

УДК 550.388.2

КАЛИБРОВКА ЭМПИРИЧЕСКИХ УФ СПЕКТРОВ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕГУЛЯРНОГО E -СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ

© 2022 г. В. Д. Николаева^{1, 2, *}, Е. И. Гордеев³, Д. Д. Рогов^{1, 2}, С. В. Новиков^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение

“Арктический и антарктический научно-исследовательский институт”, Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Санкт-Петербургский государственный университет”, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: vera_nik@list.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Выполнена калибровка эмпирических спектров модели EUVAC и потока излучения в линии L_{α} (входных параметров AIM-E, используемых для расчета регулярного E -слоя), по данным измерений спутника TIMED. Проведенная коррекция позволила повысить точность определения параметров регулярного E -слоя. Результаты расчетов критических частот показывают хорошее согласие с данными вертикального зондирования российских высокоширотных станций как для минимума, так и для максимума солнечной активности.

DOI: 10.31857/S036767652203019X

ВВЕДЕНИЕ

Основным источником ионообразования регулярного E -слоя ионосферы является фотоионизация нейтральных компонент атмосферы крайним ультрафиолетовым (УФ) солнечным излучением (5–105 нм). В земной атмосфере первичные ионы образуются под действием излучения с длиной волны λ менее 103.76 нм [1]. Излучение в каждом канале или спектральной линии вносит свой вклад в ионообразование, различный для всех компонент. Так, например, особенно важен вклад спектральных линий 102.6 нм (L_{β}) и 97.7 нм, ионизирующих O_2 . В нижней части E -слоя ионосферы играет существенную роль фотоионизация молекул окиси азота излучением в сильной спектральной линии солнечного спектра 121.6 нм (L_{α}) [2]. Таким образом, для определения величины концентрации ионов необходимо знать дифференциальный спектр крайнего УФ излучения.

Численная модель области E авроральной ионосферы (AIM-E) [3] позволяет получать временное и пространственное распределение концентрации ионосферных ионов, малых нейтральных компонент и электронов. Модель AIM-E может быть использована для круглосуточного

мониторинга ионосферных параметров. Для моделирования регулярного E -слоя излучение на верхней границе атмосферы в модели AIM-E задается по эмпирической модели EUVAC [4]. В работе [5] была показана существенная систематическая ошибка EUVAC, приводящая к занижению расчетного потока фотонов крайнего УФ излучения на ~20–40% в зависимости от солнечной активности, что согласуется с результатами полученными в [4]: из-за разброса данных относительно нормированной функции ошибка EUVAC для каждого отдельного дня варьирует от 15 до 30%. В работе [5] проведена предварительная коррекция интегрального потока фотонов модели EUVAC на основе данных спутника TIMED. Так как отдельные нейтральные атмосферные составляющие ионизируются УФ излучением разных длин волн, то, для более точного определения ионного состава, необходима детальная калибровка, включающая коррекцию каждого отдельного канала спектра.

Целью данной работы является корректировка расчетных спектров крайнего УФ излучения модели EUVAC и потока фотонов в спектральной линии L_{α} , применяемых при расчете фотоионизации в модели AIM-E. Корректировка выполнена по данным прямых измерений спутника TIMED. Ре-

Таблица 1. Входные и выходные параметры блока фотоионизации модели AIM-E

Входные параметры модели AIM-E	Выходные параметры модели AIM-E
Дата и время	Концентрация ионов: N^+ , N_2^+ , NO^+ , O_2^+ , $O^+(^4S)$, $O^+(^2D)$, $O^+(^2P)$
Географические координаты	
Высота	
Параметры нейтральной атмосферы: модель NRLMSISE-00	Концентрация электронов N_e
Спектр УФ излучения (5–105 нм и L_{α}): эмпирический спектр или данные спутниковых измерений	Концентрация малых нейтральных компонент: NO , $N(^4S)$, $N(^2D)$

зультаты работы позволили существенно повысить точность расчетов параметров регулярного E -слоя авроральной ионосферы.

МОДЕЛЬ AIM-E

В табл. 1 приведены входные параметры модели AIM-E, а также расчетные величины для регулярного слоя E . Каждая из расчетных “выходных” величин зависит от высоты, времени и географического положения. Состав и температура нейтральной атмосферы также являются входными параметрами модели, и берутся согласно модели NRLMSISE-00 [6]. Так как по модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 нельзя рассчитать концентрацию окиси азота, в AIM-E для задания начальных условий используются значения концентрации NO рассчитанные по формуле [7]:

$$[NO] = 0.4 \exp\left(\frac{-3700}{T_n}\right) [O_2] + 5.0 \cdot 10^{-7} [O], \quad (1)$$

где $[NO]$, $[O_2]$ и $[O]$ – концентрации нейтралов, T_n – температура нейтральной атмосферы.

Помимо времени и расположения расчетной точки, входными параметрами модели при расчете скорости фотоионизации являются спектры потоков крайнего ультрафиолетового (УФ) излучения Солнца (5–105 нм) [4] и поток солнечного излучения в спектральной линии L_{α} [8]. Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений неразрывности для десяти химических компонент, учитывающих скорости образования и рекомбинации в 39 химических реакциях, реализовано с помощью неявного метода Гира [9].

РАСЧЕТ ПОТОКА ФОТОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДЕКСОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В модели AIM-E при расчете функции фотоионизации учитывается значение плотности по-

тока солнечных фотонов для различных значений суточного индекса солнечной активности $F_{10.7}$, который хорошо коррелирует с числом солнечных пятен, УФ и видимым солнечным излучением, а также реагирует на экстремальные УФ вспышки [10]. В данной работе полуденные солнечные индексы $F_{10.7}$ взяты из открытой базы данных OMNI [11].

Расчет излучения на верхней границе атмосферы в модели AIM-E для 37 интервалов длин волн, охватывающих диапазон от 5 до 105 нм, выполнен по модели EUVAC [4]. Это эмпирическая модель для оценки вариаций потока солнечного крайнего УФ, построенная путем параметризации имеющихся данных спутника Atmosphere Explorer E за период 1977–1981 гг. В основе модели лежит абсолютный базисный спектр F74113, характерный для минимума солнечной активности [12], и индекс $F_{10.7}$ для оценки колебаний, происходящих на других фазах 11-летнего цикла активности. Точность модели EUVAC зависит от погрешности определения базисного спектра и от степени соответствия солнечного крайнего УФ излучения нормировочной функции $P_{10.7} = (F_{10.7}A + F_{10.7})/2$, где $F_{10.7}$ – суточный индекс солнечной активности, а $F_{10.7}A$ – его средняя величина за 81 день (расчетный день является центральной точкой при поиске среднего). Несмотря на наличие более поздних версий модели [13, 14], в данной работе при расчетах спектров крайнего УФ излучения использована исходная версия модели EUVAC, т. к. она находится в открытом доступе.

Расчет потока солнечного излучения в спектральной линии L_{α} ($I_{L\alpha}$) (основной источник образования иона NO^+) производится по эмпирической формуле [8]:

$$I_{L\alpha} = B_0 + B_1 (F_{10.7} - 60)^{2/3} + B_2 (F_{10.7} - P_{10.7})^{2/3}, \quad (2)$$

где $B_0 = 2.127$, $B_1 = 0.0711 \pm 3.3 \cdot 10^{-3}$, $B_2 = 0.0413 \pm 8.6 \cdot 10^{-4}$.

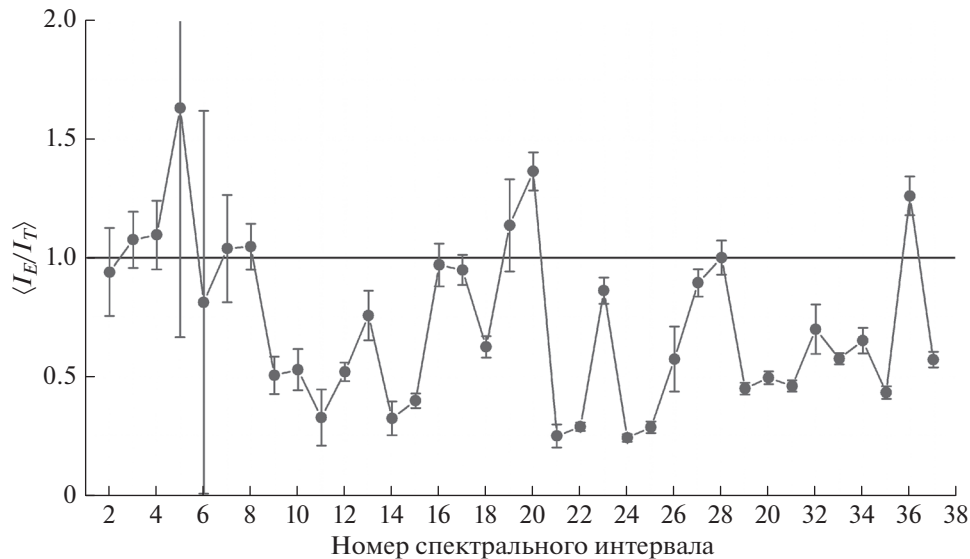


Рис. 1. Среднее отношение потоков фотонов модели EUVAC (I_E) и данных спутника TIMED (I_T), а также стандартное отклонение для каждого из интервалов длин волн.

ДААННЫЕ СПУТНИКА TIMED

В данной работе при расчетах были использованы данные прибора SEE (Solar EUV Experiment) level 3A спутника TIMED [15], находящиеся в открытом доступе [16]. Временное разрешение измерений составляет 97 мин, что соответствует частоте прохождения спутника в подсолнечной точке. Данные SEE level 3A представляют собой спектр солнечного излучения от 0.5 до 195 нм с каналами по 1 нм. Однако, эти данные доступны с двухдневным запаздыванием, а периодически полностью отсутствуют, что не позволяет применять их для диагностики состояния ионосферы в режиме реального времени. Поэтому для непрерывного мониторинга нужна хорошая эмпирическая модель спектра УФ излучения Солнца.

КОРРЕКЦИЯ СПЕКТРОВ КРАЙНЕГО УФ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для корректировки расчетного спектра модели EUVAC был использован большой объем данных спутника TIMED с 2002 по 2019 гг. с временным разрешением 1.5 ч и разрешением по длине волны 1 нм. Данные измерений спутника были приведены к формату модельных данных EUVAC: найден среднесуточный поток излучения для 37 участков спектра от 5 до 105 нм. Для отдельных спектральных линий (включая L_{α}) использовались измерения непосредственно в этой линии, а для каналов шириной 5 нм была найдена интегральная величина потока УФ излучения для соответствующего канала.

Для демонстрации отклонений модельного спектра EUVAC, на рис. 1 показана средняя вели-

чина отношения потоков фотонов, рассчитанных по модели EUVAC (I_E) и полученных со спутника TIMED (I_T) для каждого спектрального канала, а также стандартное отклонение для каждого из каналов (номера каналов и соответствующие длины волн см. в табл. 2). Величина потока фотонов для канала 1 по модели EUVAC, не приведенного на рис. 1, имеет колоссальное расхождение с данными TIMED и составляет около двух порядков для всего рассматриваемого интервала времени.

Видно, что для 27 участков спектра из 37 модель дает существенно заниженные значения потока фотонов, иногда более 50% величины. На рис. 2а приведен пример хорошего соответствия для канала 20–25 нм. Однако в подавляющем большинстве случаев наблюдается значительное расхождение модельных и реальных данных (характерный пример приведен для канала 40–45 нм на рис. 2в). В спектральной линии 28.415 нм (рис. 2б) помимо разного угла наклона распределений спутниковых и модельных значений от $F_{10.7}$, был обнаружен еще один существенный момент: для низкого уровня солнечной активности EUVAC предсказывает отрицательную величину потока фотонов. Такая ошибка связана с тем, что при разработке модели EUVAC использовался набор данных, который не включает в себя рекордно низкие условия солнечной активности, наблюдаемые в минимуме 24 цикла. Подобные расхождения делают модель EUVAC не применимой для аэрономических расчетов без предварительной корректировки.

Для приведения модельных спектров EUVAC и излучения в линии L_{α} к измеренным на спут-

Таблица 2. Калибровочные коэффициенты k и b для 37 интервалов спектра

№	λ , нм	k	b	№	λ , нм	k	b	№	λ , нм	k	b
1	5–10	0.023	$-1.435 \cdot 10^{11}$	14	45–50	1.474	$5.929 \cdot 10^{12}$	27	78.936	0.622	$3.704 \cdot 10^{12}$
2	10–15	2.150	$-5.236 \cdot 10^{12}$	15	50–55	2.552	$-1.674 \cdot 10^{11}$	28	75–80	0.590	$3.391 \cdot 10^{12}$
3	15–20	1.035	$-5.476 \cdot 10^{12}$	16	55.437	0.503	$4.082 \cdot 10^{12}$	29	80–85	1.683	$9.495 \cdot 10^{12}$
4	20–25	1.033	$-3.927 \cdot 10^{12}$	17	58.433	1.004	$7.537 \cdot 10^{11}$	30	85–90	1.763	$9.963 \cdot 10^{12}$
5	25.63	7.179	$-3.045 \cdot 10^{13}$	18	55–60	1.978	$-1.418 \cdot 10^{12}$	31	90–95	2.090	$2.644 \cdot 10^{12}$
6	28.415	0.359	$4.202 \cdot 10^{12}$	19	60.976	0.477	$2.682 \cdot 10^{12}$	32	97.762	0.855	$2.899 \cdot 10^{12}$
7	25–30	0.576	$8.678 \cdot 10^{12}$	20	62.973	0.747	$-1.887 \cdot 10^{11}$	33	95–100	1.738	$-2.199 \cdot 10^{10}$
8	30.378	1.752	$-5.766 \cdot 10^{13}$	21	60–65	1.432	$1.054 \cdot 10^{13}$	34	102.57	1.516	$1.025 \cdot 10^{12}$
9	30–35	1.386	$7.322 \cdot 10^{12}$	22	65–70	3.349	$2.582 \cdot 10^{11}$	35	103.19	1.967	$7.868 \cdot 10^{12}$
10	36.807	3.523	$-1.139 \cdot 10^{13}$	23	70.331	0.748	$1.576 \cdot 10^{12}$	36	100–105	1.070	$-7.241 \cdot 10^{12}$
11	35–40	1.305	$7.993 \cdot 10^{12}$	24	70–75	4.065	$7.864 \cdot 10^{10}$	37	121.6	2.206	$-1.163 \cdot 10^{15}$
12	40–45	2.061	$-5.592 \cdot 10^{11}$	25	76.515	1.331	$3.924 \cdot 10^{12}$				
13	46.512	0.500	$2.717 \cdot 10^{12}$	26	77.041	0.434	$4.209 \cdot 10^{12}$				

нике TIMED, была использована линейная зависимость:

$$I_T = k \cdot I_E + b. \quad (3)$$

В табл. 2 приведены регрессионные коэффициенты k и b , необходимые для корректировки спектра потока фотонов модели EUVAC и излучения в линии L_{α} . Анализ показал, что аппроксимация полиномами более высокого порядка не приводит к заметному уменьшению ошибки аппроксимации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки эффективности проведенной калибровки спектров УФ излучения модели EUVAC было проведено сопоставление параметров регулярного E -слоя, полученных по модели AIM-E, с данными вертикального зондирования (ВЗ) всех действующих российских арктических станций. Были использованы часовые значения критических частот слоя E (f_oE) на станциях Горьковская (60.27° с. ш., 29.38° в. д.), Салехард (66.52° с. ш.,

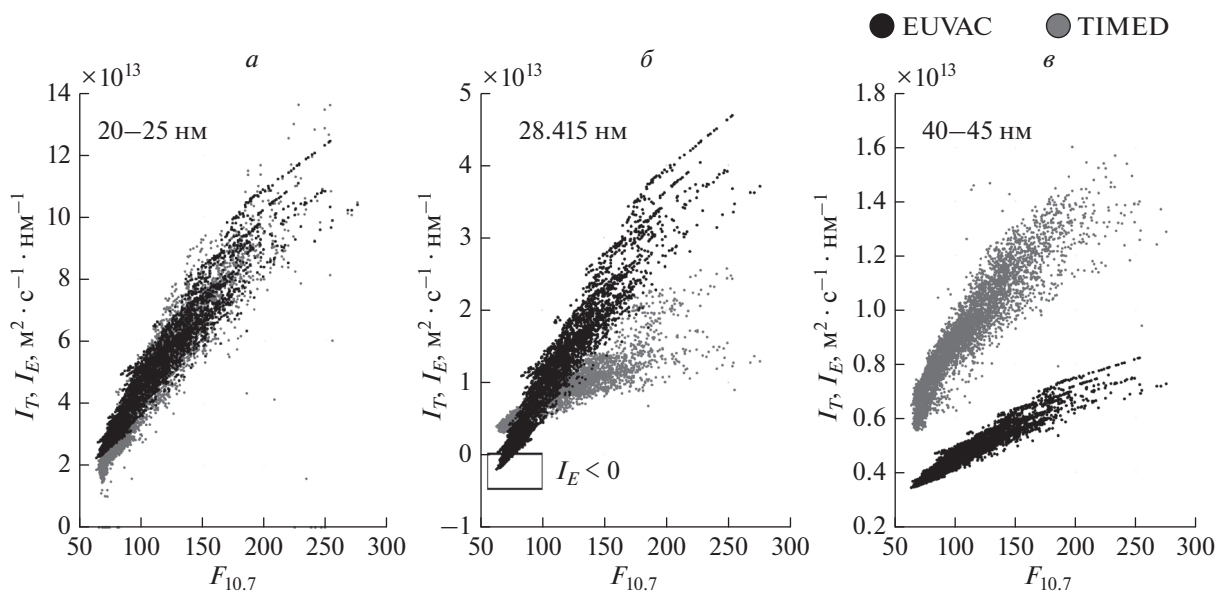


Рис. 2. Примеры распределения среднесуточной величины потока фотонов рассчитанных по модели EUVAC (черные точки) и измеренных на спутнике TIMED (серые точки) за период с 2002 по 2019 гг. для трех спектральных интервалов: канал 20–25 нм (а); спектральная линия 28.415 нм (б); канал 40–45 нм (в).

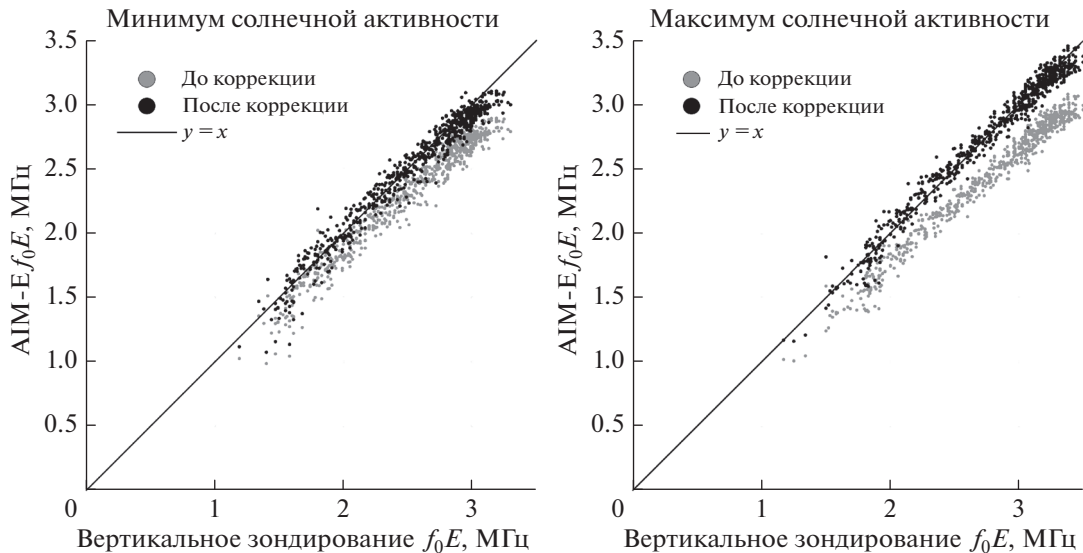


Рис. 3. Сравнение данных вертикального зондирования со станций Горьковская, Салехард, Ловозеро, Певек, Амдерма, Тикси и Диксон с результатами расчетов AIM-E до коррекции спектров УФ излучения (серые точки) и после (черные точки) для минимума (а) и максимума солнечной активности (б). Черная сплошная линия – прямая $y = x$.

66.67° в. д.), Ловозеро (68.00° с. ш., 35.02° в. д.), Певек (70.03° с. ш., 170.92° в. д.), Амдерма (69.60° с. ш., 60.20° с. д.), Тикси (71.35° с. ш., 128.54° в. д.) и Диксон (73.52° с. ш., 80.68° в. д.). Рассмотрены дни со спокойными геомагнитными и солнечными условиями для максимума (1–3 июня 2014 г. и 2–5 июня 2015) и минимума (11 июня 2018 г., 15 июня 2018 г., 22 июня 2018 г. и 4–6 июня 2019 г.) 24 цикла солнечной активности. В обработку вошло 1932 ионограммы вертикального зондирования, из которых было получено 1364 значения критической частоты регулярного E-слоя.

Для каждой станции и момента наблюдений по AIM-E были рассчитаны высотные профили электронной концентрации в диапазоне высот 90–140 км с шагом 1 км. Электронная концентрация в максимуме слоя E пересчитывалась в критическую частоту по формуле [17]:

$$f = \sqrt{\frac{N_e}{1.24 \cdot 10^{10}}}, \quad (4)$$

где f – частота зондирования [МГц], N_e – электронная концентрация [м^{-3}].

До введения корректирующих функций для спектра УФ излучения, рассчитанный параметр f_0E по модели AIM-E характеризуется заниженными (~10%) значениями как для минимума, так и для максимума солнечной активности (рис. 3). После выполненной корректировки УФ спектра EUVAC и потока фотонов в спектральной линии L_{α} , расчетные значения f_0E по модели AIM-E практически полностью совпадают с измеренными значениями f_0E (коэффициент корреляции $R = 0.981$).

На рис. 4 (верхняя панель) показан суточный ход критической частоты регулярного E-слоя для 2–5 июня 2016 г. на станции Амдерма, не входящий в интервалы, по которым ранее была произведена оценка расхождения модельных и реальных данных. Расчетные значения, с использованием скорректированных спектров, хорошо совпадают с экспериментальными данными. Из-за наличия спорадического слоя Es, экранирующего отражения от слоя E, 3 июня 2016 г. отсутствует значительное количество данных вертикального зондирования по f_0E . В геофизических условиях, приводящих к невозможности инструментальных измерений, расчеты по модели AIM-E могут служить достоверным источником информации о состоянии регулярного E-слоя.

Помимо критической частоты, измеряемой по данным вертикального зондирования, модельные расчеты позволяют судить так же и о высотном распределении ионосферных параметров. На рис. 4 (нижняя панель) показан суточный ход для вертикального распределения электронной концентрации (N_e , м^{-3}) на высотах от 90 до 140 км с шагом по высоте 1 км и шагом по времени 1 ч. Черной сплошной линией показана высота максимума регулярного E-слоя по данным ВЗ для 2–5 июня 2016 г. на станции Амдерма, белая пунктирная линия – высота максимума E-слоя по расчетам модели AIM-E для того же временного интервала. Видно, что измеренная высота слоя систематически превышает модельные расчеты. Такое расхождение обусловлено спецификой измерений при вертикальном зондировании ионосферы: импульс, излученный ионозондом, всегда

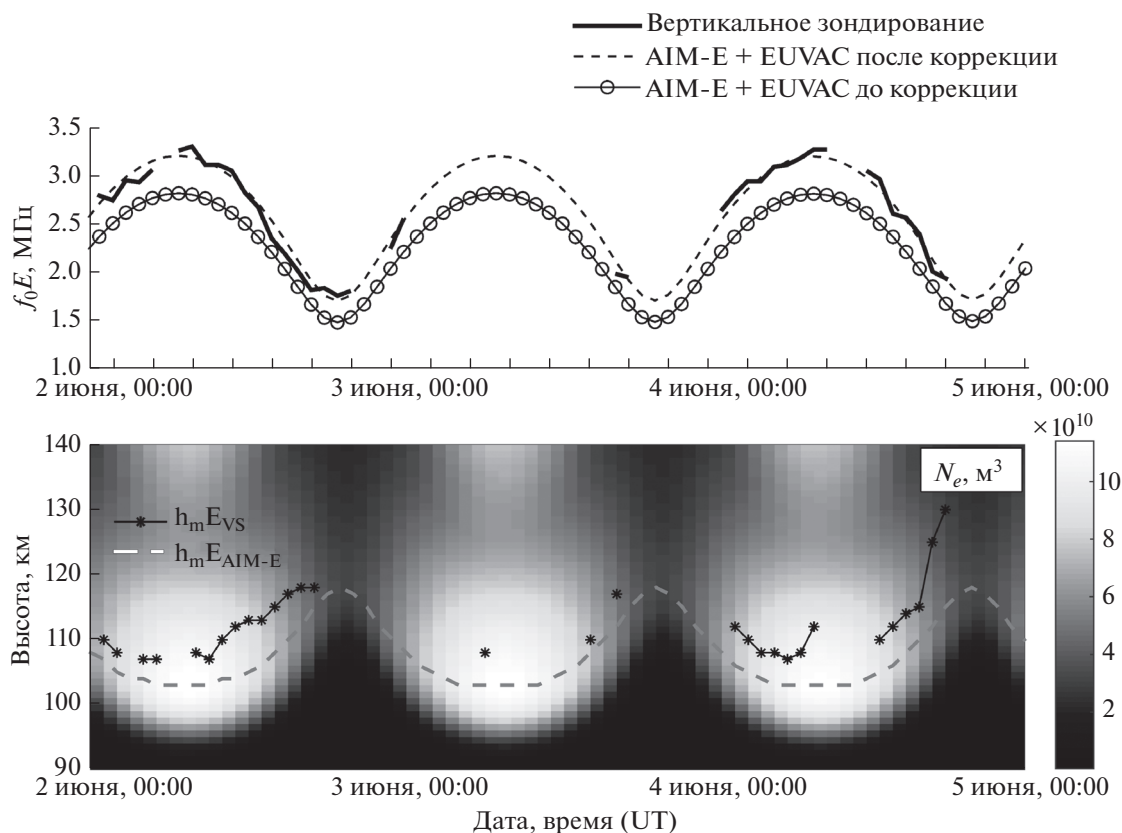


Рис. 4. Верхняя панель – суточный ход критических частот регулярного E -слоя ионосферы (f_0E) в период 2–5 июня 2016 г.: сплошная линия – данные наблюдений на ст. Амдерма; линия с кружками и пунктирная линии – результаты расчетов по AIM-E с использованием УФ спектров EUVAC и излучения в спектральной линии L_α до и после коррекции соответственно. Нижняя панель – суточный ход вертикального распределения электронной концентрации (N_e) для того же периода и станции, рассчитанный по модели AIM-E после корректировки потоков УФ излучения EUVAC и L_α . Черная линия со звездочками – высота максимума E -слоя по данным ВЗ; белая пунктирная линия – высота максимума E -слоя по расчетам модели AIM-E.

распространяется с групповой скоростью меньшей скорости света, и действующая (измеренная) высота отражений всегда превышает истинную высоту слоя [1]. Также отметим, что модельные высоты максимума E -слоя имеют выраженный суточный ход, который соответствует общему характеру вариации высот по данным ВЗ.

Таким образом, модель AIM-E, с использованием скорректированных УФ спектров EUVAC и излучения в спектральной линии L_α , дает возможность оценки распределения основных ионов, критической частоты и высоты E -слоя в любой точке освещенной авроральной ионосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены существенные систематические ошибки в расчетах спектра потока фотонов крайнего ультрафиолета по модели EUVAC и линии L_α , различные для всех интервалов спектра. Выполнена коррекция потока фотонов для всех спектральных интервалов в модели EUVAC и из-

лучения в спектральной линии L_α на основе большого объема измерений спутника TIMED, с 2002 по 2019 гг. Коррекция выполнена с использованием линейной аппроксимации для каждого из 37 спектральных интервалов. Сопоставление критических частот регулярного E -слоя в российском секторе Арктики, полученных на станциях вертикального зондирования и рассчитанных по AIM-E, показало высокую точность модельных расчетов после коррекции спектров УФ излучения как для максимума, так и для минимума солнечной активности.

Корректировка эмпирической модели крайнего УФ EUVAC, существенно увеличила точность расчета параметров регулярного слоя E с использованием численной модели ионосферы AIM-E. Прямые измерения спектра фотонов, осуществляемые спутником TIMED, могут быть использованы в модели AIM-E для исследования ионосферных эффектов экстремальных явлений космической погоды, например, солнечных вспышек. Однако, ввиду запаздывания и периодического от-

сутствия спутниковых данных, их применение для непрерывного мониторинга состояния ионосферы не представляется возможным. Возникает потребность в использовании модельных спектров УФ излучения.

Проведенная корректировка спектра потока фотонов EUVAC и потока фотонов в спектральной линии L_{α} позволяет проводить расчет ионосферных параметров при оперативной оценке состояния регулярного слоя E по модели AIM-E с использованием суточного индекса $F_{10.7}$ в качестве входного параметра. Ввиду того что непрерывный ряд измерений $F_{10.7}$ доступен с 1947 г. (в течение семи солнечных циклов) и обновляется ежедневно, данный режим модели AIM-E может быть использован как для расчетов в реальном времени, так и при проведении “климатических исследований” ионосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-72-10023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брюнелли Б.Е., Намгалдзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
2. Данилов А.Д. Химия ионосферы. Л.: Гидромет. изд-во, 1967. 294 с.
3. Nikolaeva V., Gordeev E., Sergienko T. et al. // Atmosphere. 2021. V. 12. No. 6. P. 748.
4. Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. No. A5. P. 8981.
5. Николаева В.Д., Гордеев Е.И., Рогов Д.Д., Николаев А.В. // Солн.-земн. физ. 2021. Т. 7. № 1. С. 51.
6. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. // J. Geophys. Res. 2003. V. 107. No. A12. P. 1468.
7. Fuller-Rowell T.J., Rees D., Quegan S. et al. STEP handbook on ionospheric models. Utah State University, 1996. 301 p.
8. Нусинов А.А. // Геомагн. и аэроном. 1984. Т. 24. No. 4. С. 529.
9. Gear C.W. Numerical initial value problems in ordinary differential equations. Prentice-Hall, 1971. 253 p.
10. Tapping K.F. // Space Weather. 2013. V. 11. № 7. P. 394.
11. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>.
12. Richards P.G., Torr D.G. // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. No. A7. P. 5625.
13. Richards P.G., Woods T.N., Peterson W.K. // Adv. Space Res. 2006. V. 37. No. 2. P. 315.
14. Girazian Z., Withers P. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. No. 8. P. 6779.
15. Woodraska D.L., Woods T.N., Eparvier F.G. // Proc. SPIE. 2004. V. 5660. P. 36.
16. <http://lasp.colorado.edu/home/see/data>.
17. Райт Ж.У., Кнехт Р.У., Дэвис К. Руководство по вертикальному зондированию ионосферы. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 81 с.

Empirical UV spectra calibration for the numerical simulation of the ionosphere regular E -layer

V. D. Nikolaeva^{a, b, *}, E. I. Gordeev^c, D. D. Rogov^{a, b}, S. V. Novikov^{a, b}

^a Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, 199397 Russia

^b Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia

^c Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034 Russia

*e-mail: vera_nik@list.ru

The empirical differential spectra of the EUVAC model and the radiation flux in the L_{α} spectral line (AIM-E model input parameters used to calculate the regular E -layer) were calibrated using the TIMED satellite measurements. The performed correction significantly increases the calculation accuracy of the regular E -layer. The simulated values for the critical frequency show good agreement with the vertical sounding data from Russian high-latitude stations, both for minimum and maximum of the solar activity cycle.