

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАБОЧИЕ ЧАСТОТЫ КВ-РАДИОЛИНИЙ

А.В. Черменин, А.Н. Ляхов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер Российской академии наук

В статье представлены результаты численного моделирования максимально применимых частот КВ диапазона в условиях изменения геомагнитного поля. Возмущения ионосферы, вызванные изменением геомагнитного поля, сказываются на распространении КВ радиоволн в Восточно-Сибирском секторе РФ. Наиболее критичными результатами являются: изменение интервалов доступности для работы в моде 1F2 и изменение частотных диапазонов для мод слоя E, во многом определяющих помеховую обстановку в КВ диапазоне. Эффект хорошо наблюдается при сильно возмущённых условиях ($K_p = 7$) и остаётся заметен даже при $K_p = 4$ на длинных трассах, проходящих через Арктическую область.

Введение

Наблюдаемые в последние десятилетия изменения геомагнитного поля [Mandea, Dormy, 2003; Дьяченко, 2003] могут вызвать детерминированный отклик в параметрах ионосферы, связанный с изменениями в сложном контуре обратных связей магнитосферно-ионосферных процессов. Исследованию этого отклика был посвящен ряд статей [Eufriq, 1963; Ляхов и др., 2006, 2016; Cnossen, Richmond, 2013]. Расчетные изменения параметров ионосферы, в принципе, успешно маскируются в настоящее время вариациями, вызванными высокой геомагнитной активностью. Физический механизм изменения структуры ионосферы по результатам численного моделирования [Ляхов и др., 2006, 2016], выполненного с использованием разных численных моделей CTIM [Fuller-Rowell et al., 1996; Qian et al., 2014], заключается в изменении фазового сдвига между солнечным и магнитным локальным временем. Солнечное локальное время контролирует ионизацию атмосферы УФ излучением Солнца, а магнитное локальное время определяет ионизацию и нагрев ионосферы потоками высыпавшихся энергичных электронов и протонов. Используемые в настоящее время модели геомагнитного поля и ионосферы для территории РФ созданы на базе измерений 70-х годов XX века (ГОСТ 25645.126-85). Изменения геомагнитного поля за период 1980–2015 годы можно считать достаточно серьезными (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>). Эксплуатация современных и перспективных систем КВ радиосвязи и радиолокации в частотном диапазоне 2–30 МГц, в особенности в Арктическом и Восточно-Сибирском регионах, критическим образом зависит от возможности прогноза рабочих частот. Поэтому нами была поставлена и решена задача численного моделирования изменения рабочих частот на радиотрассах разной ориентации и протяженности в условиях изменения геомагнитного поля.

Численные модели ионосферы и распространения радиоволн

Численное моделирование ионосферы выполнялось с помощью трехмерной самосогласованной модели ионосферы и термосферы TIEGCM 2.0, которая осуществляет совместное решение уравнений динамики плазмы и нейтральной атмосферы под воздействием солнечного излучения, потоков высыпающихся электронов и протонов, в электрических полях, определяемых самосогласованным образом. В TIEGCM используется модель геомагнитного поля Земли IGRF-2012 на конкретную эпоху. Коэффициенты разложения на период 1980–2015 гг. считаются точно определенными. Расчеты выполнялись в климатологическом режиме, в котором входными параметрами являются индексы солнечной ($F10.7$) и геомагнитной (K_p) активности. Год, на который выполняются расчеты, также является входным параметром, задавая значения магнитного поля Земли на расчетной сетке. Диапазон высот, охватываемый расчетами, лежит в области 90–700 км и зависит от состояния термосферы (в модели использована логарифмическая сетка по уровням давления).

Моделирование распространения КВ радиоволн в диапазоне частот 2–30 МГц выполнялось с помощью программного комплекса SIMPLE (Short-wave propagation in Ionosphere Model with Plasmasphere Exchange), реализующего метод нормальных волн [Пономарчук и др., 2016] ИСЗФ СО РАН. Программный комплекс осуществляет автоматическое определение максимально применимых частот (МПЧ) для разных мод распространения КВ радиосигнала (1F2 – один скачок через F2 слой, 2F2 – два скачка через F2 слой, 1E, 2E – один или два скачка через E-слой) и модовую структуру, расчёт ДЧХ (дистанционно-частотная характеристика) и АЧХ (амплитудно-частотная характеристика) канала. Входными данными являются концентрация электронов и эффективная частота соударений с нейтрами, рассчитанные в модели TIEGCM для данной трассы в заданных условиях.

Моделирование ионосферы выполнялось для двух уровней геомагнитной активности ($K_p = 4$ и $K_p = 7$) для 4 сезонов (зимнее и летнее солнцестояния, весеннее и осеннее равноденствия) для трех радиотрасс: Норильск-Иркутск (близкая к меридиональной ориентации), Магадан-Иркутск (близкая к широтной ориентации) и Анкоридж-Иркутск (смешанного типа). В радиофизической части рассчитывались максимально применимые частоты (МПЧ) для односкачкового распространения через слой F2 и допустимые МПЧ для мод, распространяющихся через слой E ионосферы. Для изменения года моделирования и, соответственно, геомагнитного поля от 1980 до 2014 гг. рассчитывались изменения МПЧ и интервала доступности (периода времени, в который возможно распространение радиоволн на заданной трассе).

Результаты расчетов

Результаты численного моделирования суточного хода МПЧ для мод 1F2 и 1E представлены на рисунках 1 и 2. Учитывая «заморозку» всех возмущающих геофизических факторов кроме изменения геомагнитного поля, видно, что последнее приводит к изменению МПЧ и сдвигу интервалов доступности на заданной трассе. Сводные результаты для всех сезонов и двух уровней геомагнитной активности представлены в таблицах 1 и 2.

В табл. 1 приведены результаты максимального изменения МПЧ (в МГц) для указанного сезона, трассы и уровня геомагнитной активности с учетом знака. В табл. 2 представлены изменения интервалов доступности (в часах, положительные

значения соответствуют увеличению интервала доступности, отрицательные – сокращению). Для практических приложений заметным можно считать изменение МПЧ на величину больше 1 МГц и интервала времени доступности более чем на один час.

Результаты показывают, что наиболее сильно эффект проявляется в распространении мод слоя E. Для однокачковой трассы через F2 слой более заметно изменение интервалов доступности (до 3 часов), чем изменение МПЧ. Пропуски в таблицах соответствуют невозможности распространения радиосигнала одним скачком. Многоскачковые моды не рассматривались из-за их практической неприменимости в задачах загоризонтной радиолокации.

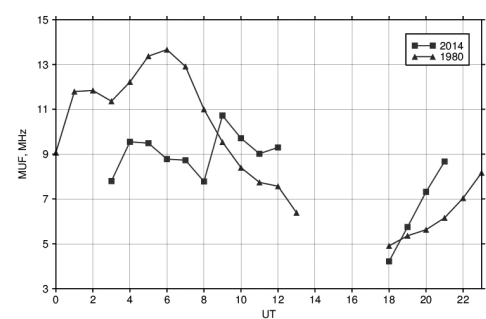


Рис. 1. Суточный ход МПЧ для моды 1F2 на трассе Магадан-Иркутск (Кр = 7, осеннее равноденствие)

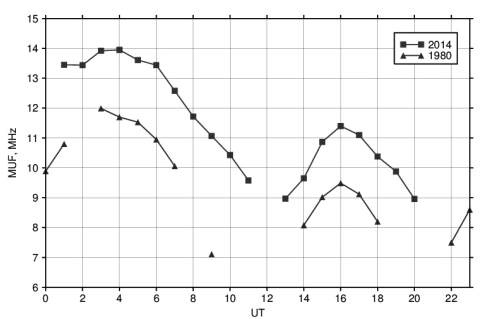


Рис. 2. Суточный ход МПЧ для моды 1E на трассе Магадан-Иркутск (Кр = 7, осеннее равноденствие)

Таблица 1. Изменение МПЧ за период 1980–2014 гг.

Кр = 7			
	Анкоридж-Иркутск	Магадан-Иркутск	Норильск-Иркутск
ВЕСНА	Е: 2.7 МГц F2: –1.3 МГц	Е: 1.9 МГц F2: –1.3 МГц	Е: 2.5 МГц F2: –1.56 МГц
ЛЕТО	Е: 2.66 МГц	Е: 2 МГц F2: –1.93 МГц	Е: 2.32 МГц F2: –0.65 МГц
ОСЕНЬ	Е: 2.81 МГц F2: –1.87 МГц	Е: 3.96 МГц F2: –4.88÷2.94 МГц	Е: 2.12 МГц F2: –0.36÷0.49 МГц
ЗИМА	Е: 2.64 МГц F2: –0.73÷0.49 МГц	Е: 2.05 МГц F2: –0.74÷0.24 МГц	Е: 1.94 МГц F2: –0.49÷0.54 МГц
Кр = 4			
	Анкоридж-Иркутск	Магадан-Иркутск	Норильск-Иркутск
ВЕСНА	Е: 1.9 МГц F2: –1.4 МГц		
ЛЕТО	Е: 1.58 МГц F2: –1.27 МГц	Е: 0.04 МГц F2: –0.82 МГц	Е: 0.18 МГц F2: –0.18÷0.66 МГц
ОСЕНЬ	Е: 1.92 МГц F2: –1.05÷0.47 МГц	Е: 0.07 МГц F2: –0.27÷0.14 МГц	Е: 0.34 МГц F2: –0.09÷0.48 МГц
ЗИМА	Е: 1,85 МГц F2: –0.87÷0.53 МГц	F2: –0.12÷0.36 МГц	F2: 0.4 МГц

Таблица 2. Изменение интервала доступности за период 1980–2014 гг.

Кр = 7			
	Анкоридж-Иркутск	Магадан-Иркутск	Норильск-Иркутск
ВЕСНА	E: –1 ч F2: –3 ч	E: +1 ч F2: –1 ч	E: +3 ч F2: –3 ч
ЛЕТО	E: –4 ч	E: –2 ч F2: –2 ч	E: +1 ч F2: –2 ч
ОСЕНЬ	E: –1 ч F2: –2 ч	E: +4 ч F2: –6 ч	E: +4 ч F2: –6 ч
ЗИМА	E: +1 ч F2: –1 ч	E: +2 ч F2: +1 ч	E: +2 ч F2: –1 ч
Кр = 4			
	Анкоридж-Иркутск	Магадан-Иркутск	Норильск-Иркутск
ВЕСНА	E: –2 ч		
ЛЕТО	E: –2 ч F2: –3 ч	E: без изменений F2: –1 ч	E: без изменений F2: –2 ч
ОСЕНЬ	E: –3 ч F2: –2 ч	E: без изменений F2: без изменений	E: +2 ч F2: +2 ч
ЗИМА	E: +3 ч F2: –3 ч	E: без изменений F2: –1 ч	F2: без изменений

Результаты численного эксперимента показывают, что искажения ионосферы, вызванные изменением геомагнитного поля, сказываются на распространении КВ радиоволн в Восточно-Сибирском и Арктическом секторах РФ. Наиболее критичными результатами являются изменение интервалов доступности для работы в моде 1F2 и небольшое (1–2 МГц) снижение МПЧ и заметное изменение частотных диапазонов для мод слоя E, во многом определяющих помеховую обстановку в КВ диапазоне. Эффект хорошо наблюдается при сильно возмущённых условиях ($K_p = 7$) и остаётся заметен даже при спокойном геомагнитном поле ($K_p = 4$) на длинных трассах, проходящих через арктическую область. Представленные результаты доказывают, что прогностические модели ионосферы для задач КВ радиосвязи и загоризонтной радиолокации должны учитывать текущее состояние геомагнитного поля и его прогноз на ближайшие годы.

Исследования проводились в рамках Гос. задания (проект № 0146-2014-0002).

Литература

Дьяченко А.И. Магнитные полюса Земли. Москва: Издательство Московского центра непрерывного математического образования, 2003. – 48 с. ISBN 5-94057-080-1.

Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Фуллер-Роуэлл Т. Возможные последствия смещения магнитных полюсов для структуры и динамики верхней атмосферы Земли // ДАН. 2006. Т. 409, № 5. С. 688–690.

Ляхов А.Н., Лосева Т.В., Черменин А.В., Гаврилов Б.Г. Численное моделирование изменений ионосферы Земли, вызванных трендом геомагнитного поля // Гелиогеофизические исследования. Выпуск 15, С. 49–58, 2016.

Пономарчук С.Н., Ильин Н.В., Ляхов А.Н., Пензин М.С., Романова Е.Б., Тащилин А.В. Комплексный алгоритм расчета характеристик распространения КВ радиоволн на основе модели ионосферы и плазмосферы и метода нормальных волн // Известия высших учебных заведений. Физика. Т. 59. № 12(2). 2016. С. 70–73.

Cnossen I., Richmond A.D. Changes in the Earth's magnetic field over the past century: Effects on the ionosphere-thermosphere system and solar quiet (Sq) magnetic variation // J. Geophys. Res: SPACE PHYSICS. 2013. V. 118. P. 849–858, doi:10.1029/2012JA018447.

Eyfrig, R.W. The effect of the magnetic declination on the F2 layer // Annales de Geophysique, 19(2), 102–117. 1963.

Fuller-Rowell T., Rees D., Quegan S., et al. A coupled thermosphere-ionosphere model. STEP Handbook on Ionospheric Models /ed. R.W. Schunk. 1996. Utah State University. P. 217–238.

Mandea M., Dormy E. Asymmetric behavior of magnetic dip poles // Earth, Planets and Space. 2003. V. 55, N 3. P. 153–157.

Qian, L., A.G. Burns, B.A. Emery, B. Foster, G. Lu, A. Maute, A.D. Richmond, R.G. Roble, S.C. Solomon, and Wangm W. The NCAR TIE-GCM: A community model of the coupled thermosphere/ionosphere system, in Modeling the Ionosphere-Thermosphere System, AGU Geophysical Monograph Series. 2014. P. 73–84.