

УДК 550.388.2

РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЯ ИОНОСФЕРНОГО ОНЧ-ИСТОЧНИКА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО МОДИФИКАЦИИ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

© 2017 г. О. М. Лебедь^{1, *}, Ю. В. Федоренко¹, Н. Ф. Благовещенская²,
А. В. Ларченко¹, В. Ф. Григорьев¹, С. В. Пильгаев¹

¹Полярный геофизический институт (ПГИ РАН), г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (АНИИ),
г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: olgamihs@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.03.2017 г.

После доработки 03.05.2017 г.

На основе результатов наблюдений электромагнитных полей ионосферного источника в эксперименте по модификации нижней ионосферы мощным модулированным коротковолновым сигналом, проведенном АНИИ на стенде EISCAT/Heating в октябре 2016 г., определены фазовые скорости ТЕ и ТЕМ волн в волноводе Земля–ионосфера на частотах 1017 и 3017 Гц и оценено влияние высыпаний во время полярных сияний на их значения. С помощью численного решения волнового уравнения в плоскостной ионосфере найдены возможные профили электронной концентрации, при которых рассчитанные фазовые скорости близки к измеренным в эксперименте.

DOI: 10.7868/S0016794017060062

1. ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты по нагреву высокоширотной ионосферы мощным модулированным коротковолновым (КВ) сигналом позволяют исследовать физические процессы, происходящие в ионосферной плазме, и эффекты распространения низкочастотных волн в волноводе Земля–ионосфера. Результаты такого рода исследований могут быть использованы как для целей радиосвязи на низких частотах, так и для изучения глубинного распределения проводимости земной поверхности для получения сведений о ее геологической структуре.

В работах [Лебедь и др., 2015, 2017] было показано, что анализ временных вариаций групповой скорости распространения атмосфериков (электромагнитных сигналов от молниевых разрядов) в СНЧ диапазоне позволяет диагностировать состояние нижней ионосферы и производить оценки ее профиля электронной концентрации. Представляет интерес расширение диапазона частот для более точного анализа состояния нижней ионосферы, поскольку существенное влияние на скорость распространения на разных частотах оказывают разные области нижней ионосферы. Однако создание наземной антенны, которая излучала бы на частотах порядка нескольких килогерц, практически невозможно. В экспериментах по нагреву

ионосферы мощная модулированная КВ радиоволна создает источник на высотах D -слоя ионосферы, излучающий низкочастотные электромагнитные сигналы с частотой, равной частоте модуляции. Такой источник может излучать на интересующих нас частотах и с его помощью мы можем исследовать как распространение радиоволн на ТЕМ моде на частотах ниже частоты поперечного резонанса волновода Земля–ионосфера (≈ 1.8 кГц), так и распространение на ТЕ и ТМ модах на частотах выше частоты резонанса. При этом из общих соображений можно предположить, что на расстояниях порядка нескольких длин волн, где происходит регистрация сигналов, высота и конфигурация источника уже слабо влияют на их скорость распространения, что дает возможность исследовать именно особенности распространения сигналов в волноводе Земля–ионосфера.

В данной работе мы приводим результаты исследования распространения электромагнитных сигналов на ТЕМ и ТЕ модах в волноводе Земля–ионосфера. С помощью моделирования пространственного распределения компонент электромагнитного поля от ионосферного ОНЧ источника у земной поверхности сделана попытка найти профили электронной концентрации, при которых возможно получение фазовых скоростей, близких к измеренным в эксперименте.

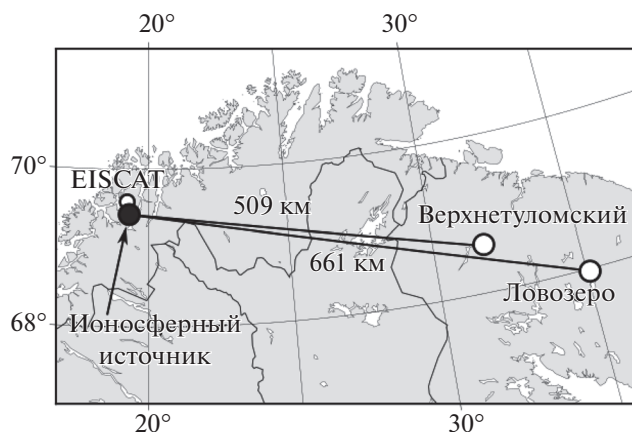


Рис. 1. Расположение нагревного стенда EISCAT и обсерваторий “Верхнетуломский” и “Ловозеро”.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по модификации нижней ионосферы мощным модулированным КВ сигналом проводились 24, 25 и 26 октября 2016 г. с 15 до 17 UT в рамках КВ нагревной кампании ААНИИ на технических средствах Европейской научной ассоциации EISCAT в северной Норвегии в октябре 2016 г. Модификация высокоширотной ионосферы осуществлялась с помощью КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating, расположенного в г. Тромсе, Норвегия (69.6° N , 19.2° E ; $L = 6.2$, $I = 78^\circ$), технические характеристики которого приведены в работе [Rietveld et al., 2016]. Эксперименты, анализируемые в данной статье, выполнялись с использованием фазированной антенной решетки “2” (ФАР 2). Ширина диаграммы направленности ФАР 2 составляет порядка 14° (на уровне половинной мощности). Эффективная мощность излучения в период экспериментов $P_{\text{эфф}} = 120\text{--}140 \text{ МВт}$. Мощная модулированная КВ радиоволна необыкновенной поляризации (Х-мода) излучалась на частоте 4040 кГц циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза (24 и 26 октября 2016 г.) и 25 мин нагрев, 5 мин пауза 25 октября 2016 г., начиная с 1-ой минуты часа. 24 и 26 октября частота модуляции от цикла к циклу изменялась в последовательности 1017, 1617, 2017 и 3017 Гц. 25 октября в течение каждого 25 мин цикла нагрева происходило ступенчатое изменение частоты модуляции по схеме 1017, 1617, 1817, 2017 и 3017 Гц (5 мин на каждой частоте). Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита (диаграмма направленности КВ нагревного комплекса была наклонена на 12° от вертикали к югу), за исключением периода с 15:01 до 15:46 UTC 24 октября, когда излучение проводилось в вертикальном направлении.

Прием низкочастотных сигналов на частоте модуляции мощной КВ радиоволны осуществ-

лялся одновременно в четырех пунктах наблюдений — Лотта (68.503° N , 28.6202° E), Верхнетуломский (68.592° N , 31.7550° E), Ловозеро (67.975° N , 35.0821° E) и Баренцбург (78.093° N , 14.208° E), удаленных от нагревного комплекса EISCAT/Heating на расстояния от 400 до 950 км. Расположение обсерваторий Верхнетуломский и Ловозеро, данные которых анализируются в настоящей работе, показано на рис. 1. Эта пара станций выбрана для измерения фазовых скоростей сигнала от ионосферного источника поскольку, во-первых, эти станции находятся почти на одной прямой относительно нагревного стенда, и, во-вторых, удалены на расстояния, достаточные для того, чтобы можно было пренебречь влиянием полей ближней зоны источника на результаты измерений. Расположение станций вдоль одной прямой минимизирует влияние возможных отклонений структуры ионосферы от плоскостной модели на оценки фазовой скорости, так как разность фаз между компонентами поля на станциях определяется условиями распространения вдоль единственной трассы.

На всех пунктах приема были установлены цифровые ОНЧ-приемники, предназначенные для регистрации двух горизонтальных магнитных и вертикальной электрической компонент поля в диапазоне частот от 30 Гц до 15 кГц [Ларченко и др., 2015]. Отличительной особенностью приемников является прецизионная синхронизация каждого отсчета цифровых данных с мировым временем с максимальной ошибкой, не превышающей 1 мкс, что дало возможность измерять абсолютные и относительные фазы компонент поля с ошибкой, не превышающей 0.01° на использованных в эксперименте частотах [Пильгаев и др., 2008; Филатов и др., 2011]. Начиная с ноября 2012 г., приемник был использован для исследования как естественных ОНЧ излучений, так и искусственных сигналов от ионосферного источника, возникающего при модификации ионосферы мощным КВ излучением [Fedorenko et al., 2014]. В цитируемой работе также описан метод калибровки и приведены характеристики данного ОНЧ-приемника.

Эксперименты выполнялись при сильно возмущенных магнитных условиях. Значения суммы трехчасовых индексов планетарной магнитной активности за сутки имели значения $\Sigma Kp = 24+$, 41 и 38 для 24, 25 и 26 октября 2016 г., соответственно. Анализ вариаций магнитного поля Земли показал, что в основном ст. Тромсе находилась в зоне восточного электроджета, за исключением периодов наблюдений после 16:30 UT, когда она оказывалась в зоне разрыва Харанга (переход от восточного к западному электроджету) или даже в зоне западного электроджета (26 октября после 16:45 UT). По данным вертикального зондирования ионосферы в Тромсе в период эксперимен-

тов регистрировались интенсивные спорадические слои E_s , как правило, с групповым запаздыванием на высокочастотном участке ионограмм, с критическими частотами $f_o E_s = 3.5\text{--}7.0$ МГц.

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Электромагнитное поле ионосферного источника в пунктах наблюдений (рис. 1) на частотах ниже частоты первого поперечного резонанса волновода Земля–ионосфера (~ 1800 Гц) в основном представлено поперечной электромагнитной модой (ТЕМ), структура поля которой аналогична структуре поля волны в свободном пространстве. В этом диапазоне частот в волноводе Земля–ионосфера другие моды не распространяются. Векторы напряженности магнитного и электрического поля ТЕМ моды тангенциальны к направлению распространения. На частотах выше первого, но ниже второго поперечного резонанса ($\sim 1800\text{--}3600$ Гц) в волноводе присутствуют три моды — ТЕМ, первая поперечная магнитная (ТМ₁) и первая поперечная электрическая (ТЕ₁) [Wait and Spies, 1964; Cummer, 2000]. Эти три моды распространяются с разными фазовыми скоростями, в основном определяемыми состоянием верхней стенки волновода Земля–ионосфера. Регистрируемая на земной поверхности на частоте 3017 Гц тангенциальная к направлению распространения компонента горизонтального магнитного поля является суммой полей ТЕМ и ТМ₁ мод, распространяющихся с различными фазовыми скоростями. При интерференции мод фаза этой компоненты зависит от расстояния до источника, что затрудняет интерпретацию результатов измерений. Радиальная компонента магнитного поля представляет единственную ТЕ₁ моду, что делает ее наиболее подходящей для измерения фазовой скорости на этой частоте.

Для разделения вектора горизонтального магнитного поля на радиальную и тангенциальную составляющие система координат на каждой из станций переводилась при помощи поворота вокруг вертикальной оси Z из геофизической с осями, направленными на север, на восток и вниз, в систему координат, первая ось которой направлена от источника, а вторая перпендикулярно ей, образуя с направленной вниз осью Z правую тройку.

Измерение фазовой скорости ТЕМ моды на частоте $f_{\text{ТЕМ}} = 1017$ Гц производилось по данным регистрации тангенциальной компоненты магнитного поля H_r . Скорость ТЕ моды на частоте $f_{\text{ТЕ}} = 3017$ Гц определялась с использованием радиальной компоненты магнитного поля H_r . Для совместной обработки результатов измерений на двух станциях частоты дискретизации аналого-цифровых преобразователей (АЦП) приводились к стандартной частоте 8 кГц. Частоты дискретизации

АЦП на станциях различаются на сотые доли процента и могут испытывать плавные изменения, связанные, в основном, с изменениями температуры. Каждый отсчет АЦП всегда привязан к мировому времени с микросекундной точностью, но присутствуют значимые отличия между временами цифровых отсчетов в obs. Ловозеро и в obs. Верхнетуломский, что недопустимо при совместной обработке данных. Для приведения данных к единой частоте дискретизации 8 кГц при обработке был применен программный интерполятор [Лебедь и др., 2012]. Далее действительные цифровые сигналы компонент $H_{t,r}^{\text{LOZ}}$, $H_{t,r}^{\text{TUL}}$ превращались в комплексные $\dot{H}_{t,r}^{\text{LOZ}}$, $\dot{H}_{t,r}^{\text{TUL}}$ при помощи преобразования Гильберта. Разность фаз между соответствующими компонентами магнитного поля вычислялась как $\Delta\varphi_{\text{ТЕМ}} = \arg\langle \dot{H}_t^{\text{TUL}} \dot{H}_t^{\text{LOZ}*} \rangle$, $\Delta\varphi_{\text{ТЕ}} = \arg\langle \dot{H}_r^{\text{TUL}} \dot{H}_r^{\text{LOZ}*} \rangle$, “*” означает комплексное сопряжение, угловые скобки — усреднение по интервалу непрерывной генерации каждой частоты. Фазовые скорости рассчитывались по формулам $v_{\text{ТЕМ}} = 2\pi f_{\text{ТЕМ}} d / \Delta\varphi_{\text{ТЕМ}}$ и $v_{\text{ТЕ}} = 2\pi f_{\text{ТЕ}} d / \Delta\varphi_{\text{ТЕ}}$, d — разность расстояний от Ловозера и Верхнетуломского до предполагаемого местоположения ионосферного источника.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рисунке 2 представлены результаты измерения фазовых скоростей сигналов ионосферного источника с частотами 1017 и 3017 Гц, соответственно, на трассе Верхнетуломский–Ловозеро. Точки на графиках соответствуют средним значениям фазовых скоростей за время интервалов генерации. Треугольниками отмечены фазовые скорости за 24 октября, а кружками — за 25 октября. Сигналы компонент электромагнитного поля на частотах 1017 и 3017 Гц за 26 октября не вошли в рассмотрение, поскольку при обработке обнаружилось, что данные сигналы очень сильно зашумлены.

Из рисунка видно, что наблюдается схожий ход фазовых скоростей, измеренных 24 и 25 октября, в промежуток времени примерно от 15 до 16 UT на частоте 1017 Гц. Отличие в скоростях, измеренных через одни сутки, составляет порядка 3–4 Мм/с. Об этом же свидетельствует точка вблизи 16:00 UT на частоте 3017 Гц. Здесь фазовые скорости отличаются всего на 1 Мм/с. Причем на частоте 1017 Гц фазовая скорость увеличивается со временем, а на частоте 3017 Гц — наоборот уменьшается. Такое поведение скоростей распространения сигналов легко объясняется влиянием Солнца на состояние верхней стенки волновода Земля–ионосфера. В рассматриваемые часы через трассу Верхнетуломский–Ловозеро

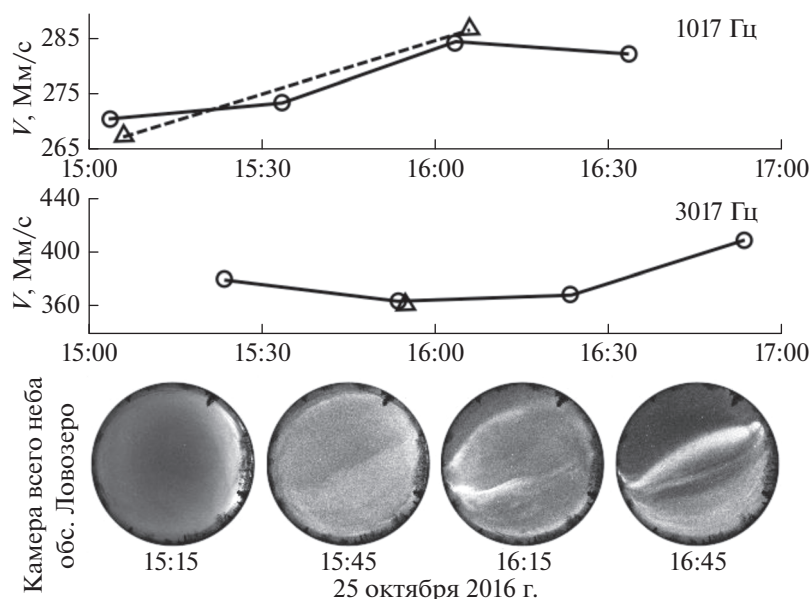


Рис. 2. Фазовые скорости распространения сигналов с частотами 1017 и 3017 Гц на трассе Верхнетулумский–Ловозеро за 24 (треугольники) и 25 (кружки) октября 2016 г. Нижняя панель – снимки с камеры всего неба, установленной в обс. Ловозеро, за 25 октября 2016 г.

проходит терминатор и наступает ночь. Это приводит к исчезновению D -слоя ионосферы в ночное время и увеличивает эффективную высоту волновода. Как показано в работе [Greifinger and Greifinger, 1979] и экспериментально подтверждено в работе [Лебедь и др., 2015], увеличение высоты волновода в ночное время приводит к возрастанию фазовой скорости ТЕМ моды, на которой распространяется сигнал с частотой 1017 Гц. В то же время, при увеличении эффективной высоты волновода на частотах выше первого поперечного резонанса волновода Земля–ионосфера возрастает угол падения парциальных плоских волн, представляющих ТЕ моду на частоте 3017 Гц, что приводит к уменьшению фазовой скорости ТЕ моды.

Особый интерес представляют значения фазовой скорости, зарегистрированные после 16:15 UTC 25 октября 2016 г. Из рис. 2 следует, что в это время $v_{\text{ТЕМ}}$ уменьшилась примерно на 2 Мм/с, не достигнув, впрочем, значений скорости, наблюдаемых до прохождения терминатора. Фазовая скорость ТЕ моды $v_{\text{ТЕ}}$ на частоте 3017 Гц увеличилась ко времени последнего интервала генерации на частоте 1017 Гц примерно на 7 Мм/с и продолжала увеличиваться. По снимкам камеры всего неба, установленной в обс. Ловозеро (рис. 2), в это время наблюдались довольно сильные полярные сияния. Учитывая возмущенность геомагнитной обстановки (обсуждалась выше) и наличие высыпаний на трассе Верхнетулумский–Ловозеро во время полярных сияний, можно предположить, что эти процессы привели к изменению профиля

электронной концентрации нижней ионосферы и, как следствие, к уменьшению эффективной высоты волновода Земля–ионосфера. Это изменение, в свою очередь, повлияло на распространение сигналов в волноводе Земля–ионосфера, в том числе на их фазовую скорость.

Можно качественно объяснить некоторые особенности поведения фазовых скоростей $v_{\text{ТЕ}}$ и $v_{\text{ТЕМ}}$ в рамках простой модели волновода, образованного бесконечно проводящими пластинами, расположенными на расстоянии, примерно равном эффективной высоте волновода Земля–ионосфера. Но для того, чтобы подобрать профили электронной концентрации, обеспечивающие близкие к полученным в эксперименте фазовые скорости ТЕМ и ТЕ мод, необходима более сложная модель. В настоящей работе для объяснения наблюдаемых вариаций фазовой скорости сигналов с частотами 1017 и 3017 Гц и установления связи между профилями электронной концентрации N_e ионосферы и измеренными фазовыми скоростями $v_{\text{ТЕ}}$ и $v_{\text{ТЕМ}}$ мы использовали численную модель, описывающую возбуждение волновода Земля–ионосфера при нагреве ионосферы мощной модулированной КВ волной [Lehtinen and Inan, 2008, 2009].

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ИОНОСФЕРНОГО ИСТОЧНИКА

Для моделирования поля ионосферного источника на земной поверхности нами был выбран метод решения волнового уравнения, описанный

в работах [Lehtinen and Inan, 2008, 2009]. При помощи этого метода можно найти горизонтальные магнитные и вертикальную электрическую компоненты поля ионосферного источника в любой точке земной поверхности на выбранной частоте.

Земная поверхность считается плоской и бесконечно проводящей. Ионосфера представляется в виде горизонтально стратифицированной немагнитной среды, однородной в горизонтальном направлении (x, y). В вертикальном направлении свойства среды в каждом слое считаются постоянными и определяются тензором диэлектрической проницаемости. В такой среде сохраняются горизонтальные компоненты волнового вектора k_x, k_y . Токи ионосферных источников представляются в виде их разложения по плоским волнам $\sim \exp(ik_x x + ik_y y)$. Электромагнитное поле в каждом слое $\mathbf{E}(k_x, k_y)$, $\mathbf{H}(k_x, k_y)$ рассчитывается отдельно для каждого k_x, k_y . Для этого волновое поле в каждом слое разделяется на волны, идущие вверх, и волны, идущие вниз. Коэффициенты отражения в каждом слое, преобразующие распространяющиеся вверх волны в распространяющиеся вниз, и наоборот, рассчитываются рекурсивно в направлениях, в которых нет т.н. “заваливающих” численных неустойчивостей. При переходе от слоя к слою горизонтальные компоненты поля сшиваются при помощи граничных условий. При отсутствии источников эти граничные условия являются просто равенством компонент на границе между слоями. При наличии источников последние описываются в виде скачка полей на разделяющей слои границе. Для перехода из пространства горизонтальных волновых чисел в физическое пространство $\mathbf{E}(k_x, k_y)$, $\mathbf{H}(k_x, k_y) \rightarrow \mathbf{E}(x, y)$, $\mathbf{H}(x, y)$ применяется обратное преобразование Фурье.

Метод реализован в вычислительной среде Octave [Eaton et al., 2016]. Для ускорения вычислений основные матричные операции реализованы на языке C++ с использованием API C++ Octave. Основные вычислительно затратные циклы программы распараллелены при помощи OpenMP, что привело к ускорению вычислений примерно в три раза.

В нашем расчете ионосферный источник представлялся в виде электрического диполя, расположенного на высоте 80 км [Lehtinen and Inan, 2008; Cohen et al., 2008]. Направление тока диполя мы выбирали в соответствии с результатами работы [Cohen et al., 2008]. В ней использовались результаты наземных измерений магнитного поля в двух точках, расположенных на расстояниях ≈ 700 км от стенда НААРП и было показано, что направление тока низкочастотного ионосферного источника практически совпадает с направлением холловского тока аврорального электродрожжа с отклонением не более ± 8 градусов. Профиль

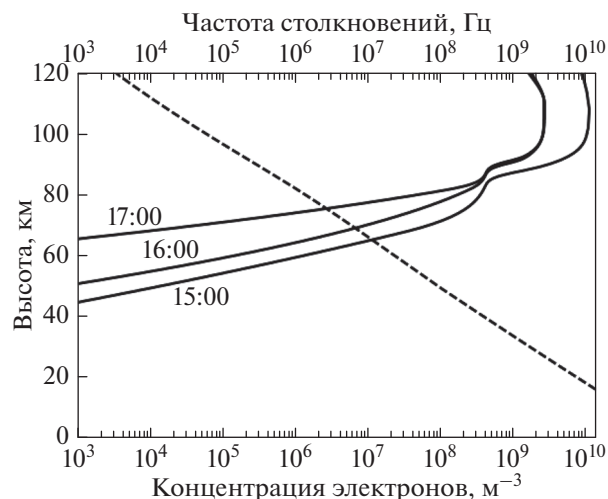


Рис. 3. Штриховая линия — высотный профиль частоты столкновений электронов с нейтрами (NRLMSISE-00); сплошная линия — высотные профили концентрации электронов на середине трассы Верхнетуломский–Ловозеро за 15, 16 и 17 UTC (IRI-2012).

частоты столкновений электронов $\nu(z)$ рассчитывался с помощью данных эмпирической модели NRLMSISE-00 и считался неизменным во время эксперимента. Статическое магнитное поле Земли рассчитано для координат стенда EISCAT/Heating по модели IGRF, его величина составила 5.53×10^{-5} Тл. Высотный профиль электронной концентрации $N_e(z)$ получен для 15, 16 и 17 UTC 25 октября 2016 г. из эмпирической модели IRI-2012 [Bilitza et al., 2014]. Вычисление N_e проводилось со следующими опциями: Auroral boundaries — off, E-peak auroral storm model — off, D-region model — IRI-95. Это позволило нам получить среднестатистический профиль электронной концентрации для данного момента времени в спокойных условиях. Возмущенные условия моделировались путем модификации этого профиля, о чем будет идти речь далее. Высотный профиль частоты столкновений электронов с нейтрами (NRLMSISE-00) и высотные профили $N_e(z)$ на середине трассы Верхнетуломский–Ловозеро (IRI-2012) показаны на рис. 3.

6. ВЛИЯНИЕ ВЫСЫПАНИЙ НА ФАЗОВЫЕ СКОРОСТИ

Снимки камеры всего неба в обс. Ловозеро и данные вертикального зондирования ионосферы в г. Тромсе в период экспериментов, когда регистрировались интенсивные спорадические слои на высотах 90–100 км, свидетельствуют о том, что можно ожидать значительных изменений электронной концентрации на высотах от 80 км и выше во время интервалов нагрева примерно от 15:30 до 17:00 UT. Мы ожидали, что фазовые ско-

рости ТЕ и ТЕМ мод значительно отреагируют на такие изменения. Однако изменения фазовой скорости ТЕМ моды во время высыпаний оказались невелики по сравнению с изменениями при переходе день—ночь. Фазовая скорость ТЕ моды изменилась сильнее и к 16:50 UT достигла значений, наблюдавшихся во время прохождения терминатора вдоль трассы.

Для оценки диапазона высот, в котором изменения электронной концентрации наиболее значимо влияют на распространение ТЕ и ТМ мод, мы сначала оценили наиболее вероятную высоту отражения ТЕ моды. Для этого, предполагая, что отражение происходит там, где сильно нарушается геометрооптическое приближение, мы использовали приведенный в работе [Виноградова и др., 1979] критерий применимости этого приближения

$$\beta = \frac{c}{2\pi f n^2} \left| \frac{dn}{dz} \right| \ll 1$$

для профиля электронной концентрации, рассчитанного моделью IRI-2012 для 16:00 UTC 25 октября 2016 на середине трассы (см. рис. 3), n — показатель преломления ионосферы для свисовой волны в квазипродольном приближении. Зависимость параметра β от высоты приведена на рис. 4, левая панель. Из рисунка следует, что для частоты 3017 Гц критерий применимости приобретает значение $\beta \approx 1$ на высоте около 80 км, что свидетельствует о сильном нарушении геометрооптического приближения и предполагает отражение ТЕ волны на этой высоте. Высота идеального волновода, образованного двумя параллельными бесконечно проводящими пластинами, отстоящими на высоту h , при наблюдавшемся изменении фазовой скорости от 360 Мм/с до 400 Мм/с (рис. 2) изменяется от 88 км до 76 км, соответственно, что не противоречит оценкам, полученным для профиля N_e из модели IRI-2012. Для оценки глубины проникновения электрического поля в ионосферу мы рассчитали распределение плотности электрической энергии в координатах k_x/k_0 и z , оно приведено на рис. 4. Видно, что плотность энергии электрического поля на обеих рассматриваемых частотах резко падает на высотах выше 80 км. Таким образом, из приведенного выше анализа следует, что характерная высота, ниже которой распространяется основная часть энергии электромагнитных волн с частотами 1017 и 3017 Гц, составляет около 80 км. Поскольку изменения N_e при высыпаниях частиц во время полярных сияний в основном происходят на высотах выше 90 км, можно ожидать, что высыпания вряд ли будут оказывать существенное влияние

на распространение сигналов в волноводе Земля—ионосфера на частотах 1–3 кГц.

Для количественной оценки влияния изменений профиля N_e на высотах от 90 км и выше мы изменили стандартный профиль N_e , последовательно увеличив за несколько шагов концентрацию на высоте 100 км на порядок, как показано на рис. 5, верхняя панель. Ниже приведены результаты расчета фазовых скоростей сигналов с частотами 1017 и 3017 Гц, соответствующие этому набору профилей. На частоте 1017 Гц фазовая скорость ТЕМ моды при увеличении концентрации на порядок уменьшилась примерно на 4 Мм/с, что сравнимо с наблюдавшимся в эксперименте изменением на 12 Мм/с при переходе от дня к ночи. Рассчитанная фазовая скорость ТЕ моды на частоте 3017 Гц увеличилась примерно на 1.5 Мм/с, что много меньше изменений, наблюдавшихся в эксперименте.

Проведенный в этом разделе анализ влияния изменений электронной концентрации на высотах 90 км и выше вследствие высыпаний на фазовые скорости ТЕМ и ТЕ мод показал, что хотя это влияние невелико, оно все же может быть обнаружено. Отличия же в изменениях измеренной и рассчитанной фазовых скоростей ТЕ моды, по-видимому, обусловлены не увеличением N_e , а чем-то другим, например, отклонением структуры ионосферы от плоскостной или сильным рассеянием на неоднородностях ионосферы вблизи трассы.

7. ПРОФИЛИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТЕЙ

Прямое измерение профиля N_e на высотах D-слоя (60–90 км) является трудной задачей, так как эти высоты слишком низки для спутниковых измерений и слишком велики для аэростатных, а ракетные измерения дороги и проводятся эпизодически. Радары частичных отражений и некогерентного рассеяния, позволяющие оценить электронную концентрацию на этих высотах, дороги и их мало. Далее мы покажем, что, используя совместные измерения фазовых скоростей ТЕ и ТЕМ мод, можно получить эквивалентный профиль электронной концентрации. Для этого мы вначале получили множество возможных профилей N_e , изменяя базовый профиль, полученный из модели IRI-2012, а затем при помощи численного решения волнового уравнения рассчитали фазовые скорости для трассы Верхнетуломский—Ловозеро и выбрали те из них, которые наиболее точно соответствовали измеренным скоростям.

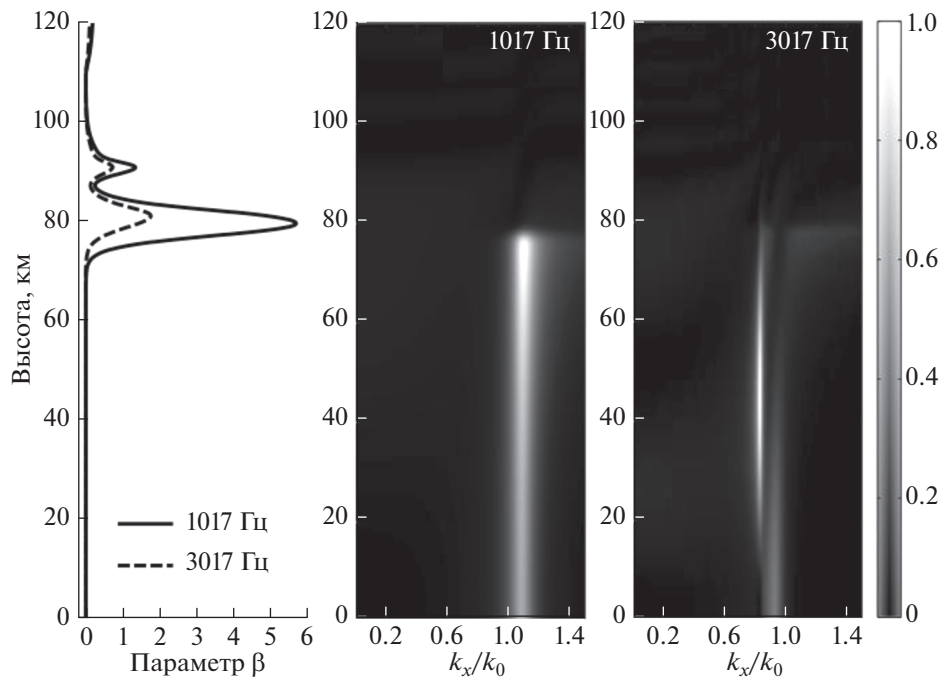


Рис. 4. Зависимость критерия применимости геометрооптического приближения β от высоты — левая панель; распределение плотности энергии волн с частотами 1017 Гц и 3017 Гц по высоте — центральная и правая панели, соответственно.

На верхней панели рис. 6 приведен набор из M профилей N_e , для которых были рассчитаны фазовые скорости u_m^{TE} и u_m^{TEM} . Ниже показаны профили, доставляющие минимум невязки измеренных скоростей v_k^{TE} и v_k^{TEM} с рассчитанными скоростями

$$R_k = \frac{1}{2} \min_m \left[\left(v_k^{\text{TEM}} - u_m^{\text{TEM}} \right)^2 + \left(v_k^{\text{TE}} - u_m^{\text{TE}} \right)^2 \right]$$

для трех интервалов измерений. Здесь $k = 1 \dots 3$, $m = 1 \dots M$. Величина невязки составила 0.8 Мм/с для первого интервала измерений, 1.4 Мм/с для второго и 1.2 Мм/с для третьего. Эти величины значительно меньше изменений скоростей за время наблюдений, поэтому можно считать, что отобранные таким образом профили электронной концентрации достаточно хорошо описывают состояние нижней ионосферы в приближении плоскостной модели.

Во время первого интервала измерений в 15:21 UT солнечный терминатор на высоте 80 км еще находился между ст. Ловозеро и Верхнетуломский. Профиль I показывает значения $N_e \approx 10^7 \text{ м}^{-3}$ на высоте 60 км, что характерно для дневных условий и свидетельствует о наличии D -слоя. В 15:51 UT скорость ТЕМ моды типична для ночной ионосферы, а профиль II характерен для гораздо менее выраженного или вообще отсутствующего D -слоя. Несмотря на то, что на трассе Верхнетуломский—Ловозеро уже почти час, как наступила ночь, для

профиля III характерны несколько большие значения N_e на высотах от 95 км и ниже, чем для профиля II, что может быть связано с влиянием высыпаний на ионосферу.

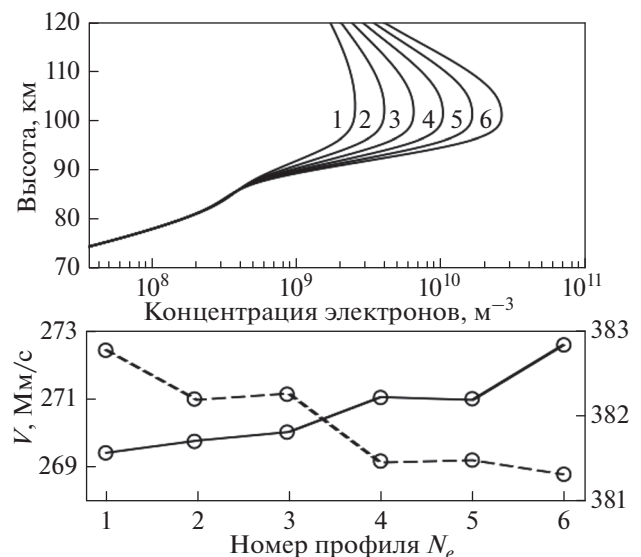


Рис. 5. Верхняя панель — набор высотных профилей N_e с изменяемой концентрацией на высоте 100 км; нижняя панель — результаты расчета фазовых скоростей сигналов с частотами 1017 (левая шкала, сплошная линия) и 3017 Гц (правая шкала, штриховая линия), соответствующие этому набору профилей.

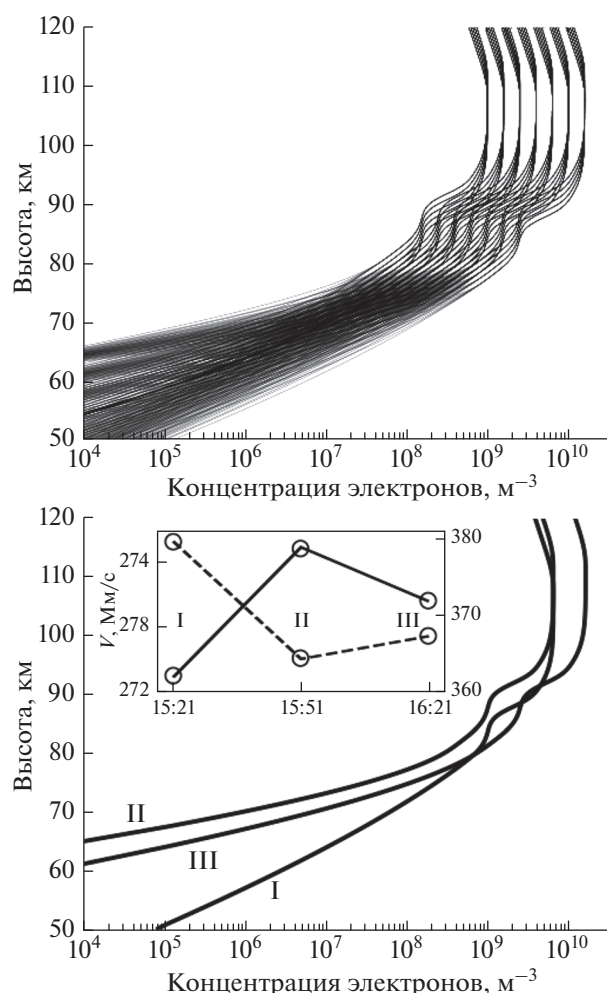


Рис. 6. Верхняя панель — набор профилей N_e , для которых выполнялось моделирование. Нижняя панель — профили N_e , соответствующие измерениям фазовых скоростей на обеих (1017 и 3017 Гц) частотах для временных интервалов вблизи 15:21 (I), 15:51 (II) и 16:21 (III). Внутри нижней панели показаны фазовые скорости сигналов с частотами 1017 (левая шкала, сплошная линия) и 3017 Гц (правая шкала, штриховая линия), для которых осуществлялся подбор профилей.

8. ВЫВОДЫ

Результаты измерений электромагнитного поля в обсерваториях ПГИ Верхнетуломский и Ловозеро, полученные при нагреве высокоширотной ионосферы мощным модулированным КВ сигналом 24–25 октября 2016 г. стенда EISCAT/Heating (Тромсе), были использованы для изучения связи профилей электронной концентрации в нижней ионосфере со скоростями распространения ТЕМ моды на частоте 1017 Гц и ТЕ моды на частоте 3017 Гц. Найдено, что отличие скорости распространения ТЕМ моды на частоте 1017 Гц от скорости, измеренной в то же время в более спокойных условиях 24 октября, мало. Отсюда следует, что высыпания электронов во время полярных

сияний 25 октября 2016 г., приведшие по данным вертикального зондирования ионосферы в Тромсе к образованию интенсивных спорадических слоев Es, оказали слабое влияние на распространение ТЕМ моды. Численное моделирование распределения энергии электрического поля по высоте показало, что поле волноводных ТЕ и ТМ/ТЕМ мод, возбуждаемых ионосферным источником, практически отсутствует на высотах 90–100 км, где в основном происходят изменения электронной концентрации за счет высыпаний при полярных сияниях. Показано, что сравнение результатов близких по времени измерений фазовых скоростей ТЕМ моды на частоте 1017 Гц и ТЕ моды на частоте 3017 Гц с результатами численного моделирования позволяет найти профили электронной концентрации, соответствующие измерениям на обеих частотах. Отсюда следует, что измерение скоростей распространения ТЕМ и ТЕ мод на частотах ниже и выше частоты первого поперечного резонанса волновода Земля-ионосфера дает возможность оценить профиль электронной концентрации в ионосфере на высотах ниже 80 км, но вряд ли может быть применено для оценки изменений в ионосфере, связанных с высыпаниями во время полярных сияний.

Авторы выражают благодарность Европейской научной Ассоциации EISCAT и Dr. M. Rietveld, а также сотрудникам обс. Верхнетуломский и обс. Ловозеро за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-35-00293.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. — М.: Наука, 1979. 384 с.
- Ларченко А.В., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В. Трехкомпонентные измерения структуры электромагнитного поля в диапазоне крайне низких и сверхнизких частот // Радиотехника и электроника. Т. 60. № 8. С. 793–801. 2015.
- Лебедь О.М., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. Программно-аппаратный комплекс для фазовых измерений в крайне низких-сверхнизких диапазонах частот // Приборы и техника эксперимента. № 3. С. 56–62. 2012.
- Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Ларченко А.В., Пильгаев С.В. Реакция авроральной нижней ионосферы на солнечные вспышки в марте 2012 г. по данным наблюдений в СНЧ диапазоне // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 55. № 6. С. 797–807. 2015.
- Лебедь О.М., Ларченко А.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. Реакция высокоширотной нижней ионосферы на солнечные протонные события по данным наблюдений в СНЧ диапазоне // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 57. № 1. С. 57–63. 2017. doi 10.7868/S0016794017010072
- Пильгаев С.В., Ахметов О.И., Филатов М.В., Федоренко Ю.В. Универсальное устройство синхронизации

данных от GPS приемника // Приборы и техника эксперимента. № 3. С. 175–176. 2008.

– Филатов М.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. Четырехканальный 24 разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента. № 3. С. 73–75. 2011.

– Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.-A., Reinisch B. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration // J. Space Weather Space Clim., V. 4. A07. P. 1–12. 2014. doi 10.1051/swsc/2014004

– Cohen M.B., Gołkowski M., Inan U.S. Orientation of the HAARP ELF ionospheric dipole and the auroral electrojet // Geophys. Res. Lett. V. 35. L02806. 2008. doi 10.1029/2007GL032424

– Cummer S.A. Modeling electromagnetic propagation in the earth-Ionosphere waveguide // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. V. 48. № 9. P. 1420–1429. 2000.

– Eaton J.W., Bateman D., Hauberg S. GNU Octave Manual Version 3. – UK: Network Theory Limited. 568 p. 2008.

– Fedorenko Yu., Tereshchenko E., Pilgaev S., Grigoriev V., Blagoveshchenskaya N. Polarization of Elf waves generated during “beat-wave” heating experiment near cutoff frequency of the earth-ionosphere waveguide // Radio Sci. T. 49. № 12. P. 254–1264. 2014. doi 10.1002/2013RS005336

– Greifinger C., Greifinger Ph. On the ionospheric parameters which govern high-latitude ELF propagation in the Earth-ionosphere waveguide // Radio Sci. V. 14. P. 889–895. 1979.

– Lehtinen N.G., Inan U.S. Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet // J. Geophys. Res., 113. A06301. 2008.

– Lehtinen N.G., Inan U.S. Full-wave modeling of trans-ionospheric propagation of VLF waves // Geophys. Res. Lett., 36. L03104. 2009.

– Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // Radio Sci. V. 51. № 9. P. 1533–1546. 2016. doi 10.1002/2016RS006093

– Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. National Bureau of Standards. Technical note 300. 1964.