

УДК 550.388.2

Численное моделирование аномалии моря Уэдделла в поведении F2-области ионосферы

М.А. Князева, Ю.В. Зубова, А.А. Намгаладзе

Политехнический факультет МГТУ, кафедра физики

Аннотация. С помощью глобальной численной модели верхней атмосферы Земли и эмпирической модели ионосферы IRI-2001 исследована морфология и механизм формирования аномалии моря Уэдделла (WSA – Weddell Sea Anomaly) в поведении F2-области ионосферы, состоящей в превышении ночных значений электронной концентрации над дневными в летних условиях. Установлено, что WSA воспроизводится в южном летнем полушарии в долготном секторе 255-315°E обеими моделями. Обнаружена аналогичная WSA долготная вариация электронной концентрации в летнем северном полушарии в долготном секторе, отстоящем на 180°. Показано, что причиной формирования обеих аномалий является несовпадение географической и геомагнитной осей Земли, которое определяет различие в широтно-временных вариациях вертикальной скорости ветрового увлечения плазмы на высотах F2-области ионосферы в различных долготных секторах.

Abstract. The morphology and mechanism of the Weddell Sea Anomaly (WSA) forming has been investigated by using the global numerical model of the Upper Atmosphere Model and empirical model of the ionosphere IRI-2001. It has been shown that both models reproduce WSA in the summer southern hemisphere in longitudinal sector 255-315°E. It has been found that the analogous WSA longitudinal variation of the electron density takes place in the summer northern hemisphere in longitudinal sector 75-135°E. It has been shown that both phenomena are caused by the non-coincidence of the geomagnetic and geodetic axes which produces the difference in vertical velocities of the ion transfer by the thermospheric wind action in the western and eastern longitudinal sectors.

Ключевые слова: среднеширотная F2-область ионосферы, термосферная циркуляция, термосферно-ионосферное взаимодействие, численное моделирование

Key words: midlatitude F2-layer of the ionosphere, thermospheric circulation, thermosphere-ionosphere interaction, numerical modeling

1. Введение

В конце 50-х годов XX в. по данным ионозондовых наблюдений над Антарктидой в районе моря Уэдделла была получена аномальная суточная вариация плотности плазмы в F2-области ионосферы: летом ночные значения электронной концентрации превышали дневные (Bellchambers, Piggott, 1958; Dungey, 1961; Penndorf, 1965). Это явление получило название "аномалия моря Уэдделла" (WSA – Weddell Sea Anomaly). В зимних условиях аномалия не наблюдалась.

Проявляется WSA в вариациях критической частоты (f_oF2), максимальной электронной концентрации ($NmF2$) F2-области ионосферы и полного электронного содержания в столбе единичного сечения (TEC – Total Electron Content), а также в вариациях электронной концентрации на фиксированных высотах (Horvath, Essex, 2003; Horvath, 2006; Burns et al., 2008; Lin et al., 2009; He et al., 2009; Horvath, Lovell, 2009a-c; 2010; Thampi et al., 2009; Jee et al., 2009; Karpachev et al., 2010; Карпачёв и др., 2010; Liu et al., 2010). Наиболее ярко она проявляется при низкой солнечной активности и преимущественно в геомагнитных спокойных условиях.

Область WSA в географических координатах занимает диапазон долгот 180-360°E и широт 40-80°S. Максимальное проявление аномалии наблюдается в долготном секторе 255-315°E и на широтах 60-70°S (Lin et al., 2009; Karpachev et al., 2010; Карпачёв и др., 2010).

Учитывая, что поведение ночной F2-области ионосферы в отсутствие прямого ионизирующего солнечного излучения определяется, главным образом, ионно-молекулярными реакциями и процессами переноса, предлагаемые механизмы формирования WSA сводятся к трем основным:

- 1) действию электрических полей как термосферного (Burns et al., 2008; Lin et al., 2009), так и магнитосферного происхождения (Penndorf, 1965; Horvath, Lovell, 2009b);
- 2) ветровому увлечению ионосферной плазмы (Dudeney, Piggott, 1978; Karpachev et al., 2010; Карпачёв и др., 2010);
- 3) вариациям потоков плазмы из плазмосферы в ионосферу (Burns et al., 2008).

Помимо указанных в качестве возможных причин формирования WSA рассматривались влияния высыпания из магнитосферы энергичных частиц (Pavlov, Pavlova, 2007), геометрии силовых линий

геомагнитного поля (Horvath, Essex, 2003; Horvath, 2006; Horvath, Lovell, 2009a), несовпадения географической и геомагнитной осей (Lin et al., 2009).

Все гипотезы являются качественными и требуют количественной оценки вклада в распределение концентрации плазмы в F2-области ионосферы каждого в отдельности процесса или фактора, т.е. необходимо применять метод математического моделирования, в котором должно учитываться следующее.

Во-первых, необходимо решать трехмерную задачу, так как процессы переноса, определяющие поведение ночной F2-области среднеширотной ионосферы, являются существенно трехмерными.

Во-вторых, необходимо решать уравнения непрерывности, движения и энергетического баланса для ионов и электронов вдоль замкнутых силовых линий геомагнитного поля, т.е. полностью включать плазмосферу. В противном случае требуется задание в качестве верхних граничных условий оцененной или подобранной каким-либо методом величины потоков ионов O^+ , от которых сильно зависит получаемый результат, вплоть до искусственного воссоздания повышений $NmF2$ и TEC .

В настоящей работе представлены результаты исследования аномалии моря Уэдделла методом математического моделирования с использованием численной глобальной модели верхней атмосферы Земли UAM (Namgaladze et al., 1988; 1991; 1998; Намгаладзе и др., 1990; 1996). Результаты численных экспериментов сопоставлялись с данными эмпирической модели ионосферы IRI-2001 (Bilitza, 2001).

2. Модельные расчеты

Глобальная трехмерная нестационарная численная модель верхней атмосферы Земли (UAM – Upper Atmosphere Model) описывает термосферу, ионосферу и плазмосферу как единую систему, охватывая диапазон высот от 80 км до геоцентрического расстояния в $15R_E$ (R_E – радиус Земли), и учитывает несовпадение геомагнитного и географического полюсов Земли (Namgaladze et al., 1988; 1991; 1998; Намгаладзе и др., 1990; 1996).

В самосогласованной версии модели UAM рассчитываются концентрации основных нейтральных (O_2 , N_2 , O , NO , N , CO_2) и заряженных (XY^+ , O^+ , H^+ и электронов) компонент верхней атмосферы, температуры нейтрального, ионного и электронного газов, скорости движения заряженных и нейтральных частиц путем численного интегрирования методом конечных разностей системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса, описывающих законы сохранения частиц, импульса и энергии, соответственно. В совокупности с ними в модели решается уравнение для потенциала электрического поля магнитосферного и термосферного происхождения.

Параметры нейтральных компонент атмосферы и потенциал электрического поля рассчитываются в сферической геомагнитной системе координат, параметры плазмы – в геомагнитной дипольной системе координат.

В модели учитываются фотодиссоциация нейтральных кислородных компонент, фотоионизация прямым и рассеянным солнечным излучением, вторичная и корпускулярная ионизация нейтральных частиц, ионно-молекулярные реакции, диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов, зарядо-обменные реакции и процессы переноса для атомарных ионов, молекулярная и турбулентная диффузия, нейтрал-ионное и вязкое трения, нагрев солнечным излучением и высыпаящимися из магнитосферы энергичными электронами, теплопроводность, Джоулев нагрев, нагрев нейтрального газа за счет химических реакций и охлаждение за счет излучения.

Учет эффектов трехмерности переноса замагнитченных атомарных ионов осуществляется путем использования лагранжевого подхода применительно к движениям плазмы вдоль траектории электромагнитного дрейфа. Подробно вид уравнений и констант, используемых в них, описаны в монографии (Брюнелли, Намгаладзе, 1988).

Шаги интегрирования по пространству и времени могут варьироваться и выбираются исходя из решаемой задачи.

Входными параметрами модели UAM являются: дата и момент времени UT начала расчета события; спектры солнечного ультрафиолетового и крайнего ультрафиолетового излучения, зависящие от солнечной активности; потоки высыпаящихся из магнитосферы энергичных электронов; распределение потенциала электрического поля на границе полярной шапки; индексы геомагнитной активности.

Граничные условия формулируются из физических предположений или экспериментальных данных (Namgaladze et al., 1998).

Помимо самосогласованной версии, в модели реализована возможность вычисления значений параметров термосферы и ионосферы по эмпирическим моделям (Martynenko, Knyazeva, 2008). Были инкорпорированы в UAM модель термосферы NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002), модель горизонтального нейтрального ветра HWM-93 (Hedin et al., 1996), ионосферы IRI-2001 (Bilitza, 2001).

В настоящей работе модельные расчеты глобального распределения электронной концентрации проводились для геомагнитных спокойных условий ($K_p < 3$) декабрьского и июньского солнцестояний при

низкой (23.12.1985, $F_{10.7}=71,2$; 23.06.1986, $F_{10.7}=69,6$) и высокой (22.12.1990, $F_{10.7}=178,1$; 20.06.1990, $F_{10.7}=161,2$) солнечной активности. Использовались следующие версии UAM:

- 1) самосогласованная (далее по тексту UAM-TT);
- 2) совместно с NRLMSISE-00 (далее UAM-MSIS);
- 3) совместно с NRLMSISE-00 и HWM-93 (далее UAM-MSIS-HWM).

Все версии расчетов отличаются способом расчета скорости термосферного ветра и состава нейтрального газа. В варианте UAM-TT термосферные состав и циркуляция рассчитываются из указанных выше уравнений. В варианте UAM-MSIS состав и трехмерная циркуляция нейтрального газа вычисляются по модели NRLMSISE-00 (скорость ветра рассчитывается из уравнения движения, исходя из эмпирических данных о градиентах давления нейтрального газа). В UAM-MSIS-HWM состав нейтральной атмосферы рассчитывается по модели NRLMSISE-00, скорость горизонтального ветра рассчитывается по модели HWM-93, а вертикальная составляющая скорости термосферного ветра рассчитывается из уравнения непрерывности для полной массовой плотности нейтрального газа.

Шаги интегрирования по высоте менялись от 3 км на высотах ниже 100 км до 30 км на высотах около 400 км и далее нарастали в геометрической прогрессии, по геомагнитной долготе – были постоянными и равными 15° , по геомагнитной широте – переменными: наибольшие шаги (3°) в окрестностях полюсов, в остальном широтном диапазоне 2° . Шаги интегрирования по времени были постоянными и равнялись 1 или 2 минутам.

В качестве начальных условий использовались квазистационарные решения уравнений, полученные в ходе многократных прогонов (расчетов параметров верхней атмосферы для одних и тех же суток).

3. Результаты модельных расчетов

3.1. Аномалия моря Уэдделла (летнее южное полушарие)

На рис. 1-2 представлены рассчитанные по всем версиям модели UAM для декабрьских солнцестояний при низкой (рис. 1) и высокой (рис. 2) солнечной активности широтно-временные вариации критической частоты F2-области ионосферы в летнем южном полушарии на двух географических меридианах: проходящем через область максимального проявления аномалии моря Уэдделла ($\lambda_1=285^\circ$, слева), и отстоящем на 180° ($\lambda_2=105^\circ$, справа).

Результаты расчетов по UAM (UAM-MSIS – второй ряд, UAM-MSIS-HWM – третий ряд, UAM-TT – четвертый ряд) сопоставлены с аналогичными результатами, полученными по эмпирической модели ионосферы IRI-2001 (первый ряд).

Помимо изолиний $foF2$, на картах отмечены положения геомагнитного экватора.

В результатах расчетов по модели IRI-2001 при обоих уровнях солнечной активности аномалия моря Уэдделла отчетливо видна в летнем южном полушарии на меридиане $\lambda_1=285^\circ$ вблизи местной полночи. Более ярко она выражена при низкой солнечной активности. По географической широте WSA занимает диапазон от 45° до $55-60^\circ$. На меридиане $\lambda_2=105^\circ$ аномалия отсутствует.

Анализ результатов расчетов по UAM показывает, что WSA по всем версиям модели так же, как и в IRI-2001, при обоих уровнях солнечной активности формируется на меридиане $\lambda_1=285^\circ$, на меридиане $\lambda_2=105^\circ$ – отсутствует. Наиболее ярко аномалия выражена по UAM для низкой солнечной активности. Широтное положение WSA по всем версиям UAM совпадает с результатами, полученными по IRI-2001. По местному времени аномалия по UAM формируется в более ранние часы, чем по IRI-2001.

Значения критической частоты ионосферной F2-области, полученные по UAM, для низкой солнечной активности оказываются заниженными относительно данных эмпирической модели ионосферы, для высокой активности – UAM завышает значения $foF2$. При этом амплитуда повышений ночных значений $foF2$ над дневными на фиксированной географической широте по всем моделям при низкой солнечной активности выше, чем при высокой. Максимальные значения амплитуды получены по версии UAM-MSIS для 23.12.1985 (в 1,5 раза, что составляет 2,3 МГц), что незначительно, но превышает значение по IRI-2001 (в 1,3 раза – 1,6 МГц) для тех же условий.

3.2. Летняя аномальная долготная вариация $foF2$ в северном полушарии

Для анализа поведения летней F2-области ионосферы над северным полушарием были построены в аналогичном формате карты широтно-временных вариаций $foF2$, полученные по IRI-2001 и всем версиям UAM, на тех же меридианах для июньских солнцестояний при низкой (рис. 3) и высокой (рис. 4) солнечной активности.

Анализ представленных широтно-временных вариаций критической частоты ионосферной F2-области показывает что, на географическом меридиане $\lambda_2=105^\circ$ в летнем северном полушарии отчетливо видна аномалия, аналогичная WSA: ночные значения $foF2$ превышают дневные. На меридиане $\lambda_1=285^\circ$ этот феномен отсутствует.

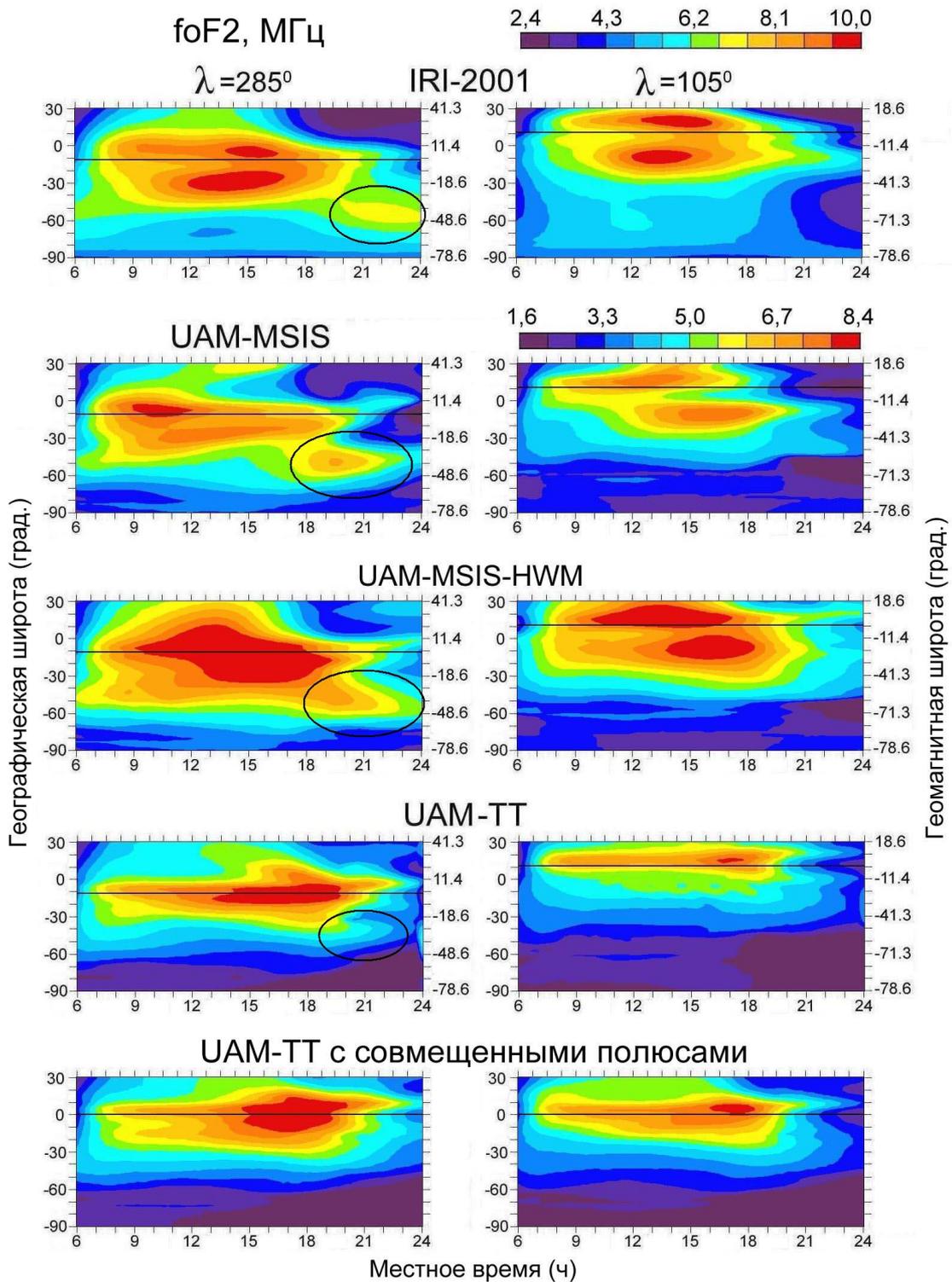


Рис. 1. Рассчитанные широтно-временные вариации foF2 в летнем южном полушарии для условий декабрьского солнцестояния при низкой солнечной активности (23.12.1985) на меридианах: $\lambda_1=285^\circ$ (слева) и $\lambda_2=105^\circ$ (справа). *Первый ряд* – результаты расчетов по IRI-2001, *второй ряд* – по версии UAM-MSIS, *третий ряд* – по UAM-MSIS-HWM, *четвертый ряд* – по UAM-TT. *Пятый ряд* – представлены результаты расчетов по версии UAM-TT с совмещенными географическими и геомагнитными полюсами. Положение геомагнитного экватора отмечено черной сплошной линией. Аномалия моря Уэдделла обведена черным кружком.

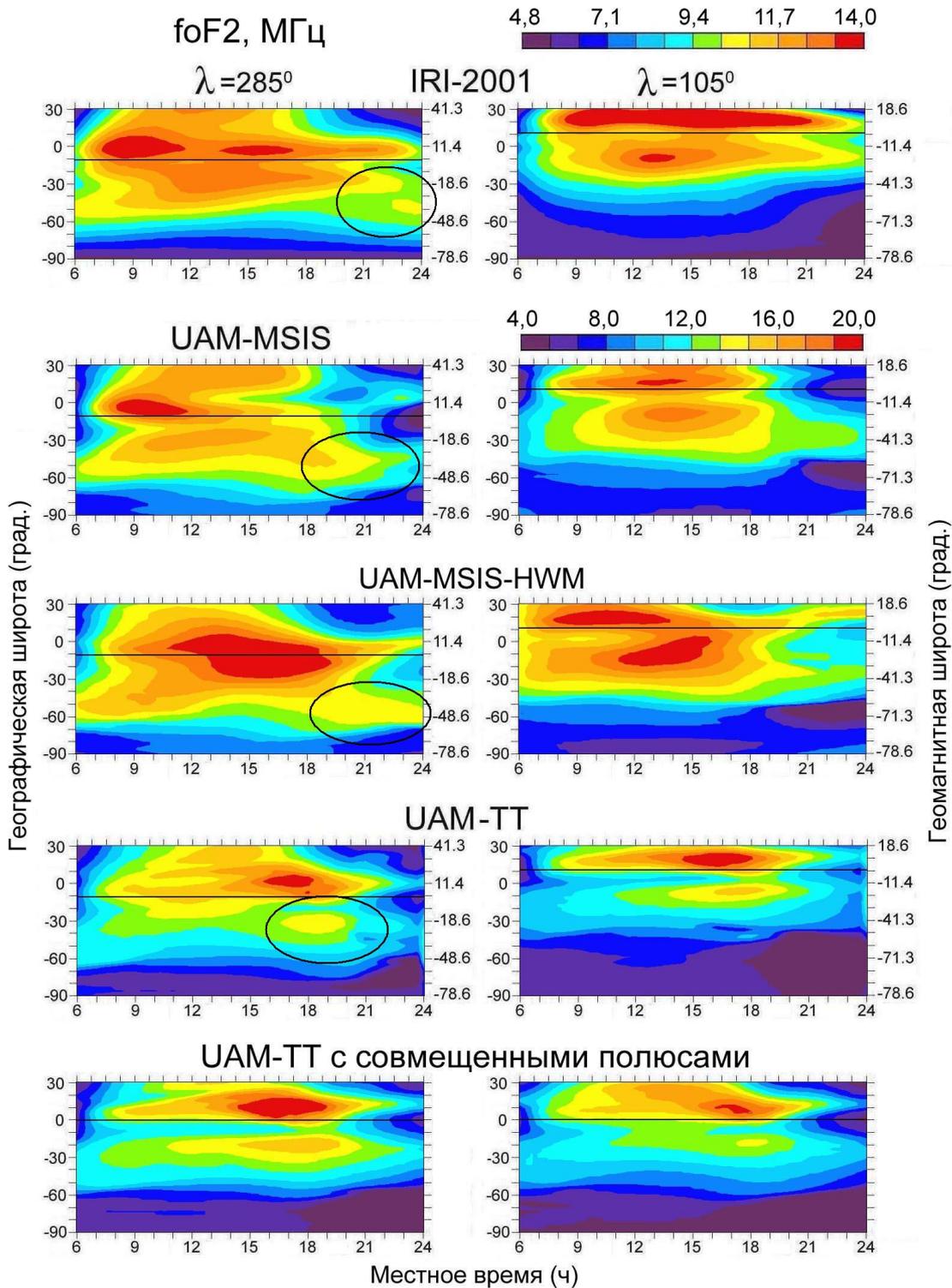


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для высокой солнечной активности (22.12.1990)

В результатах расчетов по эмпирической модели ионосферы IRI-2001 аномалия в северном полушарии видна при низкой солнечной активности и отсутствует при высокой. Ночные повышения $foF2$ достигают максимума около 22 часов LT. В расчетах по UAM аномалия воспроизводится всеми версиями модели. Наиболее ярко феномен выражен в расчетах по версии UAM-MSIS при низкой солнечной активности, по UAM-MSIS-HWM и UAM-TT – при высокой.

По широтному положению аномалия в северном полушарии совпадает с положением WSA, но с экваториальной границей, расположенной на более низких географических широтах (около 30-40°).

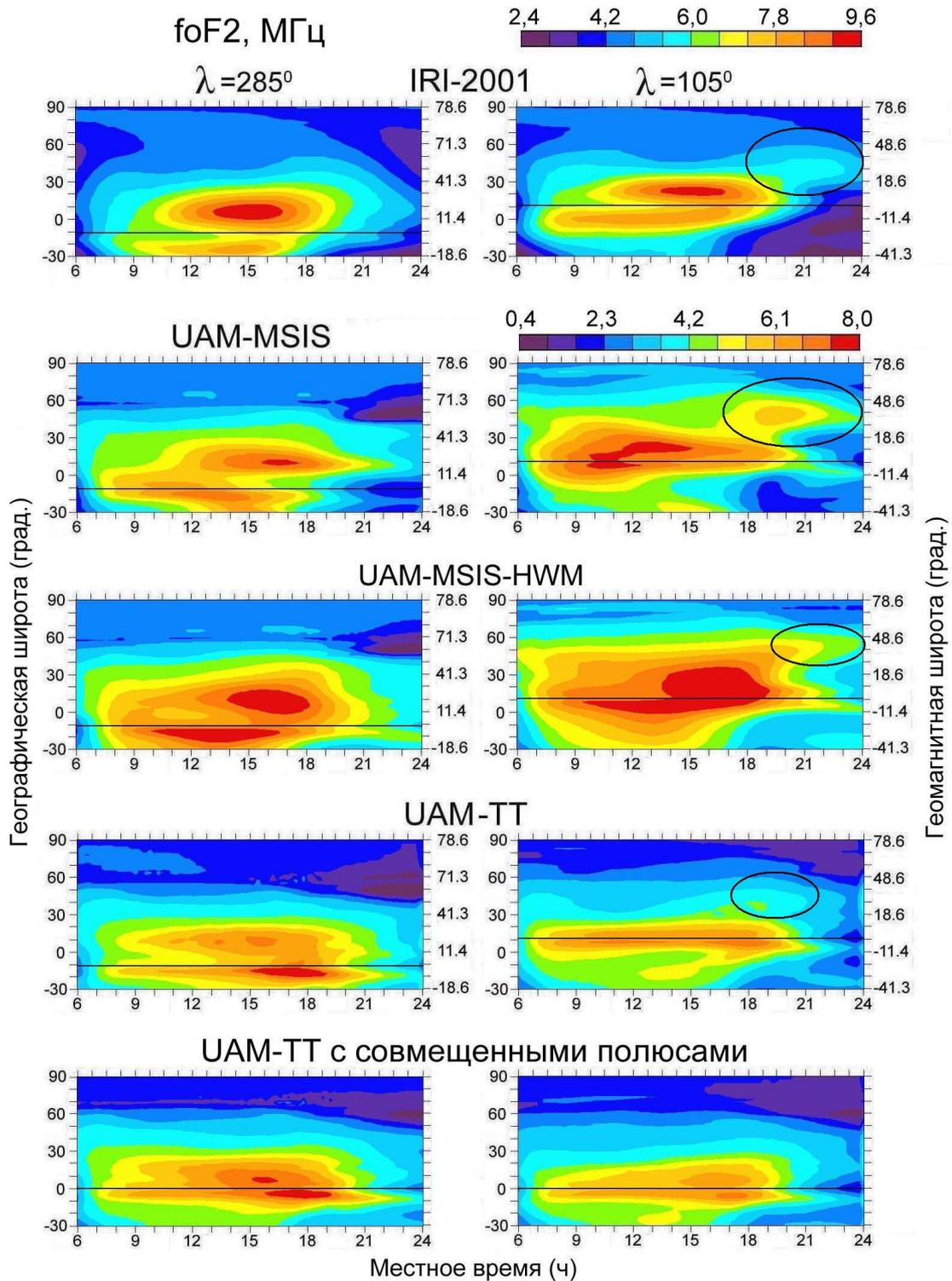


Рис. 3. Рассчитанные широтно-временные вариации $foF2$ в летнем северном полушарии для условий июньского солнцестояния при низкой солнечной активности (23.06.1986) на меридианах: $\lambda_1=285^\circ$ (слева) и $\lambda_2=105^\circ$ (справа). *Первый ряд* – результаты расчетов по IRI-2001, *второй ряд* – по версии UAM-MSIS, *третий ряд* – по UAM-MSIS-HWM, *четвертый ряд* – по UAM-TT. *Пятый ряд* – представлены результаты расчетов по версии UAM-TT с совмещенными географическими и геомагнитными полюсами. Положение геомагнитного экватора отмечено черной сплошной линией. Аномалия моря Уэдделла обведена черным кружком.

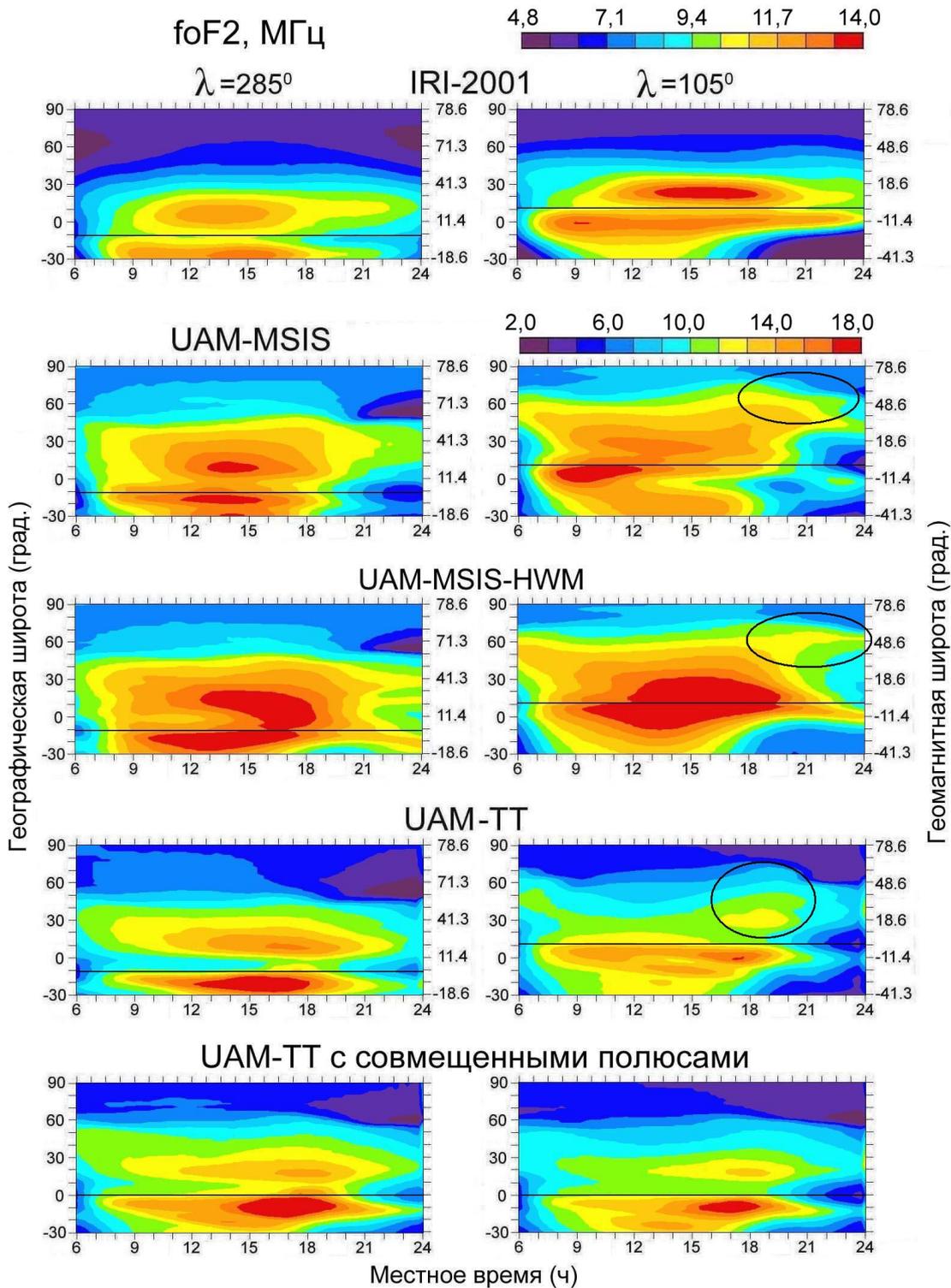


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для высокой солнечной активности (20.06.1990)

Как уже было отмечено выше, UAM занижает значения $foF2$ для низкой солнечной активности, и завышает для высокой относительно данных эмпирической модели ионосферы IRI-2001. Отношение максимальных ночных значений $foF2$ к минимальным дневным на фиксированной географической широте по всем моделям практически совпадает и составляет 1,2-1,3 раза. Максимальная амплитуда повышения $foF2$ составляет 2,7 МГц по UAM-TT при высокой солнечной активности, минимальная – 1 МГц по IRI-2001 при низкой активности.

3.3. Механизм формирования аномалии моря Уэдделла и аномалии в северном полушарии

Как показали модельные расчеты, аномалия моря Уэдделла формируется на меридиане $\lambda_1=285^\circ$. Аналогичная аномалия образуется в летнем северном полушарии в долготном секторе, отстоящем на 180° ($\lambda_2=105^\circ$). Оба этих случая объединяет тот факт, что на рассматриваемых долготах в летних условиях геомагнитный экватор (сплошная черная линия на рис. 1-4) оказывается смещенным относительно географического в летнее полушарие из-за несовпадения геомагнитной и географической осей Земли.

Для проверки роли этого несовпадения в процессе формирования обеих аномалий были проведены для всех отобранных дат расчеты глобального распределения электронной концентрации в F2-области ионосферы по версии модели UAM-ТТ с совмещенными географическими и геомагнитными полюсами. Полученные широтно-временные вариации $foF2$ на тех же меридианах приведены на рис.1-4 (пятые ряды карт).

Совмещение геомагнитного и географического экваторов привело к тому, что WSA и подобная ей аномалия в северном летнем полушарии практически исчезли. Характеры широтно-временных вариаций $foF2$ в обоих долготных секторах слабо отличаются друг от друга. Полному исчезновению обеих аномалий препятствует влияние начальных условий, которые были получены по версии UAM-MSIS с разнесенными полюсами.

Таким образом, несовпадение геомагнитной и географической осей Земли является причиной возникновения WSA и подобной ей аномалии в северном полушарии.

Рассмотрим вопрос о механизме формирования этих феноменов.

Географические широты, на которых наблюдаются обе аномалии, соответствуют средним геомагнитным широтам от $20-25^\circ$ до 50° . В спокойных геомагнитных условиях электрические поля как магнитосферного, так и термосферного происхождения слабо влияют на распределение плазмы в среднеширотной F2-области ионосферы (Ляцкий, Мальцев, 1983). Электрическое поле магнитосферной конвекции, приводящее в высоких широтах к формированию главного ионосферного провала, не проникает на средние и низкие широты, а поле, индуцированное нейтральным ветром, оказывает влияние на низкоширотную ионосферу, формируя экваториальную аномалию (Брюнелли, Намгаладзе, 1988).

Повышение плотности плазмы на высотах F2-области ионосферы посредством высыпания энергичных частиц из магнитосферы в спокойных геомагнитных условиях наблюдается только в высоких широтах (Воробьев, Ягодкина, 2005). Возможны возмущения ионосферы, обусловленные изменениями термосферного состава, а именно отношения концентрации атомарного кислорода к концентрации молекулярного азота $n(O)/n(N_2)$, но этот эффект наблюдается преимущественно во время геомагнитных бурь (Pröls, 1980).

Следовательно, основной механизм формирования WSA и аномалии в северном полушарии связан с увлечением плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля термосферным ветром.

При горизонтальном движении частицы нейтрального газа в столкновениях сообщают замагниченному иону F2-области продольную (вдоль магнитного поля) составляющую своей скорости (рис. 5). Ионы увлекают за собой электроны за счет внутреннего поляризованного электрического поля и движутся вместе с ними вдоль силовых линий геомагнитного поля.

Вертикальная составляющая скорости ветрового увлечения ионов будет, в пренебрежении эффектами склонения (различием между географическими и геомагнитными координатами):

$$V_{iz} \cong V_{i||} \cdot \sin I \cong V_{nx} \cdot \cos I \cdot \sin I,$$

где V_{nx} – меридиональная компонента нейтрального ветра, I – наклонение геомагнитного поля. То есть вертикальная составляющая скорости ветрового увлечения ионов обусловлена меридиональной составляющей скорости горизонтального движения нейтрального газа. Если V_{nx} направлена к экватору, то в обоих полушариях сообщаемая ионам V_{iz} будет направлена вверх, при V_{nx} , направленной к полюсам, V_{iz} будет направлена вниз.

На ночной стороне ветер преимущественно направлен к экватору и стремится поднять плазму вверх, на высоты, где скорость химических потерь ионов O^+ меньше, что в совокупности с потоками плазмы из плазмосферы в ионосферу приводит к ее накоплению.

Следовательно, широтно-временные вариации горизонтального термосферного ветра определяют соответствующие вариации электронной концентрации на высотах F2-области ионосферы. Это подтверждается результатами модельных расчетов с использованием различных версий UAM, отличающихся, главным образом, способом расчета циркуляции нейтрального газа (рис. 1-4). Например,

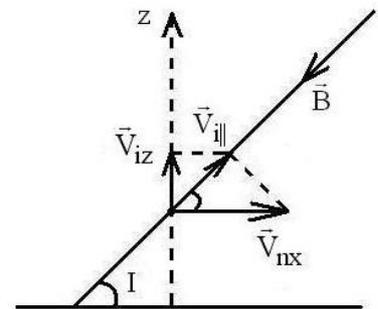


Рис. 5. Сообщение ионам вертикальной составляющей скорости при столкновении с нейтральными компонентами

отмечалось, что обе аномалии ярче выражены преимущественно при минимуме солнечной активности. Это объясняется тем, что скорость горизонтального нейтрального ветра при высокой солнечной активности меньше, чем при низкой, за счет увеличения силы трения между нейтральным и ионным газами.

Различие в эффективности ветрового увлечения ионов в разных географических долготных секторах обусловлено долготной вариацией произведения $\cos I \cdot \sin I$ (рис. 6).

На рис. 6 отчетливо видно, что в южном полушарии в долготном секторе 255-315°E, где наблюдается аномалия моря Уэдделла, значения $\cos I \cdot \sin I$ наибольшие, а в секторе, отстоящем на 180° – наименьшие, что, в свою очередь, и определяет отличие эффективности ветрового увлечения ионов и, как следствие, формирование WSA.

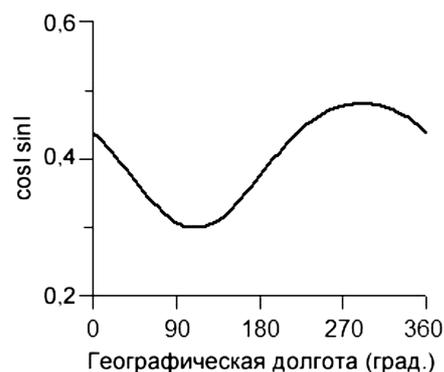


Рис. 6. Зависимость произведения $\cos I \cdot \sin I$ от географической долготы на широте 45° в южном полушарии

4. Выводы

Таким образом, проведено исследование механизма формирования аномалии моря Уэдделла (WSA) методом численного моделирования с использованием эмпирической модели ионосферы IRI-2001 и различных версий глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM, отличающихся способом расчета термосферного состава и 3-мерной циркуляции нейтрального газа. Модельные расчеты проводились для условий декабрьского и июньского солнцестояний при низкой и высокой солнечной активности.

Установлено, что WSA в южном летнем полушарии при низкой и высокой солнечной активности воспроизводится обеими моделями. Аномалия отчетливо видна в географическом долготном секторе 255-315°. Показано, что аналогичная аномальная долготная вариация плотности плазмы на высотах F2-области ионосферы имеет место в долготном секторе 75-135° северного полушария в летних условиях. Обе аномалии отчетливее выражены при низкой солнечной активности.

Численные эксперименты показали, что причиной формирования обеих аномалий является несовпадение географической и геомагнитной осей Земли, обуславливающее различия вертикальной составляющей скорости ветрового увлечения ионов на высотах F2-области ионосферы в западном и восточном географических долготных секторах.

Вариация WSA и аномалии в северном полушарии, связанная с солнечной активностью, определяется соответствующими вариациями скорости горизонтального нейтрального ветра.

Литература

- Bellchambers W.H., Piggott W.R.** Ionospheric measurements made at Halley Bay. *Nature*, v.182, p.1596-1597, doi: 10.1038/1821596a0, 1958.
- Bilitza D.** International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, v.36, N 2, p.261-275, 2001.
- Burns A.G., Zeng Z., Wang W., Lei J., Solomon S.C., Richmond A.D., Killeen T.L., Kuo Y.-H.** Behavior of the F₂ peak ionosphere over the South Pacific at dusk during quiet summer conditions from COSMIC data. *Journal of Geophysical Research*, v.113, A12305, doi:10.1029/2008JA013308, 2008.
- Dudeney J.R., Piggott W.R.** Antarctic ionospheric research, in Upper Atmosphere Research in Antarctica. *Antarctic Research Series*, v.29, p.200-235, 1978.
- Dungey J.W.** Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Physical Review Letters*, v.6, p.47-48, 1961.
- He M., Liu L., Wan W., Ning B., Zhao B., Wen J., Yue X., Le H.** A study of the Weddell Sea Anomaly observed by FORMOSAT-3/COSMIC. *Journal of Geophysical Research*, v.114, A12309, doi:10.1029/2009JA014175, 2009.
- Hedin A.E., Fleming E.L., Manson A.H., Schmidlin F.J., Avery S.K., Clark R.R., Franks S.J., Fraser G.J., Tsuda T., Vial F., Vincent R.A.** Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.58, N 13, p.1421-1447, 1996.
- Horvath I.** A total electron content space weather study of the nighttime Weddell Sea Anomaly of 1996/1997 southern summer with TOPEX/Poseidon radar altimetry. *Journal of Geophysical Research*, v.111, A12317, doi:10.1029/2006JA011679, 2006.
- Horvath I., Essex E.A.** The Weddell Sea Anomaly observed with the TOPEX satellite data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.65, p.693-706, 2003.

- Horvath I., Lovell B.C.** An investigation of the northern hemisphere midlatitude nighttime plasma density enhancements and their relations to the midlatitude nighttime trough during summer. *Journal of Geophysical Research*, v.114, A08308, doi:10.1029/2009JA014094, 2009a.
- Horvath I., Lovell B.C.** Distinctive plasma density features of the topside ionosphere and their electrodynamic features investigated during southern winter. *Journal of Geophysical Research*, v.114, A01304, doi:10.1029/2009JA013683, 2009b.
- Horvath I., Lovell B.C.** Investigating the relationships among the South Atlantic Magnetic Anomaly, southern nighttime midlatitude trough, and nighttime Weddell Sea Anomaly during southern summer. *Journal of Geophysical Research*, v.114, A02306, doi:10.1029/2008JA013719, 2009c.
- Horvath I., Lovell B.C.** Investigation of the southern daytime midlatitude trough's relation with the daytime Weddell Sea Anomaly during equinoxes. *Journal of Geophysical Research*, v.115, A01302, doi:10.1029/2008JA014002, 2010.
- Lee G., Burns A.G., Kirn Y.-H., Wang W.** Seasonal and solar activity variations of the Weddell Sea Anomaly observed in the TOPEX total electron content measurements. *Journal of Geophysical Research*, v.114, A04307, doi: 10.1029/2008JA013801, 2009.
- Karpachev O.A., Gasilov N.A., Karpachev A.T.** Reasons of the diurnal/longitudinal anomaly in the ionospheric plasma density. *8th International Conference "Problems of Geocosmos", Book of Abstracts*, St.Petersburg State University, p.48, 2010.
- Lin C.H., Liu J.Y., Cheng C.Z., Chen C.H., Liu C.H., Wang W., Burns A.G., Lei J.** Three-dimensional ionospheric electron density structure of the Weddell Sea Anomaly. *Journal of Geophysical Research*, v.114, A02312, doi: 10.1029/2008JA013455, 2009.
- Liu H., Thampi S.V., Yamamoto M.** Phase reversal of the diurnal cycle in the midlatitude ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, v.115, A01305, doi: 10.1029/2009JA014689, 2010.
- Martynenko O.V., Knyazeva M.A.** Model integration in the Framework Atmosphere Model (FrAM). *Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXXI Annual Seminar. Apatity, KSC RAS*, p.157-159, 2008.
- 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 and Applied Geophysics*, v.127, N 2/3, p.219-254, 1988.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Surotkin V.A., Naumova N.M.** Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.53, N 11/12, p.1113-1124, 1991.
- 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 the MSTU*, v.1, N 2, p.23-84, 1998.
- Pavlov A.V., Pavlova N.M.** Anomalous nighttime peaks in diurnal variations of NmF2 close to the geomagnetic equator: A statistical study. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.69, N 15, p.1871-1883, doi:10.1016/j.jastp.2007.07.003, 2007.
- Penndorf R.** The average ionospheric conditions over the Antarctic in Geomagnetism and Aeronomy. *Antarctic Research Series*, N 4, p.1-45, 1965.
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.** NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *Journal of Geophysical Research*, v.107, p.1468, doi:10.1029/2002JA009430, 2002.
- Prölss G.W.** Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere: Recent results obtained by satellite – borne gas analysers. *Review of Geophysics and Space Physics*, v.18, N 1, p.183-202, 1980.
- Thampi S.V., Lin C., Liu H., Yamamoto M.** First tomographic observations of the Midlatitude Summer Nighttime Anomaly over Japan. *Journal of Geophysical Research*, v.114, A10318, doi:10.1029/2009JA014439, 2009.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.** Физика ионосферы. *М., Наука*, 528 с., 1988.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И.** Влияние магнитной активности на глобальное распределение зон авроральных вторжений. *Геомагнетизм и аэронавигация*, т.45, № 4, с.467-473, 2005.
- Карпачев А.Т., Гасилов Н.А., Карпачев О.А.** Причины долготных вариаций NmF2 на средних и субавроральных широтах в летних ночных условиях. *Геомагнетизм и аэронавигация*, т.50, № 4, с.1-7, 2010.
- Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П.** Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. *М., Наука*, 192 с., 1983.
- Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глушенко Т.А., Наумова Н.М.** Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли. *Геомагнетизм и аэронавигация*, т.30, № 4, с.612-619, 1990.
- Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В., Намгаладзе А.Н.** Глобальная модель верхней атмосферы с переменным шагом интегрирования по широте. *Геомагнетизм и аэронавигация*, т.36, № 2, с.89-95, 1996.