

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ МОДЕЛИ IRI-2007 С ДАННЫМИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ АВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ

В.Д. Николаева¹, Л.Н. Макарова¹, А.В. Широчков¹, А.Л. Котиков^{2,3}

1 Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (АНИИИ)

2 Санкт-Петербургский Государственный университет (СПбГУ)

3 Санкт-Петербургский филиал Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (СПбФ ИЗМИРАН)

Аннотация. Данная работа посвящена оценке точности расчетов параметров ионосферы по глобальной эмпирической модели IRI-2007. Сопоставление результатов расчетов по модели IRI-2007 в условиях низкой солнечной активности проводилось с основными характеристиками профилей электронной концентрации. В рассмотрение вошли критические частоты и максимальные высоты слоев E, F₂, полученные по данным вертикального зондирования ионосферы на станции Тромсё, Норвегия (69°40'N, 18°56'E) за период с сентября 2009 по февраль 2010 г. В условиях умеренной геомагнитной активности, когда спорадический слой E_s экранирует вышележащие слои, информацию о вертикальном профиле электронной концентрации можно получать по данным радара некогерентного рассеяния EISCAT. Сравнительный анализ результатов расчетов по модели IRI-2007 с данными радара EISCAT в период слабой магнитной бури, протекавшей с 20 по 23 января 2010 г. (Dst индекс ~ -40 nT), показал существенные различия между модельными и реальными профилями электронной концентрации. Таким образом, показано, что модель IRI-2007 не достаточно описывает специфику физических процессов ионосферы высоких широт и требует включения дополнительных блоков.

Введение

Под математическим моделированием ионосферы понимают процесс, результатом которого является обобщенное количественное описание пространственно-временных вариаций ионосферных параметров, характеризующих ее физическое состояние, таких как электронная концентрация, ионный состав, ионная и электронная температуры, скорость движения ионов и так далее.

Параметры ионосферы заметно меняются с высотой и в зависимости от геомагнитных и географических координат. Авроральная ионосфера представляет собой область, на которую оказывают влияние процессы не столь существенные в средних и низких широтах, например – корпускулярные выпадения. Следовательно, задачей математического моделирования ионосферы является достаточно подробное описание параметров ионосферы путем привязки состояния ионосферы к параметрам солнечной и магнитной активности [1].

Эмпирические (статистические) модели ионосферы строятся путем усреднения большого количества данных наблюдений и представляют собой описание физико-химических характеристик среды и их изменений в виде таблиц предварительно обработанных данных наблюдений или формул аппроксимирующих ряды проведенных измерений. Такой вид моделей может описывать поведение только тех параметров и в тех областях, для которых есть достаточное количество результатов наблюдений. Кроме того, из-за усреднения такие модели не могут воспроизводить распределения параметров, соответствующие каким-либо нестандартным условиям, например, конкретному геомагнитному возмущению [2].

Наиболее широко используемой эмпирической моделью ионосферы является глобальная модель IRI (International Reference Ionosphere) [3], рекомендуемая Committee on Space Research (COSPAR) и International Union of Radio Science (URSI) и являющаяся международным стандартом ионосферы Земли. Последней версией модели является IRI-2007.

В IRI-2007 используются данные мировой сети ионозондов, радаров некогерентного рассеяния, спутников и ракет. Модель рассчитывает плотность и температуру электронов; температуру и состав ионов (O⁺, H⁺, He⁺, NO⁺, O₂⁺), ионный дрейф, полное электронное содержание (TEC) в диапазоне высот от 50 до 1500 км.

Основной целью работы является оценка применимости результатов расчетов эмпирической модели IRI -2007 (International Reference Ionosphere) для авроральной ионосферы. Апробация модели проводилась в условиях различных уровней магнитной и солнечной активности.

Апробация модели IRI-2007 в условиях низкой солнечной активности

Экспериментальные данные

При низкой солнечной активности для оценки точности работы модели было проведено сравнение с реальными данными ионозонда станции Тромсё (Норвегия). Станция Тромсё располагается на $69^{\circ}40'$ с.ш. и $18^{\circ}56'$ в.д. – в центре авроральной зоны. Данные вертикального зондирования размещаются в сети Internet в реальном времени с пятнадцатиминутным разрешением в графическом виде (в виде ионограмм) [4].

Для последующей обработки использовались околополуденные часовые значения (с 10 по 15 часов LT) за период с 19 сентября 2009 по 28 февраля 2010 г. Данный период характеризовался крайне низкой солнечной активностью. С ноября 2009 по февраль 2010 г. наблюдалось плавное увеличение количества солнечных пятен и потока радиоизлучения на длине волны 10.7 см. Среднесуточное количество солнечных пятен за этот период составляло 16 (максимум 71), а индекс F10.7 в среднем был равен 77 (максимум 96 [10^{-22} Вт/Гц*м²]). Величина полного вектора магнитного поля солнечного ветра (В) в конце 2009 г., в среднем за сутки, составляла 4 нТл, что является ее минимальным значением с 1963 г.

По ионограммам определялись следующие ионосферные параметры:

- 1) критические частоты слоев E, F₂ (f_0E , f_0F_2);
- 2) высоты максимумов концентрации слоев E, F₂ (h_mE , h_mF_2).

По критическим частотам ионосферных слоев E, F₂ была рассчитана электронная концентрация в их максимумах (N_mE , N_mF_2).

В обработку вошло более 5000 значений параметров f_0E , f_0F_2 , h_mE , h_mF_2 и модельных значений за тот же временной интервал.

По данным вертикального зондирования было найдено стандартное отклонение (σ) для каждого месяца и часа. Разница между модельными и реальными значениями сравнивалась со стандартным отклонением для каждого параметра. На рисунке 1 представлен пример сопоставления модельного и реального вертикального профиля электронной концентрации.

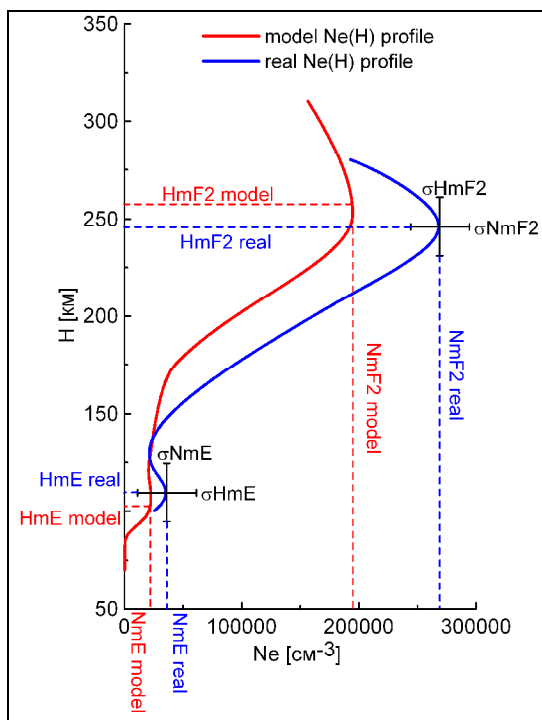


Рисунок 1. Пример построения модельного и реального вертикального профиля электронной концентрации

Результаты апробации модели IRI-2007 в условиях низкой солнечной активности

Максимальные расхождения наблюдаются по высоте максимума слоя F₂ на протяжении всего исследуемого периода (Табл. 1). Но при этом значения σ не настолько высоки, чтобы говорить о том, что модель дает плохие результаты по данному параметру. Разброс модели и реальных значений составляет в среднем, порядка 25 – 30 км, что является допустимой точностью при оценке состояния авроральной ионосферы. Однако не следует упускать из вида систематическую ошибку: модель дает завышенные и сглаженные значения данного параметра.

Полученные по модели значения электронной концентрации максимума слоя F_2 в осенний и весенний периоды сильно расходятся с данными вертикального зондирования. В зимние месяцы мы наблюдаем обратную картину – хорошая согласованность модельных и реальных данных.

Сопоставление модельных и реальных данных, показало их хорошее совпадение для E области ионосферы. Следовательно, математические расчеты концентрации и высоты слоя E, проведенные по модели ионосферы IRI-2007, могут быть использованы для описания и диагностики аврорального слоя E в невозмущенный период.

Таблица 1. Среднемесячные расхождения между реальными и модельными значениями. Отрицательные значения говорят о превышении модельных значений над реальными.

	$\sigma h_m F_2$ [km]	$h_m F_2$ difference [σ]	$\sigma N_m F_2$ [cm ⁻³]	$N_m F_2$ difference [σ]	$\sigma h_m E$ [km]	$h_m E$ difference [σ]	$\sigma N_m E$ [cm ⁻³]	$N_m E$ difference [σ]
сентябрь 2009	10.88	-2.66	36409	2.58	9.68	-1.12	9825	-0.05
октябрь 2009	10.66	-3.61	63677	1.64	6.79	-0.60	8992	0.46
ноябрь 2009	10.24	-3.08	68151	1.70	3.30	-0.34	5764	0.87
декабрь 2009	13.29	-2.18	22955	-0.65	0.00	0.00	1213	1.39
январь 2010	12.14	-2.49	54463	0.29	3.18	-0.23	3679	1.11
февраль 2010	11.06	-2.35	73005	1.33	4.47	-0.43	8669	0.73

Апробация модели IRI-2007 в условиях умеренной солнечной активности

В условиях магнитных возмущений спорадический слой E_s экранирует вышележащие слои. В таком случае, информацию о вертикальном профиле электронной концентрации можно получить по данным радара некогерентного рассеяния EISCAT [5].

Был проведен сравнительный анализ расчетов модели IRI-2007 с данными радара EISCAT в период слабой магнитной бури, протекавшей с 20 по 23 января 2010 г., (Dst индекс $\sim -40nT$) [7]. На рисунке 2 представлены вариации индексов Dst , AU и AL , электронная концентрация по данным радара EISCAT и по расчетам модели IRI-2007. Во всех случаях, когда радар некогерентного рассеяния EISCAT зафиксировал спорадический слой E_s , модель IRI-2007 не воспроизвела увеличение электронной концентрации на высотах 100-120 км. Одной из возможных причин подобного расхождения может быть отсутствие в модели IRI-2007 блока, описывающего высыпание частиц.

Таким образом, показано, что модель IRI не достаточно описывает специфику физических процессов ионосферы высоких широт и требует включения дополнительных блоков.

Список литературы

- 1 Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В., Прогнозирование состояния ионосферы, Гидрометеиздат, Ленинград, 1980г.
- 2 Зубова Ю.В., Ионосферные возмущения по наблюдениям на установках некогерентного рассеяния и их математическое моделирование, автореферат диссертации на соискание ученой степени к. ф.-м. н., на правах рукописи, Мурманск, 2009г.
- 3 <http://modelweb.gsfc.nasa.gov/ionos/iri.html>
- 4 <http://www.tgo.uit.no/ionodata/index.html>
- 5 <http://www.eiscat.se>
- 6 <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>

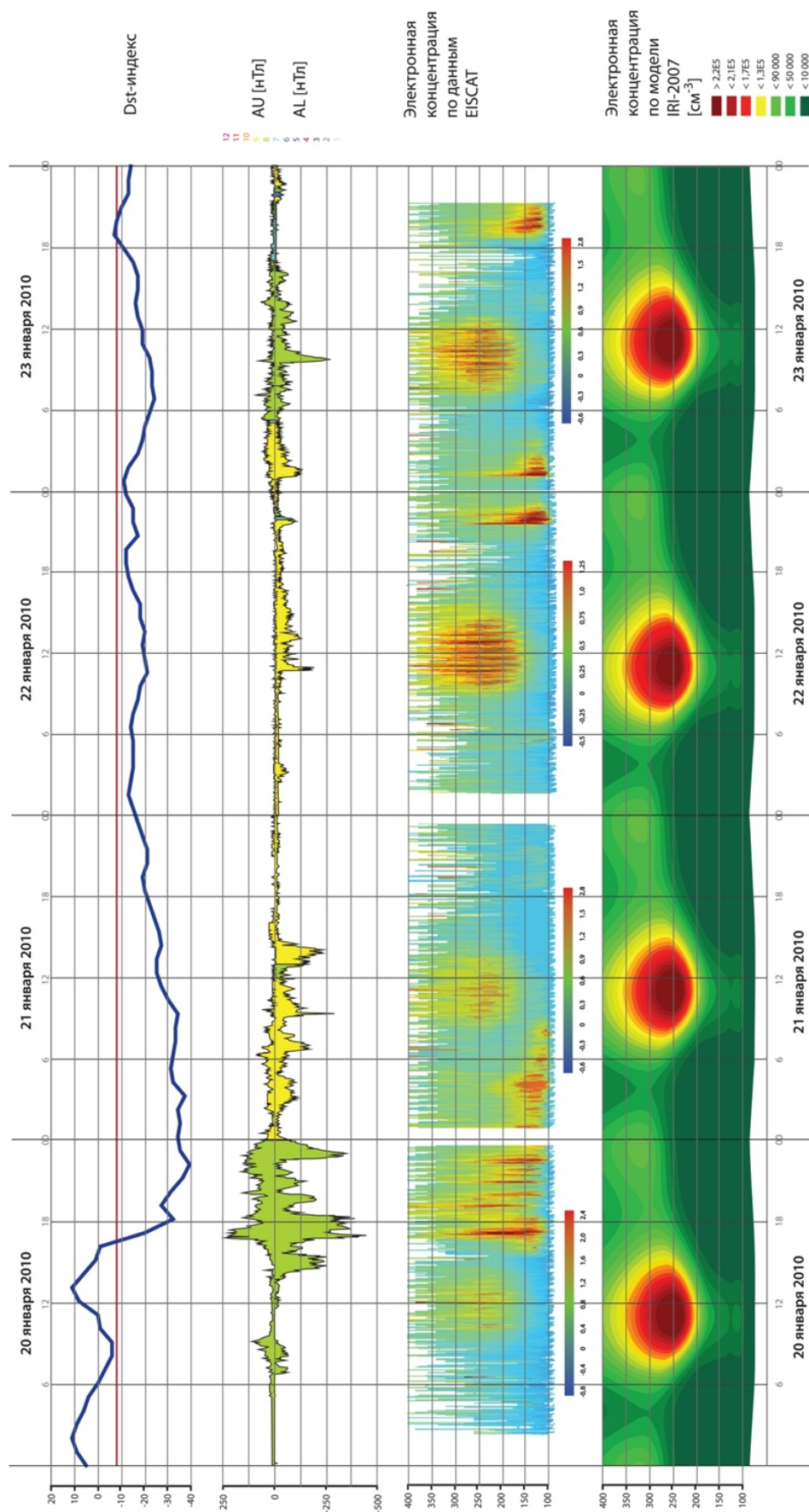


Рисунок 2
Вариации индексов Dst, AU и AL, электронная концентрация по данным радара EISCAT и по расчетам модели IRI-2007