
СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ РЕГУЛЯРНЫХ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ F2-СЛОЯ ПОЛЯРНОЙ И СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ СЕКТОРЕ

SIMILARITIES AND DIFFERENCES BETWEEN REGULAR VARIATIONS OF F2-LAYER PARAMETERS OF THE POLAR AND MIDLATITUDE IONOSPHERE IN EAST SIBERIAN SECTOR

К.Г. Ратовский

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

А.В. Ойнац

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

А.В. Медведев

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

K.G. Ratovsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru*

A.V. Oinats

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, oinats@iszf.irk.ru*

A.V. Medvedev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, medvedev@iszf.irk.ru*

Аннотация. Анализ сходств и различий полярной и среднеширотной ионосферы в восточно-сибирском секторе проведен с помощью созданных локальных моделей ионосферы. Они построены на основе непрерывных шестилетних (декабрь 2002 г. — декабрь 2008 г.) измерений на ионозондах, расположенных в Норильске (69.4° N, 88.1° E) и Иркутске (52.3° N, 104.3° E). Модели описывают регулярные вариации ионосферных параметров в терминах суточно-сезонного хода при низкой солнечной активности и изменения этого хода с возрастанием солнечной активности. Рассмотрены регулярные вариации основных параметров F2-слоя: максимума электронной концентрации N_mF2 и высоты максимума h_mF2 . Особое внимание уделено проявлению на полярной и среднеширотной станциях таких явлений, как зимняя, полугодовая, летняя вечерняя аномалии и формирование ночного максимума в зимней ночной ионосфере. Специфическое суточно-сезонное поведение h_mF2 в Норильске объясняется наибольшим магнитным наклоном и наименьшей геомагнитной широтой по сравнению с другими полярными станциями, находящимися на одной географической широте.

Ключевые слова: полярная и среднеширотная ионосфера, локальная модель, ионозонд.

Abstract. Analysis of similarities and differences between the polar and midlatitude ionosphere in the East Siberian sector was performed with local ionosphere models. The local models were constructed using 6-year (December 2002 — December 2008) continuous measurements made with ionosondes located in Norilsk (69.4° N, 88.1° E) and Irkutsk (52.3° N, 104.3° E). The models describe variations of regular ionospheric parameters in terms of diurnal and seasonal variations under low solar activity and their changes with increasing solar activity. The paper discusses regular variations of the main F2-layer parameters: the electron density maximum (N_mF2) and the peak height (h_mF2). Special attention has been given to the manifestation of such phenomena as the winter anomaly, semiannual anomaly, summer evening anomaly, and formation of the winter night peak at the polar and mid-latitude stations. The specific diurnal and seasonal behavior of h_mF2 in Norilsk is explained by the maximum magnetic inclination and the lowest geomagnetic latitude compared to other polar stations located at the same geographic latitude.

Keywords: polar and midlatitude ionosphere, local model, ionosonde.

ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является сравнение регулярных вариаций параметров F2-слоя полярной и среднеширотной ионосферы в восточно-сибирском секторе. Под регулярными подразумеваются вариации, связанные с суточным и сезонным ходом и изменениями в цикле солнечной активности. Сравнение осуществляется на основе сопоставления данных локальных эмпирических моделей в терминах суточно-сезонного хода ионосферного параметра при низкой солнечной

активности и его изменения с возрастанием солнечной активности. Метод создания локальных моделей описан в следующем разделе.

В качестве ионосферных характеристик выбраны основные параметры F2-слоя: максимум электронной концентрации N_mF2 и высота максимума h_mF2 . Локальные модели построены на основе непрерывных шестилетних измерений (декабрь 2002 г. — декабрь 2008 г.) на ионозондах, расположенных в Норильске (географические координаты: 69.4° N, 88.1° E; геомагнитные координаты: 60° N, 166° E) и Иркутске

(географические координаты: 52.3° N, 104.3° E; геомагнитные координаты: 42° N, 177° E).

По геомагнитной широте (ГШ) ионосфера может быть условно разделена на три зоны: низкоширотную (ГШ<30°), среднеширотную (30°<ГШ<60°) и высокоширотную, или полярную (ГШ>60°) [Hunsucker, Hargreaves, 2003; Schunk, Nagy, 2009]. В среднеширотной ионосфере суточно-сезонные вариации обусловлены изменением скорости образования ионов, пропорциональной косинусу зенитного угла Солнца, скорости рекомбинации ионов, зависящей от состава нейтральных частиц, а также дрейфом плазмы, обусловленным действием амбиполярной диффузии и нейтрального ветра. В свою очередь, состав нейтральных частиц определяется глобальной циркуляцией и температурой термосферы [Rishbeth, 1998]. В высокоширотной ионосфере к вышеупомянутым факторам добавляется выпадение частиц и дрейф плазмы, обусловленный воздействием электрического поля магнитосферного происхождения [Hunsucker, Hargreaves, 2003; Schunk, Nagy, 2009]. Одним из следствий дрейфа плазмы является формирование главного ионосферного провала [Spigo et al., 1978].

Региональной особенностью восточно-сибирского сектора ионосферы является то, что он максимально удален от магнитного полюса Земли по сравнению с другими долготными секторами. Следствием такого расположения является существенно разное проявление зимней и полугодовой аномалий по сравнению с североамериканским сектором ионосферы, максимально приближенным к магнитному полюсу Земли. По этой причине в работе особое внимание уделено анализу таких явлений, как зимняя, полугодовая, летняя вечерняя аномалии и формирование ночного максимума в зимней ночной ионосфере.

По определению зимняя аномалия заключается в том, что в дневное время зимние значения N_mF2 превышают летние, а полугодовая аномалия — в том, что в дневное время значения N_mF2 в равноденствия больше, чем в солнцестояния [Rishbeth, 1998]. Причиной обеих аномалий является противоположный сезонный ход косинуса зенитного угла Солнца $\cos\chi$ и отношения атомарного кислорода к молекулярному азоту $[O]/[N_2]$ [Rishbeth, 1998; Rishbeth et al., 2000b; Zou et al., 2000]. Поскольку значение N_mF2 пропорционально как $\cos\chi$, так и $[O]/[N_2]$, сезонный максимум дневного N_mF2 может наблюдаться и зимой, и летом, и в равноденствие в зависимости от региона и уровня солнечной активности [Zou et al., 2000; Тогг, Тогг, 1973].

Летняя вечерняя аномалия заключается в том, что летом вечерние значения N_mF2 (вблизи заката) превышают полуденные. Обозначение этой аномалии как «летняя вечерняя» появилось сравнительно недавно. Исторически первым появился термин «аномалия моря Уэдделла» (Weddell Sea Anomaly), обозначавший регион в Южном полушарии, где в летнее время ночные значения N_mF2 превышали дневные [Bellchambers, Piggott, 1958]. Затем появился термин «среднеширотная летняя ночная аномалия» (mid-latitude summer nighttime anomaly), обозначаю-

щий, что аномалия моря Уэдделла существует и в Северном полушарии, хотя проявляется заметно слабее, чем в Южном [Thampi et al., 2011; Lin et al., 2010]. Для обозначения этого явления в Северном полушарии также используется термин «якутская аномалия» [Клименко и др., 2013], подчеркивающий, что для Северного полушария этот эффект был впервые зарегистрирован на якутской ионосферной станции [Мамруков, 1971]. Термин «летняя вечерняя аномалия», используемый в данной работе, объединяет эффект превышения ночных значений над дневными с эффектом формирования суточного максимума N_mF2 в вечернее время в единое явление, имеющее общую причину [Burns et al., 2011].

Объяснение этого явления, предложенное в работе [Kohl et al., 1968], заключается в том, что вечерний либо ночной максимумы в летнем суточном ходе формируются за счет подъема ионосферного слоя в область более высокого отношения $[O]/[N_2]$, что компенсирует уменьшение $\cos\chi$. В свою очередь, подъем ионосферного слоя обусловлен сменой направления нейтрального ветра с дневного (к полюсу) на ночное (к экватору). Для формирования максимума важно выполнение двух условий: 1) смена направления ветра должна произойти в освещенное время суток; 2) наклонение магнитного поля I не должно быть близко 90°, поскольку эффективность подъема слоя пропорциональна $\cos/\sin I$. Очевидно, что одновременное выполнение этих двух условий формирует оптимальный диапазон широт для развития летней вечерней аномалии, а несовпадение географического и магнитного полюсов формирует оптимальный долготный сектор. Согласно данным спутника «Интеркосмос-19» [Карпачев и др., 2011; Клименко и др., 2013], летняя вечерняя аномалия наиболее развита в районе 65° N, 90° W в Южном полушарии и в районе 60° N, 150° E в Северном, причем в Южном полушарии аномалия развита заметно сильнее. Необходимо отметить, что в настоящее время объяснение явления летней вечерней аномалии далеко до завершения. Кроме механизмов, предложенных в работе [Kohl et al., 1968], исследуется влияние электрических полей, вариаций химического состава и потоков плазмы из плазмосферы в ионосферу [Burns et al., 2011, Карпачев и др., 2011; Клименко и др., 2013; Thampi et al., 2011; Lin et al., 2010].

Существование ночного максимума в зимней ночной ионосфере в некоторых работах [Jakowski, Förster, 1995; Полех и др., 2013] называют ночной зимней аномалией, хотя в работе [Jakowski, Förster, 1995] подчеркивается, что аномалией это явление становится, когда ночные значения N_mF2 зимой больше, чем летом. Другим термином для обозначения этого эффекта является «зимнее ночное повышение» электронной концентрации [Farello et al., 2002; Mikhailov et al., 2000]. Согласно работам [Farello et al., 2002; Mikhailov et al., 2000], благоприятствующими факторами для формирования ночного максимума являются повышение скорости ночного нейтрального ветра, низкие значения концентрации молекулярного азота $[N_2]$ и кислорода $[O_2]$ и высокое электронное содержание в плазмосферной силовой

трубке. Авторы работы [Jakowski, Förster, 1995] пришли к выводу, что ночная зимняя аномалия (ночные значения N_mF2 зимой выше, чем летом) наблюдается: а) при низком уровне солнечной активности, б) на средних геомагнитных широтах, в) при максимальном смещении друг относительно друга географических и геомагнитных широт (оптимальными являются североамериканский сектор в Северном полушарии и австралийский сектор в Южном на геомагнитных широтах $\sim 40^\circ$).

МЕТОД СОЗДАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Создание локальных эмпирических моделей [Zhang et al., 2004, 2005; Lei et al., 2005; Blanch et al., 2007; Altadill et al., 2008; Ratovsky, Oinats, 2011; Ratovsky et al., 2013] перспективно с различных точек зрения. Прикладное значение локальных моделей заключается в том, что они учитывают различные региональные особенности, которые в той или иной степени отсутствуют в глобальных моделях, например в международной справочной модели ионосферы IRI [Bilitza, 2001; Bilitza, Reinisch, 2008]. В итоге локальная модель дает более точный прогноз ионосферных параметров по сравнению с глобальной моделью [Oinats et al., 2006; Ratovsky et al., 2009; Ratovsky, Oinats, 2011; Ratovsky et al., 2013]. Другой аспект применения локальных моделей состоит в том, что они, давая полную картину вариаций, обусловленных суточно-сезонным ходом и его изменением в цикле солнечной активности, являются полезным инструментом выявления региональных особенностей и объяснения механизмов их формирования. Метод создания локальных моделей детально описан в работе [Ratovsky, Oinats, 2011], здесь мы повторим основные принципы.

Исходными данными для построения модели являются ионосферные параметры, полученные с 15-минутным шагом на ионозондах (дигизондах DPS-4 [Reinisch et al., 1997]), расположенных в Норильске и Иркутске. Все ионограммы ионозондов обрабатывались с помощью программного комплекса интерактивной обработки ионограмм SAO Explorer [Reinisch et al., 2004; Khmyrov et al., 2008].

Каждый параметр P может рассматриваться как функция местного времени LT , дня года D и года Y , т. е. $P(LT, D, Y)$. Для всех параметров были рассчитаны скользящие 27-дневные медианы $P_{med}(LT, D, Y)$, представляющие собой медианные значения для ряда $\{P(LT, D-13, Y), \dots, P(LT, D+13, Y)\}$. Предполагается, что 27-дневные медианы отражают вариации, связанные с суточным и сезонным ходом, а также циклом солнечной активности, поскольку более короткопериодные вариации (менее 27 дней в данном случае) подавлены усреднением.

В качестве единицы сезонных вариаций выбран месяц M , эквивалентный $T/12$, где $T=365.25$ дней — длительность солнечного года Y_S . Солнечный год начинается с зимнего солнцестояния высокосного года (21 декабря). Месяц M непрерывно изменяется от 0 до 12, $M=0$ соответствует началу Y_S (зимнему солнцестоянию), $M=3$ и 9 — весеннему и осеннему

равноденствиям, $M=6$ — летнему солнцестоянию. Поскольку одинаковые дни года различных лет не точно соответствуют одинаковым значениям месяца, ряды $P_{med}(LT, D, Y)$ с помощью линейной интерполяции были преобразованы в ряды $P_{med}(LT, M, Y_S)$ с одинаковым шагом по M .

Основное допущение модели заключается в том, что медианы ионосферных параметров P_{med} имеют линейную зависимость от индекса солнечной активности $F10.7$. Таким образом, медианное значение $P_{med}(LT, M, Y_S)$ может рассматриваться как $P_{med}(LT, M, F10.7)$, где $F10.7$ — индекс солнечной активности для данного M и Y_S . В предположении о линейной зависимости от $F10.7$ оно может быть представлено в виде

$$P_{med}(LT, M, F10.7) = P_0(LT, M) + P_D(LT, M) \times (F10.7 - F10.7_0) / F10.7_{100}, \quad (1)$$

где P_0 — значение параметра при низкой солнечной активности, т. е. при $F10.7 = F10.7_0 = 70$ с.е.п. ($1 \text{ с.е.п.} = 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$), P_D — скорость роста параметра с индексом $F10.7$. Для более компактного представления P_D нормирован на величину $F10.7_{100} = 100$ с.е.п. и в дальнейшем выражается в единицах [единицы параметра / 100 с.е.п.].

Модельные параметры $P_0(LT, M)$ и $P_D(LT, M)$ рассчитывались с помощью линейной регрессии, описываемой выражением (1). При этом использовались не ежедневные значения $F10.7$, а скользящие средние ежедневных значений. Проверка различных периодов усреднения $F10.7$ показала, что оптимальным периодом с точки зрения минимизации ошибки линейной регрессии является 1 год. По-видимому, данный факт отражает то обстоятельство, что внутригодовые вариации $F10.7$ не всегда находят адекватное отражение в вариациях ионосферных параметров. Необходимо отметить, что в международной модели IRI [Bilitza, 2001; Bilitza, Reinisch, 2008] также используется среднегодовое значение индекса солнечной активности (среднегодовое число солнечных пятен R_{z12}).

Для получения значений P_0 и P_D для произвольных LT и M использовалась аппроксимация локальных B-сплайнами рядов P_0 и P_D , рассчитанных с шагом ΔLT и ΔM . На основании проведенных тестовых расчетов были выбраны: $\Delta LT = 0.5$ ч и $\Delta M = 1$.

МОРФОЛОГИЯ N_mF2

На рис. 1 показаны суточно-сезонные вариации максимума электронной концентрации N_mF2 как функции LT и M при низкой солнечной активности ($F10.7 = 70$ с.е.п.) для Иркутска и Норильска. В данной статье границы рассвета и заката приняты по зенитному углу Солнца $\chi = 95^\circ$.

Видно, что суточно-сезонный ход N_mF2 для Иркутска характеризуется тремя максимумами: главным максимумом в полдень осенью 26 октября ($N_mF2 = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $LT = 12$, $M = 10.1$), вторым максимумом около полудня весной 23 марта ($N_mF2 = 4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $LT = 12:45$, $M = 3$) и третьим максимумом в летнее вечернее время 31 мая ($N_mF2 = 3.9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $LT = 21$, $M = 5.3$). Полуденное значение N_mF2 в зимнее солнцестояние

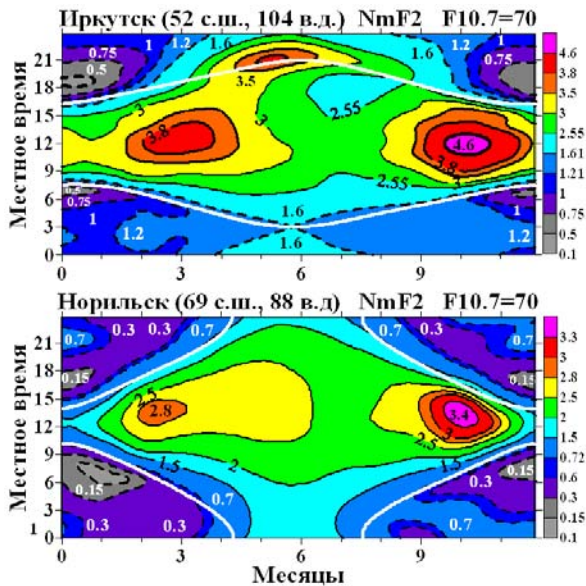


Рис. 1. Суточно-сезонные вариации N_mF_2 в $[10^5 \text{ см}^{-3}]$ при низкой солнечной активности для Иркутска (вверху) и Норильска (внизу). Сплошные белые линии показывают рассвет и закат по $\chi=95^\circ$. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

стояние ($3.3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$) выше, чем в летнее ($2.9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$). Суточный ход в летнее солнцестояние характеризуется вечерним максимумом ($N_mF_2=3.7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $LT=21:15$), утренним минимумом ($N_mF_2=1.6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $LT=3$) и промежуточным полуденным значением ($N_mF_2=2.9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$). Наименьшие значения N_mF_2 наблюдаются вблизи зимнего солнцестояния ($M=0.6$, 10 января) в послезакатные ($N_mF_2=0.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $LT=18:45$) и предрассветные ($N_mF_2=0.7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $LT=7$) часы. Видно также, что в зимнее время (приблизительно ± 2 месяца от зимнего солнцестояния) в ионосфере над Иркутском формируется ночной максимум около 2–2:30 LT (более подробные характеристики максимума будут представлены в разделе «Обсуждение»). Таким образом, суточно-сезонный ход N_mF_2 над Иркутском при низкой солнечной активности показывает наличие как зимней, так и полугодовой аномалии, летней вечерней аномалии и формирование ночного максимума в зимнее время.

Так же как и в случае Иркутска, наибольшие значения N_mF_2 над Норильском наблюдаются днем осенью 23 октября ($N_mF_2=3.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $LT=13:45$, $M=10$) и весной 5 марта ($N_mF_2=2.9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $LT=13:45$, $M=2.4$). Наименьшие значения N_mF_2 наблюдаются зимой в послезакатные и предрассветные часы. Абсолютный минимум $N_mF_2=0.12 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ соответствует $LT=6:30$, $M=1.4$ (2 февраля), наименьшее значение послезакатного минимума наблюдается вблизи зимнего солнцестояния 19 декабря ($N_mF_2=0.2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $LT=16:45$, $M=11.9$). По сравнению с Иркутском ночной максимум выражен сильнее и наблюдается на более длительном сезонном интервале. Кардинальными отличиями суточно-сезонной картины над Норильском по сравнению с Иркутском являются: а) отсутствие зимней аномалии: полуденное значение N_mF_2 в летнее солнцестояние ($2.6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$) выше, чем в зимнее ($1.6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$); б) отсутствие летней вечерней аномалии. Суточный ход в летнее солнцестояние харак-

теризуется пологим послеполуденным максимумом $N_mF_2=2.6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и пологим послеполуночным минимумом $N_mF_2=1.9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ с промежуточными значениями между ними.

Отсутствие летней вечерней аномалии в Норильске достаточно просто объясняется на основе механизма, предложенного в работе [Kohl et al., 1968]. С одной стороны, летняя ионосфера над Норильском круглосуточно освещена Солнцем, что создает благоприятные условия для развития аномалии. С другой стороны, эффективность подъема ионосферного слоя, обусловленная сменой направления нейтрального ветра, очень низка вследствие большого магнитного наклона $I=83^\circ$, $\cos I/\sin I=0.12$. Для сравнения: в Иркутске магнитное склонение составляет $I=72^\circ$, а $\cos I/\sin I=0.29$, т. е. в Иркутске эффективность подъема слоя в ~ 2.4 раза выше, чем в Норильске.

На рис. 2 показаны суточно-сезонные вариации скорости роста N_mF_2D с индексом $F_{10.7}$ как функции LT и M для Иркутска и Норильска. Скорость роста N_mF_2D показывает, насколько изменяется N_mF_2 при возрастании $F_{10.7}$ на 100 с.е.п. Видно, что для обеих станций наибольшая скорость роста наблюдается в дневное время вблизи зимнего солнцестояния: $N_mF_2D=14 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}/100$ с.е.п. при $LT=12:45$, $M=0.2$ (30 декабря) для Иркутска и $N_mF_2D=8.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}/100$ с.е.п. при $LT=13:30$, $M=0.9$ (18 января) для Норильска. Такое сезонное поведение дневного N_mF_2D означает, что с ростом солнечной активности в Иркутске усиливается зимняя аномалия, ослабляется полугодовая аномалия, зимний провал между осенним и весенним максимумами начинает «зарастать», а при экстремальном значении $F_{10.7}=250$ с.е.п. сезонный ход полуденного N_mF_2 характеризуется практически постоянным значением $\sim 28 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ с конца октября до начала января. Для Норильска сезонное поведение дневного N_mF_2D означает появление зимней аномалии при $F_{10.7}>110$ с.е.п. и такие же трансформации сезонного хода, как в Иркутске.

На рис. 2 видно, что для обеих станций суточный ход N_mF_2D в летнее солнцестояние подобен суточному ходу N_mF_2 при низкой солнечной активности. Это означает, что летняя вечерняя аномалия присутствует в Иркутске и отсутствует в Норильске при любом уровне солнечной активности (более подробно обсуждение изменения летней вечерней аномалии с ростом солнечной активности будет представлено в разделе «Обсуждение»).

Наиболее существенное различие между станциями проявляется в том, что ночью скорость возрастания N_mF_2 в Норильске заметно выше, чем в Иркутске, особенно в послеполуночное время. В летнее время N_mF_2D в Норильске выше, чем в Иркутске, в течение ~ 4 ч (01:30–05:15 LT), а в зимнее время — в течение 11 ч (20:30–07:30 LT). Среднегодовое различие для интервала 01:30–05:15 LT составляет $1.4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}/100$ с.е.п. Следует отметить, что это различие обусловлено аномально низкой скоростью возрастания N_mF_2 в Иркутске в ночное время (более детально эта особенность ионосферы над Иркутском будет рассмотрена в разделе «Обсуждение»).

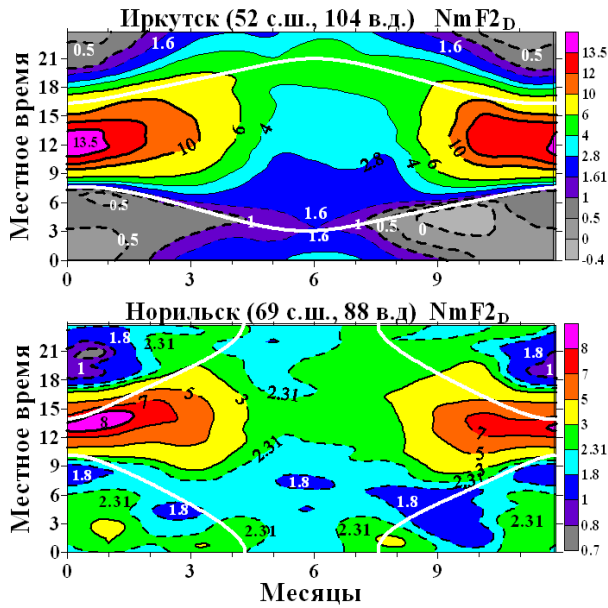


Рис. 2. Суточно-сезонные вариации скорости роста N_mF2_D с индексом $F10.7$, [$10^5 \text{ см}^{-3}/100 \text{ с.е.п.}$] для Иркутска (вверху) и Норильска (внизу). Сплошные белые линии показывают рассвет и закат по $\chi=95^\circ$. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

Из рис. 2 видно, что для Иркутска в зимнее время в суточном поведении N_mF2_D отсутствует ночной максимум. Скорость роста монотонно спадает от дневных значений к ночным, достигая наименьших значений на интервале 0–3 LT, т. е. на интервале формирования ночного максимума при низкой солнечной активности. Такое поведение N_mF2_D означает, что с ростом солнечной активности в Иркутске начинает исчезать зимний ночной максимум за счет «зарастания» послезакатного минимума и слабого возрастания на интервале максимума. В отличие от Иркутска, в норильском зимнем суточном ходе N_mF2_D присутствует ночной локальный максимум, при этом время максимума (3–4 LT) отличается от времени формирования максимума при низкой солнечной активности (21–22 LT).

МОРФОЛОГИЯ h_mF2

На рис. 3 показаны суточно-сезонные вариации высоты максимума h_mF2 как функции LT и M при низкой солнечной активности ($F10.7=70$ с.е.п.) для Иркутска и Норильска. Суточно-сезонный ход в Иркутске характеризуется большим суточным перепадом от 208–297 км в зимнее солнцестояние до 224–284 км в летнее и небольшим сезонным перепадом от 208–227 км днем до 284–301 км ночью. Такая суточно-сезонная структура типична для среднеширотных станций Северного полушария [Rishbeth et al., 2000a].

Видно, что кардинальным отличием суточно-сезонного хода h_mF2 в Норильске является небольшой суточный перепад летом (217–247 км в летнее солнцестояние) и, как следствие, большой сезонный перепад ночью (247–315 км). Такой суточно-сезонный ход, h_mF2 в Норильске только на первый взгляд может показаться аномальным. Суточно-сезонная картина

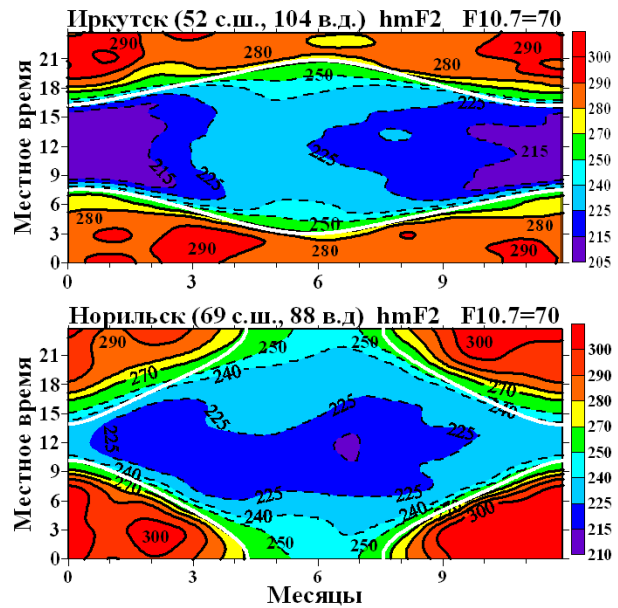


Рис. 3. Суточно-сезонные вариации h_mF2 , [км] при низкой солнечной активности для Иркутска (вверху) и Норильска (внизу). Сплошные белые линии показывают рассвет и закат по $\chi=95^\circ$. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

h_mF2 формируется вариациями балансной высоты (высоты максимума при отсутствии ветра) и нейтрального ветра [Zhang et al., 1999]. Балансная высота минимальна днем и максимальна ночью, а нейтральный ветер сдвигает h_mF2 относительно балансной высоты вниз днем и вверх ночью [Zhang et al., 1999]. С учетом того, что летняя ионосфера над Норильском круглосуточно освещена Солнцем, а эффективность подъема ионосферного слоя, обусловленная воздействием нейтрального ветра, очень низка вследствие большого магнитного склонения (см. объяснение отсутствия летней вечерней аномалии), небольшой суточный перепад в летнее время выглядит совершенно естественным. Можно обратить внимание на то, что для обеих станций большие (>270 км) и малые (<270 км) значения h_mF2 приблизительно разделены линиями рассвета и заката. Таким образом, для обеих станций суточно-сезонное поведение h_mF2 является совершенно нормальным в том смысле, что соответствует поведению зенитного угла Солнца χ .

На рис. 4 показаны суточно-сезонные вариации скорости роста высоты максимума h_mF2_D с индексом $F10.7$ как функции LT и M для Иркутска и Норильска. Скорость роста h_mF2_D показывает, на сколько километров изменяется h_mF2 при возрастании $F10.7$ на 100 с.е.п. Видно, что для обеих станций суточно-сезонное поведение h_mF2_D характеризуется «пятнистой» структурой, т. е. гладкая структура поведения h_mF2 при низкой солнечной активности с ростом индекса $F10.7$ нарушается.

Для Норильска скорость роста h_mF2 в освещенное время суток в основном выше, чем в неосвещенное. В частности, это означает, что с ростом солнечной активности ночной сезонный перепад будет уменьшаться, т. е. соответствие вариаций h_mF2 ходу зенитного угла Солнца имеет место только при низкой солнечной активности.

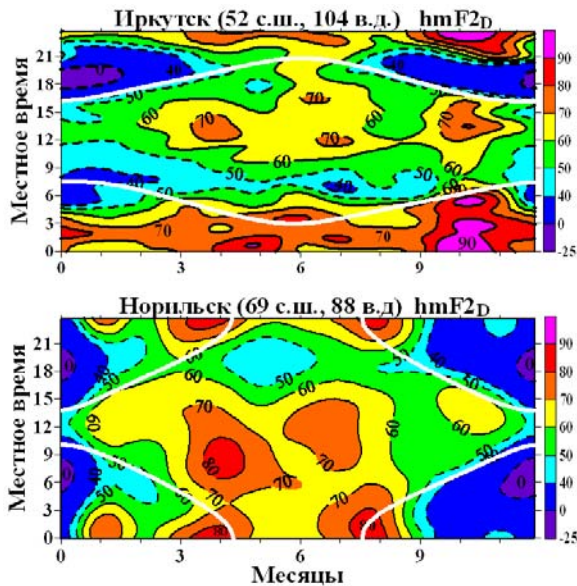


Рис. 4. Суточно-сезонные вариации скорости роста h_mF2 с индексом $F10.7$ в [км/100 с.е.п.] для Иркутска (вверху) и Норильска (внизу). Сплошные белые линии показывают рассвет и закат по $\chi=95^\circ$. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

Для Иркутска наибольшая скорость роста h_mF2 с индексом $F10.7$ наблюдается в послеполуночное время, т. е. в то же время, когда наблюдается наименьшая скорость возрастания N_mF2 (более детально эта особенность ионосферы над Иркутском будет рассмотрена в разделе «Обсуждение»).

ОБСУЖДЕНИЕ

Для того чтобы количественно охарактеризовать степень развития рассмотренных аномалий, удобно ввести безразмерные коэффициенты. Для зимней аномалии коэффициент определяется отношением полуденного N_mF2 в зимнее солнцестояние к полуденному N_mF2 в летнее солнцестояние:

$$K_w = N_mF2(LT=12, M=0) / N_mF2(LT=12, M=6),$$

а для полугодовой аномалии — отношением суммы полуденных N_mF2 в равноденствия к сумме полуденных N_mF2 в солнцестояния:

$$K_e = ((N_mF2(12, 3) + N_mF2(12, 9)) / ((N_mF2(12, 0) + N_mF2(12, 6))).$$

Степень развития летней вечерней аномалии характеризуется отношением N_mF2 в 21 LT к полуденному значению во время летнего солнцестояния:

$$K_s = N_mF2(LT=21, M=6) / N_mF2(LT=12, M=6),$$

а степень развития зимнего ночного максимума — отношением N_mF2 в максимуме (LT_m) к полусумме значений N_mF2 в минимумах (LT_1 и LT_2) во время зимнего солнцестояния:

$$K_n = 2N_mF2(LT=LT_m, M=0) / (N_mF2(LT=LT_1, M=0) + N_mF2(LT=LT_2, M=0)).$$

Выбор летнего и зимнего солнцестояния для коэффициентов K_s и K_n соответственно обусловлен тем, что именно в эти сезоны коэффициенты принимают максимальные значения. Значения коэффи-

циентов для N_mF2 при низкой солнечной активности ($F10.7=70$ с.е.п.) и скорости роста N_mF2 с индексом $F10.7$ (N_mF2_D) представлены в таблице.

Видно, что зимняя аномалия при любом уровне солнечной активности проявляется в Иркутске сильнее, чем в Норильске, и усиливается с ростом солнечной активности для обеих станций. Полугодовая аномалия демонстрирует противоположное поведение (проявляется в Норильске сильнее, чем в Иркутске, и ослабляется с ростом солнечной активности). Летняя вечерняя аномалия проявляется только в Иркутске и несколько усиливается с ростом солнечной активности. Зимний ночной максимум сильнее выражен в Норильске. С ростом солнечной активности зимний ночной максимум исчезает в Иркутске и ослабляется в Норильске.

Свойства зимней и полугодовой аномалий, выявленные на основе локальных моделей, укладываются в общепринятые представления об этих явлениях. При низкой солнечной активности поведение зимней и полугодовой аномалий в Иркутске и Норильске полностью согласуется с моделированием аномалий на основе модели СТИР (Coupled Thermosphere-Ionosphere-Plasmasphere) [Rishbeth et al., 2000b; Zou et al., 2000]. Усиление зимней аномалии не воспроизводится моделью СТИР, однако является хорошо известным эмпирическим фактом [Rishbeth et al., 2000b; Zou et al., 2000; Торг, Торг, 1973].

Наличие летней вечерней аномалии в Иркутске и ее отсутствие в Норильске косвенно согласуются с глобальными картами критической частоты, построенными по данным спутника «Интеркосмос-19» [Клименко и др., 2013]. Причина отсутствия летней вечерней аномалии в Норильске объясняется большим магнитным наклоном станции и, как следствие, слабым воздействием нейтрального ветра на ионосферу над Норильском. Согласно результатам работы [Kohl et al., 1968], ветер играет ключевую роль в формировании аномалии. Следует отметить, что, используя лишь различие в магнитных наклонениях, можно объяснить разницу в проявлении аномалии между Иркутском и Норильском, но нельзя объяснить аналогичную разницу между Якутском, где аномалия ярко выражена, и Санкт-Петербургом, где аномалия отсутствует [Мамруков, 1971].

Тот факт, что зимний ночной максимум выражен сильнее в Норильске, чем в Иркутске, лишь отчасти согласуется с механизмами формирования максимума, предложенными в работах [Farello et al., 2002; Mikhailov et al., 2000; Jakowski, Förster, 1995]. Например, такие факторы, как повышение скорости ночного нейтрального ветра [Farello et al., 2002; Mikhailov et al., 2000] и более благоприятные условия на средних геомагнитных широтах [Jakowski, Förster, 1995], способствуют более выраженному максимуму в Иркутске. Из факторов, благоприятствующих более сильному максимуму в Норильске, можно выделить высокое электронное содержание в плазмосферной силовой трубке (максимум реализуется на геомагнитных широтах $\sim 60^\circ$ [Farello et al., 2002]) и, возможно, более низкие значения концентрации молекулярного азота [N_2] и кислорода [O_2] [Farello et al.,

Таблица коэффициентов развития аномалий

Станция	N_mF2 при $F10.7=70$ с.е.п.				Скорости роста N_mF2 с $F10.7$			
	K_w	K_e	K_s	K_n	K_w	K_e	K_s	K_n
Иркутск	1.15	1.22	1.25	2.12	4.20	1.07	1.42	—
Норильск	—	1.32	—	4.10	2.95	1.14	—	2.72

2002; Mikhailov et al., 2000]. Отметим, что ослабление зимнего ночного максимума с ростом солнечной активности полностью согласуется с результатами работ [Farelo et al., 2002; Mikhailov et al., 2000; Jakowski, Förster, 1995].

Специфическими особенностями суточно-сезонного поведения h_mF2 в Норильске при низкой солнечной активности являются небольшой суточный перепад в летнее время и большой сезонный перепад ночью. Такое поведение может объясняться слабым воздействием нейтрального ветра на h_mF2 из-за большого магнитного наклона станции и тем, что летняя ионосфера над Норильском круглосуточно освещена Солнцем. Интересным фактом является то, что подобное поведение до сих пор не отмечалось на других полярных станциях. Например, согласно работе [Rishbeth et al., 2000a], амплитуды годовых гармоник ночных h_mF2 для полярных станций ($67-68^\circ N$) близки амплитудам годовых гармоник для среднеширотных станций, что говорит о небольшой разнице в сезонном перепаде ночного h_mF2 между полярными и среднеширотными станциями. На наш взгляд, существует несколько причин этого разногласия. Во-первых, сравнение полярных и среднеширотных станций в работе [Rishbeth et al., 2000a] проведено для среднего уровня солнечной активности, а, как было показано ранее, ночной сезонный перепад h_mF2 для Норильска уменьшается с ростом солнечной активности. Во-вторых, в работе [Rishbeth et al., 2000a] рассмотрены полярные станции европейского сектора. Для этих станций магнитное наклонение ($77-78^\circ$) ниже, чем в Норильске, и, следовательно, влияние нейтрального ветра больше; при этом геомагнитная широта больше, чем в Норильске, и, следовательно, влияние магнитосферных процессов больше. Таким образом, специфическая форма суточно-сезонного хода h_mF2 в Норильске обусловлена: а) наибольшим магнитным наклонением, б) наименьшей геомагнитной широтой для географической широты станции.

Характерным различием станций является то, что в послеполуночное время ($\sim 0-3$ LT) скорость роста N_mF2 с индексом $F10.7$ в Иркутске заметно меньше чем в Норильске, а скорость роста h_mF2 , наоборот, больше. Интересно, что аналогичное расхождение имеет место при сравнении наблюдений в Иркутске с прогнозом модели IRI [Ratovsky et al., 2009] и при сопоставлении локальных моделей для Иркутска и североамериканской станции Миллстон-Хилл [Ratovsky, Oinats, 2011]. В работе [Ratovsky, Oinats, 2011] было показано, что в ночное время скорость роста h_mF2 для Иркутска больше, чем для среднеширотных станций, рассмотренных в работе [Rishbeth et al., 2000a]. Таким образом, аномально

низкая скорость роста ночного N_mF2 с индексом $F10.7$ и аномально высокая скорость роста ночного h_mF2 с индексом $F10.7$, по всей видимости, являются региональной особенностью среднеширотной ионосферы восточно-сибирского сектора.

До сих пор обсуждение различий полярной и среднеширотной ионосферы проводилось на основе анализа механизмов, управляющих среднеширотной ионосферой. Естественным образом возникает вопрос о влиянии факторов, характерных именно для полярной ионосферы, т. е. о влиянии высыпаний и главного ионосферного провала. Согласно модели [Karpachev et al., 1996], для инвариантной геомагнитной широты Норильска на высоте 300 км (61°) появление провала над станцией ожидается при значениях индекса геомагнитной активности K_p от 1 до 4⁻ в зависимости от местного магнитного времени MLT. Относительное число случаев, когда K_p находится в диапазоне от 1 до 4⁻, составляет от ~ 58 % для 2008 г. до 65 % для 2003 г., из чего следует, что появление провала над станцией не является редким явлением. Однако оценка вклада провала в 27-дневную медиану является нетривиальной задачей и выходит за рамки данной работы. То, что ночные значения N_mF2 в Норильске меньше, чем в Иркутске, может объясняться в том числе и появлением провала над полярной станцией. При этом тот факт, что скорость возрастания ночных значений N_mF2 с $F10.7$ выше в Норильске, чем в Иркутске, по всей видимости, не связан с явлением провала. Вполне возможно, что эта разница связана с возрастанием высыпаний в полярной области по мере роста солнечной/геомагнитной активности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ сходств и различий полярной и среднеширотной ионосферы в восточно-сибирском секторе, проведенный на основе созданных локальных моделей, позволил получить следующие основные результаты.

Общими свойствами полярной и среднеширотной ионосферы являются:

- 1) наличие полугодовой аномалии и ее ослабление с ростом солнечной активности;
- 2) усиление зимней аномалии с ростом солнечной активности;
- 3) формирование ночного максимума в зимней ночной ионосфере и его ослабление с ростом солнечной активности.

Отличительные особенности полярной ионосферы:

- 1) отсутствие зимней аномалии при низкой солнечной активности;
- 2) отсутствие летней вечерней аномалии, наблюдаемой в восточно-сибирском секторе сред-

неширотной ионосферы при любом уровне солнечной активности;

3) более мощный зимний ночной максимум.

Специфическими особенностями суточно-сезонного поведения высоты максимума в Норильске при низкой солнечной активности являются небольшой суточный перепад в летнее время и большой сезонный перепад ночью. Такое поведение может объясняться слабым воздействием нейтрального ветра на высоту максимума из-за большого магнитного наклона станции и тем, что летняя ионосфера над Норильском круглосуточно освещена Солнцем. Интересным фактом является то, что подобное поведение до сих пор не отмечалось на других полярных станциях. Не исключено, что такая форма суточно-сезонного хода является уникальной и обусловлена: а) наибольшим магнитным наклоном, б) наименьшей геомагнитной широтой для географической широты станции.

Низкая скорость роста ночных значений максимума электронной концентрации и высокая скорость роста ночных значений высоты максимума с возрастанием солнечной активности, по всей видимости, являются региональной особенностью среднеширотной ионосферы восточно-сибирского сектора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-37-00027).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Карпачев А.Т., Гасилов Н.А., Карпачев О.А. Морфология и причины аномалии моря Уэдделла // Геомагнетизм и аэрномия. 2011. Т. 51, № 6. С. 828–840.
- Клименко В.В., Карпачев А.Т., Клименко М.В. Среднеширотные аномалии в суточном ходе электронной концентрации в ионосфере // Химическая физика. 2013. Т. 32, № 9. С. 32–41.
- Мамруков А.П. Вечернее аномальное повышение ионизации в области F // Геомагнетизм и аэрномия. 1971. Т. 11, № 6. С. 984–988.
- Полах Н.М., Куркин В.И., Золотухина Н.А., Черниговская М.А. О связи между повышением ночной зимней ионизации в среднеширотном F2-слое и стратосферными потеплениями // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 22. С. 41–46.
- Altadill D., Arrazola D., Blanch E., Buresova D. Solar activity variations of ionosonde measurements and modeling results // Adv. Space Res. 2008. V. 42, N 4. P. 610–616.
- Bellchambers W.H., Piggott W.R. Ionospheric measurements made at Halley Bay // Nature. 1958. V. 182. P. 1596–1597.
- Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci. 2001. V. 36, N 2. P. 261–275.
- Bilitza D., Reinisch B. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // J. Adv. Space Res. 2008. V. 42, N 4. P. 599–609.
- Blanch E., Arrazola D., Altadill D., et al. Improvement of IRI B0, B1 and D1 at mid-latitudes using MARP // Adv. Space Res. 2007. V. 39, N 5. P. 701–710.
- Burns A.G., Solomon S.C., Wang W., et al. The summer evening anomaly and conjugate effects // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. A01311. DOI: 10.1029/2010JA015648.
- Farelo A.F., Herraiz M., Mikhailov A.V. Global morphology of night-time hmF2 enhancements // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 1795–1806.
- Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation. New York, Cambridge University Press, 2003. 640 p.
- Jakowski N., Förster M. About the nature of the nighttime winter anomaly effect (NWA) in the F-region of the ionosphere // Planet. Space Sci. 1995. V. 43. P. 603–612.
- Karpachev A.T., Deminov M.G., Afonin V.V. Model of the mid-latitude ionospheric trough on the base of Cosmos-900 and Intercosmos-19 satellites data // Adv. Space Res. 1996. V. 18, N 6. P. 221–230.
- Khmyrov G.M., Galkin I.A., Kozlov A.V., et al. Exploring digisonde ionogram data with SAO-X and DIDBase // Radio Sounding and Plasma Physics: AIP Conf. Proc. 2008. V. 974. P. 175–185.
- Kohl H., King J.W., Eccles D. Some effects of neutral air winds on the ionospheric F-layer // J. Atmos. Terr. Phys. 1968. V. 30, N 10. P. 1733–1744.
- Lei J., Liu L., Wan W., Zhang S.-R. Variations of electron density based on long-term incoherent scatter radar and ionosonde measurements over Millstone Hill // Radio Sci. 2005. V. 40, N 2. RS2008. DOI: 10.1029/2004RS003106.
- Lin C.H., Liu C.H., Liu J.Y., et al. Midlatitude summer nighttime anomaly of the ionospheric electron density observed by FORMOSAT-3/COSMIC. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A03308. DOI: 10.1029/2009JA014084.
- Mikhailov A.V., Förster M., Leschinskaya T.Y. On the mechanism of the post-midnight winter N_mF_2 enhancements: Dependence on solar activity // Ann. Geophys. 2000. V. 18, N 11. P. 1422–1434.
- Oinats A.V., Kotovich G.V., Ratovsky K.G. Comparison of the main ionospheric characteristics measured by the Digisonde at Irkutsk in 2003 with IRI 2001 model data // Adv. Space Res. 2006. V. 37, N 5. P. 1018–1022.
- Ratovsky K.G., Oinats A.V. Local empirical model of ionospheric plasma density derived from digisonde measurements at Irkutsk // Earth Planets Space. 2011. V. 63, N 4. P. 351–357.
- Ratovsky K.G., Oinats A.V., Medvedev A.V. Diurnal and seasonal variations of F2 layer characteristics over Irkutsk during the decrease in solar activity in 2003–2006: Observations and IRI-2001 model predictions // Adv. Space Res. 2009. V. 43, N 11. P. 1806–1811.
- Ratovsky K.G., Oinats A.V., Medvedev A.V. Regular features of the polar ionosphere characteristics from digisonde measurements over Norilsk // Adv. Space Res. 2013. V. 51, N 4. P. 545–553.
- Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., et al. Ionospheric sounding support of OTH radar // Radio Sci. 1997. V. 32, N 4. P. 1681–1694.
- Reinisch B.W., Galkin I.A., Khmyrov G., et al. Automated collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network // Adv. Radio Sci. 2004. V. 2. P. 241–247.
- Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 1998. V. 60, N 14. P. 1385–1402.
- Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K.J.F., Ulich T. Semiannual and annual variations in the height of the ionospheric F2-peak // Ann. Geophys. 2000a. V. 18, N 3. P. 285–299.
- Rishbeth H., Muller-Wodarg I.C.F., Zou L., et al. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II: Physical discussion // Ann. Geophys. 2000b. V. 18, N 8. P. 945–956.
- Schunk R.W., Nagy A. Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry. New York, second ed. Cambridge University Press, 2009. 628 p.
- Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Ion convection and the formation of the mid-latitude F region ionization trough // J. Geophys. Res. 1978. V. 83, N A9. P. 4255–4264.
- Thampi S.V., Balan N., Lin C., et al. Mid-latitude Summer Nighttime Anomaly (MSNA) – observations and model simulations // Ann. Geophys. 2011. V. 29, N 1. P. 157–165.
- Torr M.R., Torr D.G. The seasonal behaviour of the F2-layer of the ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1973. V. 35, N 2. P. 2237–2251.

Zhang S.-R., Fukao S., Oliver W.L., Otsuka Y. The height of the maximum ionospheric electron density over the MU radar // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1999. V. 61, N 18. P. 1367–1383.

Zhang S.-R., Holt J.M., Zaluca A.M., Amory-Mazaudier C. Mid-latitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin Incoherent Scatter Radar data from 1966–1987 // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. A11311. <http://dx.doi.org/10.1029/2004JA010709>.

Zhang S.-R., Holt J.M., van Eyken A.P., et al. Ionospheric local model and climatology from long-term databases of multiple incoherent scatter radars // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32, N 20. L20102. URL: DOI: 10.1029/2005GL023603.

Zou L., Rishbeth H., Muller-Wodarg I.C.F., et al. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: I modelling // *Ann. Geophys.* 2000. V. 18, N8. P. 927–944.

REFERENCES

Altadill D., Arrazola D., Blanch E., Buresova D. Solar activity variations of ionosonde measurements and modeling results. *Adv. Space Res.* 2008, vol. 42, no. 4, pp. 610–616.

Bellchambers W.H., Piggott W.R. Ionospheric measurements made at Halley Bay. *Nature.* 1958, vol. 182, pp. 1596–1597.

Bilitza D. International reference ionosphere 2000. *Radio Sci.* 2001, vol. 36, no. 2, pp. 261–275.

Bilitza D., Reinisch B. International reference ionosphere 2007: improvements and new parameters. *J. Adv. Space Res.* 2008. vol. 42, no. 4, pp. 599–609.

Blanch E., Arrazola D., Altadill D., Buresova D., Mosert M. Improvement of IRI B0, B1 and D1 at mid-latitudes using MARP. *Adv. Space Res.* 2007, vol. 39, no. 5, pp. 701–710.

Burns A.G., Solomon S.C., Wang W., Jee G., Lin C.H., Rocken C., Kuo Y.H. The summer evening anomaly and conjugate effects. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A01311, DOI: 10.1029/2010JA015648.

Farelo A.F., Herraiz M., Mikhailov A.V. Global morphology of night-time hmF2 enhancements. *Ann. Geophys.* 2002, vol. 20, pp. 1795–1806.

Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation. New York, Cambridge University Press, 2003, 640 p.

Jakowski N., Förster M.A. About the nature of the Nighttime Winter Anomaly effect (NWA) in the F-region of the ionosphere. *Planet. Space Sci.* 1995, vol. 43, pp. 603–612.

Karpachev A.T., Deminov M.G., Afonin V.V. Model of the mid-latitude ionospheric trough on the base of Cosmos-900 and Intercosmos-19 satellites data. *Adv. Space Res.* 1996, vol. 18, no. 6. pp. 221–230.

Karpachev, A.T., Gasilov, N.A., Karpachev, O.A. Morphology and causes of the Weddell Sea anomaly. *Geomagneto-tizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2011, vol. 51, no. 6, pp. 812–824 (in Russian).

Khmyrov G.M., Galkin I.A., Kozlov A.V., Reinisch B.W., McElroy J., Dozois C. Exploring digisonde ionogram data with SAO-X and DIDBase. *Radio Sounding and Plasma Physics: AIP Conf. Proc.* 2008, 974, pp. 175–185.

Klimenko V.V., Karpachev A.T., Klimenko M.V. Mid-latitude anomalies in the diurnal variation of electron density in the ionosphere. *Khimicheskaya Fizika* [Russian J. Chemical Physics]. 2013, vol. 7, no. 5, pp. 611–619 (in Russian).

Kohl H., King J.W., Eccles D. Some effects of neutral air winds on the ionospheric F-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1968, vol. 30, no. 10, pp. 1733–1744.

Lei J., Liu L., Wan W., Zhang S.-R. Variations of electron density based on long-term incoherent scatter radar and ionosonde measurements over Millstone Hill. *Radio Sci.* 2005, vol. 40, no. 2, RS2008. DOI: 10.1029/2004RS003106.

Lin C.H., Liu C.H., Liu J.Y., Chen C.H., Burns A.G., Wang W. Midlatitude summer nighttime anomaly of the iono-

spheric electron density observed by FORMOSAT-3/COSMIC. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A03308. DOI: 10.1029/2009JA014084.

Mamrukov A.P. Evening anomalous enhancement of ionization in F region. *Geomagneto-tizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1971, vol. 11, no. 6, pp. 984–988 (in Russian).

Mikhailov A.V., Forster M., Leschinskaya T.Y. On the mechanism of the post-midnight winter NmF2 enhancements: dependence on solar activity. *Annales Geophysicae.* 2000, vol. 18, no. 11, pp. 1422–1434.

Oinats A.V., Kotovich G.V., Ratovsky K.G. Comparison of the main ionospheric characteristics measured by the Digisonde at Irkutsk in 2003 with IRI 2001 model data. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, no. 5, pp. 1018–1022.

Polekh N.M., Kurkin V.I., Zolotukhina N.A., Chernigovskaya M.A. On the connection between nighttime winter ionization increase in midlatitude F2 layer and stratospheric warmings. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2015, vol. 22, pp. 41–46 (in Russian).

Ratovsky K.G., Oinats A.V. Local empirical model of ionospheric plasma density derived from digisonde measurements at Irkutsk. *Earth Planets Space.* 2011, vol. 63, no. 4, pp. 351–357.

Ratovsky K.G., Oinats A.V., Medvedev A.V. Diurnal and seasonal variations of F2 layer characteristics over Irkutsk during the decrease in solar activity in 2003–2006: Observations and IRI-2001 model predictions. *Adv. Space Res.* 2009, vol. 43, no. 11, pp. 1806–1811.

Ratovsky K.G., Oinats A.V., Medvedev A.V. Regular features of the polar ionosphere characteristics from digisonde measurements over Norilsk. *Adv. Space Res.* 2013, vol. 51, no. 4, pp. 545–553.

Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., Galkin I., Huang X., Kitrosser D.F., Sales G.S., Scali J.L. Ionospheric sounding support of OTH radar. *Radio Sci.* 1997, vol. 32, no. 4, pp. 1681–1694.

Reinisch B.W., Galkin I.A., Khmyrov G., Kozlov A., Kitrosser D.F. Automated collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network. *Adv. Radio Sci.* 2004, vol. 2, pp. 241–247.

Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1998, vol. 60, no. 14, pp. 1385–1402.

Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K.J.F., Ulich T. Semiannual and annual variations in the height of the ionospheric F2-peak. *Ann. Geophys.* 2000a, vol. 18, no. 3, pp. 285–299.

Rishbeth H., Muller-Wodarg I.C.F., Zou L., Fuller-Rowell T.J., Millward G.H., Moffett R.J., Idenden D.W., Aylward A.D. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion. *Ann. Geophys.* 2000b, vol. 18, no. 8, pp. 945–956.

Schunk R.W., Nagy A. Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry. New York, second ed. Cambridge University Press, 2009, 628 p.

Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Ion convection and the formation of the mid-latitude F region ionization trough. *J. Geophys. Res.* 1978, vol. 83, no. A9, pp. 4255–4264.

Thampi S.V., Balan N., Lin C., Liu H., Yamamoto M. Mid-latitude Summer Nighttime Anomaly (MSNA) – observations and model simulations. *Ann. Geophys.* 2011, vol. 29, no. 1, pp. 157–165.

Torr M.R., Torr D.G. The seasonal behaviour of the F2-layer of the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1973, vol. 35, no. 2, pp. 2237–2251.

Zhang S.-R., Fukao S., Oliver W.L., Otsuka Y. The height of the maximum ionospheric electron density over the MU radar. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1999, vol. 61, no. 18, pp. 1367–1383.

Zhang S.-R., Holt J.M., Zaluca A.M., Amory-Mazaudier C. Mid-latitude ionospheric plasma temperature climatology and

empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966–1987. *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, A11311. DOI: 10.1029/2004JA010709.

Zhang S.-R., Holt J.M., van Eyken A.P., McCready M., Amory-Mazaudier C., Fukao S., Sulzer M. Ionospheric local model and climatology from long-term databases of multiple incoherent scatter radars. *Geophys. Res. Lett.* 2005, vol. 32, no. 20, pp. L20102. DOI: 10.1029/2005GL023603.

Zou L., Rishbeth H., Muller-Wodarg I.C.F., Aylward A.D., Millward G.H., Fuller-Rowell T.J., Idenden D.W., Moffett R.J. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: I. Modelling. *Ann. Geophys.* 2000, vol. 18, no. 8, pp. 927–944.