
МОДЕЛИРОВАНИЕ Z-ОБРАЗНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ЛУЧЕ ПЕДЕРСЕНА ДИСТАНЦИОННО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ

MODELING Z-SHAPED DISTURBANCE AT THE PEDERSEN RAY OF OBLIQUE SOUNDING IONOGRAM USING ADAPTATION OF IRI TO EXPERIMENTAL DATA

А.Г. Ким*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kim_anton@mail.ru***С.Н. Пономарчук***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, spon@iszf.irk.ru***Г.В. Котович***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kotovich@iszf.irk.ru***Е.Б. Романова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ebr@iszf.irk.ru***A.G. Kim***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kim_anton@mail.ru***S.N. Ponomarchuk***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, spon@iszf.irk.ru***G.V. Kotovich***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kotovich@iszf.irk.ru***E.B. Romanova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ebr@iszf.irk.ru*

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования перемещающегося ионосферного возмущения, приводящего к z-образным перегибам на луче Педерсена на ионограммах наклонного зондирования. Выполнен траекторный синтез дистанционно-частотной характеристики наклонного зондирования двухмерно-неоднородной ионосферы с учетом перемещающегося ионосферного возмущения. Моделирование проводилось с использованием модели ионосферы IRI адаптированной по экспериментальным данным, и Глобальной модели ионосферы и плазмасферы.

Ключевые слова: наклонное зондирование, перемещающееся ионосферное возмущение.

Abstract. We present the results of numerical modeling of a traveling ionospheric disturbance that causes z-shaped bends at the Pedersen ray of oblique incidence ionograms. The results of trajectory synthesis of oblique incidence ionograms are given for the ionosphere, taking into account the traveling ionospheric disturbance. In the work, we use the International Reference Ionosphere, adapted to experimental data, and the Model of Ionosphere and Plasmasphere.

Keywords: ionosphere, oblique sounding, ionogram, travelling ionospheric disturbances.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию ионосферных неоднородностей, в том числе перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), посвящено большое количество работ [Maeda, Handa, 1980; Иванов и др., 1987; Бойтман, Калихман, 1989; Вугмейстер и др., 1993; Millward et al., 1993; Hocke, Schlegel, 1996; Афраймович и др., 2002; Ding et al., 2008]. Одновременно с суточными и сезонными вариациями параметров ионосферы (крупномасштабными неоднородностями) на высотах ионосферы всегда присутствуют движущиеся ионизированные структуры мелких и средних масштабов.

Несмотря на появление и развитие космических средств зондирования, благодаря которым появилась возможность получать полное электронное содержание [Афраймович, Первалова, 2006], исследование ионосферы с помощью ионозондов с линейной частотной модуляцией сигнала является актуальным и иногда единственным способом получе-

ния информации о канале связи. Важно понимать факторы, которые могут приводить к искажениям дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) наклонного зондирования (НЗ) и к отклонениям от средних значений колебаний суточного хода максимальных наблюдаемых частот (МНЧ). Вариации МНЧ с периодами более одного часа на трассах НЗ могут объясняться крупномасштабными ПИВ, проходящими трассу зондирования на высотах F-области [Кутелев, Куркин, 2011]. Вариации МНЧ меньших периодов часто сопровождаются наличием на ДЧХ z-образных перегибов на односкачковой моде 1F2 [Вертоградов и др., 2008], которые двигаются с течением времени по верхнему лучу (Педерсена) из области более высоких в область более низких задержек (иногда повторяя такое прохождение несколько раз).

Целью работы было моделирование ПИВ, приводящего к z-образным перегибам на луче Педерсена на ДЧХ. Для моделирования среды распространения привлекались модели: International Ref-

ence Ionosphere (IRI) с коррекцией по реальным данным наблюдений и Глобальная модель ионосферы и плазмосферы (ГМИП), разработанная в ИСЗФ СО РАН.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЧХ

Для расчета ДЧХ сигнала использовалось приближение геометрической оптики [Кравцов, Орлов, 1980]. В программной реализации применялся метод характеристик [Гольгин и др., 2003; Михайлов, Куркин, 2007]. В рамках данного подхода решение траекторной задачи основано на численном интегрировании системы характеристических уравнений для двумерного случая методом Рунге–Кутты 4-го порядка точности [Бахвалов и др., 2001]:

$$\begin{aligned} \frac{dr}{d\tau} &= p_r, \\ \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{r} p_\varphi, \\ \frac{dp_r}{d\tau} &= -\frac{f_{pe}}{f^2} \frac{\partial f_{pe}}{\partial r} + \frac{1}{r} p_\varphi^2, \\ \frac{dp_\varphi}{d\tau} &= -\frac{1}{r} \left(\frac{f_{pe}}{f^2} \frac{\partial f_{pe}}{\partial \varphi} + p_r p_\varphi \right), \end{aligned}$$

где r, φ — полярные координаты в плоскости радиотрассы, связанные с центром Земли, τ — групповой путь (время распространения, умноженное на скорость света), f_{pe} — плазменная частота, f — частота сигнала, p_r, p_φ — компоненты направляющего импульса \vec{p} (равного по модулю показателю преломления n по касательной к траектории в направлении распространения). Для компенсации вычислительной погрешности выполнялась пошаговая проверка на удовлетворение уравнению эйконала $p_r^2 + p_\varphi^2 = n^2$ и, при необходимости, корректировался по модулю направляющий импульс \vec{p} .

Среда распространения задавалась с учетом работы [Кияновский, Сажин, 1980] равномерно расположенными высотными профилями плазменной частоты (с шагом по высоте 10 км) вдоль трассы в плоскости дуги большого круга (с расстоянием между узловыми точками ~80 км). Аппроксимация характеристик среды распространения проводилась с использованием двумерных локальных B-сплайнов второй степени на равномерной сетке значений [Кнопин, Орлов, 1981] для плазменной частоты и для ее частных производных. Входные параметры при расчетах выбирались, исходя из оптимальности времени счета. В большинстве случаев использовался шаг интегрирования 1 км. Расчет в узлах опорных значений частных производных выполнялся на основе интерполяции плазменной частоты многочленом Лагранжа:

$$\begin{aligned} f^k(k) &= \sum_{i=1}^{k-1} \frac{(k-1)!(N-k)!(-1)^{k-i}}{(k-i)(i-1)!(N-i)!} f(i) + f(k) \times \\ &\times \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \frac{1}{k-i} + \sum_{i=k+1}^N \frac{(k-1)!(N-k)!(-1)^{i-k-1}}{(i-k)(i-1)!(N-i)!} f(i), \end{aligned}$$

где $k=1, \dots, N$.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИВ С ПОМОЩЬЮ IRI

Нередко на ионограммах наблюдаются различные искажения ДЧХ, проявляющиеся в виде перегибов, петель, рассеяния и т. д. На рис. 1 показаны ионограммы НЗ со следами ПИВ, полученные на двух трассах (рис. 2) в период наблюдений с 29 марта по 2 апреля 2004 г.

Передачики находятся в Магадане (60° N, 150.7° E) и в Хабаровске (48.5° N, 135.1° E). Приемный пункт находится в Тункинской долине в с. Торы (51.8° N, 103° E) примерно в ста км от Иркутска (52° N, 104° E). Протяженность трассы Хабаровск–Торы составляет ~2300 км, Магадан–Торы — ~3030 км. Расстояние между средними точками трасс Хабаровск–Торы (51.26° N, 119.57° E) и Магадан–Торы (58.2° N, 124.17° E) ~825 км.

Видно (рис. 1), что эти ДЧХ имеют следы отражений, не характерные для сферически-слоистой ионосферы или ионосферы со слабым горизонтальным градиентом. Индекс геомагнитной активности K_p в этот период в среднем не превышал 3. Однако, несмотря на относительно спокойное состояние магнитного поля Земли в эти дни, в отдельные моменты времени наблюдались довольно устойчивые z-образные или серпообразные изгибы («серпы») на односкачковой моде 1F2 ДЧХ, перемещающиеся с течением времени по верхнему лучу из области более высоких задержек в область более низких задержек.

Численное моделирование с помощью приближения геометрической оптики широко используется для изучения влияния ПИВ на характеристики дециметровых радиоволн. Например, в работе [Балаганский, Сажин, 2003] интерпретация возмущений на ионограммах НЗ проводилась посредством численного моделирования трехмерно-неоднородного ПИВ волнового типа для глобальной модели ионосферы с коррекцией. Попытка интерпретации ионограмм НЗ с z-образными искажениями на луче Педерсена (рис. 1) была предпринята в работе [Корка, Möller, 1968], в которой с использованием компьютерного моделирования исследовалось влияние малых горизонтальных вариаций высоты слоя для однослойной параболической модели ионосферы при протяженности трассы 2000 км и 8000 км. В отличие от [Корка, Möller, 1968], в данной работе проводится моделирование для условий реальной трассы (Хабаровск–Торы, дальность ~2300 км) по полному профилю ионосферы с градиентом с помощью модели IRI в режиме адаптации [Kotovich, Mikhailov, 2003].

Совместное использование моделей ионосферы, методик адаптации, методов расчета характеристик распространения радиоволн и экспериментальных данных, получаемых на трассах НЗ, позволяет повысить точность интерпретации данных наблюдений. Для адаптации модели IRI привлекались данные вертикального зондирования (ВЗ) вблизи пунктов передачи и приема, а для получения данных в средней точке трассы использовалась методика пересчета экспериментальной ДЧХ в высотно-частотную характеристику (ВЧХ) [Ким и др., 2004]. Алгоритм пересчета данных НЗ позволяет получить ВЧХ для средней точки трассы, однако для коррекции модели

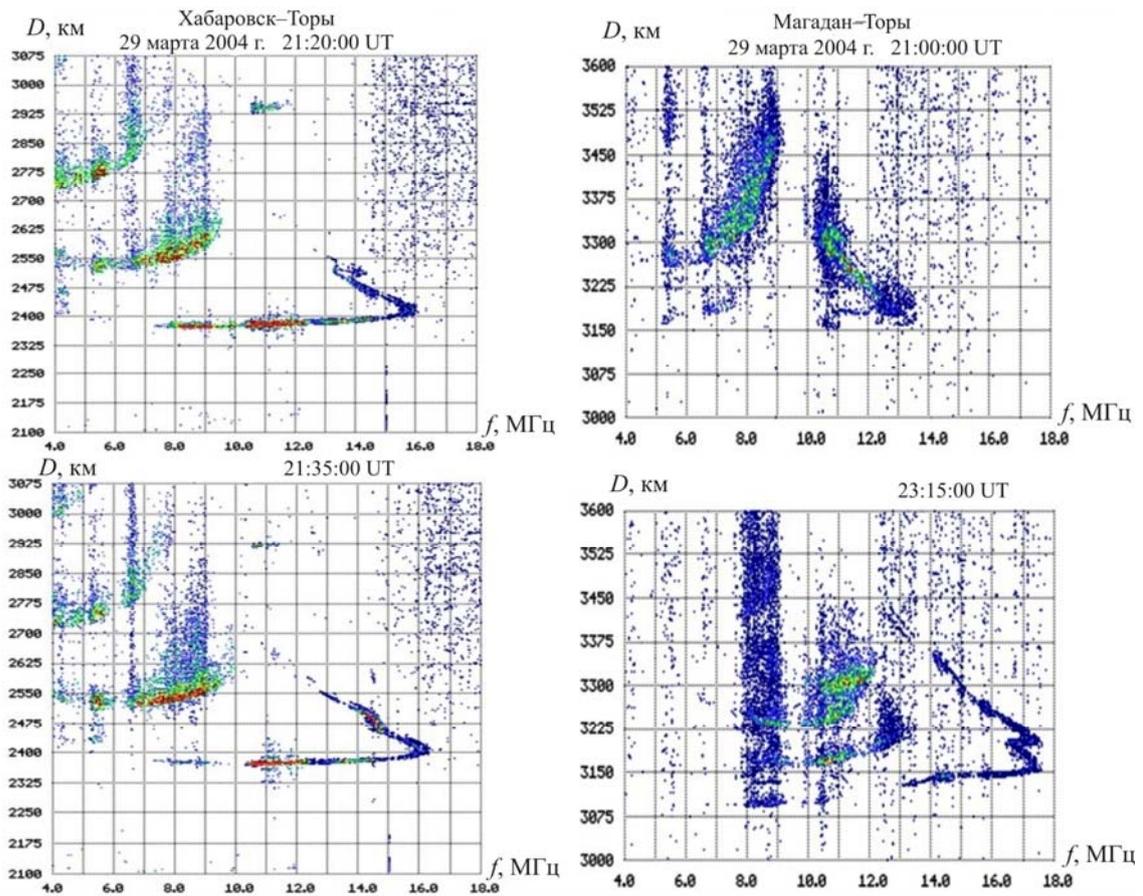


Рис. 1. Примеры ПИВ на ионограммах НЗ на трассах Хабаровск–Торы и Магадан–Торы

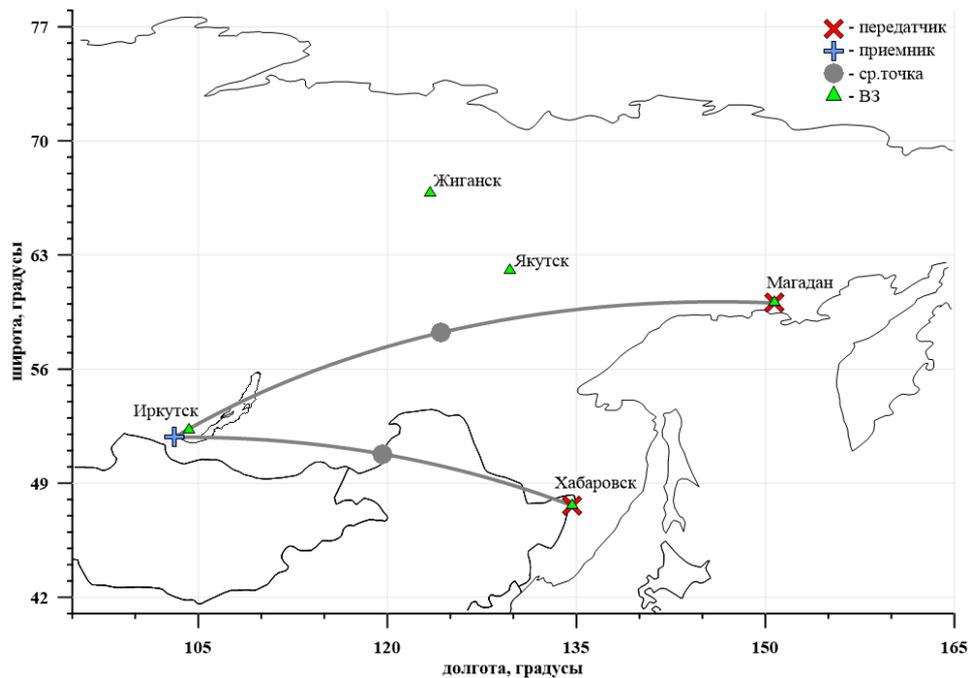


Рис. 2. Карта трасс

ионосферы достаточно только значения f_oF2 . Поэтому при обработке ионограмм НЗ формировался массив МНЧ, а для самой верхней точки на верхнем обыкновенном луче моды 1F2 (траектория которого перед отражением близка к лучу Педерсена, проходящему высоту максимума ионизации в окрестности средней точки трассы) запоминались также абсо-

лютное время распространения сигнала и частота. По этим данным с использованием модифицированного метода Смита [Кияновский, 1971] рассчитывалась критическая частота f_oF2 в средней точке трассы по алгоритму, описанному в работе [Котович и др., 2006]. Затем значения высотного профиля электронной концентрации, получаемые по модели IRI, адап-

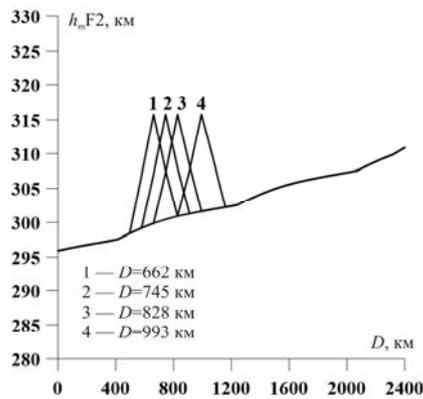


Рис. 3. Модель возмущения h_mF2

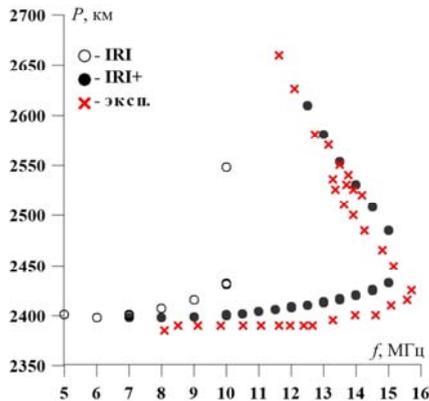


Рис. 4. Расчетная ДЧХ без возмущения

тировались по значениям f_oF2 , полученным в оконечных точках и рассчитанным для средней точки трассы. При этом значения f_oF2 между тремя точками вдоль трассы линейно интерполировались.

Среда распространения интерполировалась вдоль трассы между 29 узловыми точками, которые задавалась равномерно расположенными высотными профилями плазменной частоты вдоль дуги большого круга.

Поскольку верхний луч формируется на высотах вблизи максимума слоя F2 [Davies, 1965], то предполагалось, что искажения на верхнем луче вызываются ПИВ, находящимся на близком высотном уровне. По данным ВЗ значение h_mF2 колебалось в Хабаровске от 290 до 300 км, а в Иркутске — от 300 до 320 км, поэтому при имитационном моделировании задавалось линейное изменение h_mF2 вдоль трассы (от передатчика к приемнику) от 295 до 310 км. Подъем высоты имитируемого возмущения максимума электронной концентрации слоя F2 на 15 км от середины невозмущенного хода соответствует высоте 315 км (рис. 3). При этом моделировалось возмущение треугольной формы с шириной основания ~ 328 км.

На рис. 4 незакрашенными кружками изображена рассчитанная ДЧХ для 29 марта 21:00 UT (параметры среды задавались по модели IRI, адаптированной по среднемесячному индексу $F10.7=111$). Закрашенными кружками показана рассчитанная ДЧХ после проведения адаптации модели IRI по трем параметрам: по $F10.7$ (использовалось то же среднемесячное значение), критическим частотам в трех точках трассы (с применением линейной интерполяции вдоль трассы) и высотам максимума в двух

(оконечных) точках трассы. Экспериментальная ДЧХ нанесена крестиками. После адаптации модели IRI отклонение полученной максимальной применимой частоты (МПЧ) от наблюдаемой в эксперименте МНЧ составило всего 2 %.

На рис. 5 показаны смоделированные аномальные ДЧХ с горизонтальным движением возмущения высоты максимума слоя F2 (рис. 3) вдоль трассы

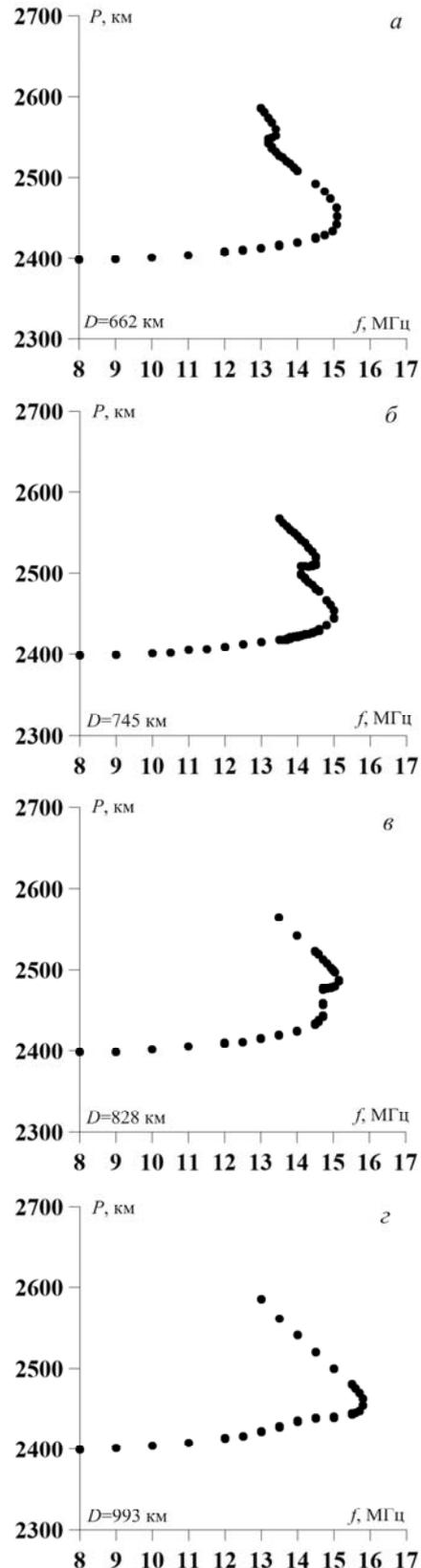


Рис. 5. Расчетные ДЧХ при возмущении h_mF2

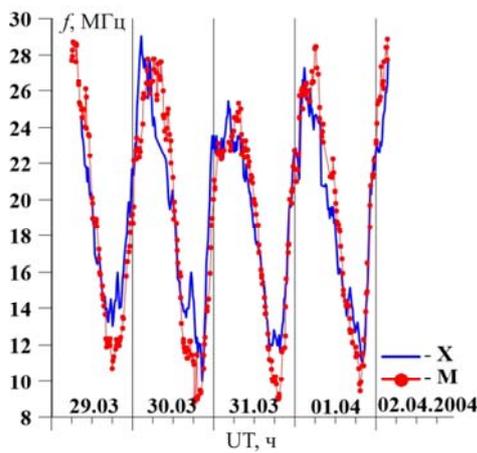


Рис. 6. Суточный ход МНЧ для трасс Хабаровск–Торы (X) и Магадан–Торы (M)

(от передатчика к приемнику) на расстояниях 662, 745, 828 и 993 км от передатчика. При приближении возмущения к средней точке трассы происходит увеличение МПЧ (рис. 5, z). При перемещении такого возмущения на большее расстояние никаких существенных изменений на верхнем луче на расчетной ДЧХ не наблюдается.

По коррелированной изменчивости суточного хода МНЧ на двух соседних трассах (рис. 2) можно судить о наличии движущейся неоднородности в области максимума слоя F2. С 30 марта по 1 апреля 2004 г. максимумы в суточном ходе МНЧ анализируемых трасс были смещены по времени (рис. 6). Знание расстояния между средними точками трасс (~825 км) и их координат позволило качественно оценить скорость и направление движения неоднородности. Судя по всему, возмущение носило положительный характер, и увеличение МНЧ, наблюдавшееся сначала на трассе Хабаровск–Торы, а затем на трассе Магадан–Торы, показывает, что неоднородность двигалась с юга на север. Временная задержка между проявлением возмущения показывает, что скорость движения составляла ~70–100 м/с.

Анализ МНЧ с целью получения параметров ПИВ более подробно описан в работе [Иванов и др., 2006]. Кроме того, о времени существования и размерах ПИВ можно судить по динамике перемещения «серпа» по верхнему лучу. Согласно экспериментальным данным НЗ, продолжительность существования таких искажений колебалась от 15 мин до нескольких часов. При характерных скоростях ПИВ ~100 м/с это соответствует горизонтальным размерам ПИВ ~90 км, регистрировавшимся на пространстве ~1000 км. Минимальное расстояние 90 км обусловлено интервалом регистрации. На самом деле размер такой неоднородности может быть и меньше 90 км, поскольку деформация верхнего луча в течение сеанса может фиксироваться лишь на одиночных ДЧХ (а не нескольких подряд).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИВ С ПОМОЩЬЮ ГМИП

В отличие от полуэмпирической модели IRI, разработанная в ИСЗФ СО РАН Глобальная модель ионосферы и плазмосферы позволяет по минималь-

ному набору входных данных рассчитывать высотные профили электронной концентрации и эффективной частоты соударений с учетом физических процессов в верхней атмосфере Земли [Кринберг, Ташилин, 1984; Tashchilin, Romanova, 2002; Ташилин, Романова, 2013]. Данная модель получила развитие для расчета параметров ионосферы в экстремальных условиях, т. е. в периоды магнитных бурь и солнечных вспышек. При этом важную роль играет изменение электронной концентрации в нижней области ионосферы (E-слой) в эти периоды по сравнению с фоновой невозмущенной ионосферой, поскольку может существенно увеличиться поглощение сигнала. В ГМИП, как и в других моделях ионосферы, сохраняются сезонно-суточные вариации параметров ионосферы, их зависимость от солнечной активности, сезона, времени суток, а также от координат (широта, долгота) точки радиотрассы, где проходит сигнал, учитывается горизонтальная неоднородность ионосферы в переходные часы суток. Комплексный алгоритм, включающий модули расчета ГМИП и условий распространения КВ-радиоволн, позволяет рассчитывать дистанционно-частотные и угловые частотные характеристики сигналов [Пономарчук и др., 2015].

Созданный программный комплекс расчета ДЧХ позволяет отображать все основные моды распространения сигнала, отражающегося от регулярных слоев ионосферы (E, F1, F2). На рис. 7, a показана типичная ДЧХ, полученная на трассе Хабаровск–Иркутск 7 марта 2015 г. в 00:36 UT. Линиями показаны рассчитанные в приближении геометрической оптики ДЧХ мод распространения 1F2, 2F2, 3F2.

На рис. 7, $b, в, z$ приведены ионограммы НЗ со следами возмущений, полученные на трассе Хабаровск–Иркутск 7 марта 2015 г. в 00:56 UT, 01:06 UT, 02:06 UT соответственно. Примерно через один час после начала возмущения на ионограммах наблюдалось отсутствие перегибов на верхнем луче, а воздействие ПИВ привело к увеличению МНЧ.

Внутренние гравитационные волны (ВГВ), которые всегда присутствуют в термосфере, играют важную роль в формировании неоднородностей электронной концентрации в F-области ионосферы. Ионосферным проявлением распространяющейся ВГВ является ПИВ, т. е. подъем и последующее опускание F2-слоя при прохождении ВГВ над данным пунктом, которое обычно сопровождается сдвинутым по фазе изменением концентрации электронов в максимуме F2-слоя. Поскольку основной механизм воздействия ВГВ на плазму F-слоя заключается в передаче импульса горизонтально движущихся нейтральных частиц ионам, которые в результате этого приобретают дополнительную скорость вдоль магнитного поля, то при моделировании ПИВ задавался импульс ветра в заданной точке трассы.

Для задания среды распространения в каждой точке трассы рассчитывался вертикальный профиль ионосферных параметров по ГМИП. ГМИП создана путем объединения двух моделей: глобальной полуэмпирической прогностической модели D-области ионосферы, позволяющей рассчитывать ионизацию в нижней ионосфере (40–100 км), и теоретической

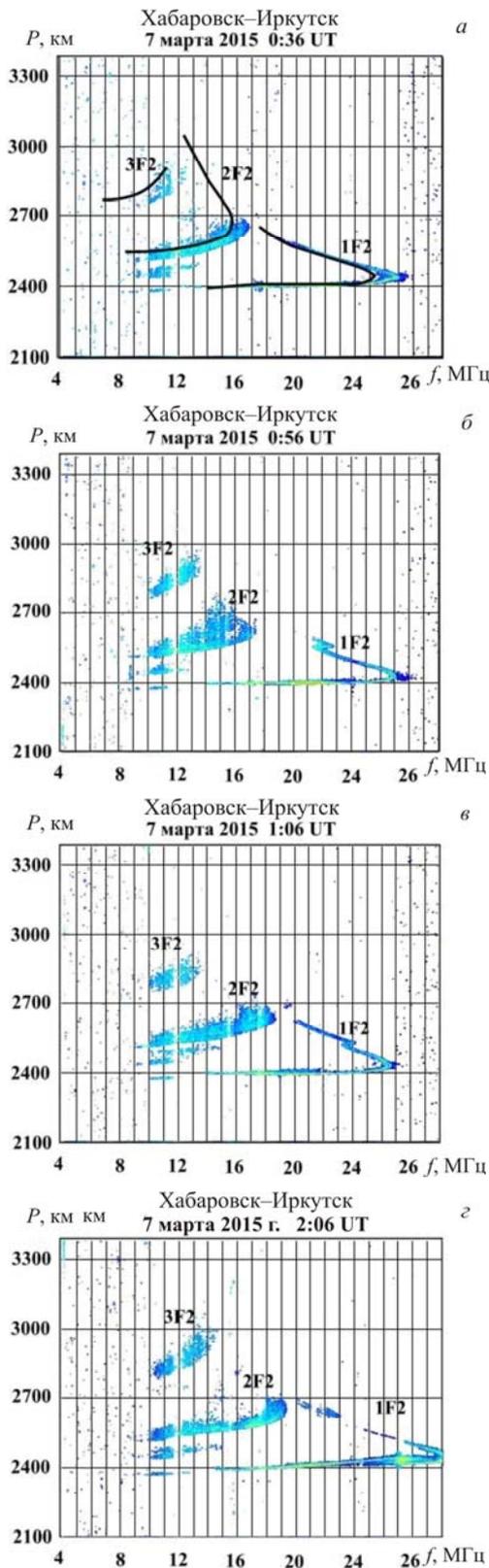


Рис. 7. Ионограммы НЗ, полученные на трассе Хабаровск–Иркутск 7 марта 2015 г.: а — 00:36 UT, б — 00:56 UT, в — 01:06 UT, з — 02:06 UT

модели ионосферы и плазмосферы для расчета ионизации выше 100 км. Теоретическая модель ионосферы и плазмосферы учитывает дрейф плазмы поперек геомагнитных силовых линий [Кринберг, Тащилин, 1984; Tashchilin, Romanova, 1995, 2002; Тащилин, Романова, 2013]. В модели молекулярные ионы N_2^+ , NO^+ , O_2^+ рассматриваются как один ион

M^+ массой 30 а.е.м., при этом концентрация ионов описывается как $N(M^+) = n(N_2^+) + n(NO^+) + n(O_2^+)$. Модель дает концентрации ионов водорода $N(H^+)$, гелия $N(He^+)$, кислорода $N(O^+)$, молекулярных ионов $N(M^+)$ и электронов $N_e = N(H^+) + N(He^+) + N(O^+) + N(M^+)$, температуры электронов T_e и ионов T_i вдоль геомагнитного поля на высотах $h \geq 100$ км от данной до магнитосопряженной области ионосферы.

Модель основана на численном решении системы нестационарных уравнений баланса частиц и энергии тепловой плазмы в дрейфующих плазменных трубках дипольного типа, основания которых расположены на высоте 100 км. Концентрации всех ионов рассчитывались с учетом процессов фотоионизации, рекомбинации и переноса вдоль геомагнитных силовых линий под действием амбиполярной диффузии и увлечения ионов горизонтальным нейтральным ветром. Для расчета скоростей фотоионизации термосферных составляющих и энергетических спектров первичных фотоэлектронов использован справочный спектр УФ-излучения Солнца из работы [Richards et al., 1994]. Температуры электронов и ионов рассчитывались с учетом процессов теплопроводности вдоль геомагнитных силовых линий и обмена тепловой энергией между электронами, ионами и нейтральными частицами вследствие упругих и неупругих столкновений. Скорость нагрева тепловых электронов рассчитывалась согласованно, путем решения кинетического уравнения переноса фотоэлектронов в сопряженных ионосферах с учетом потерь энергии фотоэлектронами при прохождении через плазмосферу.

Для описания пространственно-временных вариаций температуры и концентраций нейтральных компонентов O , O_2 , N_2 , H и N использовалась глобальная эмпирическая модель термосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002], а скорости горизонтального термосферного ветра определялись согласно эмпирическим моделям HWM07 [Drob et al., 2008] и DWM07 [Emmert et al., 2008]. Значения интегрального потока и средней энергии высыпавшихся электронов, необходимые для расчета скоростей авроральной ионизации, взяты в соответствии с глобальной моделью электронных высыпаний [Hardy et al., 1987]. Электрическое поле магнитосферной конвекции рассчитывалось на основе эмпирической модели распределения потенциала магнитосферной конвекции на высотах ионосферы [Sojka et al., 1986].

ПИБ могут вызываться крупномасштабными ВГВ, распространяющимися к экватору от аврорального источника нагрева [Afraimovich et al., 2002]. Такая волна может представлять собой импульс направленного к экватору ветра, скорость которого зависит от высоты. В присутствии термосферного ветра ионы и электроны испытывают силу трения. Поскольку заряженные частицы могут свободно двигаться только вдоль геомагнитного поля [Rishbeth, Garriott, 1969], то продольная компонента силы трения (в случае направленного к экватору ветра) будет перемещать заряженные частицы вверх по наклонным линиям геомагнитного поля (рис. 8). Это движение приведет к подъему F2-слоя. Продольная компонента $U_{||}$ и вертикальная компо-

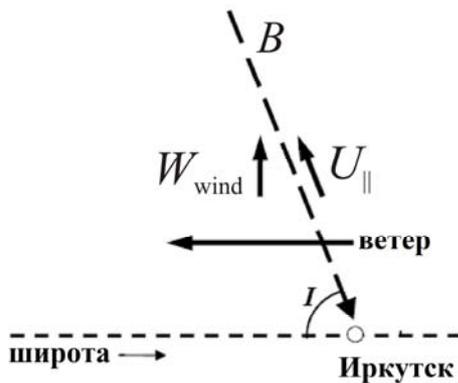


Рис. 8. Схема воздействия термосферного ветра на заряженную компоненту

нента W_{wind} дрейфа, вызванного термосферным ветром, рассчитываются следующим образом:

$$U_{\parallel} = (U \cos D - V \sin D) \cos I,$$

$$W_{wind} = U_{\parallel} \sin I,$$

где U и V — меридиональная и зональная компоненты горизонтального термосферного ветра, I и D — магнитное наклонение и склонение (для Иркутска $I=72.2^\circ$, $D=-3.86^\circ$).

Прохождение ПИВ над заданной точкой трассы моделировалось как усиление W_{wind} :

$$W_{wind} + 50 \text{ [м/с]} \cdot \text{WTID},$$

где WTID — коэффициент, позволяющий менять эту импульсную добавку. В модельных расчетах использовалось $\text{WTID}=0.5$, т. е. W_{wind} возрастала на 25 м/с. Такой импульс задавался в узловых точках вдоль трассы распространения последовательно от передатчика к приемнику.

Моделирование этого возмущения по ГМИП было проведено для трассы Хабаровск–Иркутск (7 марта 2015 г., 01:00 UT) с последующим расчетом ДЧХ в приближении геометрической оптики. При моделировании предполагалось, что неоднородность должна захватывать такое пространство вблизи трассы, чтобы точки отражения находились в плоскости дуги большого круга и при этом траектории сигнала попадали в точку приема. Траектории, отклоняющиеся от дуги большого круга, не рассматривались.

На рис. 9 приведены уровни плазменных частот в зависимости от высоты и траектории распространения сигнала частотой 23.2 МГц с учетом возмущения среды. Неоднородность расположена на расстоянии ~634 км от передатчика. Среда распространения задавалась равномерно расположенными высотными профилями электронной плотности в 30 точках вдоль дуги большого круга. Расчетный шаг по дальности между соседними узловыми точками ~79 км. Моделирование показало, что в области точки поворота вблизи возмущения происходит фокусировка верхних лучей.

На рис. 10 приведены траектории для сигнала частотой 24 МГц для этого же момента времени. Для данной частоты расхождение верхних лучей отсутствует. Таким образом, неоднородность влияет на изменение группового пути верхнего луча только тогда, когда максимум волнового возмущения проходит вдоль дуги большого круга от точки входа сигнала

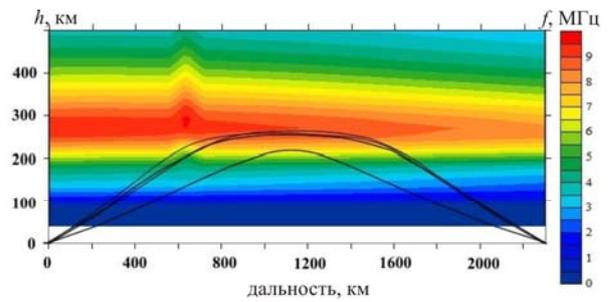


Рис. 9. Траектории распространения сигнала в возмущенной ионосфере: $f=23.2$ МГц

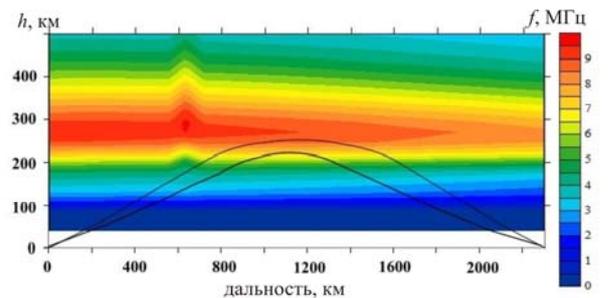


Рис. 10. Траектории распространения сигнала в возмущенной ионосфере: $f=24$ МГц

в ионосферу до средней точки трассы (рис. 11). Если максимум неоднородности переместился в область средней точки трассы, то происходит увеличение МПЧ (рис. 11, з). Если возмущение находится во второй половине трассы за точкой отражения, то эффекта проявления ПИВ на верхнем луче на ДЧХ нет (рис. 11, д), что подтверждается также работами [Корка, Möller, 1968; Грозов и др., 2005].

Таким образом, качественное моделирование показало, что перемещение со временем подобных серпообразных перегибов по верхнему лучу односкачковвой моды 1F2 на ДЧХ (рис. 11) может вызываться прохождением «порыва» термосферного ветра со скоростью импульса +25 м/с относительно фонового.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием модели ионосферы, адаптированной по экспериментальным данным, проведена проверка модели возмущения, связанная с изменением $h_m F2$ на локальных участках трассы НЗ. Показано, что ионограммы НЗ с z-образными искривлениями в области верхнего луча, не характерными для сферически-слоистой ионосферы или ионосферы со слабым горизонтальным градиентом, могут свидетельствовать о том, что в момент формирования отражающегося сигнала происходит его отражение и фокусировка от области локального скачка высоты максимума слоя F2, приходящегося на первую половину трассы. Также моделирование показало, что при прохождении ПИВ вблизи средней точки трассы НЗ искривления на верхнем луче пропадают и происходит увеличение МНЧ, что может быть использовано для получения параметров ПИВ путем анализа вариаций МНЧ по данным наблюдений на сети трасс НЗ. Если скачок $h_m F2$ приходится на вторую половину трассы, то z-образный перегиб на верхнем луче односкачковвой моды 1F2 не наблюдается.

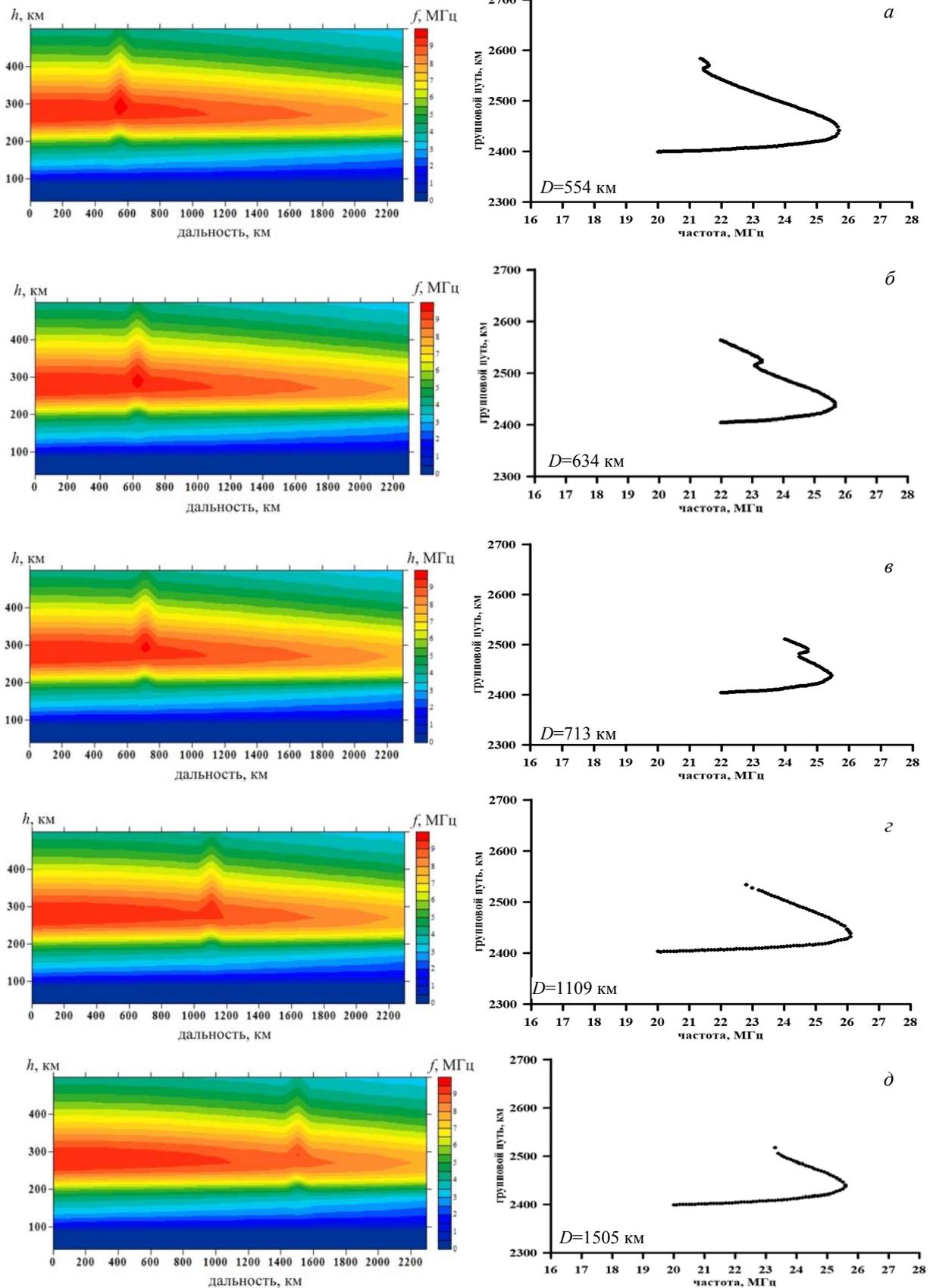


Рис. 11. Результаты моделирования возмущения (слева) и ДЧХ (справа)

Благодаря возможностям разработанной в ИСЗФ СО РАН модели ГМИП было показано, что локальное изменение $h_p'F2$ может объясняться воздействием проходящего импульса термосфер-

ного ветра, отличающегося от фонового ветра на 25 м/с.

Использованный в работе способ коррекции модели IRI по экспериментальным данным НЗ может

применяться и для коррекции других моделей ионосферы, способных адаптироваться по f_0F2 . Необходимыми условиями являются наличие достоверных экспериментальных данных НЗ и возможность получения параметров однокачковой моды 1F2. Данный способ адаптации модели ионосферы может использоваться для решения обратной задачи при интерпретации экспериментальных данных.

Авторы благодарны за полезные консультации А.В. Тащилину и А.В. Ойнацу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Перевалова Н.П. Перемещающиеся волновые пакеты возмущений полного электронного содержания по данным глобальной сети GPS (морфология и динамика) // Солнечно-земная физика. 2002. Вып. 3. С. 61–72.

Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

Балаганский Б.А., Сажин В.И. Численное моделирование характеристик декаметровых радиоволн в ионосфере с трехмерно-неоднородными возмущениями // Геомагнетизм и аэронавигация. 2003. Т. 43, № 1. С. 92–96.

Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. ФМЛ, 2001. 630 с.

Бойтман О.Н., Калихман А.Д. Анализ структуры перемещающихся ионосферных возмущений по ионограммам // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. М.: Наука, 1989. Т. 88. С. 59–69.

Вертоградов Г.Г., Денисенко П.Ф., Вертоградова Е.Г., Урядов В.П. Мониторинг среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений по результатам наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы // Электромагнитные волны и электронные системы. 2008. Т. 13, № 5. С. 35–44.

Вугмейстер Б.О., Захаров В.Н., Калихман А.Д., Радионов В.В. К динамике перемещающихся ионосферных возмущений // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. М.: Наука, 1993. Т. 100. С. 189–196.

Гольгин В.А., Михайлов Я.С., Сажин В.И. Численное моделирование ионограмм наклонного зондирования ионосферы при наличии распространения в ионосферных волновых каналах // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике: труды. Иркутск, 2003. С. 75–77.

Грозов В.П., Думбрава З.Ф., Ким А.Г. и др. Проявление перемещающихся ионосферных возмущений по данным наклонного зондирования и имитационное моделирование параметров возмущения // Распространение радиоволн: сборник докладов XXI Всерос. научн. конф. В 2-х т. Йошкар-Ола, 25–27 мая 2005 г. Т. 1. С. 177–181.

Иванов В.П., Карвецкий В.Л., Коренькова Н.А. Сезонно-суточные вариации в параметрах среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений // Геомагнетизм и аэронавигация. 1987. Т. 27, № 3. С. 511–513.

Иванов В.А., Лыонг В.Л., Насыров А.М., Рябова Н.В. Моделирование ионограмм для исследования перемещающихся ионосферных возмущений и их влияние на суточные ходы максимально наблюдаемых частот // Геоурсы. 2006. № 2 (19). С. 2–5.

Ким А.Г., Грозов В.П., Котович Г.В. Применение модифицированного метода кривых передачи для расчета критической частоты в средней точке трассы наклонного зондирования по лучу Педерсена // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике: труды. Иркутск, 2004. С. 82–85.

Кияновский М.П. Программа расчетов на ЭВМ по модифицированному методу кривых передачи. Лучевое при-

ближение и вопросы распространения радиоволн. М.: Наука, 1971. С. 287–298.

Кияновский М.П., Сажин В.И. К аналитическому представлению ионосферных данных при расчете декаметровых радиоволн // Исследования по геомагнетизму, астрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1980. Вып. 51. С. 41–48.

Коноплин В.Н., Орлов А.И. Приближение данных локальными сплайнами второй степени // Исследования по геомагнетизму, астрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1981. Вып. 57. С. 101–104.

Котович Г.В., Ким А.Г., Михайлов С.Я. и др. Определение критической частоты f_0F2 в средней точке трассы по данным наклонного зондирования на основе метода Смита // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46, № 4. С. 547–551.

Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.

Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.

Кутелев К.А., Куркин В.И. Моделирование влияния крупномасштабных ПИВ волнового типа на ионограммы наклонного зондирования радиотрасс Иркутск–Норильск и Иркутск–Магадан // Сборник докладов XXIII Всерос. научн. конф. «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, Россия, 23–26 мая 2011. Т. 1. С. 235–238.

Михайлов Я.С., Куркин В.И. Исследование характеристик перемещающихся ионосферных возмущений // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике: труды. Иркутск, 2007. С. 164–167.

Пономарчук С.Н., Котович Г.В., Романова Е.Б., Тащилин А.В. Прогноз характеристик распространения декаметровых радиоволн на основе глобальной модели ионосферы и плазмосферы // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 3. С. 49–54.

Тащилин А.В., Романова Е.Б. Численное моделирование диффузии ионосферной плазмы в дипольном геомагнитном поле при наличии поперечного дрейфа // Математическое моделирование. 2013. Т. 25, № 1. С. 3–17.

Afraimovich E.L., Ashkaliev Ya.E., Aushev V.M., et al. Simultaneous radio and optical observations of the mid-latitude atmospheric response to a major geomagnetic storm of 6–8 April 2000 // J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys. 2002. V. 64, N 18. P. 1943–1955.

Davies K. Ionospheric Radio Propagation. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1965. 470 p.

Ding F., Wan W., Liu L., et al. Statistical study of large scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during major magnetic storms over the years 2003–2005 // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A00A01.

Drob D.P., Emmert J.T., Crowley G., et al. An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07 // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A12304. DOI: 10.1029/2008JA013668.

Emmert J.T., Drob D.P., Shepherd G.G., et al. DWM07 global empirical model of upper thermospheric storm-induced disturbance winds // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A11319. DOI: 10.1029/2008JA013541.

Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Raistrick R., McNeil W.J. Statistical and functional representation of the pattern of auroral energy flux, number flux, and conductivity // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 12275–12294.

Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophys. 1996. V. 14. P. 917–940.

Kopka H., Möller H.G. Interpretation of anomalous oblique incidence sweep-frequency records using ray tracing // Radio Sci. 1968. V. 3, N 1. P. 43–51.

Kotovitch G.V., Mikhailov S.Ya. Adaptive abilities of IRI model in predicting decametric radiopath characteristics // Geomagnetism and Aeronomy. 2003. V. 43, N 1. P. 82–85.

Maeda S., Handa S. Transmission of large-scale TIDs in the ionospheric F2-region // J. Atmos. Terr. Phys. 1980. V. 42, N 9/10. P. 853–859.

Millward G.H., Moffett R.J., Quegan S., Fuller-Rowell T.J. Effects of a gravity wave on the midlatitude ionospheric F layer // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 19173–19179.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A12. P. 1468–1483.

Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: Solar EUV flux model for aeronomic calculations // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99, N A5. P. 8981–8992.

Rishbeth H., Garriott O.K. Introduction to Ionospheric Physics. New York: Academic Press, 1969. 334 p.

Sojka J.J., Rasmussen C.E., Schunk R.W. An interplanetary magnetic field dependent model of the ionospheric convection electric field // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 11281–11290.

Tashchilin A.V., Romanova E.B. UT-control effects in the latitudinal structure of the ion composition of the topside ionosphere // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1995. V. 57, N 12. P. 1497–1502.

Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere // *Proc. COSPAR. Colloquia Series.* 2002. V. 14. P. 315–325.

REFERENCES

Afraimovich E.L., Perevalova N.P. *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* [GPS-Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere]. Irkutsk, 2006, 480 p. (In Russian).

Afraimovich E.L., Ashkaliev Ya.E., Aushev V.M., Beletsky A.B., Vodyannikov V.V., Leonovich L.A., Lesyuta O.S., Mikhalev A.V., Yakovets A.F. Simultaneous radio and optical observations of the mid-latitude atmospheric response to a major geomagnetic storm of 6–8 April 2000. *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, no. 18, pp. 1943–1955.

Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Perevalova N.P. Traveling wave disturbance of total electron content according to worldwide GPS network (morphology and dynamics). *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2002, iss. 3, pp. 61–72. (In Russian).

Balaganskiy B.A., Sazhin V.I. Numerical modeling of HF radio wave characteristics in the ionosphere with third-dimensional inhomogeneous disturbances // *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 2003, vol. 43, no. 1, pp. 92–96. (In Russian).

Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennyye metody* [Numerical Methods]. FML Publ., 2001. 630 p. (In Russian).

Boitman O.N., Kalikhman A.D. Analysis of traveling ionospheric disturbances structure with the help of ionograms. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics Research], Moscow, Nauka Publ., 1989, vol. 88, pp. 59–69. (In Russian).

Davies K. *Ionospheric Radio Propagation*. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1965. 470 p.

Ding F., Wan W., Liu L., Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Perevalova N.P. Statistical study of large scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during major magnetic storms over the years 2003–2005. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A00A01.

Drob D.P., Emmert J.T., Crowley G., Picone J.M., Shepherd G.G., Skinner W., Hays P., Niciejewski R.J., Larsen M., She C.Y., Meriwether J.W., Hernandez G., Jarvis M.J., Sipler D.P., Tepley C.A., O'Brien M.S., Bowman J.R., Wu Q., Murayama Y., Kawamura S., Reid I.M., Vincent R.A. An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A12304. DOI: 10.1029/2008JA013668.

Emmert J.T., Drob D.P., Shepherd G.G., Hernandez G., Jarvis M.J., Meriwether J.W., Niciejewski R.J., Sipler D.P., Tepley C.A. DWM07 global empirical model of upper thermospheric storm-induced disturbance winds. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A11319. DOI: 10.1029/2008JA013541.

Golygin V.A., Mikhailov Ya.S., Sazhin V.I. Numerical modeling of oblique ionograms with propagation in ionospheric channels. *Baikal'skaya mezhdunarodnaya molodezhnaya shkola po fundamentalnoi fizike: trudy* [Proc. Baikal Young Scientists' International School on Fundamental Physics], Irkutsk, 2003, pp. 75–77. (In Russian).

Grozov V.P., Dumbrava Z.F., Kim A.G., Kotovich G.V., Mikhailov Ya.S., Oinats A.V. Traveling ionospheric disturbances from oblique ionograms and modeling of disturbance parameters. *Rasprostranenie radiovoln: sbornik dokladov XXI Vserossiyskoi nauchnoi konferentsii* [Radio Propagation: Proc. XXI Russian National Conf.], Yoshkar-Ola, 25–27 May 2005, vol. 1, pp. 177–181. (In Russian).

Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Raistrick R., McNeil W.J. Statistical and functional representation of the pattern of auroal energy flux, number flux, and conductivity. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. 92, pp. 12275–12294.

Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophys.* 1996, vol. 14, pp. 917–940.

Ivanov V.P., Karvetskiy V.L., Koren'kova N.A. Seasonal-diurnal variations of middle scale traveling ionospheric disturbances. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1987, vol. 27, no. 3, pp. 511–513. (In Russian).

Ivanov V.A., Lyong V.L., Nasyrov A.M., Ryabova N.V. Modeling of ionograms for traveling ionospheric disturbances research and its connection with maximal observing frequencies. *Georesursy* [Georesources]. 2006, no. 2 (19), pp. 2–5. (In Russian).

Kim A.G., Grozov V.P., Kotovich G.V. Application of modified method of transferring curves for critical frequency calculation from Pedersen ray in path midpoint. *Mezhdunarodnaya Baikal'skaya molodezhnaya shkola po fundamentalnoi fizike: trudy* [Proc. Baikal Young Scientists' International School on Fundamental Physics]. Irkutsk, 2004, pp. 82–85. (In Russian).

Kiyanovsky M.P. Computer calculations with the help of the modified method of transfer curves. *Luchevoe priblizhenie i voprosy rasprostraneniya radiovoln* [Geometric optics and radio propagation]. Moscow, Nauka Publ., 1971, pp. 287–298. (In Russian).

Kiyanovsky M.P., Sazhin V.I. On the analytical representation of ionospheric data in calculating decameter radio wave propagation. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics Research]. Moscow, Nauka Publ., 1980, iss. 51, pp. 41–48. (In Russian).

Konoplin V.N., Orlov A.I. Data approaching by local second-order splines. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics Research]. Moscow, Nauka Publ., 1981, iss. 57, pp. 101–104. (In Russian).

Kopka H., Möller H.G. Interpretation of anomalous oblique incidence sweep-frequency records using ray tracing. *Radio Sci.* 1968, vol. 3, no. 1, pp. 43–51.

Kotovich G.V., Mikhailov S.Ya. Adaptive Abilities of IRI model in predicting decametric radiopath characteristics. *Geomagnetizm and Aeronomy*. 2003, vol. 43, no. 1, pp. 82–85.

Kotovich G.V., Kim A.G., Mikhailov S.Ya., Grozov V.P., Mikhailov Ya.S. Determining the f_oF2 critical frequency at the path midpoint from oblique sounding data based on the Smith method. *Geomagnetizm and Aeronomy*. 2006, vol. 46, no. 4, pp. 517–521.

Kravtsov Yu.A., Orlov Yu.I. *Geometricheskaya optika neodnorodnykh sred* [Geometric optics for non-homogeneous media]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 304 p. (In Russian).

Krinberg I.A., Tashchilin A.V. *Ionosfera i plazmasfera* [Ionosphere and Plasmasphere]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 189 p. (In Russian).

Kutelev K.A., Kurkin V.I. Modeling impact of large-scale wavelike traveling ionospheric disturbances on oblique ionograms for Irkutsk–Norilsk and Irkutsk–Magadan paths.

Rasprostranenie radiovoln: sbornik докладov XXIII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii [Radio Propagation: Proc. XXIII Russian National Conf.], Yoshkar-Ola, 23–26 May, 2011, vol. 1, pp. 235–238. (In Russian).

Maeda S., Handa S. Transmission of large-scale TIDs in the ionospheric F2-region. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1980, vol. 42, no. 9/10, pp. 853–859.

Mikhailov Ya.S., Kurkin V.I. Research of parameters of traveling ionospheric disturbances. *Mezhdunarodnaya Baikalskaya molodezhnaya shkola po fundamentalnoi fizike: trudy* [Proc. Baikal Young Scientists' International School on Fundamental Physics]. Irkutsk, 2007, pp. 164–167. (In Russian).

Millward G.H., Moffett R.J., Quegan S., Fuller-Rowell T.J. Effects of a gravity wave on the midlatitude ionospheric F layer. *J. Geophys. Res.* 1993, vol. 98, pp. 19173–19179.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A12, pp. 1468–1483.

Ponomarchuk S.N., Kotovich G.V., Romanova E.B., Tashchilin A.V. Forecast of short radio waves characteristics on the base of Global ionosphere and plasmasphere model. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2015, vol. 1, no. 3, pp. 49–54. (In Russian).

Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: solar EUV flux model for aeronomic calculations. *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, no. A5, pp. 8981–8992.

Rishbeth H., Garriott O.K. *Introduction to Ionospheric Physics*. New York, Academic Press, 1969. 334 p.

Sojka J.J., Rasmussen C.E., Schunk R.W. An interplanetary magnetic field dependent model of the ionospheric convection electric field. *J. Geophys. Res.* 1986, vol. 91, pp. 11281–11290.

Tashchilin A.V., Romanova E.B. UT-control effects in the latitudinal structure of the ion composition of the topside ionosphere. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1995, vol. 57, no. 12, pp. 1497–1502.

Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere. *Proc. COSPAR. Colloquia Series*. 2002, vol. 14, pp. 315–325.

Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling of ionosphere scattering in dipole geomagnetic field with crossover drift. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling]. 2013, vol. 25, no. 1, pp. 3–17. (In Russian).

Vertogradov G.G., Denisenko P.F., Vertogradova E.G., Uryadov V.P. The monitoring of medium-scale travelling ionospheric disturbances as the result of oblique chirp sounding of the ionosphere. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2008, vol. 13, no. 5, pp. 35–44. (In Russian).

Vugmeister B.O., Zakharov V.N., Kalikhman A.D., Radionov V.V. About dynamics of traveling ionospheric disturbances. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics Research]. Moscow, Nauka Publ., 1993, vol. 100, pp. 189–196. (In Russian).