

УДК 550.388.2

М.В. Рыбаков, М.И. Карпов, А.А. Намгаладзе

О влиянии вариаций электрического поля на состояние ионосферы над обсерваторией Воейково

M.V. Rybakov, M.I. Karpov, A.A. Namgaladze

On response of the ionosphere over the Voeykovo station on the electric field variations

Аннотация. Проведено вертикальное радиозондирование ионосферы в обсерватории Воейково Ленинградской области (географические координаты 59.95 N, 30.70 E, геомагнитные координаты 56.32 N, 117.96 E) с использованием цифрового ионозонда CADI (The Canadian Advanced Digital Ionosonde) в период с 1 по 28 февраля 2013 г. Измеренные с помощью ионозонда часовые значения критической частоты F2-слоя ионосферы были сопоставлены с вариациями по эмпирическим моделям IRI-2012 и IRI-Plas (International Reference Ionosphere Extended to the Plasmasphere). Значения частот foF2 CADI лежали в диапазоне прогнозных значений IRI-2012 и IRI-Plas. Критические частоты для рассматриваемых условий были также рассчитаны с использованием глобальной трехмерной самосогласованной модели верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model). Результаты моделирования удовлетворительно согласовались с данными измерений, за исключением значений в вечерние часы, близких к заходу Солнца, когда значения foF2 наиболее зависимы от ионосферных электрических полей и термосферных ветров. Изучено влияние меридиональных и зональных компонент электрического поля ионосферы на суточное поведение foF2. Показано, что обе компоненты являются важными, даже несмотря на то что магнитная активность в рассматриваемый период не была высокой ($K_p \leq 4$). Как измерения, так и модельные расчеты показывают, что ионосфера над станцией Воейково ведет себя скорее как субавроральная ионосфера, нежели как среднеширотная.

Abstract. Vertical sounding of the ionosphere has been performed using the CADI ionosonde at the Voeykovo station (geographic coordinates 59.95 N 30.70 E and geomagnetic coordinates 56.32 N 117.96 E), St. Petersburg, Russia, from 1 till 28 February 2013. The hourly values of the F2-layer critical frequency measured by the CADI have been compared with the variations from the empirical models IRI-2012 and IRI-Plas (International Reference Ionosphere extended to the plasmasphere). The CADI foF2 values lie in the range between the IRI-2012 and IRI-Plas predictions. The critical frequencies have been also calculated using the global three-dimensional first principle Upper Atmosphere Model (UAM). The UAM calculated foF2 values agree well with the measured ones with exception of several hours around sunset when the ionospheric electric field and thermospheric winds have the greatest impact on the foF2. The relative role of the meridional and zonal components of the electric field vector in the foF2 diurnal behavior have been investigated. It has been shown that both components are important even though magnetic activity was not too high ($K_p \leq 4$). The measurements and UAM calculations show that the ionosphere over the Voeykovo behaves like the subauroral ionosphere rather than midlatitude one.

Ключевые слова: ионосфера, F2-слой, критическая частота, электрическое поле, термосферные ветры, вертикальное радиозондирование, физико-математическое моделирование, модель верхней атмосферы Земли, субавроральная зона
Key words: ionosphere, F2-layer, critical frequency, electric field, thermospheric winds, vertical sounding, physical mathematical modeling, Upper Atmosphere Model, subauroral zone

1. Введение

Вертикальное радиозондирование является одним из основных методов, позволяющим эффективно проводить мониторинг состояния ионосферы. Полученные данные используются для решения широкого круга практических и теоретических задач. В настоящее время ведутся работы в направлении автоматизации обработки ионограмм и передачи данных ионосферных наблюдений в международную сеть (Гришинцев, Коробейников, 2013).

Помимо результатов вертикального зондирования, для анализа состояния ионосферы широко используются как теоретические (Schunk, Soika, 1996; Namgaladze et al., 1998a,b; 2000; 2003; Mingalev et al., 2011), так и эмпирические модели (Bilitza, 2001; Sergienko, Ivanov, 1993; Schunk, 1996). Эмпирические модели основываются на совокупности данных наблюдений за ионосферой. Такие модели из-за

усреднений не могут воспроизводить распределения параметров, соответствующие нестандартным условиям, например конкретному геомагнитному возмущению. Таким образом, для проведения эффективного мониторинга целесообразно использовать адаптацию ионосферных моделей с учетом данных непосредственных измерений, полученных, в частности, при помощи вертикального зондирования.

Широко используемой эмпирической моделью ионосферы является глобальная модель IRI (International Reference Ionosphere) (*Canadian advanced digital ionosonde*, 2009), рекомендуемая Committee on Space Research (COSPAR) и International Union of Radio Science (URSI). Последняя версия модели IRI-2012 основана на данных измерений мировой сети ионозондов, радаров некогерентного рассеяния, спутников и ракет. Она рассчитывает электронную концентрацию, температуру электронов и ионов; ионный состав и дрейфовую скорость в диапазоне высот от 50 до 1 500 км.

Оценка¹ применимости результатов расчетов по эмпирической модели IRI-2012 в качестве дополнительного инструмента на этапе первоначальной обработки ионограмм и при анализе данных для субавроральной станции СПбф ИЗМИРАН в Воейково Ленинградской области, показала, что в условиях спорадической ионизации необходимо использовать модели высокоширотной ионосферы, включающие блок корпускулярного ионообразования. При определении, является ли ионосфера над станцией Воейково субавроральной или среднеширотной, ионосферные параметры, рассчитанные с применением глобальной трехмерной самосогласованной модели верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model), были сопоставлены с данными вертикального зондирования, а также с прогностическими данными эмпирических моделей IRI-2012 и IRI-Plas (International Reference Ionosphere Extended to the Plasmasphere).

2. Измерения и численные расчеты

В ходе измерений параметров ионосферы на магнито-ионосферной станции Воейково СПбф ИЗМИРАН использовался цифровой ионозонд CADI (The Canadian Advanced Digital Ionosonde) производства Scientific Instrumentation Limited (SIL, Канада) (*Canadian advanced digital ionosonde*, 2009). В таблице приведены основные технические характеристики ионозонда CADI.

Таблица. Технические характеристики ионозонда CADI

Характеристика	Значение
Мощность передатчика, Вт	600
Диапазон высот, км	90–1020
Диапазон частот, МГц	1–20
Разрешение по высоте, км	6
Максимальная длительность импульсов, мкс	40

Для рассматриваемого периода с 1 по 28 февраля 2013 г. анализировались ионограммы вертикального зондирования с временным разрешением 15 мин, доступные в сети Интернет². Часовые и среднемесячные значения критических частот foF2 определялись по ионограммам вертикального зондирования.

В работе (*Nikolaeva et al.*, 2014) указанные реальные данные рассматривались в сопоставлении с расчетом по модели IRI-2012. В настоящей работе данные вертикального зондирования сопоставлялись с прогнозами как модели IRI-2012, так и IRI-Plas, доступные в сети Интернет³.

Кроме того, для рассматриваемых гелиофизических условий были проведены расчеты часовых критических частот F2-слоя ионосферы с использованием модели UAM. Модель охватывает околоземное пространство с высоты 60–80 км (нижняя граница переменная) до геоцентрического расстояния, равного 15 земным радиусам, как единую систему и рассчитывает трехмерные вариации концентраций, скоростей движения и температур нейтральных и заряженных частиц, а также распределение электрического потенциала посредством решения уравнений непрерывности, движения, теплового баланса, а также уравнения для электрического потенциала (*Namgaladze et al.*, 1988; 1998a; 1998b). В проведенных расчетах нейтральный состав находился по эмпирической модели MSIS, скорости нейтрального ветра – по модели HWM-93.

¹ <http://www.sil.sk.ca/cadi.html>.

² <http://www.sphere.izmiran.ru/>

³ <http://ftp.izmiran.ru/pub/izmiran/SPIM/Maps/foF2/2013/>

Среднемесячные значения критических частот foF2, полученные исходя из данных вертикального радиозондирования на станции Воейково, соответствующие значения по эмпирическим моделям IRI-2012 и IRI-Plas, а также рассчитанные значения с использованием теоретической модели UAM приведены на рис. 1. Часовые значения критических частот представлены на рис. 2 и 3.

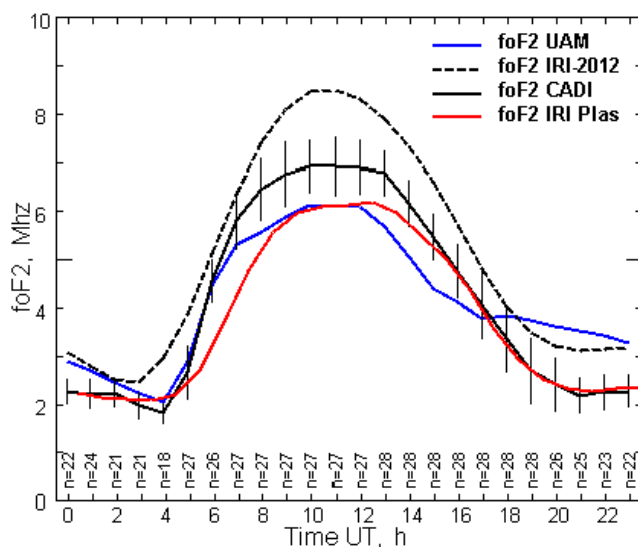


Рис. 1. Среднемесячные значения критических частот foF2 за февраль 2013 г. для каждого часа суток, где n – количество данных foF2 CADI за каждый час. Вертикальными линиями обозначены стандартные отклонения критических частот

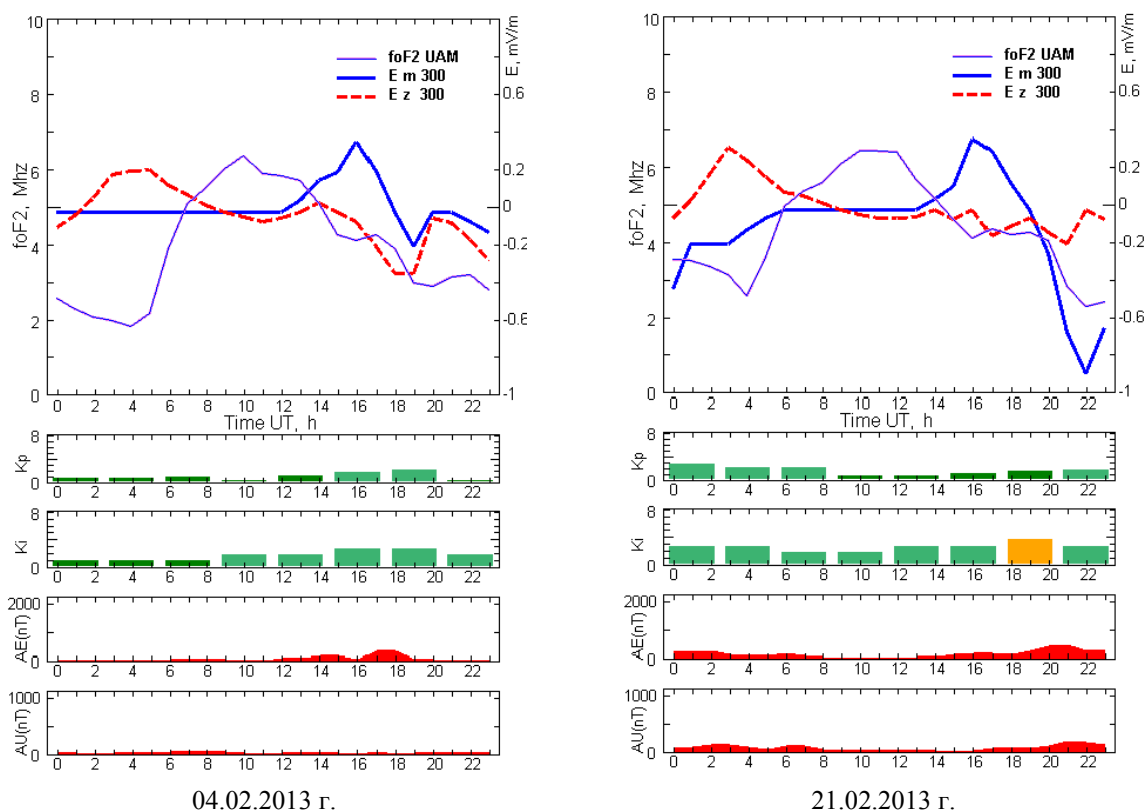


Рис. 2. Рассчитанные по модели UAM значения критических частот foF2, меридиональной и зональной компонент вектора электрического поля на высоте 300 км (Em 300 и Ez 300), а также индексы Kp, Ki, AE, AU для 04.02.2013 и 21.02.2013

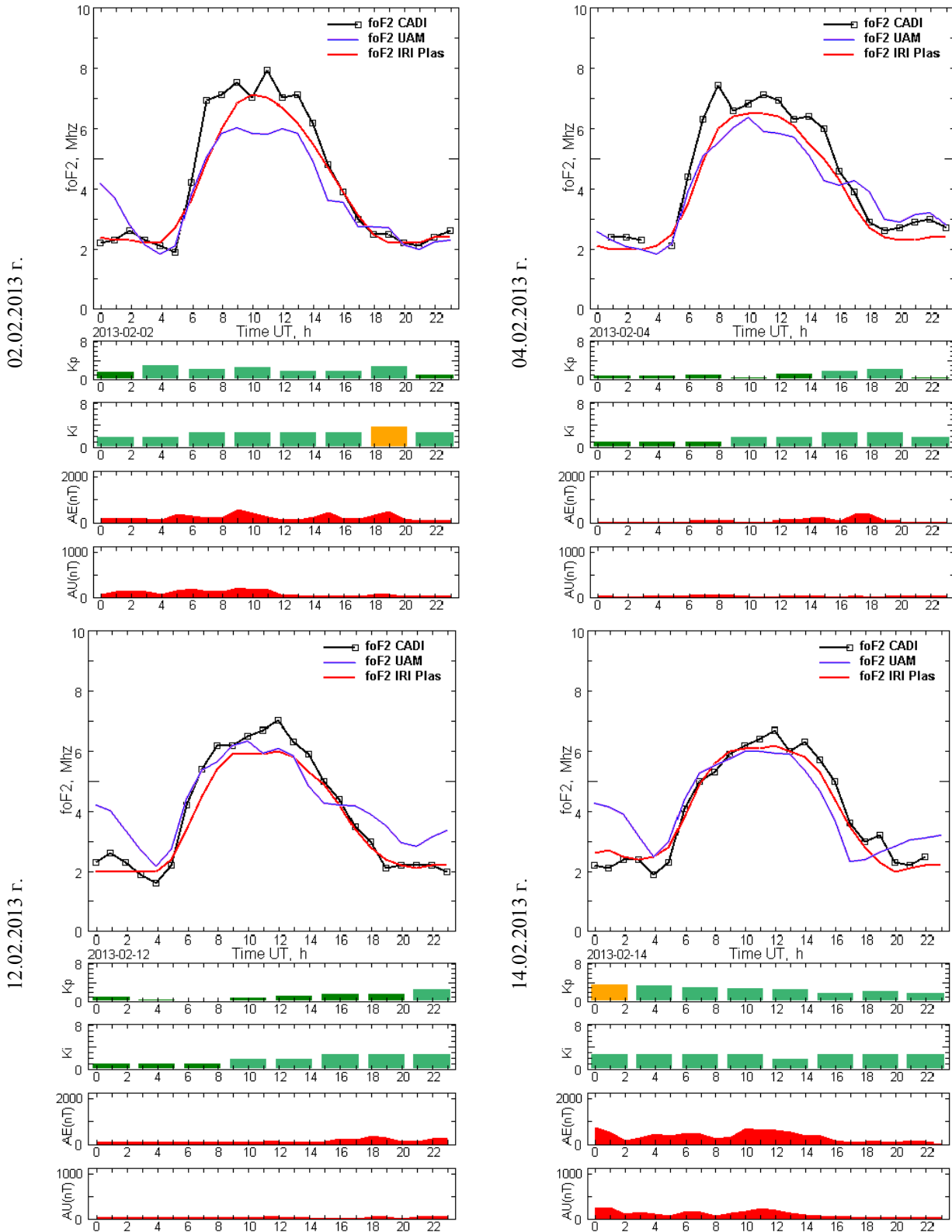


Рис. 3а. Измеренные значения критических частот (foF2 CADI), эмпирические данные (foF2 IRI-Plas), рассчитанные значения (foF2 UAM), а также значения индексов Kp, Ki, AE, AU для некоторых дней февраля 2013 г.

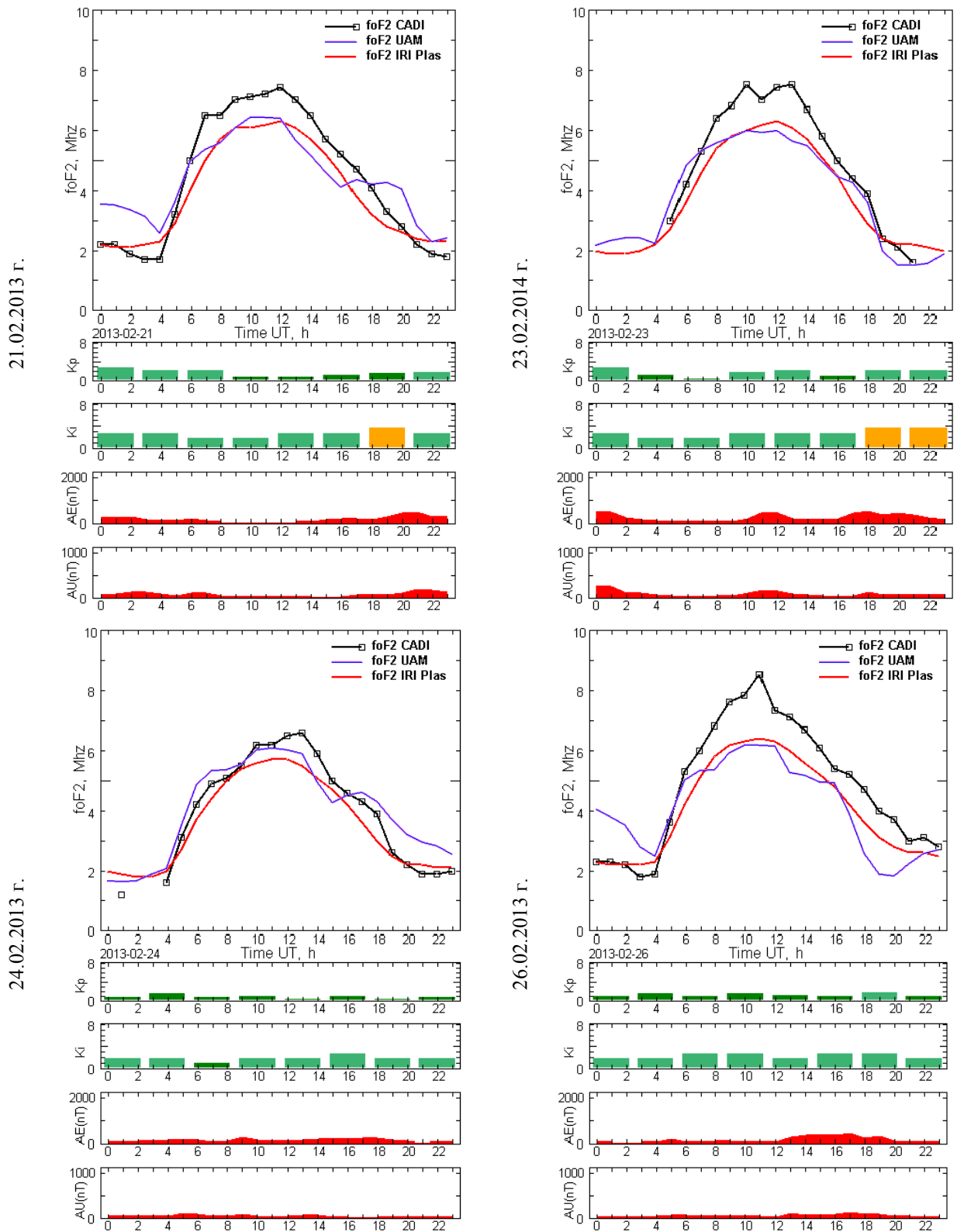


Рис. 36. Измеренные значения критических частот (foF2 CADI), эмпирические данные (foF2 IRI-Plas), рассчитанные значения (foF2 UAM), а также значения индексов Kp, Ki, AE, AU для некоторых дней февраля 2013 г.

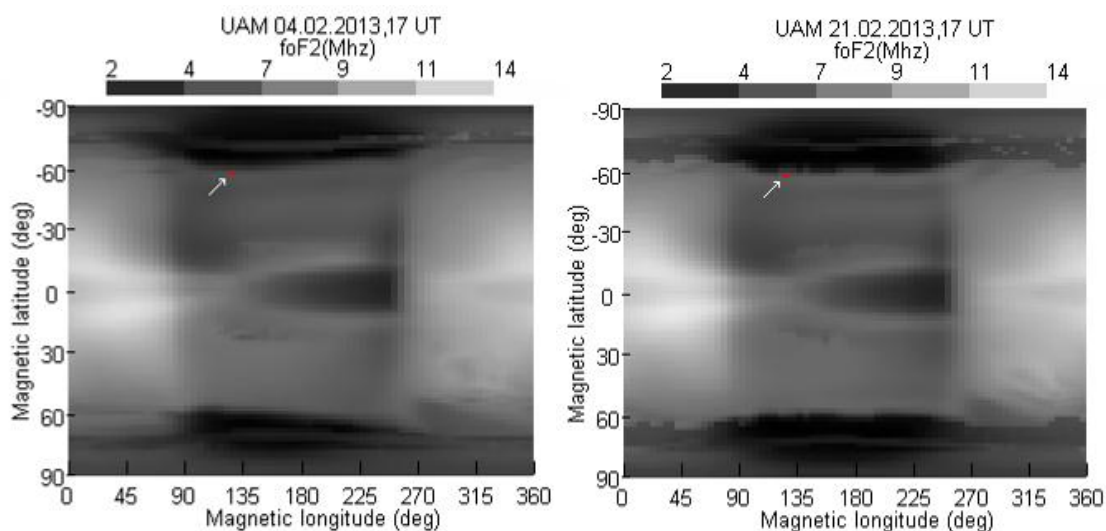


Рис. 4. Карты foF2 UAM, в 17.00 UT 04.02.2013 (слева) и 21.02.2013 (справа). Светлая стрелка указывает на точку Воейково

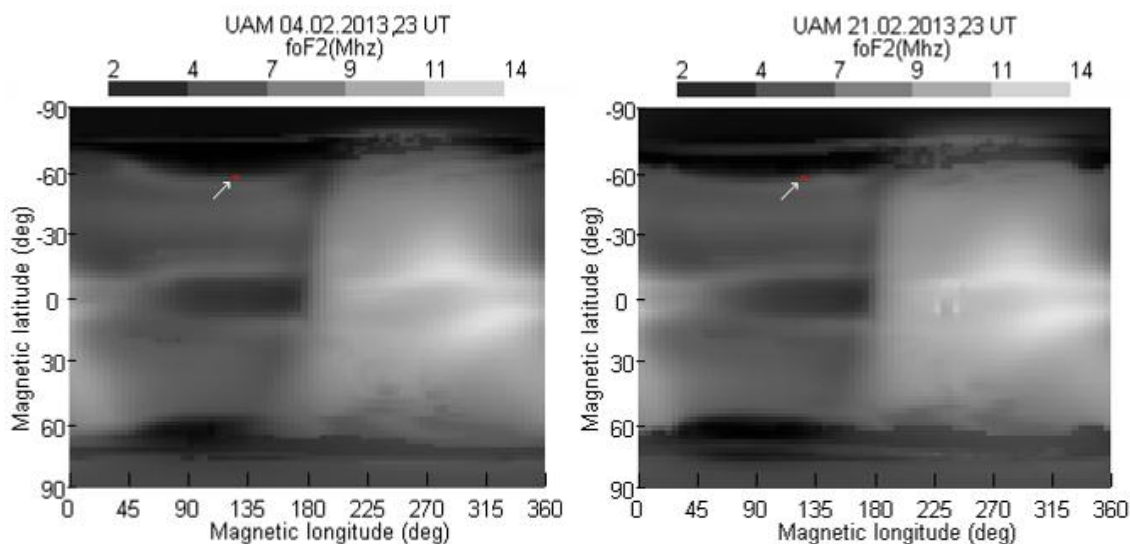


Рис. 5. Карты foF2 UAM, в 23.00 UT 04.02.2013 (слева) и 21.02.2013 (справа). Светлая стрелка указывает на точку Воейково

Как видно из рисунков, реальные данные foF2 находятся в диапазоне значений между прогнозами моделей IRI-2012 и IRI-Plas. Критические частоты, рассчитанные по модели UAM, находятся в удовлетворительном согласии как с данными измерений, так и с эмпирическими данными, за исключением данных измерений, проведенных в часы, близкие к заходу Солнца. В это время суток значительное влияние оказывает электрическое поле ионосферы: меридиональная компонента электрического поля E_m изменяет значения критических частот F2-слоя (рис. 2).

При расчете по модели UAM точка Воейково расположена скорее в субавроральной зоне, нежели в среднеширотной зоне (рис. 4, 5). При этом отмечают большие вариации foF2 на границе зоны, при увеличении K_i , AE, AU вечером 21.02.2013 по отношению к тем же параметрам 04.02.2013.

3. Заключение

В работе проведен анализ суточных данных критических частот F2-слоя ионосферы, измеренных в феврале 2013 г. методом радиозондирования на магнитной станции Воейково, расположенной в средних широтах. Реальные данные были сопоставлены с прогнозными значениями эмпирических моделей IRI-2012 и IRI-Plas, а также с рассчитанными по теоретической модели UAM. Измеренные

значения foF2 находились в диапазоне между значениями по IRI-2012 и IRI-Plas, а также хорошо согласовывались с рассчитанными значениями, за исключением данных измерений, проведенных в вечерние часы. Это отличие объясняется большей зависимостью электронной концентрации в максимуме F2-слоя ионосферы от электрических полей и скоростей термосферных ветров в данное время суток. Таким образом, ионосфера над станцией Воейково ведет себя скорее как типичная субавроральная ионосфера, нежели как среднеширотная.

Полученные результаты используются при обработке ионограмм в СПбф ИЗМИРАН и могут быть применены на магнитно-ионосферных станциях при обработке данных вертикального зондирования ионосферы.

Литература

- Bilitza D.** International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, v. 36, N 2, p. 261-275, 2001.
Canadian advanced digital ionosonde. System manuals. 2233 Hanselman Avenue Saskatoon, SK S7L 67A, Canada: Scientific instrumentation limited, 2009.
- Mingalev O.V., Mingaleva G.I., Melnik M.N., Mingalev V.S.** Numerical simulation of the time evolution of small-scale irregularities in the F-layer ionospheric plasma. *International Journal of Geophysics*, v. 2011, p. 8, 2011.
- Namgaladze A.A., Namgaladze A.N., Yurik R.Yu.** Global modeling of the quiet and disturbed upper atmosphere. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, v. 25, N 5-6, p. 533-536, 2000.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M.** Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. *Pure Applied Geophysics*, v. 127, N 2/3, p. 219-254, 1988.
- Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Namgaladze A.N.** Global model of the upper atmosphere with variable latitudinal integration step. *Geomagnetism and Aeronomy International*, v. 1, N 1, p. 53-58, 1998a.
- Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Volkov M.A., Namgaladze A.N., Yurik R.Yu.** High-latitude version of the global numerical model of the Earth's upper atmosphere. *Proceedings of MSTU*, v. 1, N 2, p. 23-84, 1998b.
- Namgaladze A.N., Evstafiev O.V., Khudukon B.Z., Namgaladze A.A.** Model interpretation of the ionospheric F-region electron density structures observed by ground-based satellite tomography at sub-auroral and auroral latitudes in Russia in January – May 1999. *Annales Geophysicae*, v. 21, N 4, p. 1005-1016, 2003.
- Nikolaeva V.D., Rybakov M.V., Kotikov A.L.** IRI-2012 model adaptability estimation for automated processing of vertical sounding ionograms. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, v. 1, N 89, p. 82-87, 2014.
- Schunk R.W., Soika J.J.** Ionospheric models. *Mod. Ionos. Sci. Ed. Kohl H., Ruster R., Schlegel K. Katlenburg-Lindau: European Geophysical Society*, p. 181-215, 1996.
- Schunk R.W.** STEP Handbook of Ionospheric Models. *Utah State University*, p. 1-25, 1996.
- Sergienko T.I., Ivanov V.E.** A new approach to calculate the excitation of atmospheric gases by auroral electron impact. *Annales Geophysicae*, v. 11, p. 717-727, 1993.
- Грищенко А.Ю., Коробейников А.Г.** Проектирование и технологическая подготовка сетей станций вертикального зондирования ионосферы. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, № 3(85), с. 61-66, 2013.

References

- Bilitza D.** International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, v. 36, N 2, p. 261-275, 2001.
Canadian advanced digital ionosonde. System manuals. 2233 Hanselman Avenue Saskatoon, SK S7L 67A, Canada: Scientific instrumentation limited, 2009.
- Mingalev O.V., Mingaleva G.I., Melnik M.N., Mingalev V.S.** Numerical simulation of the time evolution of small-scale irregularities in the F-layer ionospheric plasma. *International Journal of Geophysics*, v. 2011, p. 8, 2011.
- Namgaladze A.A., Namgaladze A.N., Yurik R.Yu.** Global modeling of the quiet and disturbed upper atmosphere. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, v. 25, N 5-6, p. 533-536, 2000.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M.** Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. *Pure Applied Geophysics*, v. 127, N 2/3, p. 219-254, 1988.

- Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Namgaladze A.N.** Global model of the upper atmosphere with variable latitudinal integration step. *Geomagnetism and Aeronomy International*, v. 1, N 1, p. 53-58, 1998a.
- Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Volkov M.A., Namgaladze A.N., Yurik R.Yu.** High-latitude version of the global numerical model of the Earth's upper atmosphere. *Proceedings of MSTU*, v. 1, N 2, p. 23-84, 1998b.
- Namgaladze A.N., Evstafiev O.V., Khudukon B.Z., Namgaladze A.A.** Model interpretation of the ionospheric F-region electron density structures observed by ground-based satellite tomography at sub-auroral and auroral latitudes in Russia in January – May 1999. *Annales Geophysicae*, v. 21, N 4, p. 1005-1016, 2003.
- Nikolaeva V.D., Rybakov M.V., Kotikov A.L.** IRI-2012 model adaptability estimation for automated processing of vertical sounding ionograms. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, v. 1, N 89, p. 82-87, 2014.
- Schunk R.W., Soika J.J.** Ionospheric models. *Mod. Ionos. Sci. Ed. Kohl H., Ruster R., Schlegel K. Katlenburg-Lindau: European Geophysical Society*, p. 181-215, 1996.
- Schunk R.W.** STEP Handbook of Ionospheric Models. Utah State University, p. 1-25, 1996.
- Sergienko T.I., Ivanov V.E.** A new approach to calculate the excitation of atmospheric gases by auroral electron impact. *Annales Geophysicae*, v. 11, p. 717-727, 1993.
- Grishentsev A.Yu., Korobeynikov A.G.** Proektirovanie i tehnologicheskaya podgotovka setey stantsiy vertikalnogo zondirovaniya ionosfery [Projecting and technological preparation of the net of ionosphere vertical sounding stations]. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik informatsionnykh tehnologiy, mehaniki i optiki*, N 3(85), p. 61-66, 2013.

Информация об авторах

Рыбаков Михаил Васильевич – Санкт-Петербургский филиал института ионосферы, земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, ведущий инженер, e-mail: mvr_spb@rambler.ru

Rybakov M.V. – Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS, Saint-Petersburg Branch, Leading Engineer, e-mail: mvr_spb@rambler.ru

Карпов Михаил Иванович – Политехнический институт МГТУ, кафедра физики, аспирант, мл. науч. сотрудник, e-mail: mikhaikarpov@hotmail.com

Karpov M.I. – Polytechnic Institute of MSTU, Physics Department, Ph.D. Student, Junior Researcher, e-mail: mikhaikarpov@hotmail.com

Намгаладзе Александр Андреевич – Политехнический институт МГТУ, кафедра физики, д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, e-mail: namgaladze@yandex.ru

Namgaladze A.A. – Polytechnic Institute of MSTU, Physics Department, Dr of Phys.-Math. Sci., Professor, Head Scientist, e-mail: namgaladze@yandex.ru