

Исследование динамических процессов в ионосфере в период низкой солнечной активности по данным радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН

**А.В. Медведев, Г.А. Жеребцов, В.И. Куркин, А.П. Потехин, К.Г. Ратовский,
С.С. Алсаткин, М.В. Толстикова, А.А. Щербаков**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291
E-mail: medvedev@iszf.irk.ru*

В статье приведен обзор исследований, проведенных на инструментах радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН на спаде и в минимуме солнечной и геомагнитной активности. Представлены статистические закономерности поведения основных характеристик среднеширотной ионосферной плазмы над Восточной Сибирью для различных сезонов в годы минимума солнечной активности. На основе данных многолетних непрерывных измерений профиля электронной концентрации проведен статистический анализ волновых возмущений, выявлены сезонные и суточные особенности частоты проявления возмущений, их зависимость от уровня солнечной активности. На фоне спокойных геомагнитных условий установлены суточные и сезонные закономерности поведения такого интересного явления как среднеширотный промежуточный (падающий) спорадический слой. Кратко описаны новые возможности и методы экспериментального изучения динамических процессов в ионосфере.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферные возмущения, стратосферное потепление, спорадический слой.

Введение

В исследованиях фундаментальных проблем физики ионосферы всегда большое внимание уделялось данным наблюдений во времена низкой солнечной активности, когда появлялась возможность минимизировать часть внешних факторов воздействия на среду. Период 2007-2009 годов, с этой точки зрения, стал уникальным в истории аппаратных наблюдений. С января 2008 по март 2009 годов (за исключением нескольких дней) значение индекса F10.7 не превышало 70 с.е.п., а с лета 2007 по лето 2009 – 75 с.е.п. Таким образом, интервал крайне низкой активности Солнца охватил все сезоны, что позволило исследователям получить экспериментальные данные о закономерностях поведения ионосферных параметров с высокой статистической достоверностью. В фазе минимума солнечной активности на радиофизическом комплексе ИСЗФ СО РАН велись интенсивные наблюдения. Весь этот период непрерывно работали цифровые ионозонды в Иркутске и Норильске. Общее время измерения ионосферных параметров на Иркутском радаре НР составило более 6000 часов (в том числе во время сильных зимних стратосферных потеплений в 2008 – более 650 часов, в 2009 – более 600 часов). Эти данные позволяют подробно изучить важные закономерности поведения основных ионосферных параметров в условиях крайне слабой геомагнитной активности, сформулировать ряд задач для дальнейших исследований.

Статистический анализ ионосферной возмущённости в период низкой солнечной активности по данным иркутского ионозонда

Главной задачей анализа являлось определение общего количества возмущенных дней и определение общего числа волнообразных возмущений в зависимости от уров-

ня солнечной активности, сезона и времени суток. Использовались данные о поведении электронной концентрации, как функции двух переменных $Ne(z, t)$, где z – высота над поверхностью Земли, t – время. Все высотные профили электронной концентрации приводились к 15 минутному шагу по времени. Пропуски в данных более 30 минут считались разрывами, при пропусках менее 30 минут применялась линейная интерполяция. На следующем этапе разделялись медленные фоновые вариации электронной концентрации и возмущения. Для этого в работе использовались два критерия: спектральный и интегральный медианный.

Интегральный медианный критерий предназначен для оценки общей возмущенности дня или ночи; он позволяет эффективно выделять возмущения униполярного характера и представляет собой среднее относительное отклонение от медианы:

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Ne_i - Me_i|}{Me_i}. \quad (1)$$

Здесь Ne_i – электронная концентрация в i -ый момент времени, а Me_i – медиана в i -ый момент времени. Медиана рассчитывалась по 27 дням суточного хода электронной концентрации. Относительное отклонение I – рассчитывалось отдельно для дневного и ночного времени суток. Эта величина позволяет оценить вклад в вариации электронной концентрации долгопериодных возмущений (от полусуток и более), включая проявления планетарной волновой активности. Распределение 50% самых возмущенных дней по годам представлено на рис. 1.

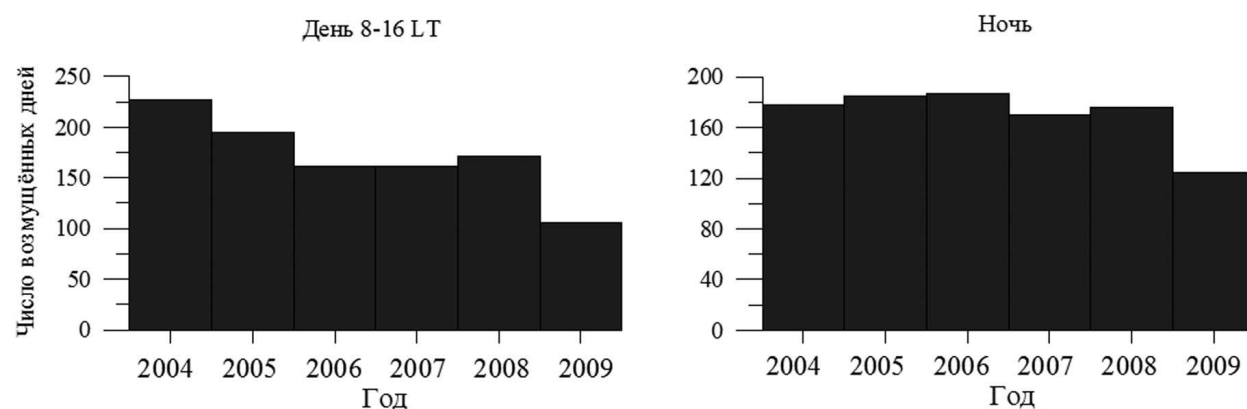


Рис. 1. Распределение 50% самых возмущенных дней по годам

Уровень общей дневной возмущенности ионосферы показывает хорошо выраженную прямую зависимость от солнечной активности при отсутствии такой зависимости в ночное время.

Интересный результат получен при анализе распределения общего количества интегральных возмущений по сезонам (рис. 2). Факт существования асимметрии возмущенности между зимним и летним полушариями хорошо известен исследователям, и гистограмма распределения по сезонам количества возмущенных ночей его замечательно иллюстрирует. Возмущенность же в светлое время суток имеет более сложный характер. Количество возмущенных дней в месяце максимально по-прежнему в зимний период, но минимум достигается не в летнее солнцестояние, а вблизи весеннего и осеннего равноденствия.

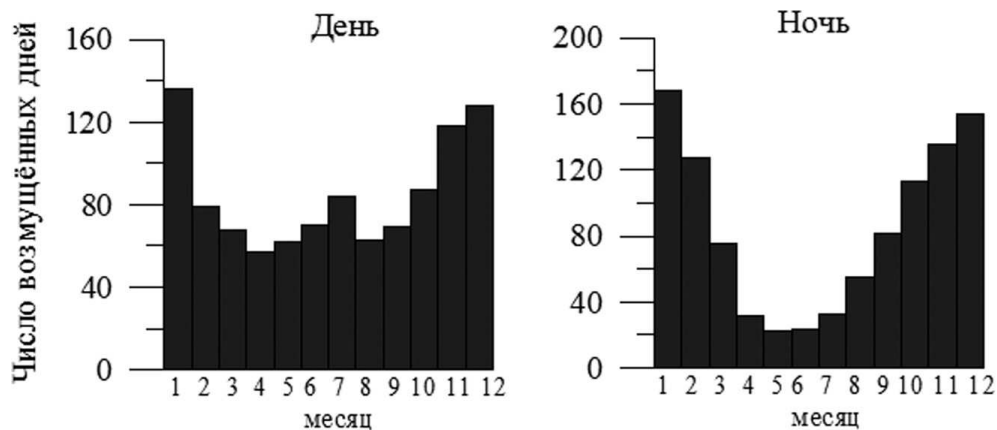


Рис. 2. Распределение 50 % самых возмущённых дней по сезонам

Спектральный критерий использовался для обнаружения ионосферных возмущений с периодами от 1 до 6 часов, соответствующими внутренним гравитационным волнам (ВГВ). В его основе лежит предположение о том, что из всего спектра волнового возмущения можно выделить доминирующую гармонику, в которой сосредоточена большая часть энергии. Если это предположение выполняется, тогда на каждой из высот, которые захватывает волна, в спектре вариаций электронной концентрации должен наблюдаться локальный максимум на одной и той же частоте. Для уменьшения влияния боковых лепестков использовалось окно Блэкмена:

$$0.42 - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) \quad (2)$$

Для того чтобы уменьшить влияние шумов задавался порог на амплитуду локального максимума. Таким образом, в данной работе критерием наличия возмущений было принято выполнение следующих условий:

1. Наличие локального максимума в спектре на данной частоте как минимум на трех соседних высотах.
2. Локальный максимум должен составлять не менее 5% от амплитуды нулевой гармоники (среднего по окну анализа).
3. Локальный максимум должен не менее чем на 20% превосходить по амплитуде соседние значения в спектре.

При обработке данных скользящим 12 часовым окном получены следующие результаты.

Из рис. 3 видно, что количество волновых возмущений днем убывает со спадом солнечной активности притом, что в ночное время явной связи между количеством возмущений и величиной индекса F 10.7 не наблюдается. Распределение возмущений по сезонам (рис. 4) хорошо иллюстрирует асимметрию возмущенности между зимним и летним полушариями.

По вертикальному профилю электронной концентрации можно определить кажущуюся вертикальную скорость. Кажущаяся вертикальная скорость определяется как модулем реальной скорости, так и наклоном волнового фронта:

$$V_z = V/\sin\theta, \quad (3)$$

где θ – угол возвышения над горизонтом (θ положителен для волны, распространяющейся вверх и отрицателен для волны, распространяющейся вниз). Как можно видеть из формулы (3), кажущаяся вертикальная скорость всегда больше модуля реальной скорости и совпадает с ним только в случае, когда волна распространяется строго вертикально. На рис. 5 представлены распределения скоростей для дня и ночи.

Распределение кажущейся вертикальной скорости имеет глобальный максимум на ~ -80 км/ч днём и -150 км/ч ночью. Ночью также имеется второй максимум в области положительных скоростей на ~ 150 км/ч.

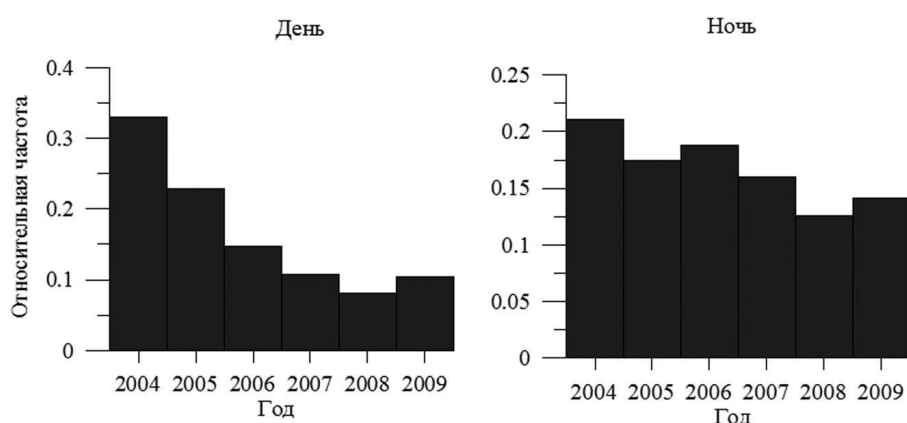


Рис. 3. Общее число волновых возмущений на фазе спада солнечной активности 2004-2009 гг.

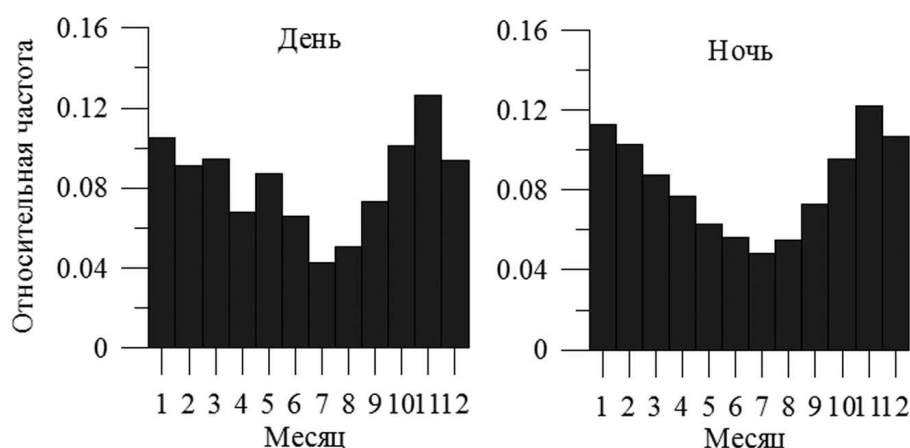


Рис. 4. Распределение волновых возмущений на фазе спада солнечной активности 2004-2009 гг. по сезонам

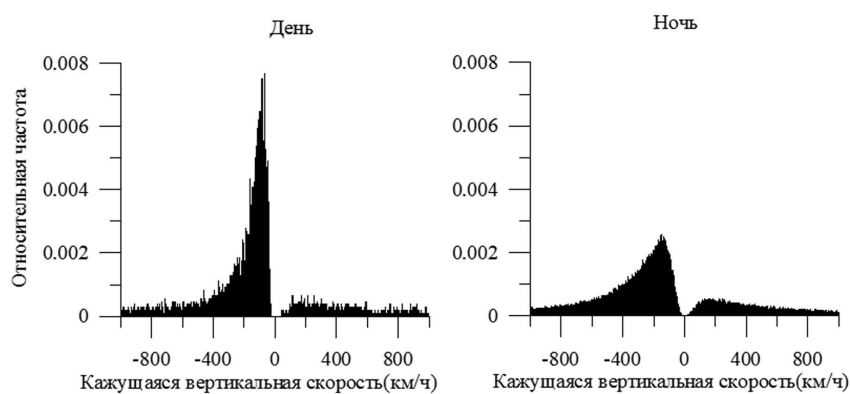


Рис. 5. Распределение кажущихся вертикальных скоростей на фазе спада солнечной активности 2004-2009 гг.

Изучение динамических процессов в ионосфере

Основным источником данных о динамике ионосферной плазмы является мировая сеть радаров НР. В практике метода НР для определения лучевой скорости плазмы обычно используют Фурье преобразование спектра НР – его автокорреляционную функцию (АКФ). В первом приближении скорость дрейфа плазмы может быть определена независимо от других ионосферных параметров через угол наклона фазы $\psi(\tau)$ АКФ. Однако, доплеровский сдвиг спектра НР за счет движения плазмы весьма мал по сравнению с шириной спектра рассеянного сигнала, а дисперсия при определении доплеровского сдвига – велика. На Иркутском радаре НР такая методика определения скорости дрейфа методом линейной регрессии имеет еще и дополнительную погрешность. Дело в том, что уникальной чертой Иркутского радара, которую необходимо учитывать в ионосферных измерениях, является его частотный принцип сканирования, т.е., зависимость направления излучения от несущей частоты. При возникновении, например, значительных горизонтальных градиентов ионизации в плоскости сканирования этот фактор приводит к искажениям спектра НР сигнала, делая его асимметричным. Искажения такого рода сказываются на точности восстановления параметров плазмы, в особенности при определении скорости дрейфа. Для компенсации этих искажений на Иркутском радаре НР нами был разработан специальный метод. При малых значениях коэффициента асимметрии и доплеровского смещения частоты спектра нами было использовано следующее выражение для фазы АКФ:

$$\psi(\tau) \approx 2\pi f_{don} \tau + \Delta S \cdot \text{tg}(2\pi \Delta F \tau),$$

где f_{don} – доплеровский сдвиг частоты зондирующего сигнала, ΔS – коэффициент асимметрии спектра, а ΔF – полуширина спектра НР. В этом приближении величины f_{don} и ΔS могут быть успешно разделены в рамках того же метода линейной регрессии. Дополнительный параметр ΔS , в свою очередь, может быть связан с наличием горизонтального градиента электронной концентрации $\partial N_e / \partial x$ вдоль оси сканирования, прохождением через диаграмму космических источников и некоторыми другими причинами. Модифицированный алгоритм определения скорости дрейфа плазмы позволил понизить погрешность в несколько раз [1, 2].

Проверка методики осуществлялась путем сравнения скорости плазмы, полученной новым методом на ИРНР и на радаре Милстоун-Хилл при их одновременных наблюдениях. На рис. 6 представлены приведенные к локальному времени графики суточного хода скорости дрейфа ионов на высоте 250 км, усредненные за шесть дней наблюдения с 23 по 28 января 2008 года. Как можно видеть, вариации лучевой скорости ионосферной плазмы двух среднеширотных радаров НР имеют сходный характер.

Применение новой методики при обработке данных длительных наблюдений Иркутского радара НР в период развития мощного стратосферного потепления 2008 года позволили выявить значительные долгопериодные вариации скорости ионосферной плазмы на высотах слоя F2.

На рис. 7 представлена динамика изменения скорости вертикального движения плазмы на высоте 250 км с 18 января по 5 февраля 2008 года по данным ИРНР. С 18 по 31 января наблюдаются периодические вариации скорости, смещающие суточные вариации дрейфа ближе к области положительных значений, которые соответствуют общему направлению движения плазмы вверх.

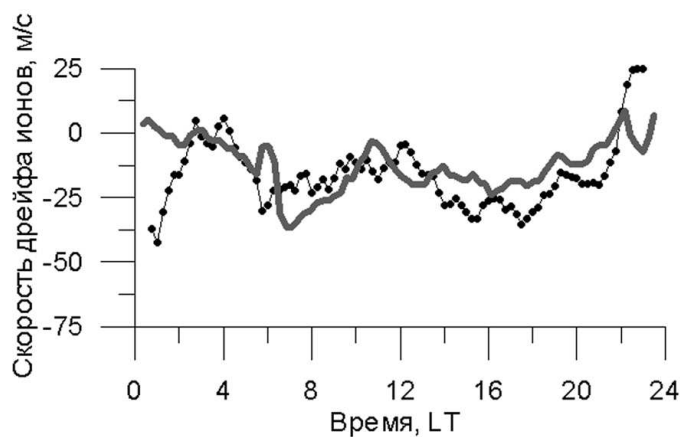


Рис. 6. Сравнение скоростей дрейфа ионов, полученных на радарх ИР в Иркутске (черный) и Милстоун-Хилле (серый) в январе 2008 г.

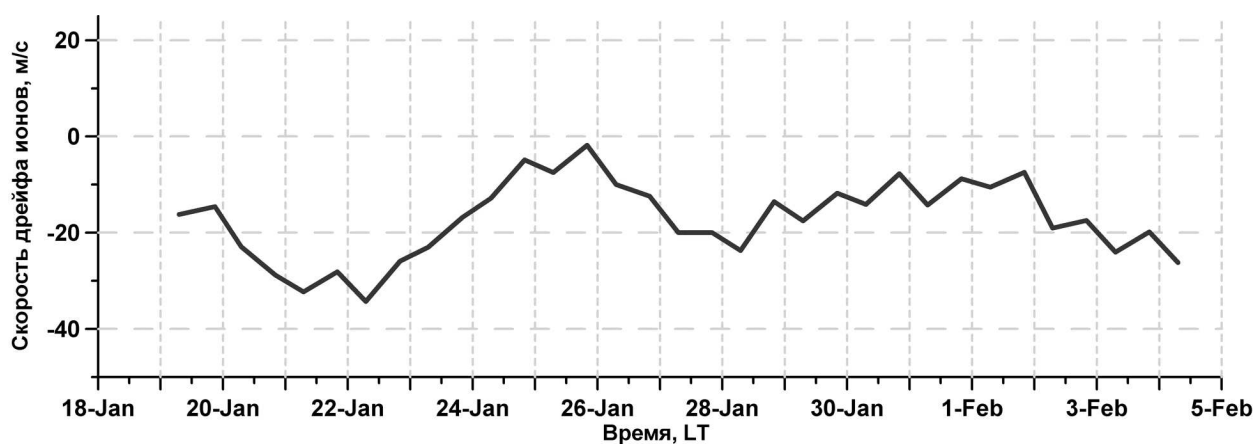


Рис. 7. Усреднённая по суткам скорость дрейфа ионосферной плазмы во время зимнего потепления 2008 г.

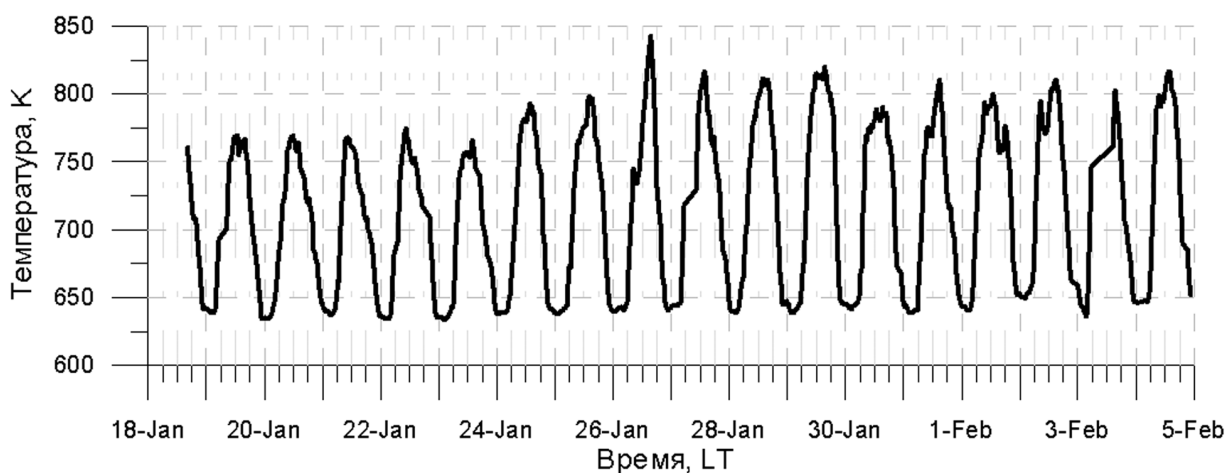


Рис. 8. Вариации ионной температуры во время зимнего потепления 2008 г.

По данным ИРНР характерные изменения с периодом 12-14 суток наблюдаются также и в температуре ионов (рис. 8). Фаза роста температуры ионов совпадает по времени с положительным трендом скорости плазмы и наоборот – отрицательный тренд суточного хода

вертикального дрейфа сопровождается понижением дневной температуры ионов. На рис. 9 приведено сравнение температуры атмосферы на высотах 60 и 96 км для дня и ночи по данным спутниковых наблюдений с усредненными данными по температуре ионов на высоте 250 км. Сравнение показывает, что температуры ионов на ионосферных высотах и нейтральной атмосферы на высоте 60 км ведут себя синфазно, а на высоте 96 км – противофазно. Сопоставление этих экспериментальных фактов позволяет предположить распространение возмущения в вертикальном направлении, проникновении части энергии атмосферных планетарных волн на ионосферные высоты. Так же обращает на себя внимание хорошая корреляция усредненной по суткам скорости дрейфа ионов (рис. 7) и температуры нейтральной атмосферы на высоте 60 км по данным спутника AURA.

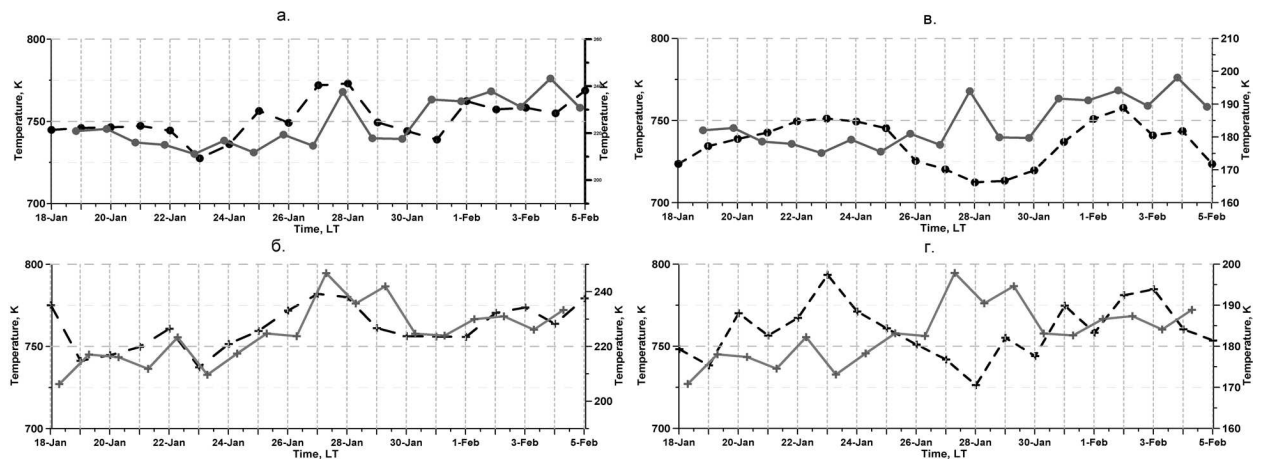


Рис. 9. Сравнение температуры ионов на высоте 250 км по данным ИРНР (серая сплошная линия) ночью (•) и днем (+) с температурой нейтральной атмосферы (черная пунктирная линия) на высоте 60 км (рисунки а, б) и 96 км (рисунки в, г) ночью (•) и днем (+) по данным спутника AURA во время зимнего потепления 2008 г.

Исследование закономерностей поведения высоты среднеширотного промежуточного падающего слоя

Продолжительный магнитоспокойный период позволил достаточно подробно исследовать такое интересное явление как среднеширотный промежуточный падающий ионосферный слой. Этот слой детально исследован на низкоширотном радаре Аресибо [3]. Он представляет собой тонкий (0.5-1 км) слой высокой электронной концентрации (10^5 - 10^6 см⁻³) и по этим параметрам схож с традиционным Es – спорадическим слом, эпизодически возникающий в E-области ионосферы. Однако в отличие от Es промежуточный падающий слой (ППС) формируется в нижней части F-области и последовательно опускается в E-область ионосферы. Другим названием ППС является приливный ионный слой (ПИС) из-за ~ 12 часовой повторяемости его возникновения и опускания [3].

Закономерности ППС проявляются в суточных вариациях высоты спорадического слоя hEs, получаемых с помощью ионограмм. На рис. 10 представлены суточные вариации высоты hEs, полученные на ионозонде вертикального зондирования DPS-4 в Иркутске в апреле, июне, октябре и ноябре. Проявление ППС заключается в том, что два раза в сутки (утром и вечером) hEs скачкообразно возрастает от высоты E-области (~ 100 км) до высоты промежуточной E-F-области (130-150 км), а затем последовательно опускается до высот E-области.

Было проведено исследование локальных времен, соответствующих максимумам hEs на предполуденном и послеполуденном интервалах LTmax1 и LTmax2, соответственно. Локальные времена LTmax1 и LTmax2 могут рассматриваться, как времена зарождения утреннего и вечернего ППС. На рис. 11 представлены сезонные вариации LTmax1 и LTmax2 для 2006 и 2007 гг.

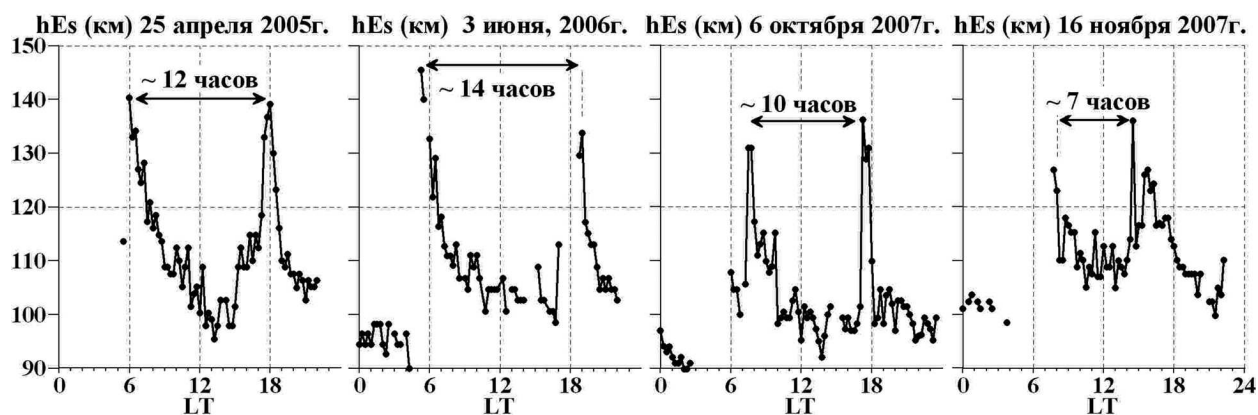


Рис. 10. Суточные вариации высоты спорадического слоя hEs

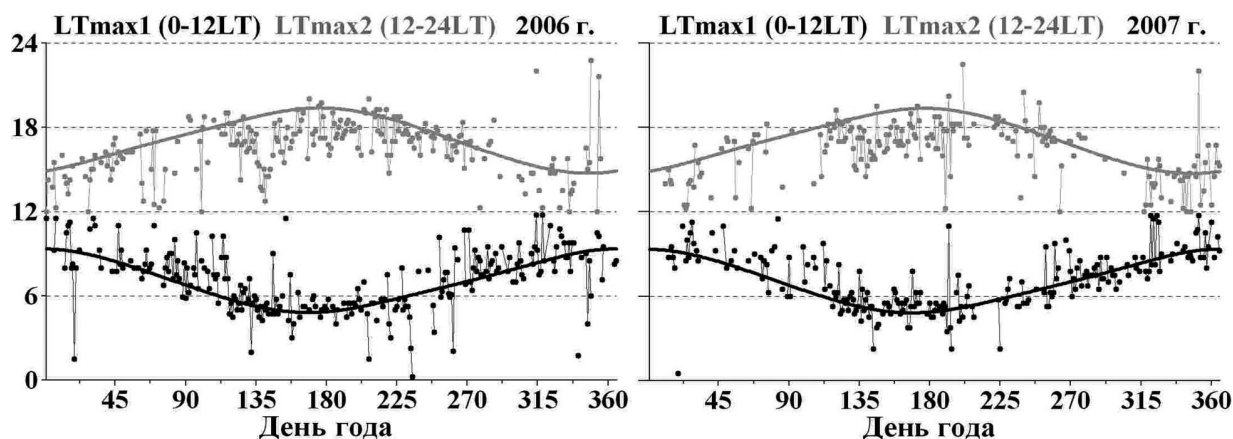


Рис. 11. Сезонные вариации времен зарождения утреннего (LTmax1, черные кружки) и вечернего (LTmax2, серые кружки) падающего промежуточного слоя

Из рис. 11 видно, что разница между временами зарождения вечернего и утреннего ППС максимальна в летнее время и уменьшается при переходе от лета к зиме. Эмпирически было установлено, что времена LTmax1 группируются относительно местного времени рассвета на земной поверхности плюс 1 час (черная сплошная линия на рис. 11), времена LTmax2 – относительно местного времени заката на земной поверхности минус 1 час (серая сплошная линия на рис. 11). Необходимо отметить, что эта картина повторяется для годов низкой солнечной активности (2008, 2009 гг.), а с ростом солнечной активности повторяется в целом, но становится более размытой. Таким образом, согласно нашим наблюдениям, явление ППС не имеет строгой 12-часовой периодичности, а определяется временами местного рассвета и заката. Этот вывод отличается от результатов работы [4], где на основе анализа данных, полученных на радаре некогерентного рассеяния в Аресибо, показано, что поведение ППС обусловлено полусуточным приливом зонального ветра. По всей видимости, различие в выводах связано с тем, что в ионосфере над Аресибо (18° с.ш.) сезонные вариации проявляются гораздо слабее по сравнению с ионосферой над Иркутском (52° с.ш.).

Заключение

Обширный экспериментальный материал, полученный на инструментах радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН на спаде и в минимуме солнечной и геомагнитной активности, позволяет изучить важные статистические и морфологические закономерности поведения основных ионосферных параметров в условиях крайне слабой геомагнитной активности и сформулировать ряд задач для дальнейших исследований.

Созданные на основе анализа длинных рядов данных радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН локальные модели электронной концентрации позволяют существенно улучшить по сравнению с другими эмпирическими моделями долгосрочный прогноз суточного хода и сезонных изменений ионосферы в Иркутске и Норильске.

Анализ возмущений ионосферы позволил установить, что общий (интегральный) и короткопериодный (волновой) уровень возмущений имеет прямую зависимость от уровня солнечной активности в дневное время при практически полном отсутствии такой зависимости ночью. Как общая, так и волновая возмущенность ионосферы в зимний период существенно выше, чем в летний, при любом уровне солнечной активности.

Выборочные исследования пространственно-временной структуры наиболее мощных волновых возмущений выявили, что в дневной период характеристики этих возмущений соответствуют природе внутренних гравитационных волн. В ночной период наиболее мощные возмущения, по-видимому, вызваны иными причинами.

Длительные непрерывные наблюдения на Иркутском радаре НР позволили построить статистически достоверные медианные высотные профили электронной концентрации для всех сезонов фазы минимума солнечной активности. На основе этих данных были исследованы закономерности суточных вариаций масштабной высоты внешней ионосферы.

Длительные наблюдения в периоды мощных стратосферных потеплений 2008-2010 годов позволили выявить долгопериодные изменения в скорости дрейфа плазмы и температуре ионов на высоте максимума ионизации, которые свидетельствуют, по-видимому, о проникновении энергии планетарных волн на ионосферные высоты.

Данные за многолетний магнитоспокойный период позволили исследовать сезонно-суточные закономерности образования среднеширотного промежуточного падающего слоя. Установлено, что в отличие от результатов полученных в Аресибо, ППС над Иркутском не имеет строгой 12 часовой периодичности, а определяется временами местного рассвета и заката. Если учесть, что ППС формируется механизмом ветрового сдвига, то данные об суточно-сезонных изменениях высоты его образования позволяют тестировать и калибровать модели поведения нейтрального ветра в диапазоне высот 150-100 км.

Литература

1. Потехин А.П., Медведев А.В., Заворин А.В., Кушнарев Д.С., Лебедев В.П., Шпынев Б.Г. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния // Космические исследования, 2008. Т.46. № 4. С.356-362.
2. Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S. Correlation method for determining the ionospheric plasma drift velocity at the Irkutsk scatter radar // Geomagnetism and Aeronomy, 2009. V.49. № 7. P.206-211.

3. *Mathews J.D.* Sporadic E: current views and recent progress // *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 1998. V. 60. №4. P. 413-435.
4. *Christakis N., Haldoupis C., Zhou Q., Meek C.* Seasonal variability and descent of mid-latitude sporadic E layers at Arecibo // *Ann. Geophys.*, 2009. V. 27. № 3. P. 923-931.

Research of dynamic processes of ionosphere in the period of low solar activity using data of Institute of Solar-Terrestrial Physics radiophysical complex

**A.V. Medvedev, G.A. Zherebtsov, V. I. Kurkin, A.P. Potekhin, K.G. Ratovsky, S.S. Alsatkin,
M.V. Tolstikov, A.A. Shcherbakov**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics
Russia, 664033, Irkutsk, Lermontov 126a, P.O. Box 291
E-mail: medvedev@iszf.irk.ru*

In the article the review of researches conducted on tools of Institute of Solar-Terrestrial Physics radiophysical complex in the period of decay and minimum of solar and geomagnetic activity was adduced. Statistical laws of behavior of basic characteristics of Eastern Siberia midlatitude ionospheric plasma for different seasons during minimum of solar activity were submitted. On the basis of the data of perennial continuous measurements of electron concentration profile the statistical analysis of wave disturbances was done. In quiet geomagnetic conditions diurnal and seasonal regularities of behavior of midlatitude intermediate (dropping) sporadic layer were found. The new capabilities and methods of experimental analysis of dynamic processes in an ionosphere were briefly described.

Keywords: ionosphere, ionospheric disturbances, stratospheric warming, sporadic layer.