

УДК 551.510:621.371:550.388

ОТЛИЧИЯ ПРОГНОЗОВ УСЛОВИЙ КВ-РАДИОСВЯЗИ МЕЖДУ ПЕРЕДАТЧИКОМ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ И ПРИЕМНИКОМ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ

© 2021 г. И. В. Мингалев^{1, 2, *}, З. В. Суворова¹, В. Н. Шубин³, А. М. Мерзлый⁴,
В. В. Тихонов⁵, А. Б. Талалаев⁶, В. С. Мингалев¹

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

²Мурманский Арктический государственный университет (МАГУ),
г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

⁴Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН),
г. Москва, Россия

⁵АО «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны»,
г. Тверь (Тверская обл.), Россия

⁶АО «РТИ», г. Москва, Россия

*e-mail: mingalev_i@pgia.ru

Поступила в редакцию 03.09.2020 г.

После доработки 29.12.2020 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Сопоставлены результаты прогнозов условий радиосвязи в КВ-диапазоне между передатчиком, расположенным на средних широтах, и приемниками, расположенными в районах Норвежского и Баренцева морей. В качестве основы расчета прогнозов были использованы модели ионосферы IRI-2016 и Global Dynamic Model of Ionosphere (GDMI), разработанная в ИЗМИРАН. Прогноз условий радиосвязи основан на расчетах трехмерных лучевых траекторий радиоволн в приближении геометрической оптики с учетом анизотропии ионосферной плазмы и ее пространственной неоднородности. Показано, что прогноз условий радиосвязи, рассчитанный при помощи модели GDMI, может существенно отличаться от прогноза, рассчитанного при помощи модели IRI-2016. Также показано, что в середине декабря рассчитанные с помощью моделей GDMI и IRI-2016 значения МПЧ для радиотрассы Санкт-Петербург–Longyearbyen (Лонгйирбюен) (Шпицберген) для односкачковых траекторий днем превышают экспериментальные значения МПЧ на 5–20%, а ночью ниже экспериментальных на 30–40%. При этом для второй половины дня точность прогноза МПЧ, полученного с использованием модели GDMI, лучше, чем точность прогноза МПЧ, полученного с использованием модели IRI-2016. Для остального времени суток наоборот, использование модели IRI-2016 обеспечивает лучшую точность прогноза МПЧ.

DOI: 10.31857/S001679402104009X

1. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежной КВ-радиосвязи с морскими и воздушными судами, а также сухопутными объектами в высоких широтах имеет большое прикладное значение. Распространение КВ-радиоволн определяется пространственным распределением концентрации электронов в ионосфере, которое на средних и высоких широтах имеет сложную неоднородную структуру как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Основные крупномасштабные неоднородно-

сти – это овал полярных сияний (ОПС) и главный ионосферный провал (ГИП). Их положение существенно меняется в зависимости от времени суток и от геофизических условий.

Для прогноза условий радиосвязи, а также для оценки состояния ионосферы по работе различных радиотрасс давно применяется численное моделирование распространения радиоволн КВ-диапазона с расчетом лучевых траекторий в приближении геометрической оптики [Кравцов и Орлов, 1980; Budden, 1985; Крашенинников и

Егоров, 2005; Андреев и др., 2007а, б; Крашенинников и др., 2017, 2018; Крашенинников и Шубин, 2020].

Для расчета лучевых траекторий распространения радиоволн КВ-диапазона необходимо рассчитывать плазменную частоту и частоту столкновений электронов в ионосфере во всей области прохождения лучевых траекторий. Для задания распределения этих параметров в ионосфере разработаны эмпирические модели, построенные на основе анализа данных наблюдений о состоянии ионосферы, самые известные из которых – это Международная Справочная модель Ионосферы (IRI) [Bilitza et al., 2017] и модель NeQuick [Nava et al., 2008]. В модели GDMI, разработанной в ИЗМИРАН, основные параметры F2-слоя ионосферы для спокойных геомагнитных условий рассчитываются по моделям $hmF2$ [Shubin et al., 2013; Shubin, 2015] и $foF2$ [Шубин, 2017], которые построены на основе данных наземного зондирования ионосферы и профилей электронной концентрации, полученных радиозатменным методом с помощью спутников. Модели IRI, NeQuick и GDMI существенно различаются между собой и могут быть использованы для расчета лучевых траекторий радиоволн КВ-диапазона в приближении геометрической оптики.

Общая схема вычислений в этих моделях следующая. Над заданной точкой на поверхности Земли по аналитическим формулам рассчитываются высоты максимумов критической частоты и значения этой частоты на высоте для D, E, F1 и F2-слоев ионосферы. Аналитические формулы подбирают для выбранной базы данных. Затем с помощью перечисленных параметров также по аналитическим формулам рассчитываются вертикальные профили в узлах сетки по высоте электронной концентрации и плазменной частоты, а также профили температуры электронов и частоты их столкновений [Banks, 1966; Schunk and Nagy, 1978; Часовитин и др., 1988].

Указанные выше модели отличаются между собой используемыми аналитическими формулами для расчета основных параметров слоев ионосферы, а также базами данных, с помощью которых эти формулы построены.

Цель данной работы – сравнить прогнозы условий КВ-связи между передатчиком, расположенным на средних широтах, и приемниками, расположенными в районах Норвежского и Баренцева морей, рассчитанные при использовании моделей ионосферы IRI-2016 и GDMI.

Область на поверхности Земли, в которую попадают выходящие из одного передатчика односкачковые лучевые траектории радиоволн КВ-диапазона, существенно меняется в течение суток. В дальнейшем будем называть эту область зоной засветки передатчика.

В данной работе с помощью численного моделирования исследуются изменения этой зоны для передатчика, расположенного в Санкт-Петербурге, в течение суток 21 июня 2019 г. для разных частот КВ-диапазона, близких к максимальной применимой частоте (МПЧ) для данных условий. Проводится анализ моделирования и делается вывод о возможности односкачковой КВ-радиосвязи между Санкт-Петербургом и районами, расположенными к северу от него в секторе азимутальных углов от -30° до 30° от направления на север.

Также проводится сравнение экспериментальных ионограмм наклонного зондирования (НЗ) для радиотрассы Санкт-Петербург–Longyearbyen (Лонгйирбюен) (Шпицберген), полученных техническими средствами ААНИИ в течение одних суток (14–15 декабря 2001 г.) для пяти моментов времени, и численно синтезированных с использованием эмпирических моделей ионосферы ионограмм для этой же радиотрассы для тех же моментов времени.

Кроме того, приведено описание используемой в работе численной модели распространения радиоволн КВ-диапазона. Эта модель является дальнейшим развитием модели, использовавшейся в работах [Андреев и др., 2007а, б].

2. МЕТОД РАСЧЕТА ЛУЧЕВЫХ ТРАЕКТОРИЙ КВ-РАДИОВОЛН

Для численного моделирования распространения КВ-радиоволн используется приближение геометрической оптики [Кравцов и Орлов, 1980] с учетом анизотропии ионосферной плазмы, обусловленной геомагнитным полем. Лучевые траектории находятся путем численного решения системы уравнений эйконала:

$$\frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = \mathbf{p} - \frac{1}{2} \nabla_{\mathbf{p}} (n_b^2), \quad \frac{d\mathbf{p}}{d\tau} = \frac{1}{2} \nabla_{\mathbf{r}} (n_b^2), \quad (1)$$

в которых \mathbf{r} – радиус-вектор, проведенный из начала координат в точку наблюдения; \mathbf{p} – вектор волновой нормали; τ – приведенная длина луча; n_b^2 – квадрат вещественной части показателя преломления нормальной волны. Этот показатель определяется как решение дисперсионного биквадратного уравнения

$$An^4 + Bn^2 + C = 0, \quad (2)$$

в котором использованы обозначения:

$$\begin{aligned} A &= \varepsilon_{\perp}(1 - \cos^2 \theta) + \varepsilon_{\parallel} \cos^2 \theta, \\ B &= -\varepsilon_{\perp} \varepsilon_{\parallel} (1 + \cos^2 \theta) - (\varepsilon_{\perp}^2 - g^2)(1 - \cos^2 \theta), \\ C &= \varepsilon_{\parallel} (\varepsilon_{\perp}^2 - g^2), \end{aligned}$$

где θ – угол между векторами \mathbf{p} и $\mathbf{b} = \mathbf{B}_{\text{внеш}}/|\mathbf{B}_{\text{внеш}}|$; $\mathbf{B}_{\text{внеш}}$ – внешнее магнитное поле; $\varepsilon_{\perp} = 1 - \frac{\omega_p^2(\omega - iv_e)}{[(\omega - iv_e)^2 - \omega_H^2]\omega}$, $g = \frac{\omega_p^2\omega_H}{[(\omega - iv_e)^2 - \omega_H^2]\omega}$, $\varepsilon_{\parallel} = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega - iv_e)\omega}$ – компоненты тензора комплексной диэлектрической проницаемости плазмы $\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & -ig & 0 \\ ig & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{pmatrix}$ в декартовой системе координат с осью z , ориентированной вдоль магнитного поля $\mathbf{B}_{\text{внеш}}$; $\omega_p^2 = e^2 N_e / m_e \varepsilon_0$ – квадрат плазменной частоты; e и m_e – заряд и масса электрона; N_e – концентрация электронов в плазме; $\omega_H = e \mathbf{B}_{\text{внеш}} / m_e$ – гирочастота электронов; ν_e – эффективная частота соударений электронов с другими частицами.

Дисперсионное уравнение (2) определяет два решения для двух волновых мод – обыкновенной и необыкновенной волн, которые распространяются с различными показателями преломления, фазовыми и групповыми скоростями, причем обыкновенная волна имеет левую поляризацию, а необыкновенная волна – правую. Решение дисперсионного уравнения можно представить в виде $n = \left[\frac{-B \pm D}{2A} \right]^{1/2}$, где $D = (B^2 - 4AC)^{1/2}$.

Для численного интегрирования системы уравнений эйконала используется схема Рунге–Кутты 4-го порядка точности с коррекцией гамильтониана на каждом шаге траектории. Особенностью используемой нами схемы является расчет компонент градиента в декартовых координатах, при этом параметры среды задаются на сетке в сферической системе координат. Такой подход позволяет избежать накопления дополнительной погрешности, которая непременно возникла бы при расчете траектории в сферической системе координат вследствие большего количества вычислительных операций (вычисление коэффициентов Ламе, более громоздкие уравнения с большим количеством слагаемых и пр.).

3. ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ

Для задания этих параметров использовались две эмпирические модели ионосферы – модель IRI-2016 и разработанная в ИЗМИРАН модель ионосферы GDMI. Для проведения расчетов были выбраны две даты – 21 июня 2019 г. и 21 декабря 2018 г. – и заданы спокойные геофизические условия (индекс $A_p = 3$, $F10.7 = 70$, $F10.7A = 70$).

На рисунках 1 и 2 представлены вертикальные профили критической частоты плазмы, рассчи-

танные по указанным выше моделям, в точках, расположенных на долготе 30° E и на широтах 60° , 65° , 70° N в разные моменты времени. На рисунке 1 представлены вертикальные профили критической частоты плазмы для даты 21.12.2018 г. в моменты, когда в Санкт-Петербурге полночь (а) и полдень (б). На рисунке 1а видно, что в полночь для всех трех точек максимальные критические частоты в F -слое, рассчитанные по модели GDMI, больше, чем рассчитанные по модели IRI-2016. Высоты максимумов F -слоя для точек с широтами 60° и 65° , рассчитанные по модели GDMI, ниже, чем рассчитанные по модели IRI-2016, примерно на 40 и 25 км соответственно. Градиент электронной концентрации на высотах 170–190 км, рассчитанный по модели GDMI, существенно больше, чем рассчитанный по модели IRI-2016, что сильно влияет на распространение КВ-радиоволн. Различия между моделями на высотах ниже 170 км незначительны.

На рисунке 1б видно, что в полдень для всех трех точек максимальные критические частоты в F -слое, рассчитанные по модели GDMI, больше, чем рассчитанные по модели IRI-2016. Высоты максимумов F -слоя для всех точек, рассчитанные по модели GDMI, ниже, чем рассчитанные по модели IRI-2016, примерно на 40–50 км. Градиент электронной концентрации на высотах 130–150 км, рассчитанный по модели GDMI, существенно больше, чем рассчитанный по модели IRI-2016, что сильно влияет на распространение КВ-радиоволн. Различия между моделями на уровне E -слоя ионосферы также весьма существенны. Это связано с тем, что в модели GDMI в области ОПС дополнительно учитывается источник ионизации атмосферы, вызванный выпадающими из магнитосферы заряженными частицами [Бадин и др., 2013]. Поэтому модель GDMI дает выраженный максимум E -слоя на высоте 110 км, а в модели IRI-2016 такого максимума нет.

На рисунке 2 представлены вертикальные профили критической частоты плазмы для даты 21.06.2019 г. в моменты, когда в Санкт-Петербурге полночь (а) и полдень (б). На рисунке 2а видно, что в полночь для всех трех точек имеются существенные различия между профилями, рассчитанными по модели GDMI и по модели IRI-2016, на высотах 90–120 км и 130–300 км. Для всех трех профилей модель GDMI дает высоту максимума F -слоя ~ 260 км, а модель IRI-2016 – ~ 320 км. При этом максимальные критические частоты F -слоя, рассчитанные по этим двум моделям, различаются незначительно (модель IRI-2016 дает значения $foF2$ примерно на 0.5 МГц меньше). Градиент электронной концентрации на высотах 130–150 км, рассчитанный по модели GDMI, существенно больше, чем рассчитанный по модели IRI-2016, что сильно влияет на распространение КВ-радиоволн.

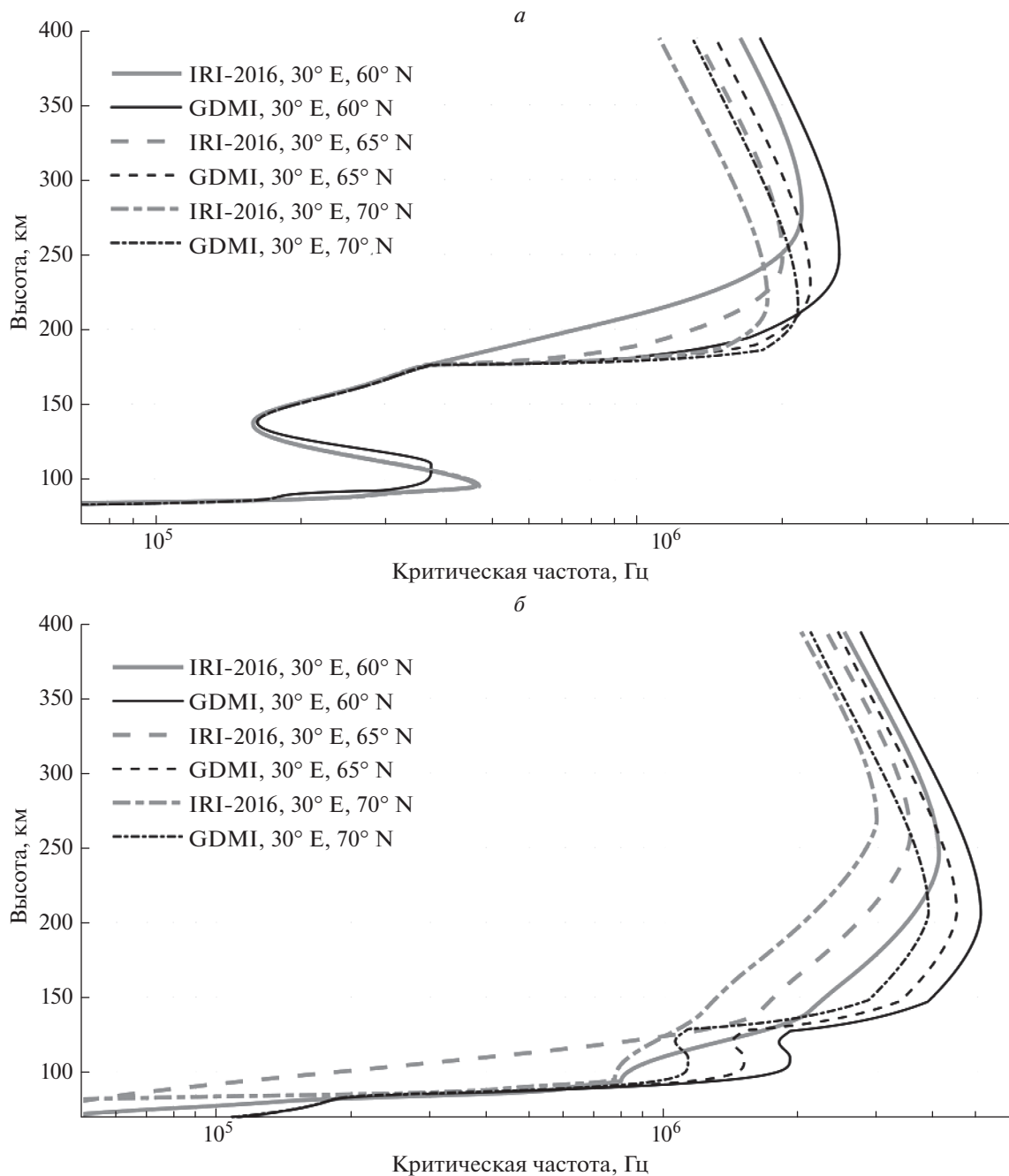


Рис. 1. Вертикальные профили критической частоты плазмы, рассчитанные по моделям GDMI и IRI-2016 для даты 21.12.2018 г. для спокойных геофизических условий (индекс $A_p = 3$, $F_{10.7} = 70$, $F_{10.7A} = 70$), для моментов времени UT = 22:00 (а) и UT = 10:00 (б).

На рисунке 2б видно, что в полдень для всех трех точек профили, рассчитанные по модели GDMI и по модели IRI-2016, на высотах выше 130 км близки между собой. Различия между моделями на высотах 90–120 км весьма существенны. Модель GDMI дает выраженный максимум E-слоя на высоте 110 км, а модель IRI-2016 такого максимума не дает. Градиент электронной кон-

центрации на высотах 90–120 км, рассчитанный по модели GDMI, существенно больше, чем рассчитанный по модели IRI-2016, что сильно влияет на распространение КВ-радиоволн. Критические частоты на высоте 100 км, рассчитанные по модели GDMI, больше, чем рассчитанные по модели IRI-2016, примерно в 6 раз.

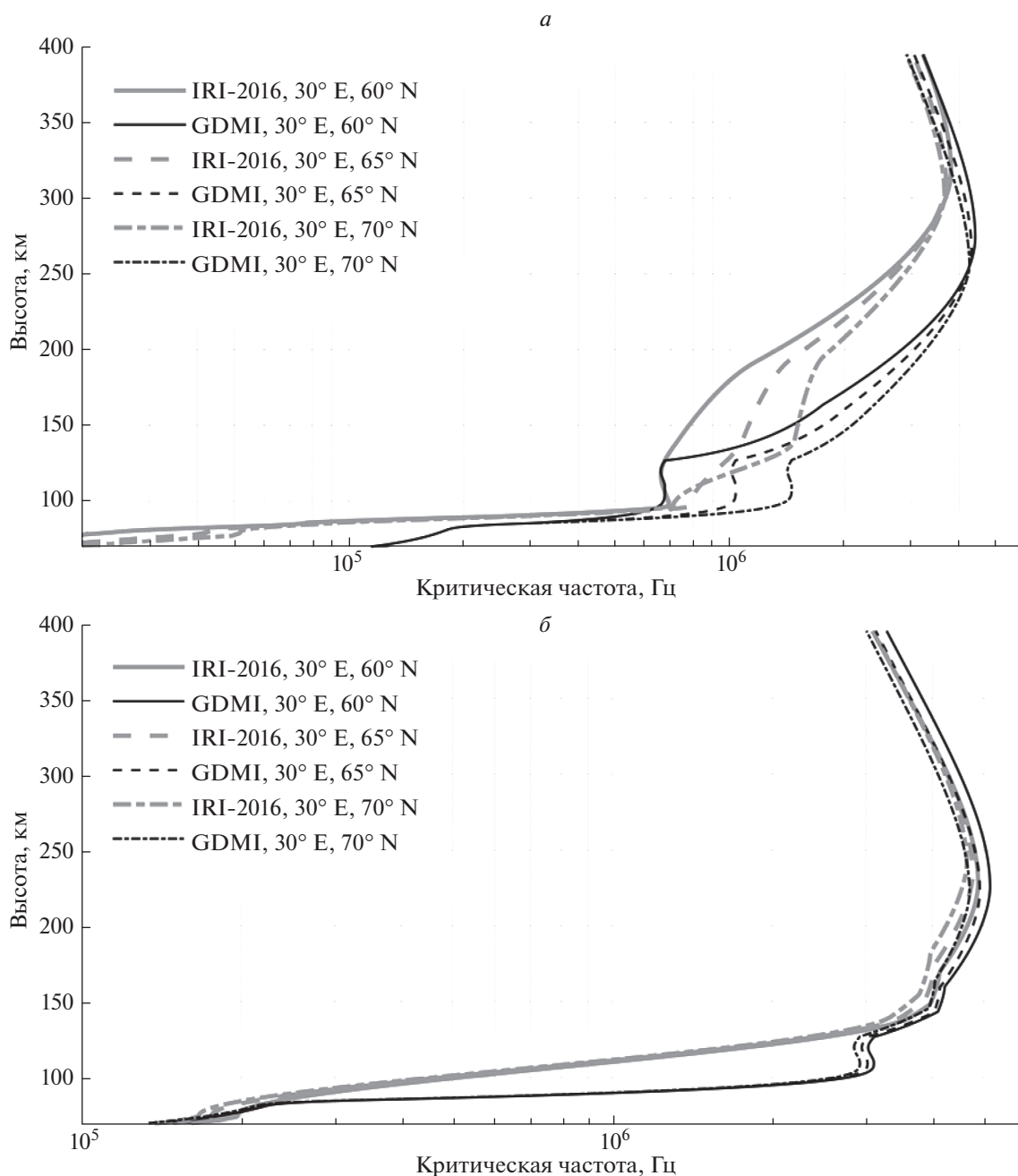


Рис. 2. Вертикальные профили критической частоты плазмы, рассчитанные по моделям GDMI и IRI-2016 для даты 21.06.2019 г. для спокойных геофизических условий (индекс $A_p = 3$, $F_{10.7} = 70$, $F_{10.7A} = 70$), для моментов времени UT = 22:00 (а) и UT = 10:00 (б).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОНЫ ДОСЯГАЕМОСТИ ОДНОСКАЧКОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ

Моделирование проводилось следующим образом. Передатчик располагался в точке с координатами 30.5° E , 60.0° N . Для выбранной частоты и выбранного времени суток рассчитывался следующий набор выходящих из передатчика лучевых траекторий для обыкновенной моды (не-

обыкновенная мода затухает сильнее). Углы возвышения выбирались следующим образом: в диапазоне от 6° до 10° – с шагом 0.5 градуса, от 11° до 18° – с шагом 1 градус, от 20° до 32° – с шагом 2 градуса. Для каждого угла возвышения рассчитывались лучевые траектории, выходящие из передатчика в секторе азимутальных углов от -30° до 30° от направления на север с шагом 2 градуса. Точки падения на поверхность Земли траекто-

рий, вышедших из передатчика с одним углом возвышения и разными азимутами, соединялись одной линией. Полученная область на поверхности Земли, ограниченная крайними кривыми, соответствовала зоне засветки передатчика на данной частоте при данных геофизических условиях.

Возможны случаи, когда в одну точку попадают две и более лучевых траекторий, выходящих из передатчика при разных углах возвышения и разных азимутальных углах. Такие ситуации соответствуют многолучевому распространению, когда лучевая траектория, вышедшая из передатчика с меньшим углом возвышения, отражается от *E*-слоя ионосферы, а вышедшая из передатчика с большим углом возвышения отражается от *F*-слоя ионосферы. В случае, когда все траектории отражаются от одного и того же слоя ионосферы, ближайšie к передатчику кривые соответствуют большим углам возвышения, дальние кривые — меньшим углам.

На рисунке 3 изображены зоны засветки передатчика на частоте 4 МГц, рассчитанные для даты 21 декабря 2018 г., UT = 22:00 (полночь в СПб) и спокойных геофизических условий (индексы $A_p = 3$, $F_{10.7} = 70$, $F_{10.7A} = 70$), для случаев, когда параметры ионосферы заданы по модели GDMI (*a*) и по модели IRI-2016 (*b*). Видно, что на рис. 3*a* зона засветки по дальности лежит в пределах примерно от 800 до 1900 км от передатчика, а на рис. 3*b* эта зона располагается на расстоянии от 1200 км до 1800 км от передатчика. Это обусловлено тем, что в случае, когда ионосфера задана по модели IRI-2016, траектории с углами возвышения от 21 до 32 градусов проходят сквозь ионосферу и не попадают на поверхность Земли, а в случае задания ионосферы по модели GDMI эти траектории отражаются от ионосферы и попадают на поверхность Земли. Такое различие связано с тем, что концентрация электронов на высотах 180–250 км, рассчитанная по модели GDMI, существенно выше, чем концентрация, рассчитанная по модели IRI-2016, как видно из рис. 1*a*.

На рисунке 4 изображены зоны засветки передатчика на частоте 5 МГц, рассчитанные для даты 21 декабря 2018 г. UT = 10:00 (полдень в СПб) и спокойных геофизических условий (индексы $A_p = 3$, $F_{10.7} = 70$, $F_{10.7A} = 70$), для случаев, когда параметры ионосферы заданы по модели GDMI (*a*) и по модели IRI-2016 (*b*). Видно, что на рис. 4*a* зона засветки по дальности лежит в пределах примерно от 500 до 1300 км от передатчика, а на рис. 4*b* эта зона располагается на расстоянии от 1400 км до 2000 км от передатчика. Столь существенная разница обусловлена тем, что в случае, когда ионосфера задана по модели GDMI, траектории с углами возвышения от 6 до 32 градусов отражаются от нижней части *F*-слоя ионосферы на высотах от 130 до 150 км, а в случае задания ионосферы по

модели IRI-2016 эти же траектории отражаются от ионосферы на высотах ~200–250 км. Такое различие связано с тем, что концентрация электронов на высотах 100–250 км, рассчитанная по модели GDMI, существенно выше, чем концентрация, рассчитанная по модели IRI-2016, как видно из нижней части рис. 1.

На рисунке 5 представлены зоны засветки передатчика на частоте 6 МГц, рассчитанные для даты 21 июня 2019 г. UT = 22:00 (полночь в СПб) и спокойных геофизических условий (индексы $A_p = 3$, $F_{10.7} = 70$, $F_{10.7A} = 70$), для случаев, когда параметры ионосферы заданы по модели GDMI (*a*) и по модели IRI-2016 (*b*). Видно, что на рис. 5*a* зона засветки по дальности лежит в пределах примерно от 800 до 1800 км от передатчика, а на рис. 5*b* эта зона располагается на расстоянии от 1400 км до 2000 км от передатчика. Имеющаяся разница между зонами засветки обусловлена тем, что в случае, когда ионосфера задана по модели GDMI, концентрация электронов на высотах 140–250 км существенно выше концентрации, рассчитанной по модели IRI-2016. Это приводит к тому, что лучевые траектории в первом случае отражаются на меньших высотах, чем во втором случае, что, в свою очередь, приводит к уменьшению расстояния между передатчиком и точками падения траекторий в первом случае.

На рисунке 6 представлены зоны засветки передатчика на частоте 10 МГц, рассчитанные для даты 21 июня 2019 г., времени UT = 10:00 (полдень в СПб) и спокойных геофизических условий (индексы $A_p = 3$, $F_{10.7} = 70$, $F_{10.7A} = 70$), для случаев, когда параметры ионосферы заданы по модели GDMI (*a*) и по модели IRI-2016 (*b*). Видно, что на рис. 6*a* зона засветки по дальности лежит в пределах примерно от 800 до 1400 км от передатчика, а на рис. 6*b* эта зона располагается на расстоянии от 900 км до 1600 км от передатчика. Разница в зонах засветки не столь существенна, как на рис. 3 и 4. Имеющиеся различия обусловлены тем, что концентрация электронов на высотах 80–130 км, рассчитанная по модели GDMI, существенно выше, чем концентрация, рассчитанная по модели IRI-2016, как видно из нижней части рис. 1*b*, а на высотах более 130 км концентрации, рассчитанные по обеим моделям, близки между собой.

5. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИОНОГРАММ

Для сравнения экспериментальных и численно синтезированных ионограмм НЗ были выбраны ионограммы для радиотрассы Санкт-Петербург—Лонгйирбюен (Шпицберген), полученные техническими средствами ААНИИ в течение одних суток (14–15 декабря 2001 г.) для пяти момен-

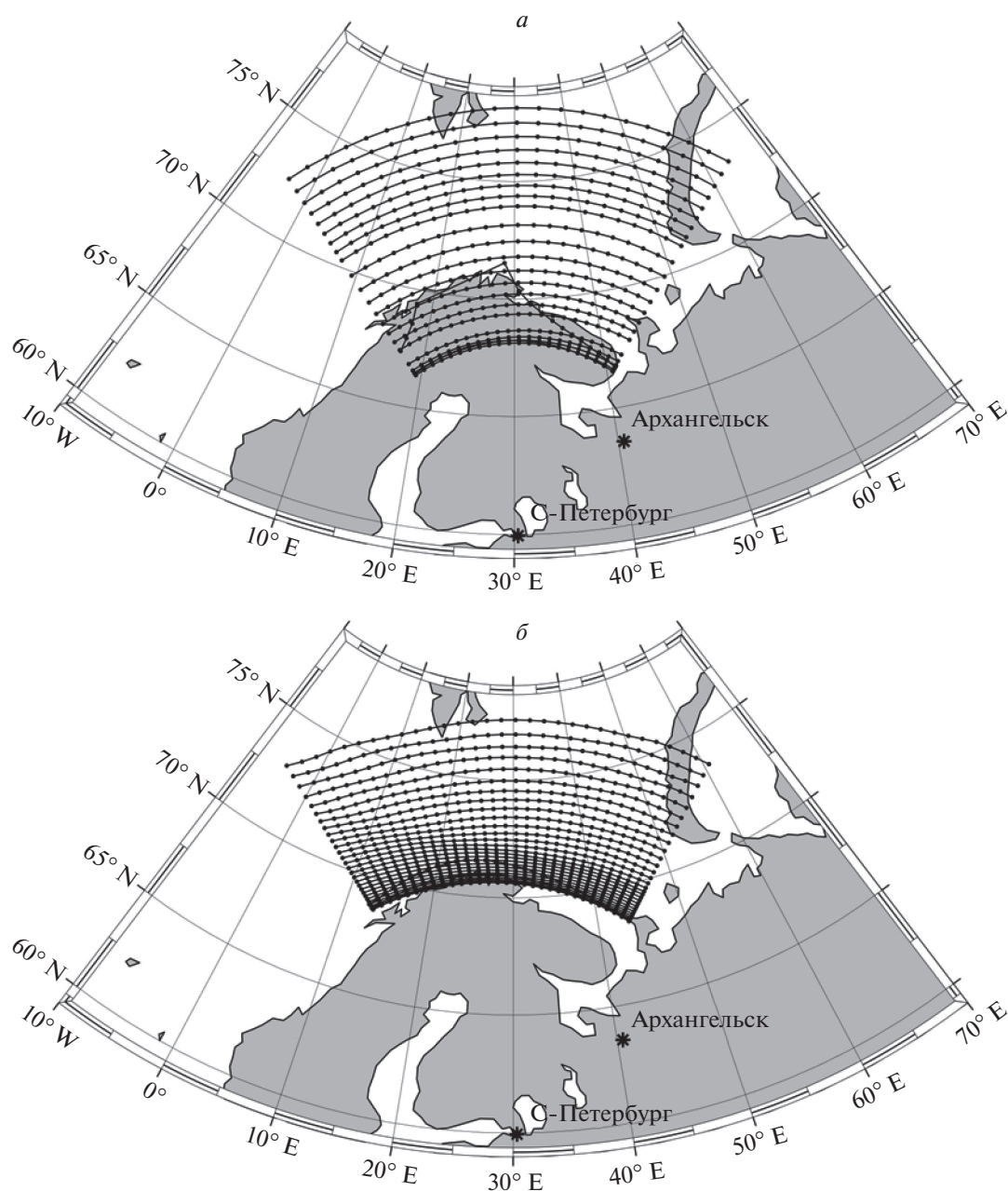


Рис. 3. Зоны засветки расположенного в СПб передатчика на частоте 4 МГц, рассчитанные для момента времени 21 декабря 2018 г. UT = 22:00 и для ионосферы, заданной по модели GDMI (а) и по модели IRI-2016 (б).

тов времени. Эти ионограммы приведены в работе [Андреев и др., 2007а].

Для этой радиотрассы и для этих же моментов времени нами были рассчитаны ионограммы НЗ в двух случаях. В первом случае трехмерное распределение электронной концентрации было рассчитано при помощи модели IRI-2016, а во втором случае — при помощи модели GDMI. Для данных расчетов нами была создана программа, использующая метод “пристрелки” и метод расчета лучевых траекторий, описанный выше в раз-

деле 2. В этой программе расчеты полностью трехмерные, учитывается анизотропия ионосферной плазмы, а также отклоняющее поглощение.

На рисунках 7–11 приведены экспериментальные и синтезированные ионограммы НЗ для пяти моментов времени: 14 декабря 2001 г. UT = 12:48, UT = 14:48, UT = 20:48, UT = 23:48 и 15 декабря 2001 г. UT = 8:48.

В момент времени 14 декабря 2001 г. UT = 12:48 значение геомагнитного 3-часового индекса $ap = 7$, а среднее значение этого индекса за предыдущие

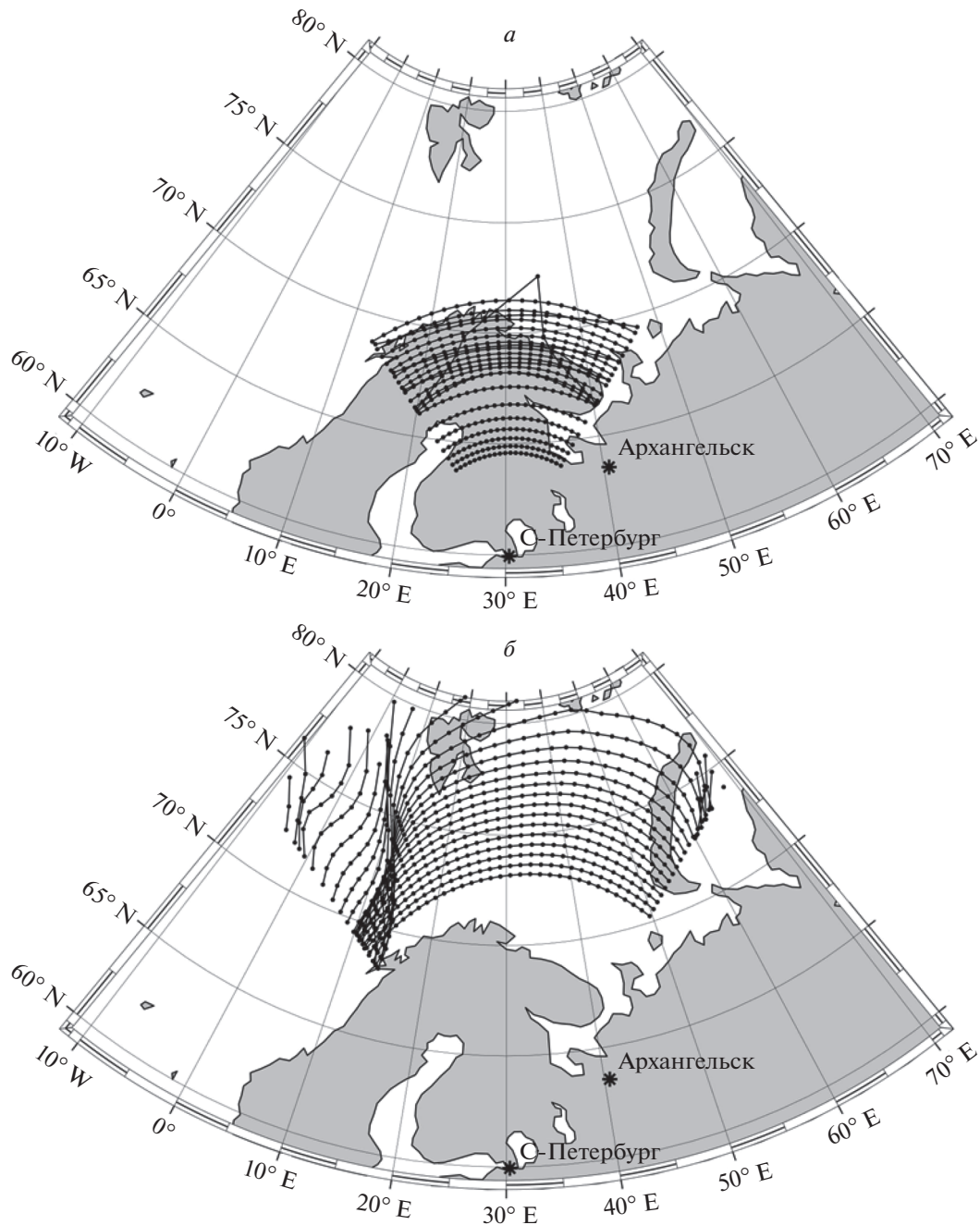


Рис. 4. Зоны засветки расположенного в СПб передатчика на частоте 5 МГц, рассчитанные для момента времени 21 декабря 2018 г. UT = 10:00 для ионосферы, заданной по модели GDMI (а) и по модели IRI-2016 (б).

сутки $A_p = 2.75$. Значение индекса $F_{10.7} = 217$. На верхней части рисунка видно, что экспериментальная МПЧ для односкачковых траекторий, отражающихся от F_2 -слоя, составила ~ 20 МГц. Из средней и нижней частей рисунка видно, что МПЧ для этих же траекторий, рассчитанных с помощью моделей IRI-2016 и GDMI, составила ~ 21 МГц. Таким образом, для данного момента времени МПЧ для односкачковых траекторий на

синтезированных ионограммах превышает экспериментальную МПЧ примерно на 1 МГц, что говорит о том, что эмпирические модели дали более высокую концентрацию электронов в F_2 -слое в центральной части радиотрассы, чем в реальности. Аналогично при сравнении МПЧ двухскачковых траекторий, отражающихся от F_2 -слоя, видно, что экспериментальная МПЧ совпадает с МПЧ, рассчитанной с помощью модели GDMI, и

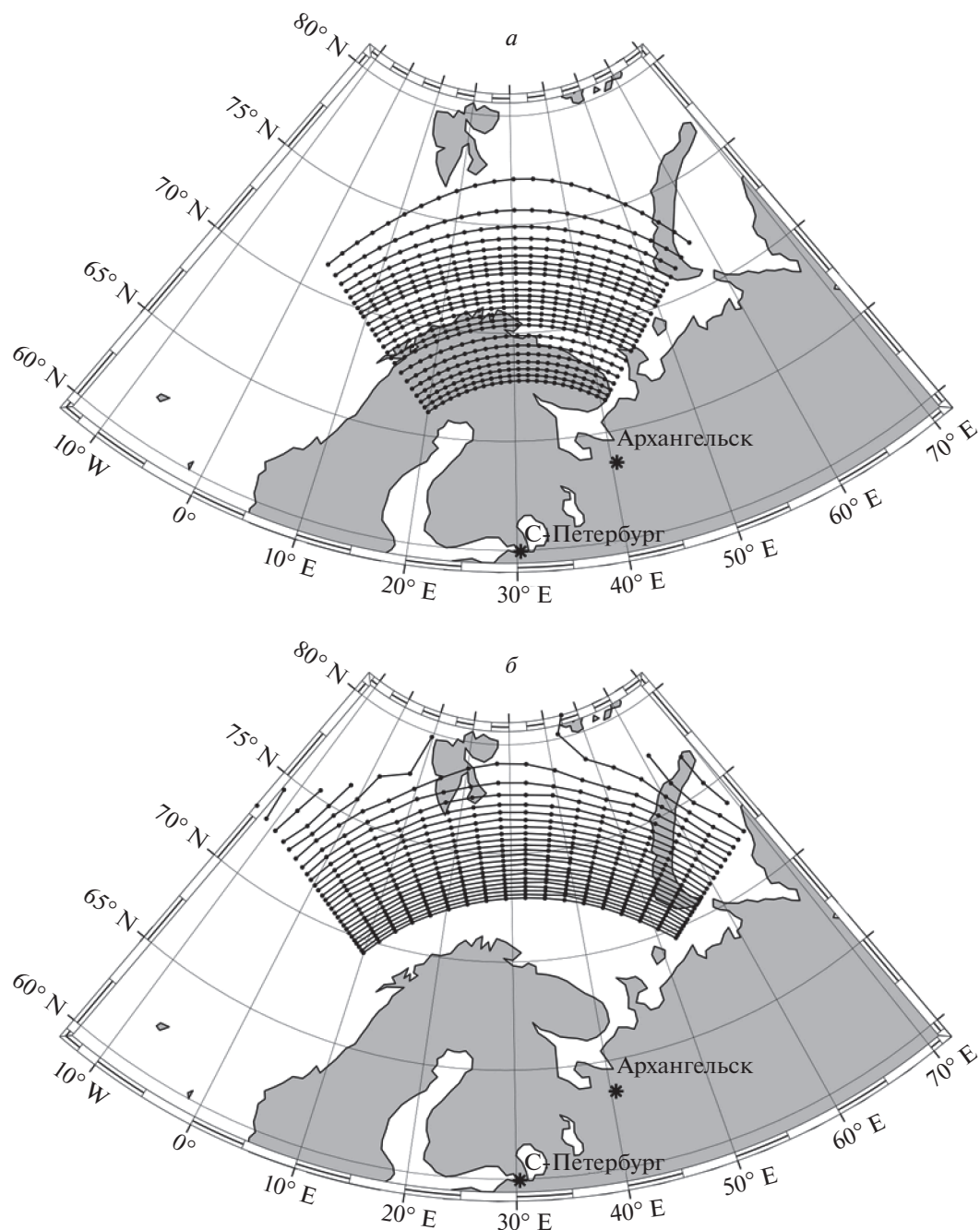


Рис. 5. Зоны засветки расположенного в СПб передатчика на частоте 6 МГц, рассчитанные для момента времени 21 июня 2019 г. UT = 22:00 для ионосферы, заданной по модели GDM1 (а) и по модели IRI-2016 (б).

составляет ~12 МГц, а МПЧ, рассчитанная с помощью модели IRI-2016, составляет 13 МГц. Таким образом, отличие экспериментальной МПЧ от рассчитанных с помощью эмпирических моделей не превышает 1 МГц.

Аналогичные сравнения МПЧ для 1- и 2-скачковых траекторий проведены для других моментов времени. Результаты сравнения, а также значения индексов ap , Ap , $F10.7$ приведены в табл. 1.

Как видно из таблицы, для момента времени 14.12.2001 г. UT = 14:48 для односкачковых траекторий, отражающихся от $F2$ -слоя, экспериментальная МПЧ составляет ~14 МГц, МПЧ, рассчитанная с помощью модели GDM1, превышает экспериментальную на 0.7 МГц, а МПЧ, рассчитанная с помощью модели IRI-2016, превышает экспериментальную на 2.5 МГц. Экспериментальная МПЧ для двухскачковых траекторий, от-

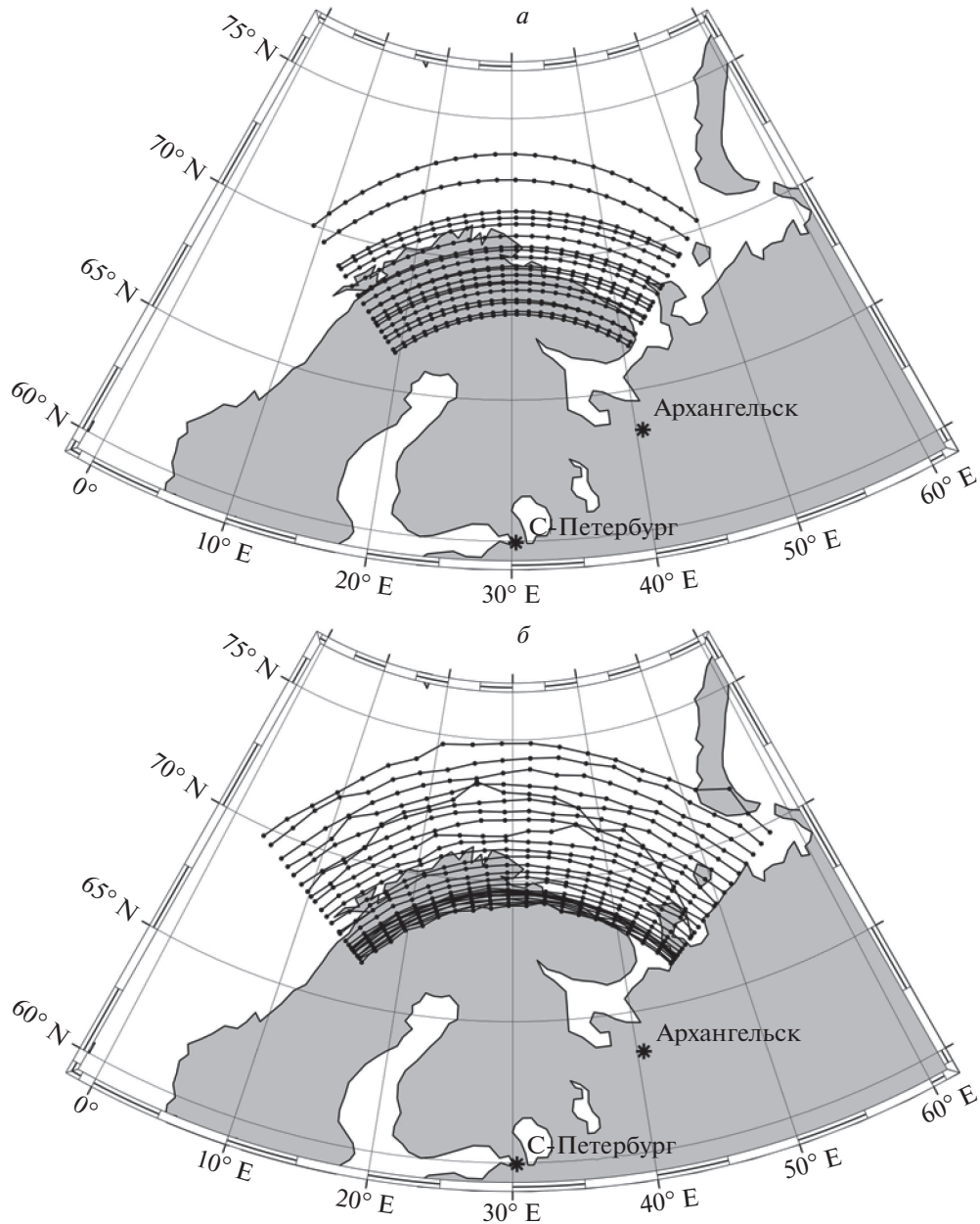


Рис. 6. Зоны засветки расположенного в СПб передатчика на частоте 10 МГц, рассчитанные для момента времени 21 июня 2019 г. UT = 10:00 для ионосферы, заданной по модели GDMI (а) и по модели IRI-2016 (б).

ражающихся от F_2 -слоя, составляет ~ 6.7 МГц, МПЧ, рассчитанная с помощью модели GDMI, превышает экспериментальную на 2.3 МГц, а МПЧ, рассчитанная с помощью модели IRI-2016, превышает экспериментальную на 3.6 МГц. Таким образом, для данного момента времени модель IRI-2016 дает большую погрешность в МПЧ, чем модель GDMI, как для односкачковой связи, так и для двухскачковой, при этом погрешность при определении МПЧ для двухскачковой связи превышает таковую для односкачковой. Указанный факт означает, что обе модели завышают

электронную концентрацию в данный момент времени, причем IRI-2016 завышает больше, чем модель GDMI.

Для момента времени 14.12.2001 г. UT = 20:48 для односкачковых траекторий, отражающихся от F_2 -слоя, экспериментальная МПЧ составляет ~ 13.5 МГц, МПЧ, рассчитанная с помощью модели GDMI, меньше экспериментальной на 5.2 МГц, а МПЧ, рассчитанная с помощью модели IRI-2016, меньше экспериментальной на 3.8 МГц. Экспериментальная МПЧ для двухскачковых траекто-

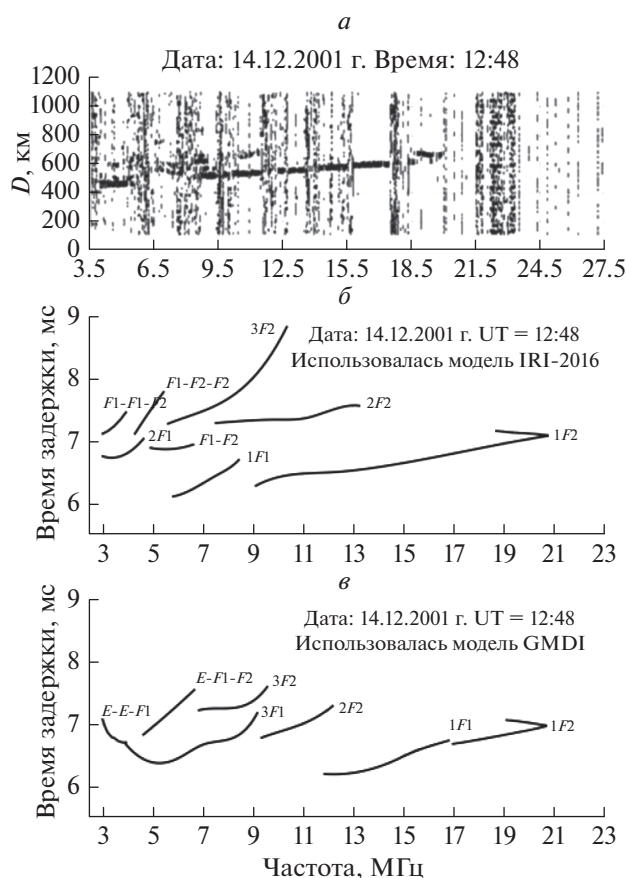


Рис. 7. Ионограммы наклонного зондирования для радиотрассы Санкт-Петербург–Лонгйирбуен (Шпицберген) для момента времени 12:48 UT 14 декабря 2001 г., полученные экспериментально (а), численно синтезированные с использованием модели IRI-2016 (б) и численно синтезированные с использованием модели GDMI (в).

рий, отражающихся от F_2 -слоя, составляет ~ 9.5 МГц, МПЧ, рассчитанная с помощью модели GDMI, меньше экспериментальной на 4 МГц, а МПЧ, рассчитанная с помощью модели IRI-2016, меньше экспериментальной на 3.2 МГц. Таким образом, для данного момента времени модель IRI-2016 дает меньшую погрешность в МПЧ, чем модель GDMI, как для односкачковой связи, так и для двухскачковой. Указанный факт означает, что обе модели занижают электронную концентрацию в данный момент времени, причем IRI-2016 занижает меньше, чем модель GDMI.

Для момента времени 14.12.2001 г. UT = 23:48 экспериментальная МПЧ для односкачковых траекторий, отражающихся от F_2 -слоя, составляет ~ 13 МГц, МПЧ для этих же траекторий, рассчитанная с помощью модели GDMI, меньше экспериментальной на 5 МГц, а МПЧ, рассчитанная с помощью модели IRI-2016, меньше экспериментальной на 2 МГц. Экспериментальная

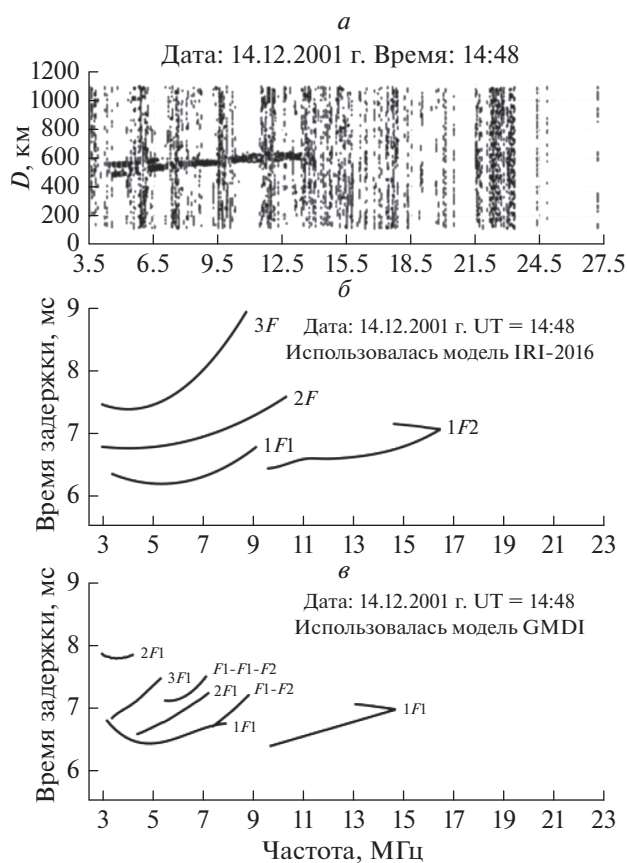


Рис. 8. Ионограммы наклонного зондирования для радиотрассы Санкт-Петербург–Лонгйирбуен (Шпицберген) для момента времени 14:48 UT 14 декабря 2001 г., полученные экспериментально (а), численно синтезированные с использованием модели IRI-2016 (б) и численно синтезированные с использованием модели GDMI (в).

МПЧ для двухскачковых траекторий, отражающихся от F_2 -слоя, составляет ~ 8 МГц, МПЧ для этих же траекторий, рассчитанная с помощью модели GDMI, меньше экспериментальной на 2.5 МГц, а МПЧ, рассчитанная с помощью модели IRI-2016, меньше экспериментальной на 1 МГц. Таким образом, для данного момента времени модель IRI-2016 дает меньшую погрешность в МПЧ, чем модель GDMI, как для односкачковой связи, так и для двухскачковой. Указанный факт означает, что обе модели занижают электронную концентрацию в данный момент времени, причем IRI-2016 занижает меньше, чем модель GDMI.

Для момента времени 15.12.2001 г. UT = 08:48 для односкачковых траекторий, отражающихся от F_2 -слоя, экспериментальная МПЧ составляет ~ 22 МГц, МПЧ, рассчитанная с помощью модели GDMI, меньше экспериментальной на 4 МГц, а МПЧ, рассчитанная с помощью модели IRI-2016, меньше экспериментальной на 1 МГц. Экспериментальная МПЧ для двухскачковых траекторий,

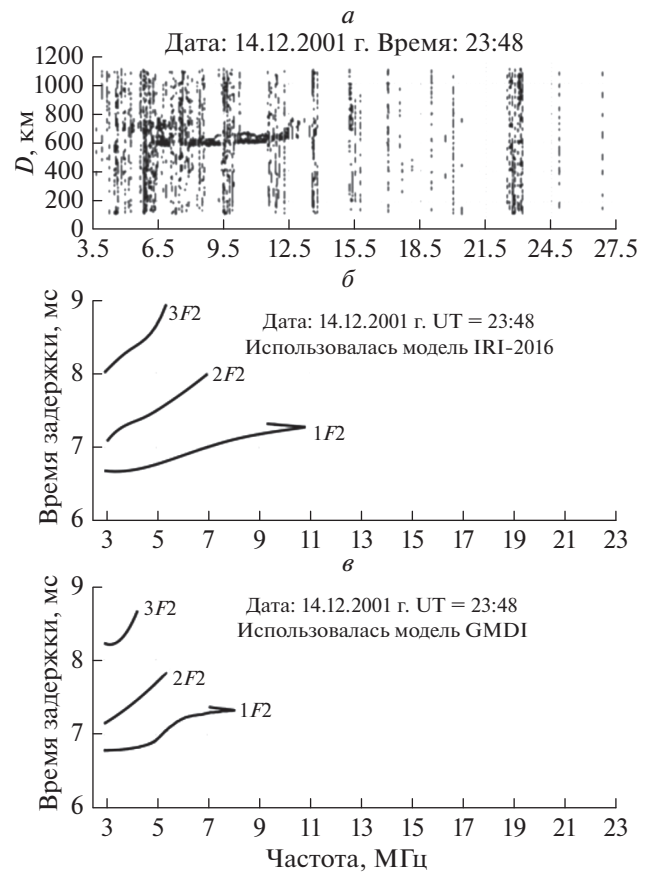
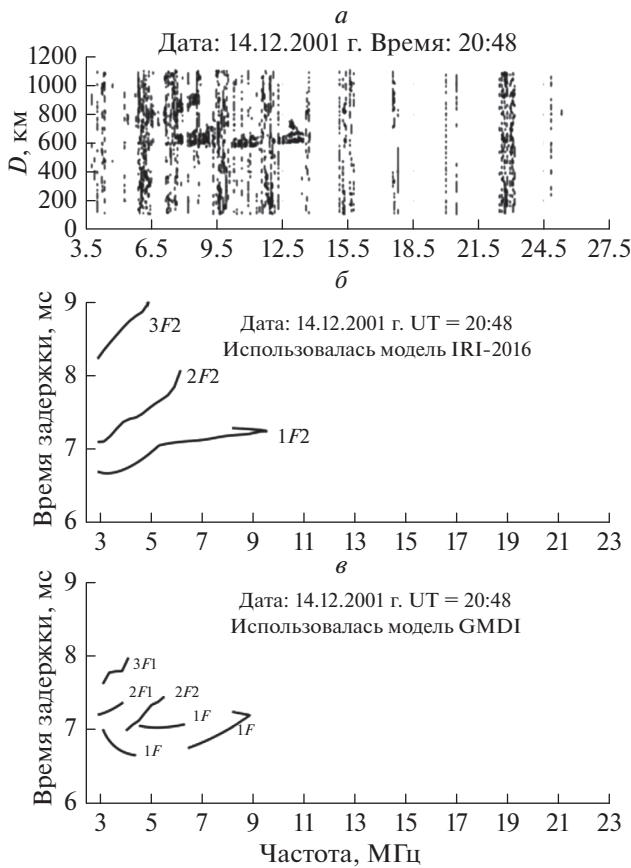


Рис. 9. Ионограммы наклонного зондирования для радиотрассы Санкт-Петербург–Лонгйирбуен (Шпицберген) для момента времени 20:48 UT 14 декабря 2001 г., полученные экспериментально (а), численно синтезированные с использованием модели IRI-2016 (б) и численно синтезированные с использованием модели GDMI (в).

Рис. 10. Ионограммы наклонного зондирования для радиотрассы Санкт-Петербург–Лонгйирбуен (Шпицберген) для момента времени 23:48 UT 14 декабря 2001 г., полученные экспериментально (а), численно синтезированные с использованием модели IRI-2016 (б) и численно синтезированные с использованием модели GDMI (в).

отражающихся от F2-слоя, составляет ~14.7 МГц, МПЧ, рассчитанная с помощью модели GDMI, меньше экспериментальной на 3 МГц, а МПЧ,

рассчитанная с помощью модели IRI-2016, меньше экспериментальной на 1.5 МГц. Таким образом, для данного момента времени модель IRI-2016

Таблица 1. Результаты сравнения экспериментальных и синтезированных ионограмм НЗ

Дата/время	ap	Ap	F10.7	МПЧ для 1-скачковых траекторий, МГц			МПЧ для 2-скачковых траекторий, МГц		
				эксперимент	GDMI	IRI-2016	эксперимент	GDMI	IRI-2016
14.12.2001 UT = 12:48	7	2.75	217	20	21	21	12	12	13
14.12.2001 UT = 14:48	7	2.75	217	14	14.7	16.5	6.7	9	10.3
14.12.2001 UT = 20:48	7	3.375	217	13.5	8.9	9.7	9.5	5.5	6.2
14.12.2001 UT = 23:48	7	3.375	217	13	8	11	8	5.5	7
15.12.2001 UT = 08:48	7	7.75	218	22	18	21	14.7	11.7	13.2

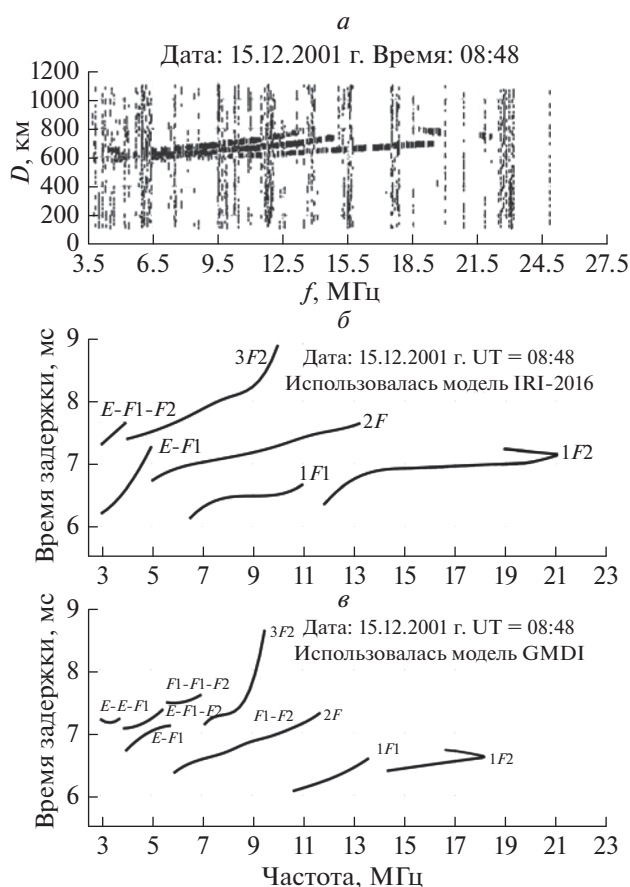


Рис. 11. Ионограммы наклонного зондирования для радиотрассы Санкт-Петербург–Лонггирбьен (Шпицберген) для момента времени 8:48 UT 15 декабря 2001 г., полученные экспериментально (а), численно синтезированные с использованием модели IRI-2016 (б) и численно синтезированные с использованием модели GDMI (в).

дает меньшую погрешность в МПЧ, чем модель GDMI, как для односкачковой связи, так и для двухскачковой. Указанный факт означает, что обе модели занижают электронную концентрацию в данный момент времени, причем IRI-2016 занижает меньше, чем модель GDMI.

Проведенное выше сравнение экспериментальных ионограмм НЗ и численно синтезированных показало, что наилучшую точность (~5%) прогноза МПЧ для односкачковых траекторий, отражающихся от F_2 -слоя, численно синтезированные с использованием эмпирических моделей ионограммы НЗ обеспечивают во второй половине дня, когда местное время LT в пределах от 14:30 до 19:00 (UT от 12:30 до 17:00). Несколько хуже точность прогноза МПЧ в первой половине дня, когда местное время LT в пределах от 10:30 до 11:00 (UT от 8:30 до 9:00). В ночное время, когда местное время LT в пределах от 22:30 до 2:00 (UT от 20:30 до 24:00), имеют место наибольшие

отклонения МПЧ для отражающихся от F_2 -слоя односкачковых траекторий, рассчитанных с помощью эмпирических моделей, от экспериментальной МПЧ. При этом использование модели GDMI во второй половине дня обеспечивает лучшую точность прогноза МПЧ, чем использование модели IRI-2016, а ночью и в первой половине дня наоборот, использование модели IRI-2016 обеспечивает лучшую точность прогноза МПЧ.

6. ВЫВОДЫ

Проведенный в разделе 5 сравнительный анализ полученных техническими средствами ААНИИ в течение одних суток 14–15 декабря 2001 г. экспериментальных ионограмм НЗ для радиотрассы Санкт-Петербург–Лонггирбьен (Шпицберген) и ионограмм НЗ, численно синтезированных с использованием эмпирических моделей ионосферы для этой же радиотрассы, позволяет сделать вывод о том, что рассчитанные с помощью моделей GDMI и IRI-2016 значения МПЧ для односкачковых траекторий днем превышают экспериментальные значения МПЧ на 5–20%, а ночью ниже экспериментальных на 30–40%. При этом для второй половины дня точность прогноза МПЧ, полученного с использованием модели GDMI, лучше, чем точность прогноза МПЧ, полученного с использованием модели IRI-2016. В остальное время суток наоборот, использование модели IRI-2016 обеспечивает лучшую точность прогноза МПЧ.

Представленные в разделах 4 и 5 данной работы результаты численного моделирования распространения радиоволн КВ-диапазона показали, что прогноз условий радиосвязи, рассчитанный при помощи модели GDMI, может существенно отличаться от прогноза, рассчитанного при помощи модели IRI-2016. Зоны засветки поверхности Земли односкачковыми лучевыми траекториями радиоволн КВ-диапазона на одной и той же частоте, полученные для расположенного в Санкт-Петербурге передатчика при использовании этих двух моделей, имеют следующие отличия. И ближняя, и дальняя границы зоны засветки, рассчитанной с использованием модели GDMI, расположены, как правило, ближе к передатчику, чем границы зоны, рассчитанной при использовании модели IRI-2016, причем в некоторых случаях на 500–600 км. Это связано с тем, что модель GDMI по сравнению с моделью IRI-2016 в большинстве случаев дает более высокую концентрацию электронов в E -слое и нижней части F -слоя ионосферы.

Также стоит отметить, что средние характеристики параметров ионосферы заметно изменились за последние десятилетия. По этой причине крайне важны дальнейшее развитие и расширение отечественной системы мониторинга ионосферы.

ры, создание отечественной базы данных ионосферных параметров за длительный период времени, а также уточнение с помощью этой базы данных существующих эмпирических моделей ионосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев М.Ю., Благовещенский Д.В., Выставной В.М., Мингалев В.С., Мингалева Г.И. Интерпретация экспериментальных данных распространения коротких радиоволн на трассе Санкт-Петербург–арх. Шпицберген // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 47. № 4. С. 534–542. 2007а.
- Андреев М.Ю., Мингалева Г.И., Мингалев В.С. Численное моделирование структуры высокоширотного ионосферного слоя F и прохождения через него коротких радиоволн в меридиональном направлении // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 47. № 4. С. 518–527. 2007б.
- Бадин В.И., Деминов М.Г., Деминов Р.Г., Шубин В.Н. Модель медианы критической частоты E-слоя для авроральной области // Солнечно-земная физика. Вып. 8. С. 145–146. 2013.
- Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 304 с. 1980.
- Крашенинников И.В., Шубин В.Н. Частотная зависимость энергетических параметров волнового поля на предельной дальности односкачкового распространения радиоволн в условиях низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 60. № 2. С. 220–228. 2020.
- Крашенинников И.В., Егоров И.Б. Формирование комбинированных модов в ионосферном прохождении радиоволн // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 45. № 2. С. 241–244. 2005.
- Крашенинников И.В., Павлова Н.М., Ситнов Ю.С. Модель IRI в задаче прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн в условиях высокой солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 57. № 6. С. 774–782. 2017.
- Крашенинников И.В., Гвишвили Г.В., Стаханова И.Г. Оценка критической частоты в задаче радиопросвечивания ионосферы с высокоорбитальных космических аппаратов в арктическом регионе // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 58. № 5. С. 669–675. 2018.
- Часовитин Ю.К., Широков А.В., Беспозванная А.С. и др. Глобальная эмпирическая модель распределения электронной концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере // Ионосферные исслед. № 44. С. 6–13. 1988.
- Шубин В.Н. Глобальная эмпирическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы для спокойных геомагнитных условий // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 57. № 4. С. 450–462. 2017.
- Banks P. Collision frequencies and energy transfer // Planet. Space Sci. V. 14. P. 1085–1103. 1966.
- Bilitza D., Altadil D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. V. 15. P. 418–429. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016SW001593>
- Budden K.G. The propagation of radio waves. Cambridge: Cambridge University Press. 669 p. 1985.
- Nava B., Consson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 70. № 15. P. 1856–1862. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.01.015>
- Schunk R.W., Nagy A.F. Electron temperatures in the F region of the ionosphere: Theory and observations // Rev. Geophys. Space Ge. V. 16. № 3. P. 355–399. 1978. <https://doi.org/10.1029/rg016i003p00355>
- Shubin V.N. Global median model of the F2-layer peak height based on ionospheric radio-occultation and ground-based Digisonde observations // Adv. Space Res. V. 56. P. 916–928. 2015.
- Shubin V.N., Karpachev A.T., Tsybulya K.G. Global model of the F2 layer peak height for low solar activity based on GPS radio-occultation data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 104. P. 106–115. 2013.