

В.А. Шемелов, К.А. Лобанов

МОДЕЛЬ СПРАВОЧНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМОСФЕРЫ

V.A. Shemelov, K.A. Lobanov

REFERENCE TEC MODEL OF PLASMASPHERE

В работе рассмотрен вопрос моделирования вертикального профиля концентрации электронов на высотах выше максимума концентрации электронов в ионосфере. Показана актуальность и выполнена разработка модели справочного полного электронного содержания (ПЭС) плазмосферы по данным экспериментальных измерений ПЭС в интервале высот от 500 до 20 000 км на основе регистрации сигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС) GPS на борту низкоорбитальных космических аппаратов системы COSMIC. Проверка качества разработанной модели справочного ПЭС плазмосферы выполнялась путем расчета эффективного индекса солнечной активности и уточнения с его помощью модельного значения критической частоты слоя F2 ионосферы. По результатам апробации относительная ошибка восстановления значений f_oF2 при невозмущенных геомагнитных условиях в дневные и ночные часы суток составила 7 – 10 %.

Ключевые слова: плазмосфера, верхняя ионосфера, модель плазмосферы, полное электронное содержание, концентрация электронов, GPS, COSMIC.

In work the question of modelling of a vertical structure of electron concentration at heights above a maximum of electron concentration in an ionosphere is considered. The urgency is shown and development of the reference total electron contents (TEC) model of plasmasphere according to experimental TEC measurements in an interval of heights from 500 up to 20 000 km on the basis of registration of signals of GPS radionavigating system satellite onboard space vehicles in low orbits of system COSMIC is executed. Quality check of the developed reference TEC model of plasmasphere was carried out by calculation of an effective index of solar activity and specification with its help of modelling value of critical frequency of layer F2 of an ionosphere. By results of approbation the relative error of restoration of values f_oF2 under not indignant geomagnetic conditions in day time and night hours of day has made 7 – 10 %.

Key words: plasmasphere, upper ionosphere, model of plasmasphere, total electron contents, electron concentration, GPS, COSMIC.

Введение

Геофизическое обеспечение функционирования средств радиосвязи, радиопеленгации и радионавигации является задачей, требующей знания состояния ионосферы. В связи с тем что в настоящее время сеть регулярных наблюдений за состоянием ионосферы не позволяет в полной мере освещать требуемую территорию, для диагностирования ионосферы пользуются справочными ионосферами, основанными на эмпирических моделях. В частности, при организации коротковолновой радиосвязи хорошо

себя зарекомендовала международная справочная ионосфера [9], полезным свойством которой является способность адаптировать среднемесячные значения параметров ионосферы к текущему её состоянию на основе измерений либо параметров ионосферы (например, высота уровня максимума концентрации электронов слоя F2, критическая частота слоя F2, ПЭС), либо параметров радиосигналов (например, разность фаз двух когерентных радиоволн), связанных с состоянием ионосферы. Процедура адаптации справочной ионосферы к её фактическому состоянию основана на использовании эффективного индекса солнечной активности. Под эффективным индексом солнечной активности обычно понимают такое значение индекса солнечной активности (например, W или F10.7) – входного параметра модели ионосферы, при котором значения её выходных параметров соответствуют измеренным значениям параметров ионосферы [1,5,14,15]. Определив эффективный индекс солнечной активности и задав его значение в качестве исходного модели ионосферы, можно получить справочную ионосферу, адаптированную к текущему уровню солнечной активности.

ПЭС ионосферы вызывает наибольший интерес в связи с глобальностью, непрерывностью и дешевизной получения данного параметра при использовании приемной двухчастотной аппаратуры потребителя СРНС.

Предпосылки

С 1997 г. в Военно-космической академии им. А.Ф.Можайского проводились экспериментальные измерения ПЭС на основе регистрации сигналов СРНС “Циклон/Цикада” с помощью модернизированной навигационной аппаратуры потребителя “Шхуна” [1,15]. Тогда на основе экспериментальных и модельных данных ПЭС выполнялся расчет эффективного индекса солнечной активности, уточнение модели ионосферы IRI и восстановление критических частот слоя F2 ионосферы. При этом погрешность восстановления значений f_0F2 , выраженная относительной ошибкой, в среднем составила 6–9 % для г. Санкт-Петербурга и г. Москвы.

Однако при смене используемой СРНС в методике расчета эффективного индекса солнечной активности с “Циклон/Цикада” (высота орбиты 1000 км) на ГЛОНАСС/GPS (высота орбиты 19 000–20 000 км), произошло увеличение погрешности восстановления значений f_0F2 в среднем до 9–12 % [6].

В качестве возможной причины данного эффекта может быть неадекватность моделей вертикального распределения концентрации электронов на высотах выше 1000 км (включая высоты плазмосферы), вызванная малым числом эмпирических данных к моменту построения последних. К аналогичному заключению также пришли авторы [6,16].

В настоящей работе выдвинута гипотеза, что привлечение новых данных при разработке справочной плазмосферы позволит повысить качество диагностирования ионосферы с применением радиофизического метода, использующего в качестве исходных данных параметры сигналов среднеорбитальных СРНС.

Таким образом, целью работы является проверка этой гипотезы.

Для достижения поставленной цели работы следует решить следующие частные задачи исследования:

- выполнить анализ существующих моделей плазмосферы на предмет соответствия данным измерений;

- проанализировать наличие и возможность использования данных измерений, пригодных для целей разработки новой модели плазмосферы;
- разработать опытную модель плазмосферы на основе доступных эмпирических данных в случае выявления существенных погрешностей в описании плазмосферы рассмотренными моделями;
- выполнить апробацию разработанной модели плазмосферы.

В продолжение логики исследований проанализируем существующие возможности модельного описания состояния плазмосферы.

Анализ моделей плазмосферы

Используемые при расчетах в режиме реального времени модели плазмосферы являются эмпирическими или гибридными. Например, это:

- а) стандартная модель ионосферы СМИ (ГОСТ 25645.146-89);
- б) параметрическая модель ионосферы PIM;
- в) глобальная модель плазмосферы GCPM;
- г) трехмерная аналитическая модель ионосферы NeQuick;
- д) глобальная модель ионосферы и плазмосферы NeUoG-plas;
- е) стандартная модель ионосферы и плазмосферы SPIM.

Представленные модели описывают осредненное состояние среды, и это является существенным недостатком, который в какой-то степени компенсируется адаптационными возможностями моделей.

К примеру, на рис. 1 а изображены аналитические профили электронной концентрации, используемые на высотах выше максимума концентрации электронов в гибридных моделях ионосферы. Очевидно, что то или иное аналитическое представление профиля параметра ионосферы является более или менее грубым приближением к реальному состоянию среды и, несмотря на вариации с высотой параметров аналитических зависимостей, наличие погрешностей неизбежно.

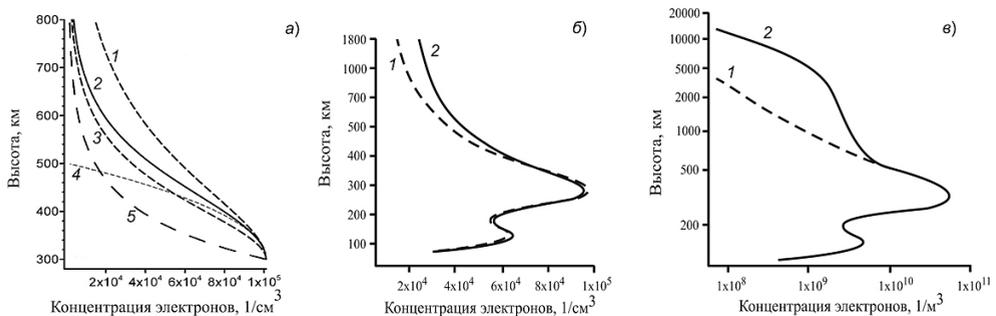


Рис. 1. Вертикальные профили концентрации электронов по данным моделей ионосферы.

а) 1 – α -Чепмена, 2 – хи-квадрат, 3 – β -Чепмена, 4 – параболическая, 5 – экспоненциальная зависимость; б) 1 – по данным модели IRI [8], 2 – по экспериментальным данным; в) 1 – по данным модели NeQuick [9], 2 – по данным модели NeQuick с верхней частью из модели Галлахера [1].

Далее, в работах [6,16] выполнено сравнение экспериментальных профилей электронной концентрации с профилями, полученными из эмпирических моделей ионосферы (рис. 1 б), а в работе [11] – сравнение профилей, полученных по разным моделям (рис. 1 в).

Анализ представленных зависимостей показывает, что существующие эмпирические модели ионосферы, применяемые для оперативных расчетов параметров среды, даже будучи адаптированными на текущие гелиогеофизические условия, недостаточно корректно описывают вертикальный профиль концентрации электронов, особенно на высотах плазмосферы. Это влечет за собой ошибки при получении модельных значений ПЭС, используемых наряду с экспериментальными измерениями для определения эффективного индекса SA, применяемого в качестве параметра адаптации модели ионосферы.

В настоящее время для определения значений ПЭС при эксплуатации средне-орбитальных систем наибольшее применение нашли модели SPIM [13] и NeQuick. Рассмотрим, каким образом они описывают ПЭС на высотах плазмосферы.

На рис. 2 представлены графики суточного хода ПЭС, полученного по моделям SPIM (рис. 2 а) и NeQuick (рис. 2 б), для различных интервалов высот. На рис. 2 в представлено сравнение результатов расчета ПЭС моделями SPIM и NeQuick, на рис. 2 г – сравнение ПЭС по двум моделям и данным центра CODE.

Из анализа представленных зависимостей видно, что модельные данные довольно противоречивы и нуждаются в существенной коррекции, желательно на основе данных экспериментальных измерений. ПЭС по модели NeQuick имеет суточный ход, сильно отличающийся от суточного хода ПЭС по модели SPIM (рис. 2 в). Центр CODE для построения карт ПЭС использует ассимиляционную модель, позволяющую использовать данные измерений в режиме времени, близком к реальному. Считается, что данные центра CODE обладают малой погрешностью, хоть и занижают экспериментальные данные. Из рис. 2 г видно, что характер суточного хода по модели SPIM хорошо согласуется с данными центра CODE.

Таким образом, выполненный анализ подтверждает высказанное ранее предположение о неудовлетворительной точности описания вертикального профиля концентрации электронов эмпирическими моделями ионосферы.

Однако в рамках применяемого метода [15] диагностирования состояния ионосферы возможно отказаться от вертикального профиля концентрации электронов и использовать параметр ПЭС.

О появившихся на сегодняшний день возможностях измерения ПЭС на высотах плазмосферы речь пойдет далее.

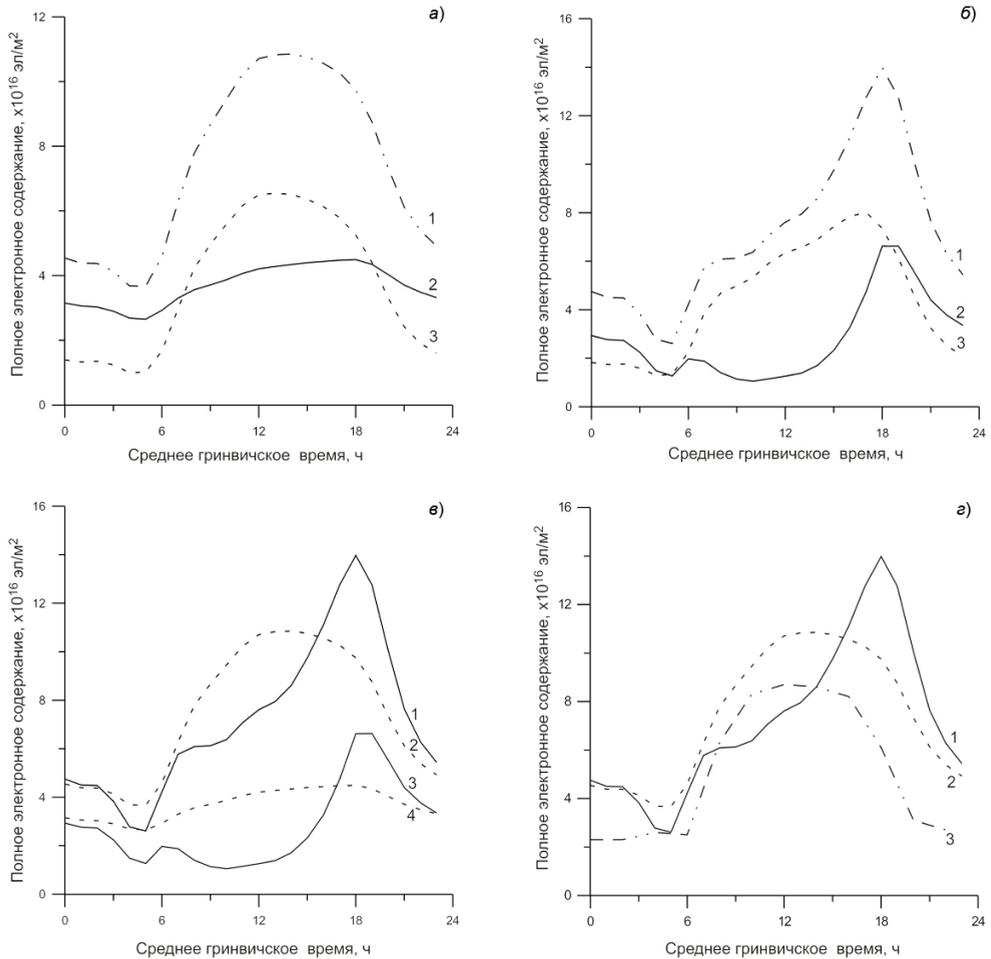


Рис. 2. ПЭС по моделям SPIM, NeQuick и данным центра CODE.

а и *б*: 1 – от 60 до 20 000 км по моделям NeQuick и SPIM соответственно, 2 – от 500 до 20 000 км по моделям NeQuick и SPIM, 3 – от 60 до 500 км по моделям NeQuick и SPIM; *в*: 1 и 2 – от 60 до 20 000 км по моделям NeQuick и SPIM соответственно, 3 и 4 – от 500 до 20 000 км по моделям NeQuick и SPIM; *г*: 1 и 2 – от 60 до 20 000 км по моделям NeQuick и SPIM соответственно, 3 – по данным центра CODE).

Измерение ПЭС плазмосферы

В настоящее время в связи с развитием трансионосферных методов зондирования среды появляются возможности для более полного описания верхней ионосферы путем использования данных измерений с геофизических и навигационных космических аппаратов. Большие перспективы заключаются в использовании космических аппаратов с установленными на борту двухчастотными приемниками сигналов

СРНС например, системы COSMIC (система обзора для задач метеорологии, климата и изучения ионосферы), созданной в целях развития радиозатменных методов.

На борту космических аппаратов системы COSMIC расположена двухчастотная приемная аппаратура среднеорбитальной системы GPS. Специфика данного способа измерения заключается во взаимном расположении космических аппаратов двух систем и возможности регистрации сигналов космических аппаратов системы GPS как при положительных, так и при отрицательных углах места на навигационный космический аппарат. Сущность радиозатменных методов состоит в обработке принятой информации и восстановлении метеорологических и геофизических параметров путем решения обратной радиофизической задачи. Данные регистрации сигналов передаются на наземные пункты приема информации для последующей обработки и расчета значений ПЭС в диапазоне просвечиваемых радиосигналом высот. Такие данные применяются в задачах метеорологии при расчетах индексов конвекции [2].

В настоящий момент орбитальная группировка системы COSMIC в количестве шести аппаратов расположена на круговых орбитах в шести плоскостях с наклоном $\sim 72^\circ$ на высотах ~ 500 и ~ 800 км с последующим переходом на единую высоту орбит. Численность группировки системы планируется увеличить до 12, а впоследствии – и до 24 аппаратов.

Применяемый нами метод диагностирования состояния ионосферы в качестве входных данных использует значения ПЭС до высоты орбиты среднеорбитальной навигационной системы (20 000 км). Средства системы COSMIC позволяют диагностировать значения ПЭС в диапазоне высот от 500 км до 20 000 км. Значения ПЭС, полученные при больших положительных углах места радиолуча и доступные по адресу в сети Интернет <http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu>, обладают погрешностью измерений $2-3 \cdot 10^{16}$ эл/м², что соответствует погрешности определения ПЭС с помощью наземных двухчастотных приемников системы GPS.

Перспективность радиофизического метода диагностирования параметров среды обусловлена его глобальностью, дешевизной и приемлемой точностью, а также доступностью экспериментальных данных.

Таким образом, подтверждается наличие и возможность использования данных измерений ПЭС средствами системы COSMIC, пригодных для целей разработки новой модели плазмосферы.

Модель справочного ПЭС плазмосферы

Следует отметить, что использование зарубежных источников данных при геофизическом обеспечении прикладных задач нежелательно, что обуславливает необходимость создания системы, аналогичной системе COSMIC, в нашей стране. Однако проверку выдвинутой гипотезы возможно осуществить на основе имеющихся экспериментальных данных путем разработки новой математической модели ПЭС плазмосферы, пригодной для решения прикладных задач.

Известно, что разработке математических моделей физических объектов должна предшествовать концептуальная (или вербальная) модель физических процессов, определяющих состояние изучаемого объекта.

Для понимания данных процессов вначале нами были изучены факторы, оказывающие влияние на численные характеристики ПЭС плазмосферы. Данными факторами явились: солнечная активность (индекс СА – число Вольфа (W) или поток радиоизлучения на длине волны 10,7 см ($F_{10,7}$)), геомагнитная активность (индекс A_p), местное время или геомагнитная долгота (Λ) и геомагнитная широта (X). Данные предикторы будут являться входными параметрами в модель.

Также следует определить граничные условия для предикторов. Таковыми являются: W – от 0 до 50 (низкий уровень солнечной активности); A_p – от 10 до 100 нТл (низкий уровень геомагнитной активности); Λ – от 0 до 360 град; X – от -80 до 80 град. Следует отметить, что выбор граничных условий по некоторым гелиогеофизическим параметрам был продиктован условиями, имевшими место при составлении выборки из ряда данных наблюдений.

Далее, при наличии ясной для понимания и непротиворечивой вербальной модели физических процессов в изучаемой объекте, целесообразно перейти к разработке математической модели ПЭС плазмосферы, например, в рамках физико-статистического подхода к построению моделей [4].

В основе разработки математической модели ПЭС плазмосферы будет положен алгоритм идентификации параметров модели, состоящий из следующих этапов.

На первом этапе, в целях получения осредненных численных характеристик изучаемого параметра, выполнялся расчет математического ожидания ПЭС плазмосферы в узлах регулярной сетки, в которые значения ПЭС интерполировались из узлов хаотической сетки подионосферных точек.

На втором этапе выполнялось количественное оценивание имеющего определяющее значение параметра, такого, как временной интервал осреднения экспериментальных данных ПЭС плазмосферы. Он определяется периодом стационарности ПЭС плазмосферы, зависящим от времени суток и уровня гелиогеофизической возмущенности среды. Экспериментально было установлено, что во время спокойных геомагнитных условий, а также в дневные и ночные времена суток период стационарности ПЭС плазмосферы составляет 60-90 мин, в восходно-заходные времена и при геомагнитных возмущениях – 10-20 мин.

На третьем этапе, в целях пространственной аппроксимации экспериментальных значений ПЭС плазмосферы, было использовано аналитическое представление поля с помощью известного математического аппарата – сферического гармонического разложения величины по ортогональным функциям, широко применяемого при климатическом описании геофизических параметров. Это, например, параметры магнитного поля Земли и слоя F2 ионосферы, такие, как потенциал (U) индукции и составляющие (B_x, B_y, B_z) вектора индукции геомагнитного поля внутриземных источников [2], критическая частота слоя F2 ионосферы (f_0F2), максимально применимая частота для скачка на расстояние 3000 км (M(3000)F2) [7].

Основное выражение метода сферического гармонического анализа имеет вид:

$$F(X, \Lambda) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=m}^N [g_n^m \cos(m\Lambda) + h_n^m \sin(m\Lambda)] \cdot P_n^m(\cos X'), \quad (1)$$

где $F(X, \Lambda)$ – экспериментальное распределение ПЭС; Λ – геомагнитная долгота;

$X' = 90 - X$ – модифицированная широта, где $X = \arctg(I_{500} / \cos\Phi)$; I_{500} – магнитное наклонение на высоте 500 км; g_n^m , h_n^m – коэффициенты разложения; $P_n^m(\cos X')$ – присоединенные функции Лежандра порядка n и индекса m в нормировке Шмидта.

Таким образом, определение коэффициентов сферического разложения для данного месяца, четного часа и уровней солнечной и геомагнитной активности выполнялось на основе рассчитанных значений математического ожидания на основе выборки ПЭС с 2007 по 2010 г., при этом коэффициенты соотносились с 15-м числом месяца. Между 15-ми числами соседних месяцев для определения ПЭС плазмосферы в модели реализован алгоритм линейной интерполяции значений ПЭС, полученных по двум наборам коэффициентов. Аналогичная процедура интерполяции предусмотрена для коррекции модели ПЭС плазмосферы по текущему уровню SA.

При этом идентифицируемыми параметрами модели являлись рассчитываемые коэффициенты сферического гармонического разложения ПЭС по ортогональным функциям.

Таким образом, модель справочного ПЭС плазмосферы включает в себя вербальную модель физических процессов изучаемого объекта и математическую модель ПЭС плазмосферы. Вербальная модель физических процессов изучаемого объекта служит для обоснования перечня влияющих факторов на объект, а математическая модель ПЭС плазмосферы – для функциональной связи предикторов (параметров влияющих факторов) и предиктанта (ПЭС плазмосферы).

Отметим, что построенная модель справочного ПЭС плазмосферы выгодно отличается от предшествующих [10,12,13], а именно:

- а) выявленными влияющими факторами на ПЭС плазмосферы и сформулированными градациями данных факторов, позволившими корректно использовать исходные данные для построения модели;
- б) принципиально новыми эмпирическими данными, положенными в ее основу.

Для иллюстрации результатов работы модели на рис. 3 представлен суточный ход ПЭС, полученный для диапазона высот 500-20 000 км для станции Fairford (51.7°N, 1.5°W) для 3 марта 2007 г. с помощью моделей SPIM (2) и NeQuick (3), а также по разработанной модели справочного ПЭС плазмосферы (1). Из анализа рисунка видно, что данные моделей SPIM и NeQuick довольно противоречивы, а модель справочного ПЭС плазмосферы дает более высокие значения относительно других моделей. Однако характер суточного хода ПЭС по модели справочного ПЭС плазмосферы больше сходен с данными модели SPIM.

Таким образом, мы рассмотрели входные параметры и граничные условия модели, математический аппарат, использованный при расчете коэффициентов модели, и алгоритм ее разработки.

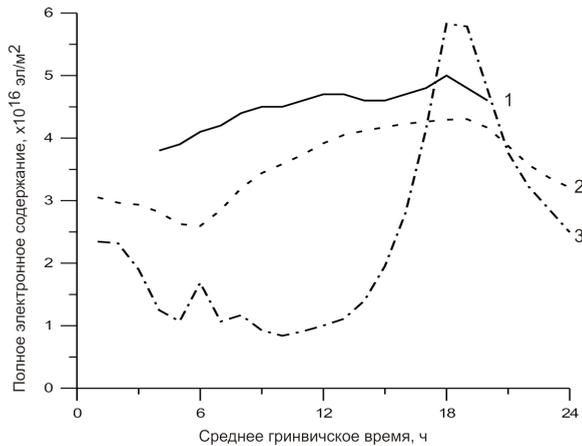


Рис. 3. Полное электронное содержание в слое 500-20 000 км для станции Fairford 3.03.2007.

Апробация модели справочного ПЭС плазмосферы

В рамках способа адаптации модели ионосферы к текущим гелиогеофизическим условиям с помощью эффективного индекса CA , рассчитываемого по данным измерений параметров сигналов СРНС ГЛОНАСС и GPS, вначале следует определить экспериментальный и модельный ПЭС в слое от поверхности Земли до 20 000 км. До высоты орбиты КА системы COSMIC модельный ПЭС следует получить с помощью модели IRI, выше орбиты КА системы COSMIC — с использованием разработанной модели ПЭС плазмосферы. Уточненный таким образом модельный ПЭС позволяет более корректно рассчитывать требуемый эффективный индекс CA , используемый для адаптации модели ионосферы, например модели SPIM.

На рис. 4 представлен график относительной ошибки критической частоты слоя F2 ионосферы, восстановленной по данным модели SPIM, уточненной разными индексами CA . Наибольшую погрешность имеют значения f_0F2 , смоделированные с применением числа Вольфа (1). Малые значения погрешности — у критических частот, смоделированных с применением эффективного индекса, полученного на основе расчета ПЭС путем обработки сигналов СРНС GPS, зарегистрированных наземными средствами (2). Наименьшую погрешность имеют частоты, полученные при использовании эффективного индекса CA , рассчитанного с применением модели ПЭС плазмосферы (3), но только для геомагнитно-невозмущенных условий (рис. 4, 5), когда суточная сумма индекса A_p не превышает значения ~ 100 нТл. Также уменьшение погрешности имеет место в полуденные и полуночные времена суток, когда интервал осреднения ПЭС не превышает характерный интервал изменчивости ПЭС плазмосферы.

Полученные в результате апробации модели ПЭС плазмосферы результаты позволяют сделать вывод о влиянии вариации концентрации электронов на высотах плазмосферы на ПЭС и, следовательно, на погрешности диагностирования параметров ионосферы с применением радиофизического метода.

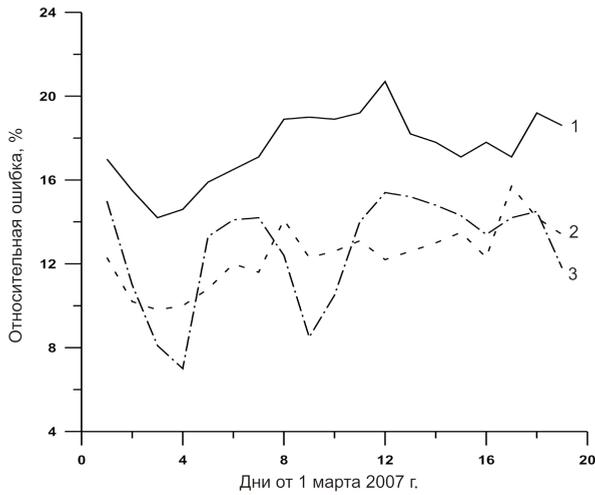


Рис. 4. Относительная ошибка восстановления критических частот f_0F_2 для станции Fairford моделью SPIM на основе числа Вольфа (1), ионосферного индекса CA (2) и индекса, полученного с применением модели справочного ПЭС плазмосферы (3) для 15 ч МСВ.

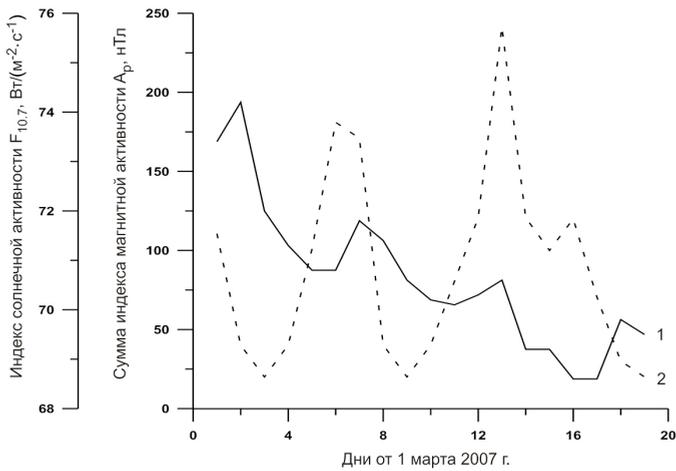


Рис. 5. Индексы солнечной (1) и геомагнитной активности (2).

Выводы

Результаты выполненной работы позволяют заключить:

- существует проблема недостаточно корректного описания эмпирическими моделями ионосферы профиля концентрации электронов на высотах выше максимума концентрации электронов;

- в целях более корректного описания состояния плазмосферы целесообразно использовать данные трансионосферного зондирования с бортов низкоорбитальных космических аппаратов путем приема и обработки сигналов СРНС GPS;
- применение разработанной модели ПЭС плазмосферы при моделировании критических частот f_0F_2 слоя F2 ионосферы дало удовлетворительные результаты при спокойных геомагнитных условиях для ночных и дневных условий, а именно: 7-10 % относительной ошибки восстановления f_0F_2 , что позволяет говорить о большей объективности описания состояния плазмосферы в отношении интегральной концентрации электронов;
- неудовлетворительная точность модели ПЭС плазмосферы в восходно-заходные часы может быть вызвана недостаточной временной дискретностью исходных данных ПЭС плазмосферы, что говорит о необходимости увеличения числа низкоорбитальных космических аппаратов, а также задействованных СРНС.

Литература

1. *Ашманец В.И., Зубарев А.И., Ортиков М.Ю., Троицкий Б.В.* Оперативная оценка состояния околоземного космического пространства // Геомагнетизм и аэрномия, 2000, Т. 40, № 1, с. 109-112.
2. *Дудник М.Г., Канухина А.Ю., Власов А.А.* Расчет индексов конвекции с использованием данных радиозатемненного зондирования спутников COSMIC/FORMOSAT. / Ученые записки РГГМУ, 2011, № 20, с. 56-70.
3. ГОСТ 25645.126-85. Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 21 с.
4. *Комаров В.С., Попов Ю.Б., Суворов С.С., Кураков В.А.* Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии. — Томск.: ИОА СО РАН, 2004. — 235 с.
5. *Михайлов А.В., Терехин Ю.Л., Михайлов В.В.* Региональный эффективный индекс солнечной активности для прогноза месячных медианных значений f_0F_2 // Геомагнетизм и аэрномия, 1990, т. 30, № 4, с. 624-630.
6. *Полтавский О.С.* Методы обеспечения КВ-трасс информацией о состоянии ионосферы — Автореф. дис. на соискание учен. степени канд. физ.-мат. наук. — Ростов-на-Дону, 2009.
7. *Троицкий Б.В., Ортиков М.Ю., Лобанов К.А., Власов А.А., Погорельцев А.И.* Ионосферное обеспечение коротковолновой радиосвязи с использованием карт полного электронного содержания // Геомагнетизм и аэрномия, 2007, т. 47, № 3, с. 413-418.
8. *Чернышев О.В., Васильева Т.Н.* Прогноз максимально применимых частот. — М.: Наука, 1973. — 386 с.
9. *Bilitza D.* International Reference Ionosphere IRI-90. Rept. NSSDC / WDC-A-R&S 90-22, 156 p., Lanham, MD, USA, 1990.
10. *Coisson P., Radicella S., Leitinger R., Nava B.* New option for IRI topside electron density profile using NeQuick model // IRI News Letter, 2005, p.5-7.
11. *Cueto M., Coisson P., Radicella S., Ciraolo L., Herraiz M.* Including the Gallagher plasmaspheric model in the NeQuick ionospheric model // Bulgarian Geophys. J., 2004, v. 30, p. 1-4.
12. *Gallagher D.L., Craven P.D., Comfort R.H.* An empirical model of the Earth's Plasmasphere // Adv. Space Res., 1988, v. 8, p. 15-24.
13. *Gulyaeva T.L., Huang X., Reinisch B.W.* The ionosphere-plasmasphere model software for ISO // Acta Geod. Geophys. Hungarica, 2002, v. 39, № 3, p.247-260.
14. *Minnis C.M., Bazzard G.H.* // J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 1960, v. 18, p.297-303.
15. *Ortikov M.Yu., Shemelov V.A., Shishigin I.V., Troitsky B.V.* Ionospheric index of solar activity based on the data of measurements of the spacecraft signals characteristics // J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2003, v. 165, p.1425-1430.
16. *Stankov S., Jakowski N., Heise S., Muhtarov P., Kutiev I., Warnant R.* A new method for reconstruction of the vertical electron density distribution in the upper ionosphere and Plasmasphere // J. Geophys. Res., 2003, v. 108, p.1164-1180.