

## Модели ионосферы и их коррекция по оперативной информации с ионосферной наблюдательной сети

Н. Г. Котонаева\*, М. В. Коломин\*,  
В. В. Михайлов\*

*Исследована возможность коррекции климатических моделей ионосферы по данным одного наблюдательного пункта, оснащенного ионозондом вертикального радиозондирования, с целью мониторинга плазменной оболочки Земли в окрестности этого средства измерения. Для исследований использованы модели SIMP-STANDARD и IRI. В качестве критерии эффективности коррекции климатических моделей ионосферы взяты вероятности того, что относительные отклонения скорректированных моделей будут менее 10%. Определены размеры областей вокруг каждого ионозонда государственной ионосферной сети, в которых возможно повышение качества ионосферного мониторинга путем коррекции климатической модели ионосферы по данным этого конкретного ионозонда.*

**Ключевые слова:** ионосфера, климатическая модель, коррекция, оперативный мониторинг состояния ионосферы.

### 1. Введение

Использование климатических моделей для оперативного мониторинга всегда сопряжено с задачей ассимиляции в модель информации с наблюдательной сети с целью экстраполяции данных на неосвещенную территорию. Это распространяется и на мониторинг ионосферы. Медианные модели, такие как IRI [8], NeQuick [10], SIMP-STANDARD [5], описывают среднемесячное климатическое состояние, и возможность их использования для диагностики среды является предметом исследования многих авторов. В решении этой задачи можно выделить два направления.

Первое — это ассимиляция в модель данных нескольких наблюдательных пунктов. Здесь чаще всего применяют метод кригинга [14] и метод мультиквадриков [12]. Использование первого метода, например, проиллюстрировано в работах [1, 4] при коррекции модели IRI. Метод мультиквадриков взят для модели SIMP-2 [6], которая ассимилирует данные более 70 ионозондов (как российской государственной сети, так и зарубежных). Ярким примером ассимиляции большого количества данных ионозондов, основанной на плавной адаптации параметров эмпирической модели

\* Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова; e-mail: kotonaeva@ipg.geospace.ru (Котонаева Надежда Геннадьевна).

ионосферы IRI в реальном времени, являются достижения глобальной ионосферной радиообсерватории (GIRO) [9]. Подобное эмпирическое ассимиляционное моделирование позволяет получить глобальную картину реакции ионосферы на различные кратковременные события.

Вторым направлением коррекции ионосферных моделей является коррекция по данным наблюдений одного конкретного средства наблюдений, такого как ионозонд вертикального или наклонного радиозондирования, приемник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, радар некогерентного рассеяния и т. п. Так, например, в работе [7] проблему коррекции модели IRI решают по данным одного ионозонда наклонного зондирования. Задача обычно решается подобными средствами с целью определения параметров ионосферы в окрестности наблюдательного пункта. В качестве областей применимости метода коррекции обычно используют радиусы корреляции, рассчитанные в работе [2] и составляющие до 6—10° по широте и 10° по долготе.

Надежность и эффективность использования одного средства измерения при коррекции моделей ионосферы требует количественных оценок, отличных от простого использования радиусов корреляции. Эти параметры зависят как от самой модели, так и от метода проведения коррекции.

Авторы настоящей статьи решили вернуться к результатам работы [2] и переосмыслить их на основе новых массивов геофизической информации, ионосферных моделей и других численных критериев. Основной целью исследования стало определение областей эффективного использования данных одного ионозонда вертикального зондирования для коррекции климатической модели ионосферы. Для решения указанной задачи рассматривали две модели: широко известную международную модель IRI в версии IRI-2012 [8] и эмпирическую медианную модель SIMPLE-STANDARD [5, 6], разработанную в Институте прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова. Модель охватывает ионосферные области D, E и F в диапазоне высот от 65 до 1000 км. Моделирование параметра  $foF2$ , которое использовано в настоящей статье, в Северном полушарии опирается на локальные модели, созданные для 75 ионосферных станций. Такая модель представляет собой регрессионную функцию, аргументом которой является ионосферный индекс  $T$  [15], прогнозируемый ионосферной службой Австралии (IPS), а результатом — величина  $foF2$  для данной станции.

## **2. Методы и статистические критерии эффективности коррекции ионосферных моделей**

Проверку эффективности коррекции ионосферных моделей по данным одного ионозонда вертикального радиозондирования государственной наблюдательной сети проводили путем сравнения наблюданной частоты с рассчитанной критической частотой — наивысшей частотой радиоизлучения, при которой слой F2 ионосферы не только отражает вертикально направленную радиоволну, но и пропускает ее.

Данные о критической частоте слоя F2 ионосферы, полученные на станции, которую будем называть станцией-донором, ассимилировались в модель одним из указанных ниже способов. С помощью скорректированной модели рассчитывались значения  $foF2$  в точках расположения конт-

рольных ионозондов, называемых станциями-реципиентами. Данные ионозондов на станциях-реципиентах использовали исключительно для сравнения результатов экстраполяции. При проведении статистического анализа каждый ионосферный наблюдательный пункт объявлялся по очереди станцией-донором, а остальные при этом становились станциями-реципиентами.

Для коррекции по данным одного ионозонда были применены два наиболее очевидных метода. Первый из них (метод I) связан с подбором эффективного значения входного геофизического индекса. Для каждой глобальной ионосферной модели аргументами, кроме географического положения и времени, являются характерные геофизические индексы. Для модели IRI этим индексом является индекс  $IG_{12}$  [12], а для модели SIMP-STANDARD — ионосферный индекс  $T$  [15].

Методика коррекции моделей состоит в нахождении такого эффективного значения геофизического индекса, при котором

$$foF2_{\text{obs}}(D) - foF2_{\text{mod}}(D) = 0, \quad (1)$$

где  $foF2_{\text{obs}}(D)$  — наблюдаемые часовые значения критической частоты слоя F2 на станции-доноре;  $foF2_{\text{mod}}(D)$  — критическая частота в точке расположения станции-донора, рассчитанная с помощью модели при специально подобранным значении геофизического индекса. Далее с использованием найденного значения геофизического индекса рассчитываются скорректированные часовые значения критической частоты слоя F2 на станциях-реципиентах —  $foF2_{\text{cor}}(R)$ .

При проведении исследования выяснено, что данный метод эффективен для модели IRI, но неприменим для модели SIMP-STANDARD, построенной как совокупность локальных моделей по отдельным станциям наземного радиозондирования.

Вторым методом коррекции, используемым в настоящей работе, стал метод, основанный на пропорциональном изменении критической частоты слоя F2 на станции-реципиенте по формуле

$$foF2_{\text{cor}}(R) = \frac{foF2_{\text{obs}}(D)}{foF2_{\text{mod}}(D)} foF2_{\text{mod}}(R), \quad (2)$$

где  $foF2_{\text{mod}}(D)$  и  $foF2_{\text{mod}}(R)$  — модельные значения  $foF2$  на станции-доноре и реципиенте соответственно, рассчитанные при наблюдаемых значениях геомагнитных индексов.

Этот метод, названный корреляционным методом коррекции (метод II), был применен и для модели IRI, и для модели SIMP-STANDARD. Близкий метод использован в работе [11].

Статистические критерии, определяющие эффективность проведения коррекции, определяются задачами, для решения которых предназначены те или иные модели. Они должны отражать абсолютную ошибку коррекции:

$$foF2 = foF2_{\text{cor}}(R) - foF2_{\text{obs}}(R),$$

где аргумент  $R$  означает, что наблюдаемые ( $\text{obs}$ ) и скорректированные ( $\text{cor}$ ) значения критической частоты  $foF2$  получены на одной станции-реципиенте и в один момент времени, а также относительную ошибку коррекции:

$$foF2 = \frac{foF2}{foF2_{\text{obs}}(R)}.$$

В предположении, что для удовлетворительной работы технических средств допустима некоторая малая ошибка определения параметра критической частоты ионосферы, в качестве критерия эффективности коррекции взята вероятность того, что относительная ошибка коррекции будет менее этого значения.

Для примера в качестве допустимого значения относительной ошибки рассмотрим величину 10% [3]:

$$P_{10} = P(|foF2| < 10\%). \quad (3)$$

Критерием, определяющим возможность проведения коррекции, явилась разность вероятностей ошибки, меньшей 10%, рассчитанных по скорректированной ионосферной модели и по ионосферной модели без коррекции:

$$P_{10} = P_{10 \text{ cor}} - P_{10 \text{ mod}}. \quad (4)$$

Выборка для определения статистических критериев эффективности (3), (4) бралась по всем часовым значениям 2017—2018 гг. в те моменты, когда на станциях (доноре и реципиенте) одновременно были получены часовые значения  $foF2$ , используемые для сравнения и коррекции. Отметим, что объем выборки варьировался от 16 000 значений на среднеширотных станциях до 8000 на северных станциях. Это обусловлено периодами  $F$ -рассеяния и ионосферного поглощения, в большей степени характерными для северных регионов.

При проведении исследований рассчитывали также и традиционные статистические оценки ошибок коррекции, такие как среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Величины  $foF2$  варьировались в интервалах от 0,3 до 0,5 МГц при точности определения критической частоты по ионограмме вертикального радиозондирования 0,1 МГц. Это не позволило в большинстве случаев оценить преимущество самой коррекции.

### **3. Результаты проведения коррекции ионосферных моделей**

Проверка на возможность коррекции проводилась для всех пар ионосферных наблюдательных пунктов Росгидромета, оснащенных ионозондами вертикального радиозондирования (расположение станций и их номера приведены ниже на рисунке). Частично результаты статистического анализа приведены в таблице, данные сгруппированы по регионам (Сибирь, Дальний Восток, северные станции). Каждой станции в первом столбце присвоены условные номера. Также параметр  $P_{10}$  был рассчитан для климатических моделей без коррекции. Расчет производился для того же объема выборки, что и расчет при проведении коррекции. Этим вызвано различие в значениях  $P_{10}$  в разных строках.

Авторы не ставили задачу определить преимущества одной модели перед другой, а также преимущества двух используемых методов коррекции.

Необходимо было выяснить размеры областей, в которых использование данных одного ионозонда вертикального радиозондирования позволило бы повысить эффективность применения климатических моделей для оперативной диагностики среды. Результаты, полученные по каждой из моделей с использованием перечисленных методов коррекции, качественно близки, поэтому для дальнейших выводов будут использованы наибольшие значения параметра  $P_{10}$  для модели IRI как наиболее часто используемой в научных и практических исследованиях.

Анализ данных таблицы свидетельствует о том, что по данным станции Новосибирск (№ 6) можно проводить коррекцию модели только до станции Подкаменная Тунгуска (№ 7). Для северных станций (Салехард, Амдерма, Диксон) коррекция моделей по станции Новосибирск невозможна. По данным станции Подкаменная Тунгуска возможна коррекция для района от Новосибирска до Салехарда. Станция Салехард (№ 8) является ключевой станцией, по ней возможна коррекция для районов от Подкаменной Тунгуски до северных станций Амдерма и Диксон. Данные станций Амдерма (№ 9) и Диксон (№ 10) возможно использовать в северных регионах.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что при использовании моделей ионосферы без коррекции в северном и европейском регионах только 50—60% значений  $foF2$  будут иметь ошибку менее 10%. На Дальнем Востоке эта величина составит 40—50%. Коррекция модели по данным одного ионозонда при благоприятном расположении ионозонда-донора может повысить эти показатели на 10—15%.

Используя весь массив попарной проверки возможности коррекции, можно выявить области эффективности использования данных одного ионозонда. Будем считать, что коррекция эффективна, если параметр  $P_{10}$  увеличился хотя бы на 5%.

На рисунке *a* показан алгоритм построения областей эффективности коррекции на примере станции Амдерма. Применялся следующий алгоритм построения. С использованием данных станции Амдерма при определении критической частоты слоя F2 в точке, где расположена станция Диксон, получен выигрыш в параметре  $P_{10}$  на 15,5%, поэтому граница области эффективности коррекции расположена дальше Диксона. Аналогичные рассуждения проведены для точки расположения станции Салехард, где выигрыш составил 19,9%, и точки расположения станции Ловозеро — 12,7%. Выигрыш на станции Горьковская составил только 1%, поэтому на линии Горьковская — Амдерма граница области эффективности находится между ними и рассчитывается из условия обратной пропорциональности. В случае, если в некотором направлении эффективность коррекции в точке станции-реципиента по данной станции-донору не установлена, область эффективности ограничивается расстоянием 300 км от станции-донора.

На рисунке *b*, построенном на основе всего массива попарной проверки возможности коррекции, включающем данные таблицы, указаны области, в которых эффективность коррекции, оцененная по параметру  $P_{10}$ , составит 5% и более. Рисунок построен по алгоритму, описанному выше. Видно, что области, в которых коррекция климатических моделей по дан-

**Вероятность  $P_{10}$  (%) значений относительной ошибки определения критической частоты слоя F2 менее 10%**

Станция-донор	R	IRI			SIMP-STANDARD	
		без коррекции	с коррекцией		без коррекции	с коррекцией (II)
			I	II		
Станции Сибири						
6. Новосибирск	7	55,6	60,1	63,0	62,8	66,8
	8	59,6	52,7	54,8	65,6	64,4
	9	61,0	50,0	51,5	66,0	62,2
	10	55,6	45,36	46,2	62,4	57,7
7. Подкаменная Тунгуска	6	61,0	6,1	63,5	65,8	66,9
	8	59,9	63,3	64,3	66,5	71,0
	9	60,8	58,5	58,3	66,5	67,1
	10	57,3	55,3	54,5	63,2	63,8
8. Салехард	6	66,8	58,6	55,3	72,1	64,4
	7	63,5	65,6	64,6	67,6	70,7
	9	63,1	81,8	81,1	68,9	82,1
	10	58,8	69,3	67,5	65,3	71,2
9. Амдерма	6	67,2	55,3	52,2	72,4	61,9
	7	64,9	60,9	58,7	68,5	66,4
	8	62,7	82,6	81,3	69,6	81,8
	10	60,3	75,8	74,1	66,4	75,5
10. Диксон	6	66,5	50,0	46,8	71,3	57,3
	7	63,9	57,8	55,5	67,9	63,6
	8	62,5	70,2	67,9	69,6	71,5
	9	64,4	76,3	74,2	70,4	76,2
Станции Дальнего Востока						
11. Хабаровск	12	42,0	50,5	51,3	55,9	54,8
	13	46,3	41,1	45,0	53,2	51,8
	14	47,5	44,2	42,9	33,2	29,6
	15	42,9	40,0	42,0	54,8	46,8
12. Петропавловск-Камчатский	11	47,9	52,4	51,9	61,2	55,1
	13	46,4	45,1	48,9	53,7	59,3
	14	47,9	47,6	43,3	34,6	34,1
	15	43,1	48,6	45,8	56,4	48,9
13. Магадан	11	49,7	48,4	44,9	62,0	52,1
	12	43,8	49,3	48,8	57,6	59,3
	14	45,5	43,0	42,5	30,6	30,2
	15	41,8	41,4	41,5	48,0	42,0
14. Тикси	11	51,5	46,7	42,5	65,9	30,3
	12	40,5	44,6	42,6	61,8	35,1
	13	48,5	43,3	42,5	54,1	30,5
	15	44,6	62,5	60,6	61,6	37,8
15. Певек	11	49,2	46,5	42,8	65,6	46,9
	12	41,8	48,1	45,9	62,4	49,4
	13	49,0	43,2	41,3	51,6	41,4
	14	53,5	63,3	60,2	33,2	36,8
Северные станции						
4. Горьковская	5	57,0	67,2	68,0	64,2	69,1
	8	60,2	58,1	61,1	65,8	61,3
	9	60,1	59,8	62,6	65,2	61,1
	10	54,8	51,8	52,8	60,8	56,8

Продолжение таблицы

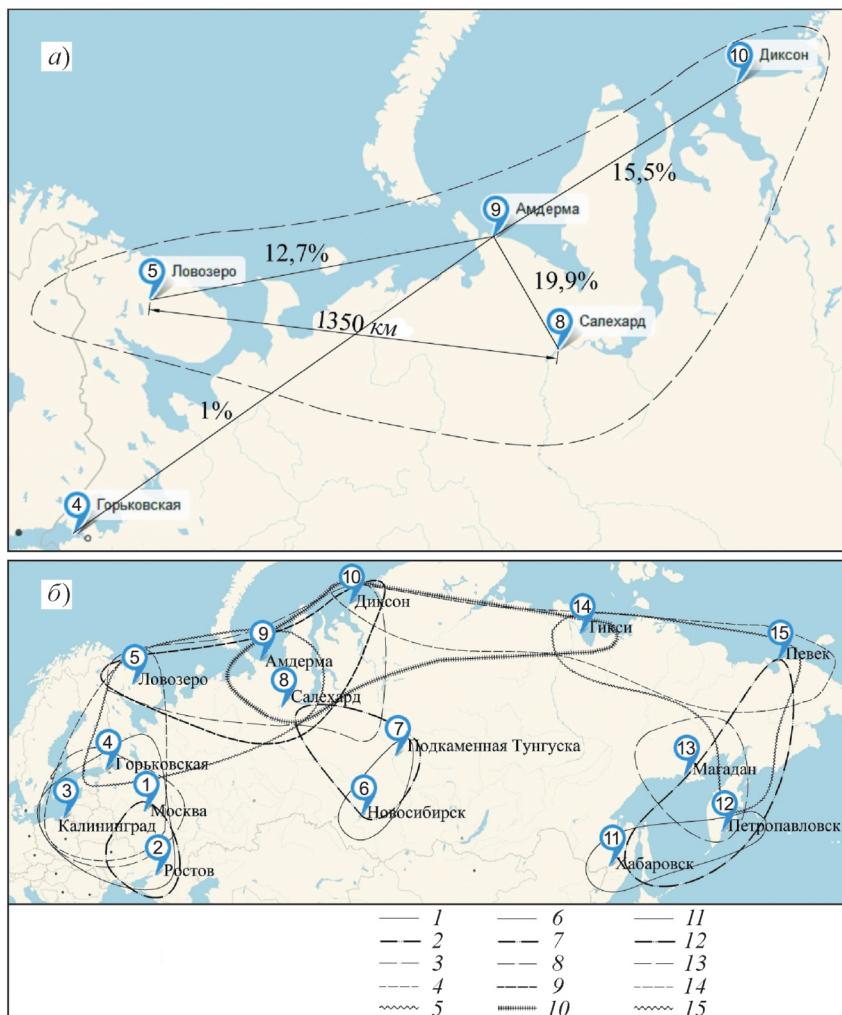
Станция-донор	R	IRI			SIMP-STANDARD	
		без коррекции	с коррекцией		без коррекции	с коррекцией (II)
			I	II		
5. Ловозеро	4	63,5	69,5	67,8	59,9	68,3
	8	61,5	69,6	70,3	68,9	71,6
	9	62,6	72,8	73,2	68,4	72,8
	10	59,3	63,0	61,5	65,4	67,2
8. Салехард	4	63,0	63,8	61,2	59,8	60,6
	5	61,9	71,2	70,1	69,2	71,9
	9	63,1	81,8	81,1	68,9	82,1
	10	58,8	69,3	67,5	65,3	71,2
9. Амдерма	4	63,8	64,8	62,6	60,1	60,6
	5	61,8	74,5	73,1	68,9	72,9
	8	62,7	82,6	81,3	69,6	81,8
	10	60,3	75,8	74,1	66,4	75,5
10. Диксон	4	62,4	54,7	52,7	58,0	56,1
	5	62,3	62,5	61,5	69,8	67,6
	8	62,5	70,2	67,9	69,6	71,5
	9	64,4	76,3	74,2	70,4	76,2
	14	52,1	66,6	65,8	34,1	41,2

*Примечание.* R — станция-реципиент; I — коррекция по эффективному значению входного геофизического индекса; II — корреляционный метод коррекции. Расположение станций показано на рисунке.

ным одного ионозонда возможна, составляют в среднем менее 1500 км по долготе и менее 800 км по широте. Отметим также, что в большинстве случаев выполняется условие, по которому коррекцию лучше осуществлять по данным станции, находящейся южнее, чем в обратном направлении.

Ионозонды в северных областях находятся на расстояниях, при которых почти над всей территорией возможна коррекция ионосферных моделей по данным соседней ионосферной станции для определения критической частоты ионосферы в интересующей точке. Европейская часть России полностью закрыта указанными зонами, однако их пересечение минимально. На территории Дальнего Востока три работающие станции покрывают восточное побережье России, однако они обеспечивают в некоторых районах только минимальный выигрыш в определении  $foF2$  при коррекции климатической модели. Эффективность проведения коррекции на территории Урала и Восточной Сибири не рассматривалась из-за отсутствия в этих районах станций Росгидромета.

Таким образом, сеть ионозондов государственной наблюдательной сети в составе станций, указанных на рисунке б, является необходимой, но не достаточной. Для проведения эффективной коррекции климатических моделей ионосферы необходимо объединение данных наблюдательных ресурсов различных ведомств, в частности данных ионозондов Российской академии наук — обсерватории Арти на Урале и ионозонда Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (ИСЗФ СО РАН) в Иркутске.



Построение области эффективности проведения коррекции по данным станции Амдерма (а), а также области эффективности проведения коррекции модели IRI по данным станций государственной наблюдательной сети: 1 — Москва; 2 — Ростов-на-Дону; 3 — Калининград; 4 — Горьковская; 5 — Ловозеро; 6 — Новосибирск; 7 — Подкаменная Тунгуска; 8 — Салехард; 9 — Амдерма; 10 — Диксон; 11 — Хабаровск; 12 — Петропавловск-Камчатский; 13 — Магадан; 14 — Тикси; 15 — Певек.

#### 4. Выводы

Статистические исследования возможности коррекции климатических ионосферных моделей по данным одного ионозонда вертикального радиозондирования показали, что современные модели, например модели IRI и SIMP, построенные на большом экспериментальном материале, возможно корректировать по данным одного измерения в области не более 1500 км по долготе и не более 800 км по широте. В этой области число случаев, когда относительная ошибка определения критической частоты слоя F2 будет меньше 10%, возрастет более чем на 5%. Зоны, в которых использование данных ближайшего ионозонда повысит эффективность климатичес-

ких моделей, покрывают почти всю северную часть и европейский регион России. На Урале, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке эта сеть либо минимальна, либо недостаточна. Более широкому покрытию территории России зонами, в которых эффективна коррекция модели, может способствовать объединение данных наблюдательных ресурсов различных ведомств, в частности ионозондов Российской академии наук — обсерватории Арти на Урале и ионозонда ИСЗФ СО РАН в Иркутске.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-05-80023).

## Литература

- 1. Денисенко П. Ф., Жбанков Г. А., Соцкий В. В.** Коррекция моделей ионосферы по данным сети наземных ионозондов. — Труды конференции РРВ-26, 2019, т. I, с. 133—136.
- 2. Киселева М. В., Кияновский М. П., Князюк В. С., Ляхова Л. Н., Юдович Л. А.** Прогнозирование критических частот области F2. /В сб.: Ионосферные возмущения и их влияние на радиосвязь. — М., Наука, 1971, с. 74—99.
- 3. Коломин М. В., Котонаева Н. Г., Михайлов В. В.** Эффективность коррекции ионосферных моделей по оперативной информации одной станции вертикального радиозондирования ионосферной наблюдательной сети. — Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, 2020, вып. 674, с. 55—60.
- 4. Комиссаров А. В.** Реализация метода кригинга для коррекции граничной частоты декаметровых радиолиний. — Информационные исследования и технологии, 2012, № 1 (69), с. 98—102.
- 5. Михайлов В. В., Цыбуля К. Г., Деминов М. Г., Шубин В. Н. и др.** Модель SIMP как новый государственный стандарт распределения концентрации электронов в ионосфере (ГОСТ 25645.146). /В сб.: Материалы XXV Всероссийской конференции по распространению радиоволн, 2016, с. 51—57.
- 6. Системный мониторинг ионосферы.** /Сборник научных трудов под ред. Н. Г. Котонаевой. — М., Физматлит, 2019, 416 с.
- 7. Урядов В. П., Станченков А. М., Першин А. В., Выборнов Ф. И., Яшнов В. А.** Динамическое управление ресурсом ионосферного КВ канала путем адаптации модели IRI-2016 к условиям распространения радиоволн по
- данным наклонного ЛЧМ зондирования на контрольной трассе. /В сб.: Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, 2019, с. 500.
- 8. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., and Huang X.** International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. — Space Wea., 2017, vol. 15, pp. 418—429; doi: 10.1002/2016SW001593.
- 9. Galkin I. A., Reinisch B. W., Huang X., and Bilitza D.** Assimilation of GIRO data into a real-time IRI. — Radio Science, 2012, vol. 47, No. 04, pp. 1—10.
- 10. Giovanni G. Di. and Radicella S. M.** An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. — Adv. Space Res., 1990, vol. 10, No. 11, pp. 27—30.
- 11. Gulyaeva T. L., Stanislawska I., and Tomasik M.** Ionospheric weather: Cloning missed  $foF2$  observations for derivation of variability index. — Ann. Geophys., 2008, vol. 26, pp. 315—321.
- 12. Hardy R. L.** Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. — J. Geophys. Res., 1971, vol. 67, pp. 1905—1915.
- 13. Liu R., Smith P., and King J.** A new solar index which leads to improved  $foF2$  predictions using the CCIR atlas. — Telecomm. J., 1983, No. 50, pp. 408—414.
- 14. Samardjiev T., Bradley P. A., Cander Lj. R., and Dick M. I.** Ionospheric mapping by computer contouring techniques. — Electron. Lett., 1993, vol. 29, No. 20, p. 1794.
- 15. Turner J. F.** The Development of the Ionospheric Index T. — IPS Series R Report, R11, June, 1968.