
**ПРОГНОЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕКАМЕТРОВЫХ
РАДИОВОЛН НА ОСНОВЕ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ
И ПЛАЗМОСФЕРЫ**

**FORECASTING CHARACTERISTICS OF PROPAGATION
OF DECAMETER RADIO WAVES USING THE GLOBAL IONOSPHERE
AND PLASMASPHERE MODEL**

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*

А.В. Тащилин

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, avt@iszf.irk.ru*

S.N. Ponomarchuk

*Institute of Solar-Terrestrial Physics,
Irkutsk, Russia, spon@iszf.irk.ru*

G.V. Kotovich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics,
Irkutsk, Russia, kotovich@iszf.irk.ru*

E.B. Romanova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics,
Irkutsk, Russia, ebr@iszf.irk.ru*

A.V. Tashchilin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics,
Irkutsk, Russia, avt@iszf.irk.ru*

Аннотация. Приводятся результаты прогноза максимальных применимых частот (МПЧ) на среднеширотных трассах на основе комплексного алгоритма, включающего модули глобальной модели ионосферы и плазмосферы (ГМИП) и модели распространения радиоволн. Расчет характеристик распространения декаметровых радиоволн проводится в рамках метода нормальных волн. ГМИП, разработанная в ИСЗФ СО РАН, позволяет по минимальному набору входных данных рассчитывать профили электронной концентрации и эффективной частоты соударений с учетом физических процессов в верхней атмосфере Земли. Для оценки эффективности использования ГМИП при долгосрочном прогнозе условий распространения радиоволн были проведены расчеты МПЧ радиосвязи в различных гелиогеофизических условиях. Для получения точностных характеристик прогноза МПЧ привлекались экспериментальные данные наклонного зондирования на трассах Магадан–Иркутск, Хабаровск–Иркутск, Норильск–Иркутск. Данные трассы оборудованы современными средствами диагностики ионосферы при наклонном зондировании непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом. Проведено сопоставление результатов прогноза МПЧ по ГМИП с расчетами, выполненными по модели IRI.

Ключевые слова: ионосфера, ионограмма, распространение радиоволн.

Abstract. We present the results of forecasting maximum usable frequencies (MUF) on middle-latitude paths on the basis of complex algorithm including modules of the ionosphere and plasmasphere global model (IPGM) and the model of radio wave propagation. The computation of propagation characteristics for decameter radio waves is carried out within the framework of normal wave technique. IPGM developed in ISTP SB RAS enables to compute electron concentration profiles and effective frequency of collisions using minimum number of input data and taking into account physical processes in the Earth's upper atmosphere. To estimate the efficiency of using IPGM in long-term forecast of radio wave propagation we computed MUF for radio communication in various heliogeophysical conditions. To obtain precision characteristics of MUF forecast we used experimental data of oblique sounding on Magadan–Irkutsk, Khabarovsk–Irkutsk, Norilsk–Irkutsk paths. The paths are equipped with modern ionosphere diagnostic hardware for oblique sounding by continuous chirp signal. We also compared results of MUF forecast using IPGM with computations carried out according IRI model.

Keywords: ionosphere, ionogram, radio wave propagation.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с потребностями радиосвязи предъявляются новые требования не только к теории распространения радиоволн, но и еще в

большей степени к качеству алгоритмов расчета характеристик сигналов. В связи с этим задача разработки эффективных, практически значимых алгоритмов расчета характеристик декаметровых сигналов на базе современных глобальных моделей ионо-

сферы является актуальной. Разработка вычислительной схемы в рамках волноводного подхода позволила реализовать комплексный алгоритм расчета пространственно-частотных характеристик на основе метода нормальных волн [Алтынцева и др., 1987; Пономарчук и др., 2014]. Отличительной особенностью алгоритма является его универсальность, позволяющая единообразно, в рамках единой схемы, рассчитывать амплитудные, временные и угловые характеристики КВ-сигналов для произвольных точек расположения пунктов приема и передачи. Комплексный алгоритм расчета характеристик распространения был реализован в виде пакета программных средств, включающего модули расчета модели ионосферы и характеристик распространения радиоволн в рамках волноводного подхода. Выходными параметрами модели ионосферы являются высотные профили электронной концентрации $N(h)$ и эффективной частоты соударений $\nu(h)$. Для регулярного радиоканала с плавными продольными градиентами достаточно иметь высотные разрезы $N(h)$ и $\nu(h)$ с шагом по дальности порядка 300–400 км. В программном комплексе расчета характеристик распространения реализована возможность использования различных моделей ионосферы: международной справочной модели IRI [Bilitza, Reinisch, 2008], полуэмпирической модели ионосферы [Поляков и др., 1986], теоретической модели ионосферы [Котович и др., 2010], а также разработанной в ИСЗФ СО РАН глобальной модели ионосферы и плазмосферы (ГМИП) [Кринберг, Тащилин, 1984; Tashchilin, Romanova, 2002]. ГМИП позволяет по минимальному набору входных данных рассчитывать профили $N(h)$ и $\nu(h)$ с учетом физических процессов в верхней атмосфере Земли. Для оценки эффективности ГМИП при долгосрочном прогнозе условий распространения радиоволн были проведены расчеты МПЧ радиосигнала в различных гелиогеофизических условиях. Для получения точностных характеристик прогноза МПЧ привлекались экспериментальные данные наклонного зондирования на трассах Магадан–Иркутск, Хабаровск–Иркутск, Норильск–Иркутск, оснащенных современными средствами диагностики ионосферы при наклонном зондировании непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом [Иванов и др., 2003; Подлесный и др., 2013]. Проведено сопоставление результатов прогноза МПЧ по ГМИП с расчетами, выполненными по модели IRI.

ЭКСПЕРИМЕНТ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В работе приведены результаты тестирования комплекса программных средств прогноза МПЧ по данным ЛЧМ-зондирования ионосферы на трассах Магадан–Иркутск, Хабаровск–Иркутск, Норильск–Иркутск. Были выбраны следующие периоды наблюдений: январь, март, июль, сентябрь, октябрь 2010 г.; январь и ноябрь 2012 г. Интервал наблюдений в каждом из этих месяцев составлял не менее десяти дней. Средняя активность Солнца, выраженная в индексе

$F10.7$, в 2010 г. была равна 80, что соответствует периоду низкой солнечной активности. В 2012 г. средний индекс $F10.7$ был равен 121.

В выбранные периоды наблюдений в интерактивном режиме интерпретации ионограмм НЗ по выделенным точкам моментов прихода сигналов со значимой амплитудой были сформированы массивы экспериментальных значений максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) в суточном ходе. Рассматривались стандартные моды распространения при отражении радиоволн от слоя F. В летний период, в условиях многослойности ионосферы и присутствия спорадического слоя Es вдоль трассы распространения радиоволн, на ионограммах НЗ регулярно регистрировались сигналы с выраженной диффузностью. Обработка ионограмм и идентификация треков с последующим определением истинных значений МНЧ в данной ситуации затруднены. Так, ошибка определения МНЧ для мода минимальной кратности из-за диффузности трека могла достигать 1 МГц. Отметим, что в отдельные летние дни в дневное время спорадический слой Es полностью экранировал отражение сигналов от слоя F.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1 приведены суточные вариации медианы экспериментальных МНЧ (крестики), полученных с временным интервалом 5 мин, для мода распространения 1F за январь, март, июль, октябрь 2010 г. на трассе Магадан–Иркутск. Вертикальными линиями показан диапазон изменения экспериментальных значений МНЧ для выбранного мода распространения с интервалом 20 мин. Здесь же приведены результаты расчета МПЧ мода распространения 1F по ГМИП (сплошная линия) и, для сравнения, результаты расчетов по модели IRI (штриховая линия). При расчете МПЧ моделирование параметров ионосферы проводилось без учета геомагнитных возмущений. Все расчеты высотных профилей электронной концентрации и эффективной частоты соударений ионосферы для ГМИП и IRI проводились с идентичными входными данными. Расчеты характеристик распространения по моделям ионосферы проведены на середину месяца.

В январе, марте и октябре 2010 г. суточные вариации медианы МНЧ коррелируют с прогнозными значениями МПЧ, рассчитанными как по ГМИП, так и по модели IRI (рис. 1). Видно, что прогнозное значение МПЧ по модели IRI меньше экспериментальных значений МНЧ, тогда как МПЧ, рассчитанные по ГМИП, согласуются с МНЧ в диапазоне изменения экспериментальных данных практически во всем временном интервале. Сравнение профилей электронной концентрации в выбранных разрезах вдоль трассы распространения показывает, что расчетные значения критической частоты слоя F по модели IRI всегда меньше критических частот по ГМИП. Высоты максимумов слоя F, рассчитанные по выбранным моделям ионосферы, согласуются. В летние месяцы в условиях многослойности ионосферы характерной особенностью суточных вариаций экспе-

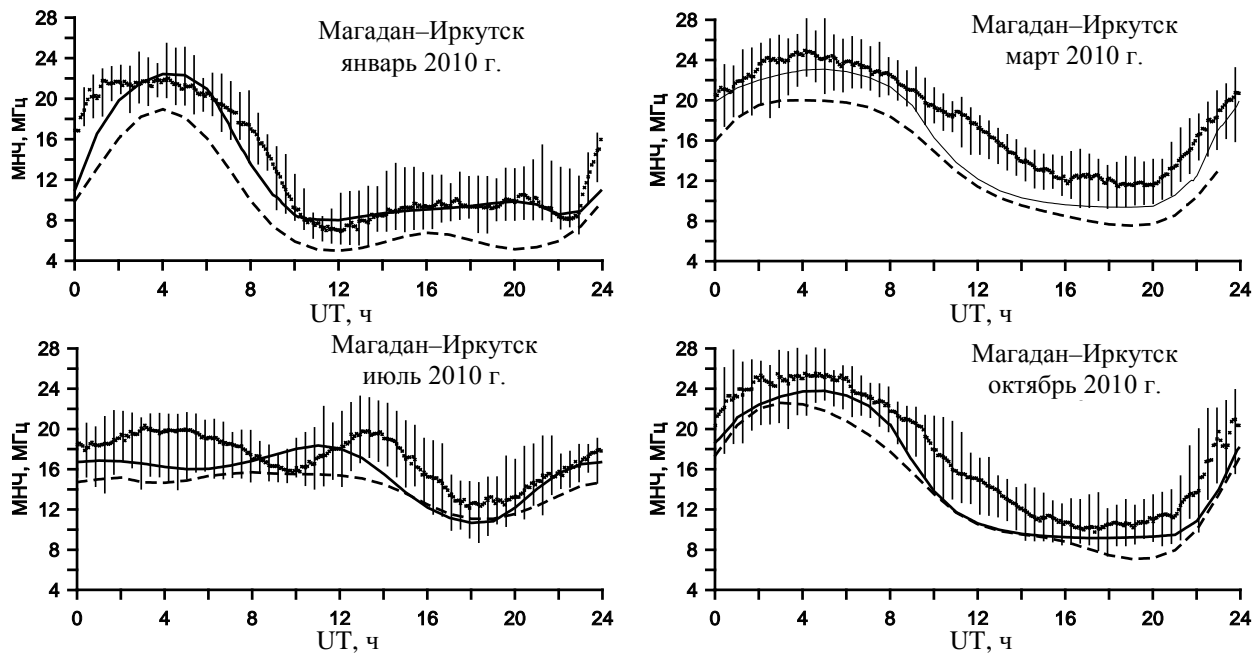


Рис. 1. Суточный ход медианы МНЧ и расчетной МПЧ на трассе Магадан–Иркутск

Таблица 1

Абсолютные и относительные ошибки прогноза МНЧ

Месяц	ГМИП				IRI			
	$\bar{\Delta}$, МГц	σ , МГц	$\bar{\delta}$, %	σ , %	$\bar{\Delta}$, МГц	σ , МГц	$\bar{\delta}$, %	σ , %
Магадан–Иркутск, 1F								
Январь 2010 г.	0.7	1.7	4.1	10.7	3.98	1.6	31.7	9.8
Март 2010 г.	2.4	1.3	14.9	9.5	4.5	0.8	26.6	7.8
Июль 2010 г.	1.6	1.7	9.3	9.7	2.9	1.4	16.5	6.7
Октябрь 2010 г.	2.4	1.2	14.4	5.5	3.5	0.96	21.7	7.5
Норильск–Иркутск, 1F								
Январь 2010 г.	0.6	1.8	7.5	19.8	2.03	1.7	18.8	9.5
Март 2010 г.	1.2	0.7	11.1	8.6	3.7	1.2	26.2	4.1
Июль 2010 г.	0.3	1.2	2.3	8.9	2.7	0.8	18.7	4.7
Октябрь 2010 г.	1.7	1.5	14.1	11.8	3.1	1.5	22.7	8.2
Хабаровск–Иркутск, 1F								
Январь 2010 г.	0.6	1.5	7	10.98	2.8	1.4	24.8	11.1
Март 2010 г.	2.8	2.1	18.7	15.1	4.2	0.7	25.8	8.2
Сентябрь 2010 г.	2.6	1.97	17.7	15.2	4.1	1.1	24.5	8.2
Октябрь 2010 г.	3.2	2.2	21.9	18.1	3.1	0.95	20.5	8.95

риментальных МНЧ является наличие двух максимумов в суточном ходе (рис. 1). Первый максимум, в период времени 0–8 UT, связан с расслоением слоя F на F1- и F2-слои. В летнее время экспериментальная МНЧ при однократном отражении излучаемого сигнала от слоя F1 может превышать МНЧ сигнала, отраженного от слоя F2. В ГМИП в профиле электронной концентрации максимум в F1-слое прописан в виде перегиба, что приводит к занижению расчетной МПЧ мода 1F1. Второй максимум в суточном ходе МНЧ определяется распределением критических частот в вечернее время суток в средней области трассы (так называемый вечерний максимум). По ГМИП вечерний максимум суточных вариаций критической частоты в области отражения сигнала от ионосферы приходится на момент времени 12 UT. Реально по вари-

ациям МНЧ вечернему максимуму соответствует момент времени 14 UT.

Аналогичные закономерности суточных вариаций МНЧ и МПЧ наблюдаются на трассах Норильск–Иркутск и Хабаровск–Иркутск. На рис. 2 приведены суточные вариации медианы экспериментальных МНЧ и расчетных МПЧ, полученных с временным интервалом 5 мин, для мода распространения 1F за январь, март, июль, октябрь 2010 г. на трассе Норильск–Иркутск, на рис. 3 — суточные вариации медианы МНЧ и расчетной МПЧ за январь, март, сентябрь, октябрь 2010 г. на трассе Хабаровск–Иркутск.

Для оценки достоверности результатов тестирования макета программных средств для каждого анализируемого месяца 2010 г. были вычислены отклонения медианы МНЧ f_m^E от расчетной МПЧ f_m^P . Статистические характеристики абсолютной ошибки

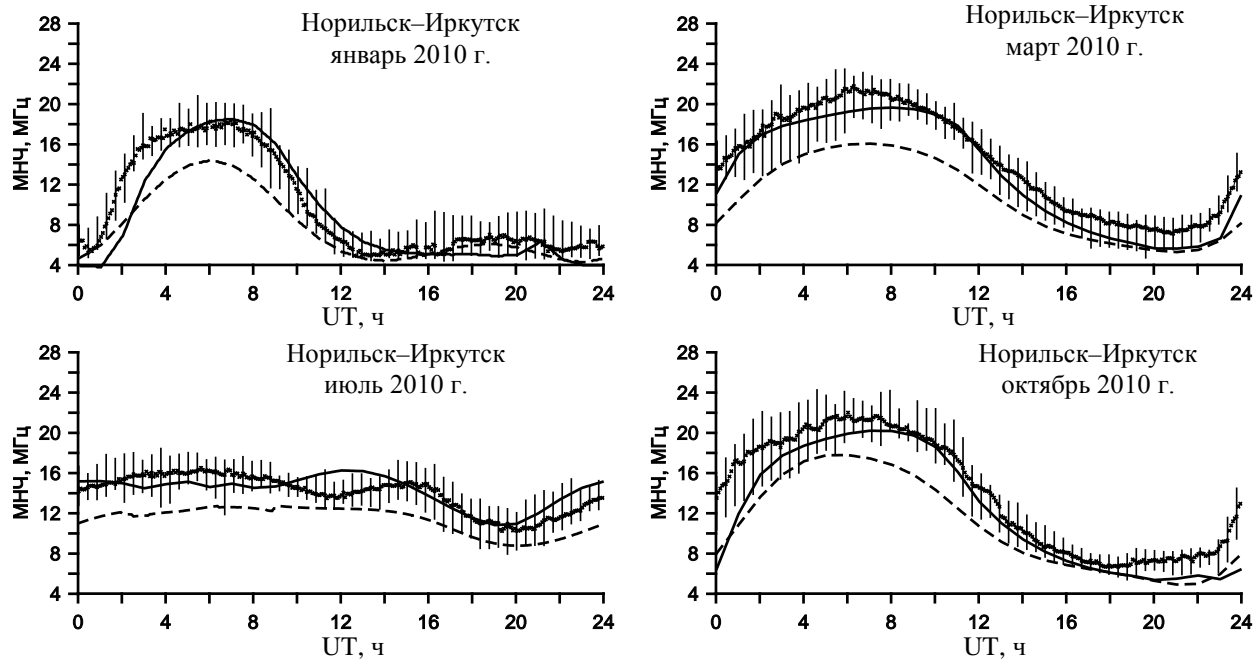


Рис. 2. Суточный ход медианы МНЧ и расчетной МПЧ на трассе Норильск–Иркутск

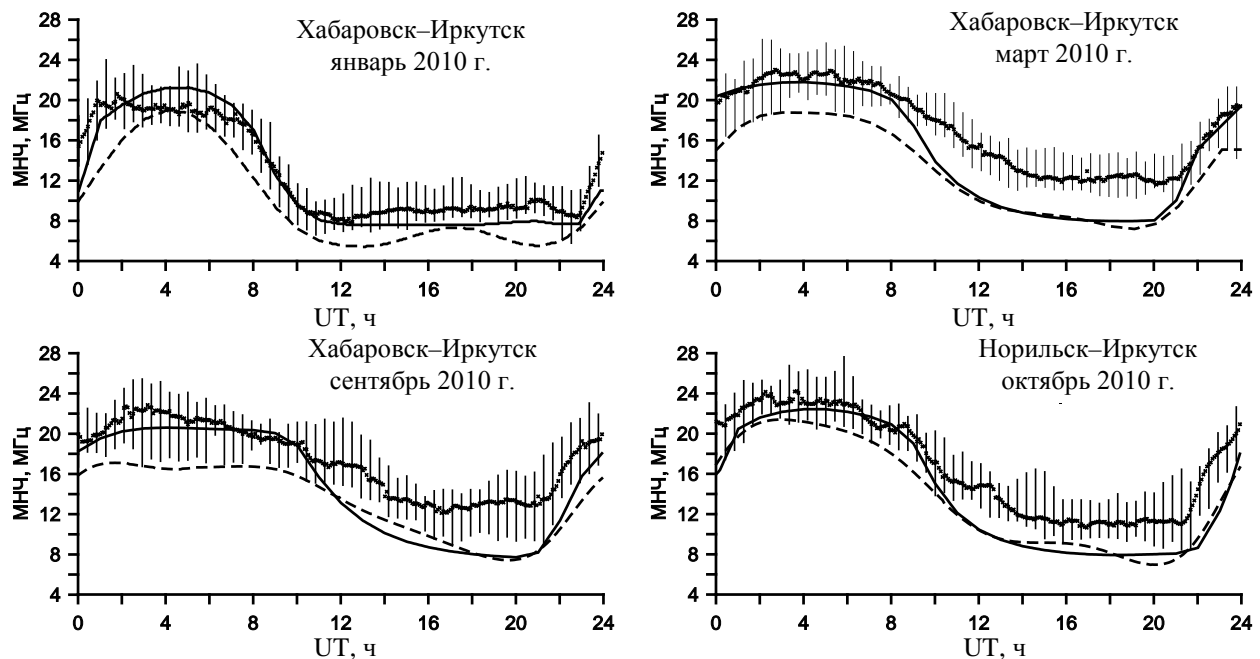


Рис. 3. Суточный ход медианы МНЧ и расчетной МПЧ на трассе Хабаровск–Иркутск

$\Delta = f_m^r - f_m^p$ (в МГц) и относительной ошибки прогноза $\delta = (f_m^r - f_m^p) / f_m^r$ (в %) представлены в табл. 1, в которой для каждого анализируемого месяца года приводятся средние значения отклонений медианы МНЧ от расчетной МПЧ за сутки ($\bar{\Delta}$ и $\bar{\delta}$). Также в табл. 1 приведены значения стандартного отклонения σ .

На рис. 4 показаны суточные вариации медианы МНЧ и расчетной МПЧ на трассах Магадан–Иркутск и Хабаровск–Иркутск в январе и ноябре 2012 г. Абсолютные и относительные ошибки прогноза МНЧ за данные месяцы приведены в табл. 2. В отличие от периода наблюдений 2010 г., в 2012 г. относительная ошибка прогноза по ГМИП увеличивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты сопоставления прогноза МПЧ по выбранным моделям ионосферы с экспериментальными данными наклонного зондирования на трассах Магадан–Иркутск, Хабаровск–Иркутск и Норильск–Иркутск позволяют сделать следующие выводы.

1. В выбранные периоды 2010 и 2012 гг. (зима, весна, лето, осень) получено соответствие расчетных значений МПЧ по тестируемому макету программных средств с экспериментальными МНЧ (медиана за соответствующий период наблюдений) по вариациям в суточном ходе.

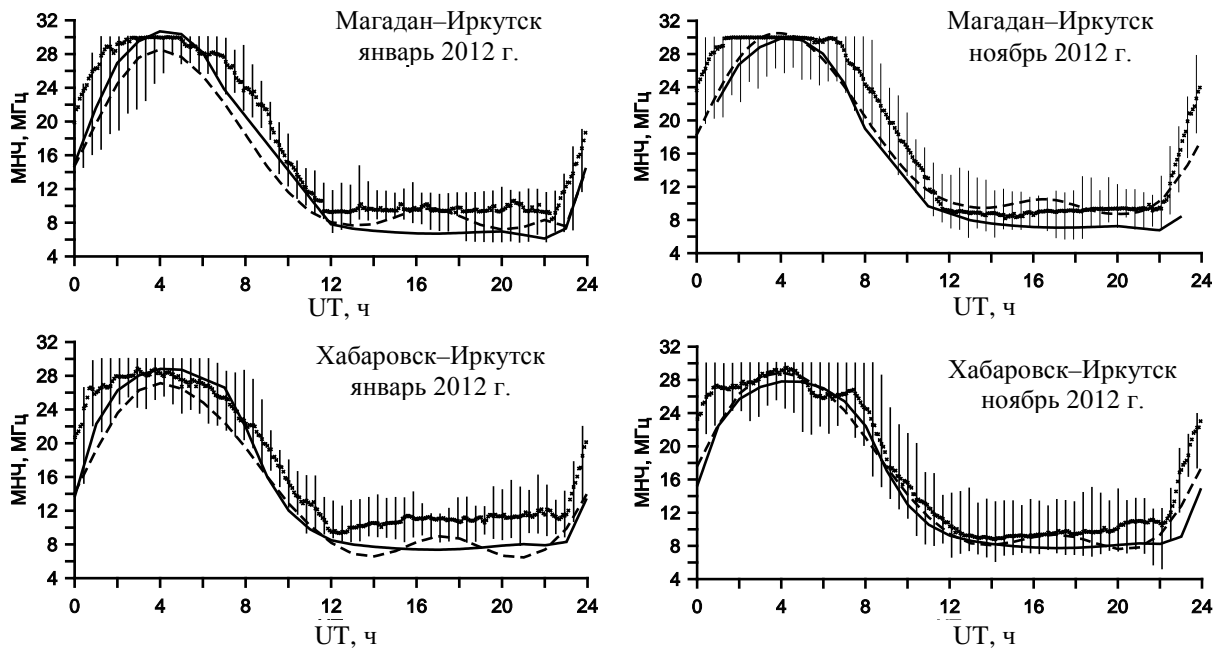


Рис. 4. Суточный ход медианы МНЧ и расчетной МПЧ на трассах Магадан–Иркутск и Хабаровск–Иркутск

Таблица 2

Абсолютные и относительные ошибки прогноза МНЧ

Месяц	ГМИП				IRI			
	$\bar{\Delta}$, МГц	σ , МГц	$\bar{\delta}$, %	σ , %	$\bar{\Delta}$, МГц	σ , МГц	$\bar{\delta}$, %	σ , %
Магадан–Иркутск, 1F								
Январь 2012 г.	2.4	1.5	18.4	12.1	2.8	1.9	16.2	8.8
Ноябрь 2012 г.	2.3	1.6	16.6	9.9	1.1	2.3	2.3	12.4
Хабаровск–Иркутск, 1F								
Январь 2012 г.	2.4	1.9	18.5	13.5	3.2	1.5	21.5	11.3
Ноябрь 2012 г.	2.1	2	2.2	1.17	1.5	1.5	9.7	8.4

2. В летний период наблюдения в условиях многослойности ионосферы характерной особенностью суточных вариаций экспериментальных МНЧ является наличие двух максимумов в суточном ходе МНЧ. Первый максимум связан с расслоением слоя F на F1- и F2-слои. В летнее время экспериментальная МНЧ при однократном отражении излучаемого сигнала от слоя F1 может превышать МНЧ сигнала, отраженного от слоя F2. В ГМИП слой F1 в профиле электронной концентрации присутствует в виде перегиба, что приводит к заниженным значениям расчетных МПЧ мода 1F1. Второй максимум в суточном ходе МПЧ определяется распределением критических частот в вечернее время суток в средней области трассы (так называемый вечерний максимум).

3. Средние за сутки отклонения медианы экспериментальных значений МНЧ от прогнозных значений МПЧ по ГМИП в рассматриваемые месяцы не превышают 3.2 МГц. Стандартные отклонения не превышают 2.2 МГц. Максимальные отклонения медианы экспериментальных МНЧ от прогнозных МПЧ соответствуют периодам наблюдения весной и осенью. Ошибки прогноза МПЧ по ГМИП меньше ошибок расчета МПЧ с использованием модели IRI.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 13-05-00979-а, 13-05-00733-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтынцева В.И., Ильин Н.В., Куркин В.И. и др. Моделирование декаметрового радиоканала на основе метода нормальных волн // Техника средств связи. Серия СС. М.: Экос, 1987. Вып. 5. С. 28–34.

Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е. и др. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // Известия вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 11. С. 919–952.

Котович Г.В., Грозов В.П., Ким А.Г. и др. Применение теоретической модели ионосферы для расчета характеристик распространения декаметровых радиоволн // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50, № 4. С. 530–534.

Кринберг И.А., Ташилин А.В. Ионосфера и плазмаосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.

Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 24–31.

Поляков В.М., Суходольская В.Е., Ивельская М.К. и др. Полуэмпирическая модель ионосферы: Для широкого диапазона гелиогеофизических условий. М., 1986. 140 с. (Материалы Мирового центра данных Б.)

Пономарчук С.Н., Ильин Н.В., Пензин М.С. Модель распространения радиоволн в диапазоне частот 1–10 МГц на основе метода нормальных волн // Солнечно-земная физика. 2014. Вып. 25. С. 33–39.

Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Adv. Space Res.* 2008, V. 42, P. 599–609.

Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere // *Solar-Terrestrial Magnetic Activity and Space Environment: Proc. COSPAR Colloquium*. Amsterdam, 2002. P. 315–325. (COSPAR Colloquia Series. V. 14).

REFERENCES

Altyntseva V.I., Ilyin N.V., Kurkin V.I., et al. Modeling the decameter radio channel based on the method of normal waves. *Tekhnika sredstv svyazi. Seriya SS*. [Communication Facilities Technique]. Moscow, Ekos Publ., 1987, no. 5, pp. 28–34 (in Russian).

Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. *Adv. Space Res.* 2008, vol. 42, pp. 599–609.

Ivanov V.A., Kurkin V.I., Nosov V.E., et al. FMCW-ionosounder and its application in ionosphere research. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. [Radiophysics and Quantum Electronics]. 2003, vol. 46, no. 11, pp. 919–952 (in Russian).

Kotovich G.V., Grozov V.P., Kim A.G., et al. Application of the theoretical reference ionosphere model for calculating HF radiowave propagation characteristics. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2010, vol. 50, no. 4, pp. 530–534 (in Russian).

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

Podlesnyi A.V., Brynko I.G., Kurkin V.I., et al. Multifunctional chirp ionosonde for monitoring the ionosphere. *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [Heliogeophysical Research]. 2013, no. 4, pp. 24–31 (in Russian).

Polyakov V.M., Suhodol'skaya V.E., Ivel'skaya M.K., et al. *Semiempirical model of the ionosphere: For wide range of heliogeophysical conditions*. Moscow, 1986. 140 p. (Materials of the World Data Center B.) (in Russian).

Ponomarchuk S.N., Ilyin N.V., Penzin M.S. The model of radio wave propagation in 1–10 MHz frequency range on the base of normal wave technique. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2014, iss. 25, pp. 33–39 (in Russian).

Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere. *Solar-Terrestrial Magnetic Activity and Space Environment: Proc. COSPAR Colloquium*. Amsterdam, 2002, pp. 315–325. (COSPAR Colloquia Series. Vol. 14).