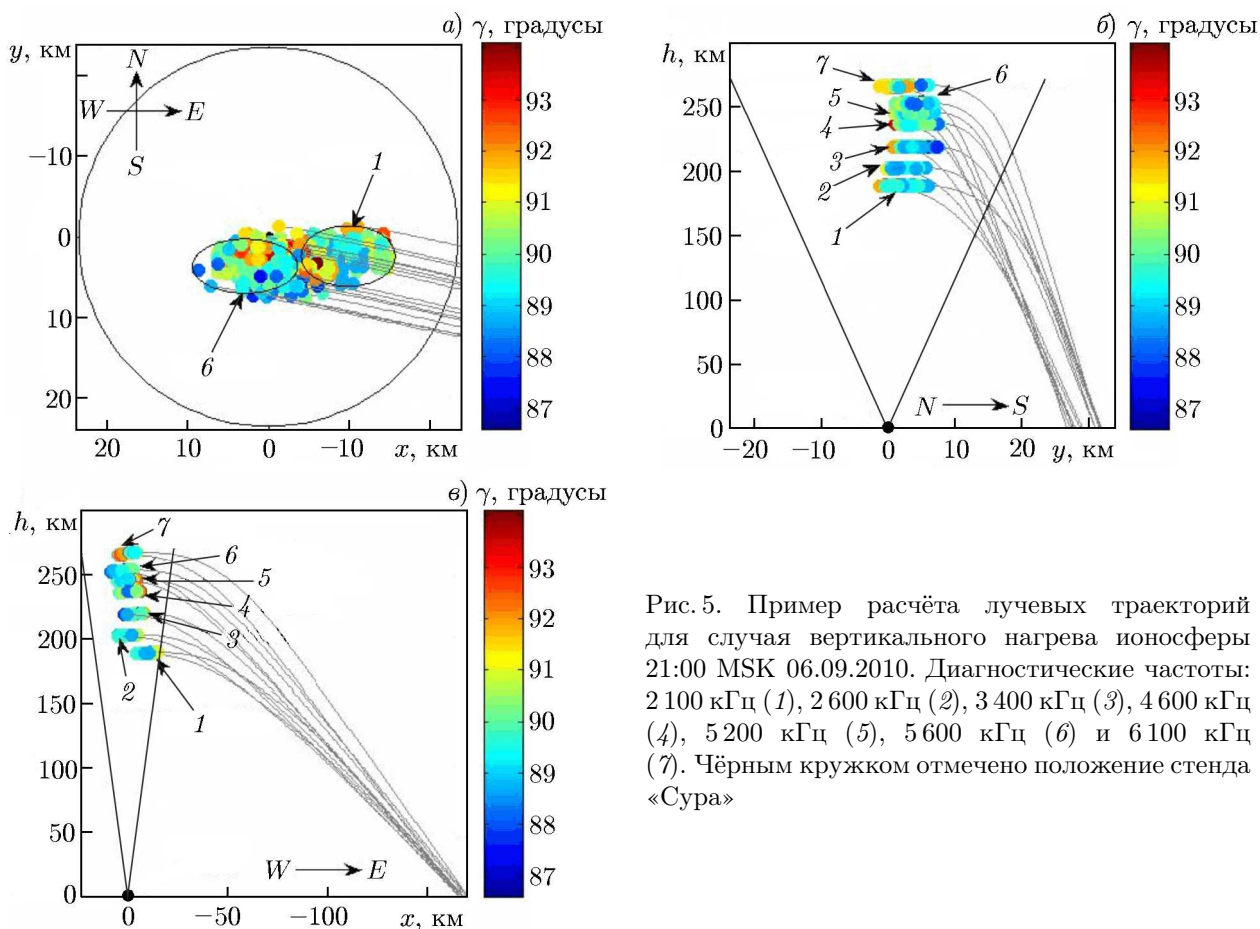


Рис. 5. Пример расчёта лучевых траекторий для случая вертикального нагрева ионосферы 21:00 MSK 06.09.2010. Диагностические частоты: 2 100 кГц (1), 2 600 кГц (2), 3 400 кГц (3), 4 600 кГц (4), 5 200 кГц (5), 5 600 кГц (6) и 6 100 кГц (7). Чёрным кружком отмечено положение стенда «Сура»

наличии неоднородностей концентрации плазмы на этих высотах в эксперименте должны были наблюдаться рассеянные сигналы с соответствующими задержками для частот 2,1÷4,1 МГц. Фактически же рассеянные сигналы для дневных часов наблюдались лишь для частот, близких к частоте волны накачки $f_0 = 5\,600$ кГц (для $f_d < 4\,700$ кГц рассеянные сигналы отсутствовали), что свидетельствует о меньших вертикальных размерах области искусственной турбулентности в дневных условиях по сравнению с ночными.

Наблюдения ракурсно рассеянных сигналов 6 сентября 2010 года проводились с 14:00 до 22:00 MSK [10]. С 17:00 MSK воздействие на ионосферу осуществлялось на стенде «Сура» на частоте $f_0 = 4\,740$ кГц в течение 2 мин с периодом 10 мин. На рис. 5 представлены результаты расчётов траекторий рассеянных сигналов для эксперимента, выполненного в ночных условиях. Для расчётов траекторий и времён задержки использовались данные вертикального зондирования ионосферы, полученные на стенде «Сура» с помощью ионозонда «Базис» непосредственно перед началом воздействия на ионосферу в 21:00 MSK, высота отражения волны накачки составляла 237 км. Показаны результаты расчётов для углов α и φ ($\varphi = 80,5^\circ$) центрального луча зондирующей волны, при которых рассеивающая область находилась ближе всего к оси диаграммы направленности стенда. Рассеянные сигналы в этом сеансе наблюдались для частот зондирования $f_d = 2\,100 \div 6\,600$ кГц.

Область рассеяния для этого сеанса измерений занимает интервал высот около 100 км. Для оптимального угла падения центрального луча с конусом 1° вертикальный размер области не превышает 5 км, а горизонтальный составляет от 7 до 15 км. Высота положения этой области изменяется от 185 до 275 км.

Область рассеяния, которой по расчётам отвечают времена задержки, близкие к наблюдаемым, оказывается в этом сеансе асимметричной и смещённой к востоку относительно оси диаграммы направленности для всех частот зондирующих волн ($-50 < x[\text{км}] < 20$) и выходит за восточную границу диаграммы направленности стенда по уровню половинной мощности. Рассчитанные траектории зондирующих/рассеянных сигналов с частотой $f_d = 5200$ кГц, близкие к наибольшему, наименьшему и среднему значениям τ_{del} , показаны на рис. 6. Синяя кривая на нём ($\tau_{\text{del}} = 1,08$ мс, $\alpha = 17^\circ$) рассчитана для о-поляризации зондирующей волны, красная кривая ($\tau_{\text{del}} = 1,06$ мс, $\alpha = 26^\circ$) — для зондирующей волны с х-поляризацией, зелёная и оранжевая кривые ($\tau_{\text{del}} = 1,14$ мс, $\alpha = 30,5^\circ$ и $\tau_{\text{del}} = 1,17$ мс, $\alpha = 36,5^\circ$) — для зондирующих волн с о-поляризацией. При этом область рассеяния о-волны для $\alpha = 17^\circ$ оказывается восточнее (ближе к ионозонду «Циклон» и дальше от центрального луча диаграммы направленности стенда «Сура») области рассеяния х-волны приблизительно на 10 км, несмотря на большее значение τ_{del} . Это даёт основание предположить, что восточную границу области рассеяния определяют волны с х-поляризацией, а обыкновенные волны рассеиваются существенно дальше за восточной границей диаграммы направленности стенда. Вдоль линии север—юг область рассеяния была расположена вблизи оси диаграммы направленности: $-8 < y[\text{км}] < 8$. Как и в ночные часы при наклонном нагреве, размеры рассеивающих неоднородностей составили в данном сеансе $45 \div 130$ м.

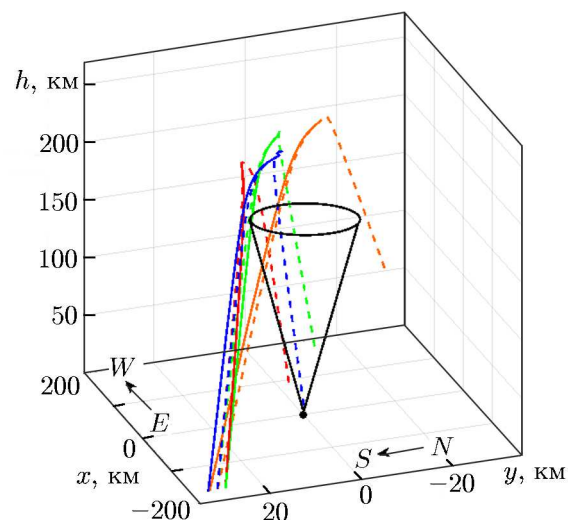


Рис. 6. Примеры траекторий зондирующего (штриховая линия) и рассеянного (сплошная линия) сигналов ионозонда «Циклон» на частоте $f_d = 5200$ кГц с углами падения $\alpha = 17^\circ$ (синяя линия, о-мода, $\tau_{\text{del}} = 1,08$ мс), $30,5^\circ$ (зелёная линия, о-мода, $\tau_{\text{del}} = 1,14$ мс) и $36,5^\circ$ (оранжевая линия, о-мода, $\tau_{\text{del}} = 1,17$ мс) и $\alpha = 26^\circ$ (красная линия, х-мода, $\tau_{\text{del}} = 1,06$ мс). Чёрным кружком отмечено положение стенда «Сура», чёрными линиями — его диаграмма направленности

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведённые расчёты траекторий распространения ракурсно рассеянных сигналов в магнитоактивной плазме для короткой трассы возвратно-наклонного зондирования Казань—Васильсурск—Казань возмущённой области ионосферы над стендом «Сура» в диапазоне частот $2 \div 7$ МГц позволяют существенно уточнить реальные высоты области рассеяния, показатели преломления диагностических волн с различными частотами в этой области, а также её горизонтальные размеры и положение. Приблизённые оценки высоты области рассеяния диагностических волн были выполнены в работе [10] на основе ионограмм и данных измерений времён задержки сигнала τ_{del} при возвратно-наклонном зондировании с использованием правила вертикальной и наклонной эквивалентности в плоскостной ионосфере [15]. Полученные данные о показателях преломления n диагностических волн с частотами f_d на высотах рассеяния h_d для рассеяния, близкого к обратному, легко конвертируются в информацию о поперечных к геомагнитному полю размерах искусственных неоднородностей (см. (2)). Данные о размерах неоднородностей теперь можно более надёжно сопоставлять с экспериментально измеряемыми временами развития и релаксации декаметровых неоднородностей в различных условиях наблюдений. В первую очередь

Таблица 2

время (MSK), ч:мин		14:35	15:35
$f_d = 2100$ кГц	l_{\perp} , м	82,4*	83,8*
	h_d , км	94,0*	96,0*
$f_d = 2600$ кГц	l_{\perp} , м	67,5*	68,2*
	h_d , км	95,0*	97,0*
$f_d = 3100$ кГц	l_{\perp} , м	57,0*	56,9*
	h_d , км	96,0*	98,0*
$f_d = 3400$ кГц	l_{\perp} , м	52,1*	52,2*
			95,2*
	h_d , км	97,0*	99,0*
$f_d = 4100$ кГц	l_{\perp} , м	66,8*	44,2*
			63,7*
	h_d , км	154,0*	102,0*
$f_d = 4700$ кГц	l_{\perp} , м	65,4*	63,6
	h_d , км	173,0*	184,0
$f_d = 5000$ кГц	l_{\perp} , м	67,8	61,6
	h_d , км	187,0	194,0
$f_d = 5600$ кГц	l_{\perp} , м	60,5	58,8
	h_d , км	207,0	211,0
$f_d = 6100$ кГц	l_{\perp} , м		57,9
	h_d , км		229,0
$f_d = 6600$ кГц (х)	l_{\perp} , м	51,7	51,8
	h_d , км	231,0	226,0

ния диагностических волн определялись из ионограмм и данных по временам задержки сигнала при возвратно-наклонном зондировании с использованием правила вертикальной и наклонной эквивалентности в плоскостной ионосфере [15]. Отсутствие на этой панели данных для определённых частот в отдельных дневных и вечерних наблюдениях объясняется отсутствием наблюдаемого сигнала рассеяния. Результаты расчётов высот рассеяния для различных частот диагностических волн на основе лучевого подхода для магнитоактивной плазмы из табл. 2–4 объединены на рис. 7в.

Для дневных условий согласно расчётам (см. табл. 2 и рис. 5) для всех частот зондирующих волн в диапазоне от 2,1 до 6,6 МГц существуют траектории сигналов, рассеянных на различных высотах, примерно от 100 км (E -слой) до 240 км (ниже максимума F_2 -слоя). При этом для частот f_d , превышающих критическую частоту E -слоя f_{oE} на 0,5–1,5 МГц ($f_d = 3,4$ и 4,1 МГц), существует две группы траекторий возможного рассеяния: с высот E -слоя (100 км) и подложки F -слоя (150–160 км). Однако, как показали измерения, наличие подобных расчётных траекторий для этих частот не является достаточным условием для наблюдения рассеянных сигналов на этих частотах в дневных условиях. Возможные значения масштабов неоднородностей и высот рассеяния, для которых в эксперименте рассеяние не наблюдалось, в табл. 2 (и последующих таблицах) помечены звёздочкой. Днём рассеяние радиоволн наблюдается в узкой частотной (высотной) области около частоты волны накачки $f_0 = 5,6$ МГц (высоты её отражения $h_0 \approx 220$ –235 км)

это касается суточной зависимости этих динамических параметров искусственных неоднородностей декаметровых масштабов. Такое сопоставление для экспериментов с наклонным нагревом плазмы (см. рис. 2 и 3) в принципе невозможно без проведения расчётов лучевых траекторий. В табл. 2–4 приведены данные о поперечных масштабах декаметровых неоднородностей l_{\perp} и их высотах h_d , основанные на расчётах для оптимальных углов падения и обратного рассеяния в экспериментах 6 сентября 2010 года и 14–15 мая 2010 года, проведённых с временным шагом в 30–60 мин.

Результаты измерений времён релаксации интенсивности рассеянного сигнала, соответствующих временам релаксации искусственных рассеивающих неоднородностей, и расчётов высоты области рассеяния для всех сеансов наблюдений 6 сентября и 14–15 мая 2010 года суммированы на рис. 7. На рис. 7а представлены измерения времён релаксации интенсивности рассеянного сигнала. На рис. 7б показаны результаты расчётов высот рассеяния диагностических волн h_d по данным измерений 6 сентября 2010 года (вертикальное воздействие) в предположении совпадения высоты h_d с высотой отражения, т. е. обратного рассеяния диагностической волны в высшей точке траектории [10]. Высоты отраже-

Таблица 3

время (MSK), ч:мин		17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00
$f_d = 2100$ кГц	l_{\perp} , м	82,9*	81,7*	84,1*	83,6*	86,5*	84,7*	127,6	124,2	133,3	126,0	134,3
	h_d , км	94,7*	96,4*	97,3*	98,4*	100,6*	100,3*	180,9	168,1	188,4	180,9	183,7
$f_d = 2600$ кГц	l_{\perp} , м	66,9*	65,6*	68,0*	67,8*	69,1*	68,5*	103,4	100,7	107,3	102,1	106,2
	h_d , км	96,6*	97,6*	99,7*	100,8	103,4*	103,3*	194,6	185,6	202,2	194,6	201,9
$f_d = 3100$ кГц	l_{\perp} , м	57,0*	56,7*	57,7*	91,1	92,6	93,8	86,9	86,7	93,7	93,8	91,3
	h_d , км	123,6	102,7	93,2	184,2	195,1	195,5	203,3	198,8	214,1	207,1	215,7
$f_d = 3400$ кГц	l_{\perp} , м	53,3*	52,6	53,8	79,9	81,2	83,2	79,3	83,4	83,6	83,6	85,8
	h_d , км	93,0	85,2	84,3	189,0	200,0	201,0	208,0	207,0	219,0	212,0	224,0
$f_d = 4375$ кГц	l_{\perp} , м	66,4*	69,0	60,4	62,2	66,8	66,7	62,5	61,7	65,1	68,4	68,6
	h_d , км	191,0	199,0	192,0	206,0	219,0	219,0	221,0	220,0	231,0	227,0	244,0
$f_d = 4700$ кГц	l_{\perp} , м	61,8	63,3	57,5	57,5	65,4	69,6	60,0		61,8	61,8	63,7
	h_d , км	199,0	205,0	199,0	212,0	230,0	232,0	226,0		238,0	232,0	251,0
$f_d = 5100 \div 5200$ кГц	l_{\perp} , м	60,4	60,5	55,3	55,4	65,7	65,7	56,3	56,2	58,0	57,9	61,6
	h_d , км	211,0	215,0	208,0	222,0	249,0	249,0	233,0	234,0	245,0	241,0	262,0
$f_d = 5600$ кГц	l_{\perp} , м	57,5	57,0	57,9	58,1			53,0	50,8	55,5	55,5	61,4
	h_d , км	222,0	226,0	223,0	236,0			238,0	239,0	252,0	251,0	280,0
$f_d = 6300$ кГц	l_{\perp} , м							54,4	52,7	60,9		
	h_d , км							256,0	261,0	278,0		
$f_d = 5600$ кГц (x)	l_{\perp} , м					55,5	55,6		48,3	52,4	52,3	55,5
	h_d , км					241,0	241,0		231,0	244,0	239,0	260,0
$f_d = 6300$ кГц (x)	l_{\perp} , м		49,3	51,6	50,1							
	h_d , км		230,0	233,0	244,0							
$f_d = 6600$ кГц (x)	l_{\perp} , м	48,6						45,4	47,3	45,7	47,3	
	h_d , км	258,0						247,0	255,0	263,0	270,0	
$f_0 = 4740$ кГц	h_0 , км	217,0	220,0	215,0	229,0	252,0	250,0	236,0	239,0	250,0	247,0	266,0

в интервале частот $f_d \approx 4,7 \div 6,6$ МГц и высот $h_d \approx 184 \div 229$ км для 15:30 MSK. Для более ранних часов наблюдений (14:00 MSK) частотный и высотный интервал рассеяния сигналов уже ($h_d \approx 205 \div 230$ км). Согласно данным табл. 2 и рис. 7а, рассеяние сигналов происходит на неоднородностях с поперечными размерами $l_{\perp} \approx 52 \div 68$ м и временами релаксации $\tau_r \approx 11 \div 16$ с.

Отсутствие рассеяния для меньших частот зондирующих волн (и, следовательно, меньших высот h_d) можно связывать с более низкой эффективностью «прорастания» искусственных неоднородностей вдоль геомагнитного поля вниз от источника в дневных условиях, а не с полным отсутствием траекторий рассеяния зондирующих/рассеянных сигналов для этих частот, проходящих через диаграмму направленности стенда, как это предполагалось в работе [16]. Источник неоднородностей, согласно существующим представлениям [17], расположен в области верхнего гибридного резонанса волны накачки, где выполнено условие $f_0 = [f_p^2 + f_c^2]^{1/2}$, т. е. на $3 \div 10$ км ниже высоты отражения волны накачки, где $f_0 = f_p$. Здесь f_p и f_c — электронные плазменная и циклотронная частоты соответственно.

Данные, представляющие результаты измерений 6 сентября 2010 года в переходное время от дня к ночи с 17:00 до 22:00 MSK, приведены в табл. 3 (см. также рис. 5 и 7). Согласно выполненным для условий эксперимента расчётам, наблюдаются три типа возможных траекторий рассеяния. Первый тип отвечает рассеянию на высотах E -слоя ($95 \div 100$ км) для частот ниже его критической частоты, т. е. $f_d \leq f_{oE}$. Второй тип наблюдается для частот $f_{oE} \leq f_d \leq f_{oE} + 1,5$ МГц при возможном рассеянии на высотах E -слоя ($95 \div 100$ км) и, одновременно, при рассеянии на высотах

Таблица 4

		а)				б)			
время (MSK), ч:мин		22:36	23:00	23:36	23:52	22:29	23:03	23:24	23:45
$f_d = 2010$ кГц	l_{\perp} , м	123,6	130,7	132,1	133,0	133,7	133,7	133,5	137,9
	h_d , км	196,0	188,0	188,0	184,0	179,0	178,0	178,0	186,0
$f_d = 2510$ кГц	l_{\perp} , м	99,4	105,6	106,5	107,1	107,9	108,3	107,1	111,7
	h_d , км	203,0	196,0	197,0	196,0	193,0	190,0	191,0	201,0
$f_d = 3010$ кГц	l_{\perp} , м	83,6	88,4	89,5	90,6	90,8	91,8	89,6	94,4
	h_d , км	208,0	202,0	207,0	209,0	204,0	202,0	202,0	214,0
$f_d = 3510$ кГц	l_{\perp} , м	72,7	76,9	77,7	78,6	78,6	79,7	77,0	81,1
	h_d , км	214,0	209,0	213,0	218,0	212,0	209,0	212,0	224,0
$f_d = 4010$ кГц	l_{\perp} , м	64,6	68,1	68,9	69,1	70,9	70,9	78,9	73,1
	h_d , км	220,0	214,0	223,0	226,0	219,0	216,0	222,0	233,0
$f_d = 4510$ кГц	l_{\perp} , м	58,5	60,7	61,4	61,6	67,3	64,8	64,0	66,9
	h_d , км	224,0	221,0	230,0	235,0	227,0	224,0	230,0	242,0
$f_d = 5010$ кГц	l_{\perp} , м	53,2	55,1	56,1	58,6	62,0	60,1	61,1	71,8
	h_d , км	230,0	227,0	238,0	245,0	235,0	232,0	242,0	261,0
$f_d = 5510$ кГц	l_{\perp} , м	48,6	50,4	55,6	62,3	57,3	58,2	59,2	71,3
	h_d , км	237,0	233,0	2523,0	266,0	245,0	240,0	257,0	272,0
$f_d = 6510$ кГц (х)	l_{\perp} , м	41,7	42,8			48,7	51,1		
	h_d , км	243,0	241,0			262,0	244,0		
$f_0 = 4785$ кГц	h_0 , км	236,0	236,0	249,0	256,0	241,0	239,0	261,0	270,0

подложки F-слоя (130÷160 км). Для частот $f_d = 2,1\div 4,1$ МГц последнее условие реализуется в разное время суток в зависимости от величины f_{oE} (см. рис. 7в) и в табл. 3 приводятся оба значения высоты рассеяния h_d . Третий тип траекторий соответствует рассеянию на высотах F-слоя (160÷280 км) для частот $f_{oE} + 1,5 \text{ МГц} \leq f_d \leq f_{xF_2} / \cos \alpha$. В последнем случае максимальная наблюдаемая частота рассеянной волны определяется максимальной применимой частотой при наклонном падении на ионосферный слой под углом α [15]. Данный случай для всех используемых в расчётах частот f_d преобладает для вечерних и ночных условий после 20:00 MSK.

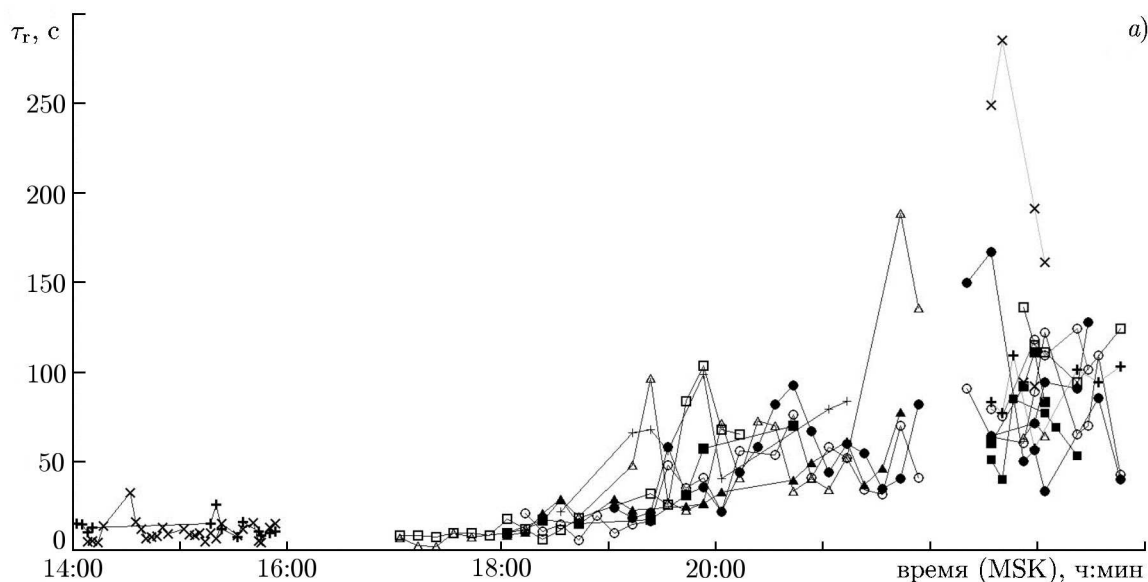


Рис. 7 (начало).

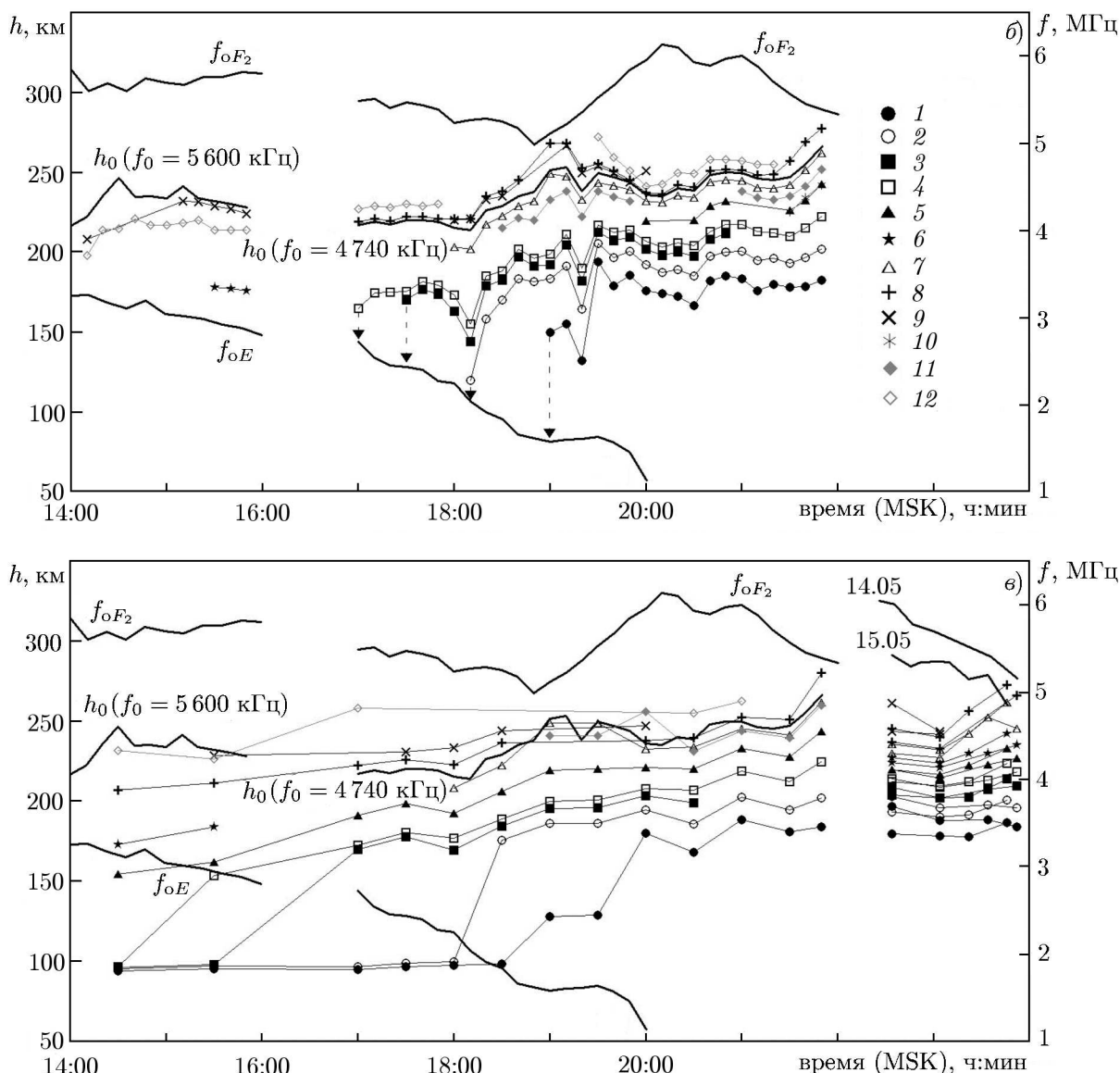


Рис. 7 (продолжение). Зависимость времён релаксации рассеянных сигналов (Казань) от времени суток (а). Зависимость критических частот ионосферы и высот отражения волны накачки (сплошные линии) и рассеяния сигналов (линии с маркерами) над станцией «Сура» от времени суток (б). Для рассеянных сигналов результаты получены с использованием правила вертикальной и наклонной эквивалентности в плоскостростной ионосфере только для реальных данных наблюдений, штриховыми вертикальными стрелками отмечены сеансы появления сигналов на уменьшающихся частотах f_d по мере снижения критических частот E-слоя. Данные о высотах рассеяния сигналов, полученные с помощью расчётов лучевых траекторий для магнитоактивной плазмы для всех возможных высот рассеяния (в). Данные до 22:00 MSK приведены для 06.09.2010, после 22:30 MSK — для 14–15.05.2010. Различные маркеры соответствуют различным частотам диагностических волн, о-мода: 2 010÷2 100 кГц (1), 2 510÷2 600 кГц (2), 3 010÷3 100 кГц (3), 3 400÷3 510 кГц (4), 4 010÷4 375 кГц (5), 4 510÷4 700 кГц (6), 5 010÷5 200 кГц (7), 5 510÷5 600 кГц (8), 6 100÷6 510 кГц (9); х-мода: 5 200 кГц (10), 5 600 кГц (11), 6 600 кГц (12)

За время проведения наблюдений с 17:00 до 22:00 MSK высоты, с которых наблюдается рассеянный сигнал на фиксированной частоте, возрастают на 50÷55 км. Сам интервал высот, в кото-

ром наблюдается рассеяние на разных частотах, возрастает от 50 км (17:00 MSK) до 90÷100 км (21:00 MSK). До 19:00 MSK для всех диагностируемых масштабов неоднородностей $l_{\perp} \approx 48 \div 102$ м времена релаксации рассеянного излучения лежат в интервале $\tau_r \approx 10 \div 25$ с, после чего они начинают возрастать, достигая значений $\tau_r \approx 30 \div 80$ с (с максимальными величинами до $\tau_r \approx 150 \div 200$ с). Масштаб рассеивающих неоднородностей для фиксированной частоты рассеяния несколько возрастает к ночи, но может считаться приблизительно постоянным.

В табл. 4 представлены данные расчётов, полученных для измерений с 22:30 до 24:00 MSK 14 (табл. 4а) и 15 (табл. 4б) мая 2010 года при наклоне диаграммы направленности стенда «Сура» на 12° к югу (в направлении магнитного зенита). При наклонном нагреве в направлении магнитного зенита области рассеяния для разных частот оказываются более «раскиданными» по площади диаграммы направленности стенда (см. рис. 2). Область рассеяния на разных частотах занимает высотный интервал $h_d \approx 180 \div 270$ км, масштабы рассеивающих неоднородностей лежат в интервале $l_{\perp} = 42 \div 133$ м, времена релаксации принимают значения $\tau_r \approx 50 \div 130$ с, максимальные значения $\tau_r \approx 250 \div 300$ с (см. рис. 6а). Данные расчётов и измерений близки к результатам расчётов и измерений для поздних часов наблюдений 6 сентября 2010 года (см. табл. 3) для случая вертикального нагрева.

Сопоставление данных, представленных на рис. 7б и в для 6 сентября 2010 года, указывает на относительно небольшие различия высот рассеяния (не более 5÷10 км), полученных с помощью различных методов расчётов. Следовательно, основные выводы, сделанные в работе [10] о свойствах рассеивающих вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностей, можно считать подтверждёнными выполненными в данной работе расчётами. В первую очередь это касается суточной зависимости времён релаксации рассеянных сигналов (времён релаксации неоднородностей различных масштабов). Возрастание данных времён от дня к ночи (максимум в 4÷10 раз) связано с ростом вытянутости (продольного масштаба l_{\parallel}) декаметровых неоднородностей в 2÷3 раза.

Времена релаксации данных неоднородностей, определяемые амбиполярной продольной диффузией с коэффициентом $D_{a\parallel}$, связаны с продольным масштабом неоднородностей следующей формулой [4]:

$$\tau = l_{\parallel}^2 / (8D_{a\parallel}), \quad D_{a\parallel} = k(T_e + T_i) / (\nu_{in} m_i). \quad (3)$$

Здесь k — постоянная Больцмана, T_e и T_i — электронная и ионная температуры соответственно, ν_{in} — частота соударений ионов с нейтральными частицами, m_i — масса иона.

Согласно работе [18] продольный масштаб декаметровых неоднородностей l_{\parallel} определяется масштабом продольной теплопроводности плазмы $l_{T_{\parallel}}$:

$$l_{T_{\parallel}} = V_{T_e} / (\nu_e \delta_e^{0,5}). \quad (4)$$

Здесь $V_{T_e} = (kT_e/m_e)^{0,5}$ — тепловая скорость электронов, ν_e — частота соударений электронов, $\delta_e = 2 \cdot 10^{-5} \div 10^{-3}$ — доля энергии, теряемой электроном при соударении с тяжёлой частицей (ионом или нейтральной частицей).

Таким образом, величина $\tau \approx l_{T_{\parallel}}^2 / D_{a\parallel} \approx \nu_{in} / (\nu_e^2 \delta_e)$. Рост характерного продольного масштаба теплопроводности и, соответственно, продольного размера в спектре декаметровых неоднородностей в ночных измерениях может приводить к наблюдаемому росту их времён релаксации. Последнее можно связывать с уменьшением величин ν_e и δ_e . Действительно, произведение $\nu_e^2 \delta_e$ может существенно (на порядок) падать с ростом высоты ионосферы при переходе от дня к ночи, и это падение не компенсируется снижением частоты ν_{in} (до 2÷3 раз) с ростом высоты [19].

Другой какой-либо однозначной зависимости времён релаксации декаметровых неоднородностей от их поперечного размера в интервале $l_{\perp} \approx 40 \div 130$ м или от их высоты по данным наших

измерений выявить не удалось. Следует отметить существующий достаточно большой разброс наблюдаемых значений времён релаксации даже в соседних сеансах измерений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых численных расчётов лучевых траекторий распространения радиоволн в диапазоне частот $2\div 7$ МГц для условий эксперимента по возвратно-наклонному зондированию возмущённой области ионосферы над нагретым стендом «Сура» с помощью ионозонда «Циклон» на короткой трассе Казань—Васильсурск—Казань установлено следующее.

В используемом диапазоне частот, наряду с рефракцией, на распространение сигналов возвратно-наклонного зондирования существенно влияет геомагнитное поле \mathbf{B}_0 . В частности, траектории сигналов нельзя считать плоскими, даже когда сигналы излучаются строго поперёк \mathbf{B}_0 . Используя попадание расчётного времени распространения сигналов возвратно-наклонного зондирования в интервал измеренных временных задержек, можно оценить размеры и высоту той области с ориентированными вдоль геомагнитного поля неоднородностями, созданными излучением стенда, которая отвечает за генерацию рассеянных сигналов. Для проведения оценок необходимо рассчитывать траектории возвратно-наклонного зондирования для волн обеих поляризации. Рассеяние сигналов возвратно-наклонного зондирования происходит вблизи наивысшей точки траекторий для сигналов, распространяющихся под углами, близкими к 90° к геомагнитному полю, т. е. имеет место почти обратное рассеяние. Вертикальный размер области рассеяния для каждой из частот зондирующих волн составляет около 5 км. При вертикальном нагреве ионосферы размер области рассеяния в направлении трассы (это направление почти перпендикулярно плоскости геомагнитного меридиана) оказывается сравнимым с горизонтальным размером диаграммы направленности стенда по уровню половинной мощности. Размер области в поперечном направлении, близком к линии север—юг, оказывается заметно меньшим. При наклонном нагреве (на 12° к югу вдоль магнитного меридиана) поперечный размер области увеличивается.

Существует три типа возможных траекторий рассеяния во всём диапазоне частот вплоть до максимальной применимой частоты для случая наклонного падения диагностических волн на возмущённую область. Первый тип траекторий отвечает рассеянию в E -слое ионосферы на высотах около 100 км для частот $f_d \leq f_{oE}$ и характерен для дневных условий. Второй тип траекторий характеризуется двумя областями рассеяния (на высотах около 100 км (E -слой) и $130\div 160$ км (подложка F -слоя) для частот $f_{oE} \leq f_d \leq f_{oE} + 1,5$ МГц) и отвечает дневным условиям вплоть до захода Солнца. Третий тип соответствует рассеянию в F -слое ионосферы на высотах $160\div 270$ км для частот $f_{oE} + 1,5$ МГц $\leq f_d \leq f_{xF_2}/\cos \alpha$, он характерен для высокочастотной части диапазона в дневные часы и для всех частот в послезаходные часы. В экспериментах 14–15.05.2010 и 06.09.2010 рассеяние для траекторий первого типа не наблюдалось, для траекторий второго типа рассеяние от верхней области отмечалось всего в нескольких вечерних сеансах (см. табл. 2, 3 и рис. 7б в моменты времени, показанные штриховыми стрелками). Рассеяние для траекторий третьего типа наблюдалось практически всегда.

Определён диапазон масштабов декаметровых неоднородностей, ответственных за рассеяние, и высотный интервал их положений. Для дневных условий в эксперименте наблюдается генерация неоднородностей с размерами $l_\perp \approx 50\div 70$ м ($l_\perp \sim \lambda_0$, где λ_0 — длина волны накачки в вакууме) в узкой области высот около уровня отражения волны накачки с $h_d \approx 190\div 230$ км. К ночи оба интервала расширяются: $l_\perp \approx 40\div 130$ м и $h_d \approx 150\div 270$ км. Рассеяние зондирующих волн с большими частотами происходит на больших высотах на неоднородностях меньших масштабов. Исследован суточный ход высот рассеяния для каждой частоты зондирования, возрастающих на 50 км от дня к ночи.

При вертикальном нагреве ионосферы оценки высоты области рассеяния и масштабов неоднородностей, выполненные для геометрии распространения радиоволн перпендикулярно плоскости магнитного меридиана с использованием правила вертикальной и наклонной эквивалентности в плоскостной ионосфере [15], оказываются близкими к полученным в результате траекторных расчётов.

Подтверждён эффект возрастания времён релаксации декаметровых неоднородностей (максимум в $4\div 10$ раз) в ночные часы по сравнению с дневными часами наблюдений, связываемый с ростом продольного масштаба декаметровых неоднородностей. Однозначной связи времён релаксации декаметровых неоднородностей с их поперечным размером не обнаружено, сам вечерний рост времён релаксации этих неоднородностей происходит в условиях увеличения высот рассеяния.

Введение, разделы 1, 2 и 4 работы выполнены при поддержке РФФ (проект 14-12-00706п), раздел 3 — при поддержке РФФИ (проект 16-02-00798).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fialer P. A. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 923.
2. Barry G. H. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 1025.
3. Rao P. V., Thome G. D. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 987.
4. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Митяков Н. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
5. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 1998. V. 59, No. 12. P. 2317.
6. Насыров А. М. Расеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Казань: Издание Казанского университета, 1991. 149 с.
7. Uryadov V. P., Ryabova N. V., Ivanov V. A., Shumaev V. V. // J. Atm. Terr. Phys. 1995. V. 57, No. 11. P. 1263.
8. Вертоградов Г. Г., Вертоградов Е. Г. Урядов В. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 1.
9. Бахметьева Н. В., Игнатъев Ю. А., Дмитриев С. А., Шавин П. Б. // Геомагнетизм и аэронамия. 1992. Т. 32, № 3. С. 180.
10. Сергеев Е. Н., Зыков Е. Ю. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 79.
11. Грач С. М., Погорелко Н. А., Яшнов В. А. // Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. 2012, № 6 (1). С. 43.
12. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf>.
13. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
14. Черенкова Е. Л., Чернышёв О. В. Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
15. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М. Мир, 1973. 504 с.
16. Болотин И. А., Фролов В. Л., Акчурин А. Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 66.
17. Грач С. М., Сергеев Е. Н., Мишин Е. В., Шиндин А. В. // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186, № 11. С. 1189.
18. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Геомагнетизм и аэронамия. 1982. Т. 22, № 4. С. 565.
19. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.

Поступила в редакцию 3 ноября 2017 г.; принята в печать 20 февраля 2018 г.

**DETERMINING THE POSITION AND PROPERTIES OF THE REGION
OF ARTIFICIAL IONOSPHERIC IRREGULARITIES ABOVE THE SURA
FACILITY RESPONSIBLE FOR GENERATION OF ASPECT SCATTERING
SIGNALS ON A SHORT PATH**

N. A. Pogorelko, E. N. Sergeev, S. M. Grach, V. A. Yashnov, A. V. Shindin, and E. Yu. Zykov

The data obtained in the experiments on aspect scattering on a short path of Kazan — Vasilsursk — Kazan performed at the Sura facility in 2010 at frequencies of 2–7 MHz are compared with the results of ray-tracing calculations of the sounding and scattered signals. Positions and sizes of the region above Sura responsible for generation of the aspect scattering signals are determined. Characteristic scales of artificial decametric scattering irregularities and their dynamic properties as functions of the generation altitude and the time of the day are found.