

М.В. Коломин*;
Н.Г. Котонаева*,
доктор физико-математических наук;
В.В. Михайлов*,
кандидат физико-математических наук

* Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (ИПГ), г. Москва.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПО ОПЕРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОДНОЙ СТАНЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Исследована возможность коррекции климатических моделей ионосферы по данным одного наблюдательного пункта, оснащенного ионозондом вертикального радиозондирования, с целью мониторинга плазменной оболочки Земли в реальном времени в окрестности этого средства измерения. Для исследований использовались модели SIMP-STANDARD и IRI. В качестве критериев 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: коррекция ионосферных моделей, распространение радиоволн, вертикальное зондирование, модель IRI, модель SIMP-STANDARD.

ВВЕДЕНИЕ

Использование климатических моделей среды 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. Существующие медианные модели, такие как IRI [1], SIMP-STANDARD [2] описывают среднеемесячное климатическое состояние, возможность их использования в реальной диагностике среды является предметом исследования многих авторов.

Одним из способов проведения коррекции ионосферных моделей является коррекция по данным наблюдений одного конкретного средства наблюдений, такого как ионозонд вертикального радиозондирования.

Основной целью исследования стал вопрос определения областей эффективного использования одного ионозонда вертикального зондирования для коррекции климатической модели ионосферы. Для решения указанной задачи рассматривались две модели: широко известная международная модель IRI в версии IRI-2012 [1] и эмпирическая медианная модель SIMP_STANDARD [2, 3], разработанная в Институте прикладной геофизики имени Е.К. Фёдорова (ФГБУ «ИПГ»). Модель охватывает ионосферные области D, E и F в диапазоне высот от 65 до 1000 км.

МЕТОДЫ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Проверка эффективности коррекции ионосферных моделей по данным одного ионозонда вертикального радиозондирования государственной наблюдательной сети проводилась следующим образом. Данные о критической частоте слоя F2 ионосферы, полученные на стан-

ции, которую будем называть станцией-донором, ассимилировались в модель одним из указанных ниже способов. С помощью скорректированной модели рассчитывались значения $foF2$ в точках расположения контрольных ионозондов, называемых станциями-реципиентами. Данные ионозондов на станциях-реципиентах использовались 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 метода. Первый из них связан с подбором эффективного значения входного геофизического индекса глобальной ионосферной модели.

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

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

где $foF2_{obs}(D)$ – наблюдаемые часовые значения критической частоты слоя F2 на станции-доноре;

$foF2_{mod}(D)$ – критическая частота в точке расположения станции-донора, рассчитанная с помощью модели при специально подобранном значении геофизического индекса.

При проведении исследования выяснено, что данный метод эффективен для модели IRI, но неприменим для модели SIMP-STANDARD.

Вторым методом коррекции, названным корреляционным методом коррекции, который был использован в работе, стал метод, основанный на пропорциональном изменении критической частоты слоя F2 на станции-реципиенте по формуле

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

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

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

$$\Delta foF2 = foF2_{korr}(R) - foF2_{obs}(R),$$

где аргумент R означает, что наблюдаемое (*obs*) и скорректированное (*korr*) значения критической частоты $foF2$ получены на одной станции-реципиенте и в один момент времени; а относительная ошибка коррекции определяется выражением

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

В предположении, что для удовлетворительной работы технических средств допустима некоторая малая ошибка в определении параметра критической частоты ионосферы, в качестве критериев эффективности проведения коррекции взяты вероятности того, что относительная ошибка коррекции будет менее этого значения.

Для примера рассмотрим в качестве такой допустимой ошибки величину 10% относительной ошибки:

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

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

$$\Delta_{10} = P_{10\ korr} - P_{10\ mod}. \quad (4)$$

Выборка для определения статистических критериев эффективности (3), (4) бралась по всем часовым значениям 2017–2018 гг. в те моменты, когда на станциях-донорах и реципиентах одновременно были получены часовые значения $foF2$, используемые для сравнения и коррекции. Отметим, что объем выборки варьировался от 16000 значений на среднеширотных станциях до 8000 на северных станциях. Это обусловлено периодами F-рассеяния и ионосферного поглощения, в большей степени характерными для северных регионов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Проверка на возможность проведения коррекции проводилась для всех пар ионосферных наблюдательных пунктов, оснащенных ионозондами вертикального радиозондирования, находящимися в ведомстве Росгидромета. Частично результаты статистического анализа приведены в табл. 1. Каждой станции в первом столбце присвоены условные номера. В таблице указаны объемы выборки, по которым рассчитывались значения P_{10} . В табл. 1 представлены значения параметра P_{10} для станций Сибири, включая северные станции.

Таблица 1

Вероятности того, что относительная ошибка определения критической частоты слоя F2 будет меньше 10% для коррекции по станциям Сибири. Объемы используемых выборок

Станция-реципиент	Станция-донор	IRI					SIMP-STANDARD		
		Объем выборки без коррекции	IRI без коррекции, %	IRI при корреляционной коррекции, %	IRI с коррекцией по IG, %	Объем выборки с корр. по IG	SIMP-STANDARD без коррекции, %	SIMP-STANDARD при корреляционной коррекции, %	Объем выборки
6. Новосибирск	7	12581	61	63,5	66,1	11569	65,8	66,9	12111
	8	8695	66,8	55,3	58,6	8572	72,1	64,4	8695
	9	8281	67,2	52,2	55,3	7961	72,4	61,9	8281
	10	8406	66,5	46,8	50	7854	71,3	57,3	8406
7. Подкаменная Тунгуска	6	12581	55,6	63	60,1	12278	62,8	66,8	12111
	8	8254	63,5	64,6	65,6	8134	67,6	70,7	8254
	9	7760	64,9	58,7	60,9	7538	68,5	66,4	7760
	10	7687	63,9	55,5	57,8	7277	67,9	63,6	7687
8. Салехард	6	9165	59,6	54,8	52,7	8488	65,6	64,4	8695
	7	8724	59,9	64,3	63,3	8061	66,5	71	8254
	9	7026	62,7	81,3	82,6	6797	69,6	81,8	7026
	10	6712	62,5	67,9	70,2	6355	69,6	71,5	6712
9. Амдерма	6	8751	61	51,5	50	7697	66	62,2	8281
	7	8230	60,8	58,3	58,5	7563	66,5	67,1	7760
	8	7026	63,1	81,1	81,8	6930	68,9	82,1	7026
	10	6692	64,4	74,2	76,3	6329	70,4	76,2	6692
10. Диксон	6	8876	55,6	46,2	45,3	8380	62,4	57,7	8406
	7	8157	57,3	54,5	55,3	7582	63,2	63,8	7687
	8	6712	58,8	67,5	69,3	6657	65,3	71,2	6712
	9	6692	60,3	74,1	75,8	6551	66,4	75,5	6692

В данной публикации стояла задача выяснить размеры областей, в которых использование одного ионозонда вертикального радиозондирования позволило бы повысить эффективность применения климатических моделей для оперативной диагностики среды.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при использовании моделей ионосферы без коррекции в северном и европейском регионе только 50–60% значений foF2 будут иметь ошибку менее 10%. На Дальнем Востоке эта величина составит 40–50%. Коррекция модели по одному ионозонду при благоприятном расположении ионозонда-донора может повысить эти показатели на 10–15%.

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

На рис. 1 показан алгоритм построения областей эффективности коррекции на примере станции Амдерма. Применялся следующий алгоритм построения. При использовании данных станции Амдерма в ходе определения 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 точек расположения станций 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-донора не установлена, область эффективности ограничивалась 300 км от станции-донора.



Рис. 1. Пример построения области эффективности проведения коррекции по данным станции Амдерма

На рис. 2, построенном на основе всего массива попарной проверки возможности коррекции, также включающем данные табл. 1, указаны области, в которых эффективность коррекции, оцененная по параметру P_{10} , составит 5% и более. Рисунок построен по алгоритму, описанному выше.

Из рисунка следует, что области, в которых коррекция климатических моделей по данным 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 станции, находящейся южнее, чем в обратном направлении.

Существующая сеть ионозондов государственной наблюдательной сети в составе станций, указанных на рис. 2, является необходимой, но недостаточной. Необходимо объединение наблюдательных ресурсов различных ведомств, в частности ионозондов Российской академии наук – обсерватории Арктики на Урале и ионозонда ИСЗФО РАН в Иркутске.



Рис. 2. Области эффективности проведения коррекции модели IRI по данным станций государственной наблюдательной сети

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные статистические исследования по анализу возможности проведения коррекции климатических ионосферных моделей по данным одного ионозонда вертикального радиозондирования показали, что современные модели, на примере моделей 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 использования климатических моделей, покрывают почти всю северную часть и европейский регион РФ. На Урале, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке эта сеть либо минимальна, либо недостаточна. Более широкому покрытию территории РФ зонами, в которых эффективна коррекция модели, может способствовать объединение наблюдательных ресурсов различных ведомств, в частности ионозондов Российской Академии наук – обсерватории Арктики на Урале и ионозонда ИСЗФО РАН в Иркутске.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-05-80023.

Список используемых источников

1. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions / D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik et al. // *Space Weather*. – 2017. – Vol. 1. – P. 418–429. – Doi:10.1002/2016SW001593.
2. Модель SIMP как новый государственный стандарт распределения концентрации электронов в ионосфере (ГОСТ 25645.146) / В.В. Михайлов, К.Г. Цыбуля, М.Г. Деминов и др. // *Материалы XXV всероссийской конференции по распространению радиоволн*. – М., 2016. – С. 51–57.
3. Системный мониторинг ионосферы: сб. науч. трудов / под ред. Н.Г. Котонаевой. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. – 416 с.