

УДК 550.388.2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПО ДАННЫМ ОДНОГО ИОНОЗОНДА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ В ПЕРИОД НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. Н. Г. Котонаева¹*, М. В. Коломин¹, В. В. Михайлов¹,
К. Г. Цыбуля¹, М. Ю. Филиппов¹

¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е. К. Федорова Роскомгидромета (ИПГ),
г. Москва, Россия

*e-mail: kotonaeva@ipg.geospace.ru

Поступила в редакцию 28.10.2019 г.

После доработки 17.03.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

Получены численные значения критериев эффективности определения критической частоты слоя $F2$ ионосферы над европейской частью России с использованием ионосферных моделей, скорректированных по данным одного ионозонда вертикального радиозондирования. Рассматривались два метода коррекции: путем подбора эффективного значения входного гелиогеофизического индекса и путем линейной корреляционной коррекции ионосферных моделей по критической частоте слоя $F2$ ионосферы. Получены области, в которых коррекция моделей по одной точке эффективна. Они определяют современное состояние зоны покрытия европейского региона России российской ионосферной наблюдательной сетью. Показано, что области, в которых коррекция медианных моделей действительно заметна по сравнению с медианными моделями без коррекции, составили в средних широтах 7° по широте и 15° по долготе. Получено, в частности, что определение параметров ионосферы на северных пунктах и пунктах в районе главного ионосферного провала методом коррекции по данным среднеширотных ионосферных наблюдательных пунктов в большинстве случаев невозможно. В этих случаях использование климатических моделей без коррекции эффективнее.

DOI: 10.31857/S0016794021010089

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос интерполяции ионосферных данных между ионосферными станциями и экстраполяции на неосвещенную ионосферными данными территорию исследовался в статье [Киселева и др., 1971]. В этой основополагающей работе было показано, что пространственная корреляция между данными ионозондов вертикального радиозондирования обнаружена в ограниченном пространстве (до 6° – 10° по широте и $\sim 20^\circ$ по долготе). Сейчас, спустя почти полвека, задача экстраполяции данных ионозондов на территорию вокруг них должна рассматриваться в совокупности с глобальными ионосферными моделями, которые во многом уже включили в себя множество корреляционных закономерностей, полученных по рядам наблюдений наземных наблюдательных пунктов и по данным наблюдений за ионосферой со спутников. Несмотря на то, что климатические модели отражают медианное состояние ионосферы, в практических приложениях зачастую используют именно такие модели, проводя их кор-

рекцию по данным одного или нескольких оперативных наблюдений. Так задача оптимального совместного использования априорной (эмпирической и физической) информации и данных текущих радиофизических измерений, решаемая путем коррекции модели ионосферы в реальном масштабе времени, ставится и решается во многих научно-практических исследованиях, в частности, в публикациях [Козлов и Коротун, 2016; Арефьев и др., 2016; Galkin et al., 2012].

Целью данной работы является получение количественных вероятностных характеристик эффективности коррекции современных глобальных ионосферных моделей по наблюдениям одного ионозонда вертикального радиозондирования для экстраполяции его данных на неосвещенную ионосферными наблюдениями территорию, выделение предельных зон вокруг ионосферной станции, вне которых коррекция ионосферной модели с использованием данных этого ионозонда ведет к ухудшению ионосферного мониторинга. В статье рассматриваются ионосферные стан-

Таблица 1. Ионосферные наблюдательные пункты — участники программы тестирования моделей

Номер	Ионосферный наблюдательный пункт	Географическая широта, градусы	Географическая долгота, градусы
1	Москва	55.50	37.30
2	Ростов	47.30	39.70
3	Калининград	54.80	20.60
4	Горьковская	60.16	29.23
5	Ловозеро	67.58	35.03

ции, расположенные в европейской части Российской Федерации, и ионосферные модели SIMP-STANDARD [Лапшин и др., 2016], IRI-2012 [Bilitza et al., 2017], NeQuick [Giovanni and Radiocella, 1990].

Для проведения коррекции моделей IRI-2012 и NeQuick использовались Фортран-коды и файлы коэффициентов модели CCIR [Bilitza et al., 2017]. Эмпирическая медианная модель SIMP-STANDARD, разработанная совместными усилиями Института прикладной геофизики им. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПГ) и Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН), реализована в виде набора подпрограмм на языке Фортран и файлов коэффициентов. Модель охватывает ионосферные области D , E и F в диапазоне высот от 65 до 1000 км. Моделирование критической частоты слоя $F2$ ионосферы, которое использовалось в настоящей статье, в северном полушарии опирается на локальные модели, созданные для 75 ионосферных станций. Локальная модель для ионосферной станции представляет собой зависимость величины $foF2$ для данной станции от месяца года, времени суток и ионосферного индекса T [Turner, 1968], прогнозируемого ионосферной службой Австралии (IPS).

В качестве статистического материала взяты данные наземных ионосферных станций за период 2017–2018 гг. пониженной солнечной активности. Период низкой солнечной активности, как было указано в работе [Киселева и др., 1971], характеризуется наихудшей корреляцией между данными ионосферных станций.

2. МЕТОДЫ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Для определенности станцией-донором в статье назван ионозонд вертикального радиозондирования, по часовым значениям критической частоты слоя $F2$ ионосферы которого корректировались ионосферные модели; станцией-реципиентом — место, на которое экстраполировались данные станции-донора посредством коррекции

модели. На станции-реципиенте расположен ионозонд, данные которого использовались для проверки результатов экстраполяции.

При проведении статистического анализа каждый ионосферный наблюдательный пункт из табл. 1 объявлялся по очереди станцией-донором, а остальные при этом становились станциями-реципиентами. Условно каждому ионосферному наблюдательному пункту присваивались номера, указанные в табл. 1.

Для коррекции моделей ионосферы по данным одного ионозонда были применены два наиболее очевидных метода, описанные ниже.

2.1. Коррекция методом подбора эффективного значения входного геофизического индекса

Для каждой глобальной ионосферной модели аргументом, кроме географического положения и времени, является геофизический индекс (табл. 2). Метод коррекции моделей состоял в нахождении такого эффективного значения геофизического индекса, при котором модельное значение $foF2$ равнялось наблюдаемому:

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

где $foF2_{\text{obs}}(D)$ — наблюдаемое часовое значение критической частоты слоя $F2$ на станции-доноре, а $foF2_{\text{mod}}(D)$ — критическая частота в точке расположения станции-донора, рассчитанная с помощью модели при специально подобранном значении геофизического индекса. Далее с использованием найденного значения геофизического индекса рассчитывались скорректированные часовые значения критической частоты слоя $F2$ $foF2_{\text{corr}}(R)$ на станциях-реципиентах.

Еще раз подчеркнем, что полученные из уравнения (1) индексы являются эффективными, а не реальными. Допустимые интервалы для них, приведенные в табл. 2, определяются алгоритмами моделей. Так, например, модель IRI может использовать значения индекса IG_{12} только превышающие —123, при меньших значениях программа выдает ошибку.

Таблица 2. Интервалы технически возможных значений входных геофизических индексов глобальных ионосферных моделей

Модель	Входной индекс	Наименьшее значение	Наибольшее значение
IRI	IG12 [Liu et al., 1983]	–123	201
SIMP-STANDARD	T [Turner, 1968]	–40	201
NeQuick	F10.7	20	200

При проведении исследования выяснилось, что данный метод коррекции эффективен для моделей IRI и NeQuick, но абсолютно неприменим для модели SIMP-STANDARD.

Особенностью метода коррекции по алгоритму путем подбора эффективного значения входного индекса является то, что появляются случаи, при которых подбор индекса по формуле (1) дает значение, выходящее за рамки допустимых интервалов, указанных в табл. 2. Причиной такого поведения моделей явилась низкая солнечная активность в период 2017–2018 гг., что проявилось в очень низких значениях критической частоты слоя F2 ночью зимой. Поэтому попытки коррекции моделей IRI и NeQuick по январским ночным данным в большинстве случаев завершались сбоями. Эти случаи в общую статистику не были включены.

2.2. Метод линейной корреляционной коррекции ионосферных моделей

Этот способ коррекции предполагает, что отношение наблюдаемой критической частоты к модельной на станции-доноре и станции-реципиенте одинаково:

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

где $foF2_{\text{mod}}(D)$ и $foF2_{\text{mod}}(R)$ – модельные значения критической частоты ионосферы на станции-доноре и станции-реципиенте соответственно, рассчитанные при наблюдаемых значениях геомагнитных индексов. Этот метод был применен для всех рассматриваемых моделей. Метод, близкий к предлагаемому, использован в работе [Gulyaeva et al., 2008].

2.3. Статистические критерии эффективности проведения коррекции ионосферных моделей

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

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

и относительной ошибки коррекции

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

где наблюдаемое и скорректированное значения $foF2$ получены в одной географической точке и в один момент времени.

При анализе эффективности коррекции моделей по данным одного ионозонда оценивалось также среднее значение абсолютной величины ошибки коррекции. Однако оказалось, что этот критерий не только не позволяет выбрать лучшую модель, поддающуюся коррекции, но и в большинстве случаев оценить преимущество самой коррекции. Среднее значение абсолютной величины ошибки коррекции варьировалось в интервале от 0.3 до 0.5 МГц как для климатических, так и для скорректированных моделей.

В качестве критериев эффективности проведения коррекции взяты вероятности того, что относительная ошибка коррекции составит менее 20% (3) либо менее 10% (4):

$$P_{20} = P(|\delta foF2| \leq 20\%), \quad (3)$$

$$P_{10} = P(|\delta foF2| \leq 10\%). \quad (4)$$

Выбор вероятностей ошибки 10% и 20% связан с рекомендациями Международного союза электросвязи (МСЭ). В Рекомендации [МСЭ-R P.1239-3] в качестве эталонов суточной изменчивости приведены нижний и верхний децильные коэффициенты для каждого часа, сезона и широтного диапазона, для конкретных гелиофизических условий.

Верхний децильный коэффициент вычисляется как

$$\overline{K_d} = \frac{d_9}{Me(foF2)},$$

а нижний децильный коэффициент как

$$\underline{K_d} = \frac{d_1}{Me(foF2)},$$

где d_9 – верхний дециль – наименьшее значение из 10% самых больших значений $foF2$,

d_1 – нижний дециль – наибольшее значение из 10% самых малых значений $foF2$,

$Me(foF2)$ – медианное значение $foF2$ для конкретных условий.

Для примера, верхний децильный коэффициент на широте 40° зимой при низкой солнечной активности варьируется в интервале 0.11–0.22, а нижний – в интервале 0.77–0.82. То есть ошибка 20% регламентируется в пределах границ изменчивости ионосферы. Подобную ошибку определения критической частоты ионосферы будем называть предельно допустимой. Ошибка же в 10% всегда уже коридора, определяемого границами $\overline{K_d}$ и $\underline{K_d}$.

Критерием, определяющим возможность проведения коррекции, явилась разница вероятностей ошибки, меньшей 20%, рассчитанных по скорректированной ионосферной модели и по ионосферной модели без коррекции:

$$\Delta_{20} = P_{20 \text{ corr}} - P_{20 \text{ mod}} \quad (5)$$

Выборка для определения статистических критериев эффективности (3–5) бралась по всем часовым значениям 2017–2018 гг. в те моменты, когда ионозондами на станциях-донорах и станциях-реципиентах одновременно были получены часовые значения f_oF2 . Отметим, что объем выборки варьировался от 16000 значений на среднеширотных станциях до 8000 на северных станциях, что обусловлено периодами F -рассеяния и ионосферного поглощения, в большей степени характерных для северных регионов. Были рассчитаны отдельно критерии эффективности для различных сезонов и времени суток. Результаты подтверждают выводы, сделанные по общей выборке без деления на сезоны. Отдельно рассматривались дни с магнитной активностью, но в связи с недостаточным объемом выборки выводы, сделанные по этим дням, не являются значимыми и в данной работе не обсуждаются.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

В таблице 3 приведены значения параметра P_{20} , рассчитанные для перечисленных в табл. 2 моделей и двух методов коррекции. Кроме того, параметр P_{20} был рассчитан для климатических моделей без коррекции. В этом случае расчет производился для того же объема выборки, что и при проведении коррекции. Так как объемы выборок разные, то наблюдается различие в значениях P_{20} для моделей без коррекции в различных строках табл. 3. Так, для модели SIMP-STANDARD коррекция критической частоты в Москве по ст. Калининград дала значение параметра $P_{20} = 82.4\%$ для объема выборки 15721, для коррекции по ст. Ловозеро – 88.7% для объема 9515. Такое увеличение обусловлено тем, что в наиболее сложные периоды, когда модель работает хуже, ионограммы в Ловозеро, в отличие от Калининграда, было невозможно обработать, и они не вошли в

выборку. Поэтому для объективной оценки диагностических способностей климатических моделей нужно использовать результаты с наибольшей выборкой.

В правом столбце табл. 3 рассчитаны результаты работы диагностической модели SIMP-2 – системы ионосферного мониторинга и прогноза, работающей в ФГБУ “ИПГ” и ассимилирующей данные более 75 станций по всему миру, поступающие в базу ФГБУ “ИПГ” [Репин и др., 2019]. SIMP-2, в отличие от SIMP-STANDARD, не является климатической моделью и за счет встроженных динамических моделей и ассимиляции оперативной информации решает задачи оперативной диагностики ионосферы.

Для проведения численного эксперимента из ассимилируемых моделью данных по очереди удалялись данные станций из табл. 1, так же как и данные ионозондов, находящихся на расстоянии менее 100 км от станции-реципиента. Наблюдения самих ионозондов на станциях-реципиентах использовали только для расчета критерия эффективности модели.

Возможность проведения коррекции модели по одной точке наглядно проиллюстрирована в табл. 4, содержащей значения параметра Δ_{20} (5).

Наилучшей для коррекции парой наблюдательных пунктов является пара Москва–Калининград в обоих направлениях. Здесь доля относительных ошибок коррекции, меньших предельно допустимых, может увеличиться до 8%. В остальных случаях доля таких ошибок коррекции может увеличиться не более чем на 5%.

Использование коррекции модели по данным среднеширотных, а тем более южных ионосферных наблюдательных пунктов для определения параметров ионосферы на северных пунктах и пунктах в районах главного ионосферного провала методом коррекции в большинстве случаев не обосновано. В этих случаях использование климатических моделей без коррекции дает лучший результат в мониторинге критической частоты слоя $F2$ ионосферы.

Для северных пунктов и для пунктов, попадающих в главный ионосферный провал, можно сделать вывод, что незначительное улучшение мониторинга возможно за счет коррекции по данным северных станций, находящихся южнее, либо по данным среднеширотных станций. Отметим, что в обратном направлении коррекция ухудшает ионосферный мониторинг.

Закономерности, описанные выше, сохраняются и при использовании критерия P_{10} – вероятности того, что относительная ошибка коррекции составит менее 10% (табл. 5).

Из таблицы видно, что при проведении коррекции ионосферных моделей по направлению

Таблица 3. Вероятность относительных ошибок моделей, меньших по абсолютной величине 20% (доля предельно допустимых ошибок), (%)

Станция-реципиент	Станция-донор	IRI			NeQuick			SIMP-STANDARD		SIMP2
		IRI без коррекции	IRI с коррекцией по IG	IRI при корреляционной коррекции	NeQuick без коррекции	NeQuick с коррекцией по F10.7	NeQuick при корреляционной коррекции	SIMP-STANDARD без коррекции	SIMP-STANDARD при корреляционной коррекции	
Москва (1)	2	81.1	85.3	87.1	79.7	85.2	87.1	82.1	87.4	91.7
	3	81.2	89.0	90.0	80.0	88.9	89.6	82.4	91.3	
	4	81.5	80.8	78.8	82.0	82.1	77.8	82.2	84.8	
	5	87.2	87.0	85.3	88.5	86.6	84.9	88.7	85.5	
Ростов (2)	1	82.2	88.8	86.5	81.2	89.1	85.8	87.7	88.1	89.6
	3	82.7	86.5	85.7	81.8	86.3	85.5	88.1	87.3	
	4	83.6	77.4	73.9	84.0	78.2	72.4	89.0	78.5	
	5	89.2	84.2	81.6	88.7	83.6	81.4	93.2	82.2	
Калининград (3)	1	80.9	89.2	87.9	81.5	89.4	87.6	84.1	91.1	95.5
	2	81.4	83.0	84.7	81.6	82.7	84.6	84.4	85.9	
	4	81.2	79.6	77.9	83.9	80.8	76.8	84.4	85.3	
	5	87.3	87.4	84.8	90.6	86.6	83.5	89.8	86.2	
Горьковская (4)	1	82.8	79.2	81.2	76.4	79.3	80.7	80.4	85.5	82.1
	2	82.9	71.7	75.0	76.2	70.8	73.8	80.6	77.3	
	3	83.1	79.0	80.7	76.9	78.7	79.7	80.9	86.2	
	5	89.4	87.5	86.7	87.6	87.2	86.1	85.4	87.4	
Ловозеро (5)	1	83.4	84.0	85.4	84.6	83.6	85.4	85.4	86.2	90.1
	2	84.0	78.9	79.7	84.8	77.6	80.0	85.8	81.3	
	3	84.1	84.0	85.9	85.1	83.4	85.3	86.0	87.3	
	4	84.2	86.3	86.5	85.6	86.3	86.3	85.9	88.6	

Москва–Калининград в обоих направлениях вероятность того, что ошибка определения критической частоты ионосферы будет менее 10%, возрастает более чем на 10% по сравнению с определением критической частоты моделью без коррекции.

Из таблицы 3 также можно сделать следующие выводы.

– При проведении коррекции модели необходимо строго учитывать широтные различия в расположении ионозонда и точки определения параметров ионосферы.

– В большинстве случаев для всех моделей для рассматриваемого региона выполняется условие,

по которому коррекцию лучше осуществлять по станции, находящейся южнее, чем по станции, находящейся в обратном направлении.

– Для моделей IRI и NeQuick не удалось выявить преимущество одного из предлагаемых видов коррекции.

– Из трех рассмотренных моделей поставленную задачу коррекции параметров ионосферы по данным одного ионозонда вертикального радиозондирования лучше выполняет модель SIMP-STANDARD при ее коррекции корреляционным методом по критической частоте ионосферы, однако в большинстве случаев ее преимущество в параметре P_{20} составляет не более 3%.

Таблица 4. Изменение доли предельно допустимых относительных ошибок скорректированных моделей по сравнению с климатической моделью, Δ_{20} , (%)

Станция-реципиент	Станция-донор	IRI с коррекцией по IG	IRI при корреляционной коррекции	NeQuick с коррекцией по F10.7	NeQuick при корреляционной коррекции	SIMP-STANDARD при корреляционной коррекции
Москва (1)	2	4.2	6	5.5	7.4	5.3
	3	7.8	8.8	8.9	9.6	8.9
	4	−0.7	−2.7	0.1	−4.2	2.6
	5	−0.21	−1.9	−1.9	−3.6	−3.2
Ростов (2)	1	6.6	4.3	7.9	4.6	0.4
	3	3.8	3	4.5	3.7	−0.8
	4	−6.2	−9.7	−5.8	−11.6	−10.5
	5	−5	−7.6	−5.1	−7.3	−11
Калининград (3)	1	8.3	7	7.9	6.1	7
	2	1.6	3.3	1.1	3	1.5
	4	−1.6	−3.3	−3.1	−7.1	0.9
	5	0.1	−2.5	−4	−7.1	−3.6
Горьковская (4)	1	−3.6	−1.6	2.9	4.3	5.1
	2	−11.2	−7.9	−5.4	−2.4	−3.3
	3	−4.1	−2.4	1.8	2.8	5.3
	5	−1.9	−2.7	−0.4	−1.5	2
Ловозеро (5)	1	0.6	2	−1	0.8	0.8
	2	−5.1	−4.3	−7.2	−4.8	−4.5
	3	−0.1	1.8	−1.7	0.2	1.3
	4	2.1	2.3	0.7	0.7	2.7

— Диагностическая модель SIMP-2, осуществляющая экстраполяцию по комплексу ионосферных данных, в большинстве случаев дает результат, превышающий возможности моделей, скорректированных по одной станции. Исключение составляет станция Горьковская, где SIMP-2 уступает модели SIMP-STANDARD, скорректированной по данным одного ионозонда. Отметим, что преимущество комплексного подхода является незначительным, если используется параметр эффективности P_{20} , однако при использовании в качестве критерия параметра P_{10} , выигрыш уже может достигать 10%. То есть, при использо-

вании SIMP-2 эксцесс закона распределения относительной ошибки коррекции $\delta f_o F2$ выше, чем при коррекции медианных моделей по данным одного ионозонда.

На рисунке 1, построенном на основе табл. 3 и 4, указаны области, в которых эффективность коррекции, оцененная по параметру P_{20} , составила 5% и более. Рисунок 1 построен в предположении долготной симметрии этого параметра, т.е. результат, полученный в направлении на запад от станции-донора, распространен на такое же расстояние на восток, и наоборот. Зоны севернее ст. Ловозеро и южнее ст. Ростов нарисованы ори-

Таблица 5. Вероятность (в %) относительных ошибок моделей, меньших по абсолютной величине 10%

Станция-реципиент	Станция-донор	IRI			NeQuick			SIMP-STANDARD		SIMP2
		IRI без коррекции	IRI с коррекцией по IG	IRI при корреляционной коррекции	NeQuick без коррекции	NeQuick с коррекцией по $F_{10.7}$	NeQuick при корреляционной коррекции	SIMP-STANDARD без коррекции	SIMP-STANDARD при корреляционной коррекции	
Москва (1)	2	53.3	59.4	61.3	50.4	59.0	61.0	55.0	61.8	71.5
	3	53.4	66.9	66.6	50.6	66.1	66.3	55.5	69.9	
	4	54.8	63.8	62.9	53.5	64.7	62.5	56.5	66.0	
	5	61.1	62.0	60.2	59.9	60.9	60.6	64.2	63.0	
Ростов (2)	1	54.3	63.6	61.7	50.1	63.5	61.2	61.1	62.9	64.5
	3	54.9	58.8	57.6	50.5	58.3	57.5	61.7	60.5	
	4	56.6	50.9	48.9	52.7	50.5	48.2	63.4	50.3	
	5	62.5	54.7	52.2	56.5	53.2	52.0	69.0	54.7	
Калининград (3)	1	53.1	66.3	65.9	53.4	66.8	65.5	57.3	69.7	80.3
	2	53.4	55.0	56.8	53.4	55.0	56.7	57.6	59.9	
	4	54.5	62.9	62.1	56.2	63.9	61.0	59.1	66.0	
	5	61.3	63.1	61.7	63.7	62.2	60.9	66.3	63.1	
Горьковская (4)	1	54.8	62.0	62.8	51.0	62.1	62.7	53.0	65.6	67.9
	2	55.1	45.9	47.8	50.8	45.9	47.2	53.1	48.8	
	3	55.5	61.6	62.7	51.6	61.1	61.9	53.7	65.1	
	5	63.3	69.5	68.2	63.0	67.3	68.2	59.1	68.0	
Ловозеро (5)	1	56.1	58.8	59.1	62.2	58.3	59.3	63.2	63.2	75.4
	2	56.8	50.0	50.6	62.1	49.6	50.6	63.4	54.0	
	3	57.1	60.2	61.4	62.7	59.5	60.5	64.1	63.1	
	4	56.4	67.2	67.6	64.1	67.5	67.9	64.1	69.3	

ентировочно, в предположении, что эти области не больше соответствующих областей с противоположных им сторон от ионосферных станций. Из рисунка 1 видно, что области, в которых коррекция медианных моделей IRI, NeQuick, SIMP-STANDARD действительно заметна по сравнению с медианными моделями без коррекции, составили в европейском регионе в среднем 7° по широте и 15° по долготе. Близкие значения были получены в работе [Киселева и др., 1971] как зоны, в которых коэффициент пространственной корреляции данных ионозондов был выше 0.5.

Рисунок 1 показывает, что европейская часть полностью закрыта указанными зонами, причем пересечение их минимально. Таким образом, су-

ществующая сеть ионозондов государственной наблюдательной сети в составе станций, указанных в табл. 1, является минимально необходимой.

4. ВЫВОДЫ

Исследована возможность коррекции глобальных медианных ионосферных моделей по данным одной ионосферной станции в европейском регионе России. Рассматривались периоды с низкой солнечной и магнитной активностью. Объем выборки соответствовал всем часовым наблюдениям в период 2017–2018 гг. Среднее значение абсолютной величины ошибки коррекции

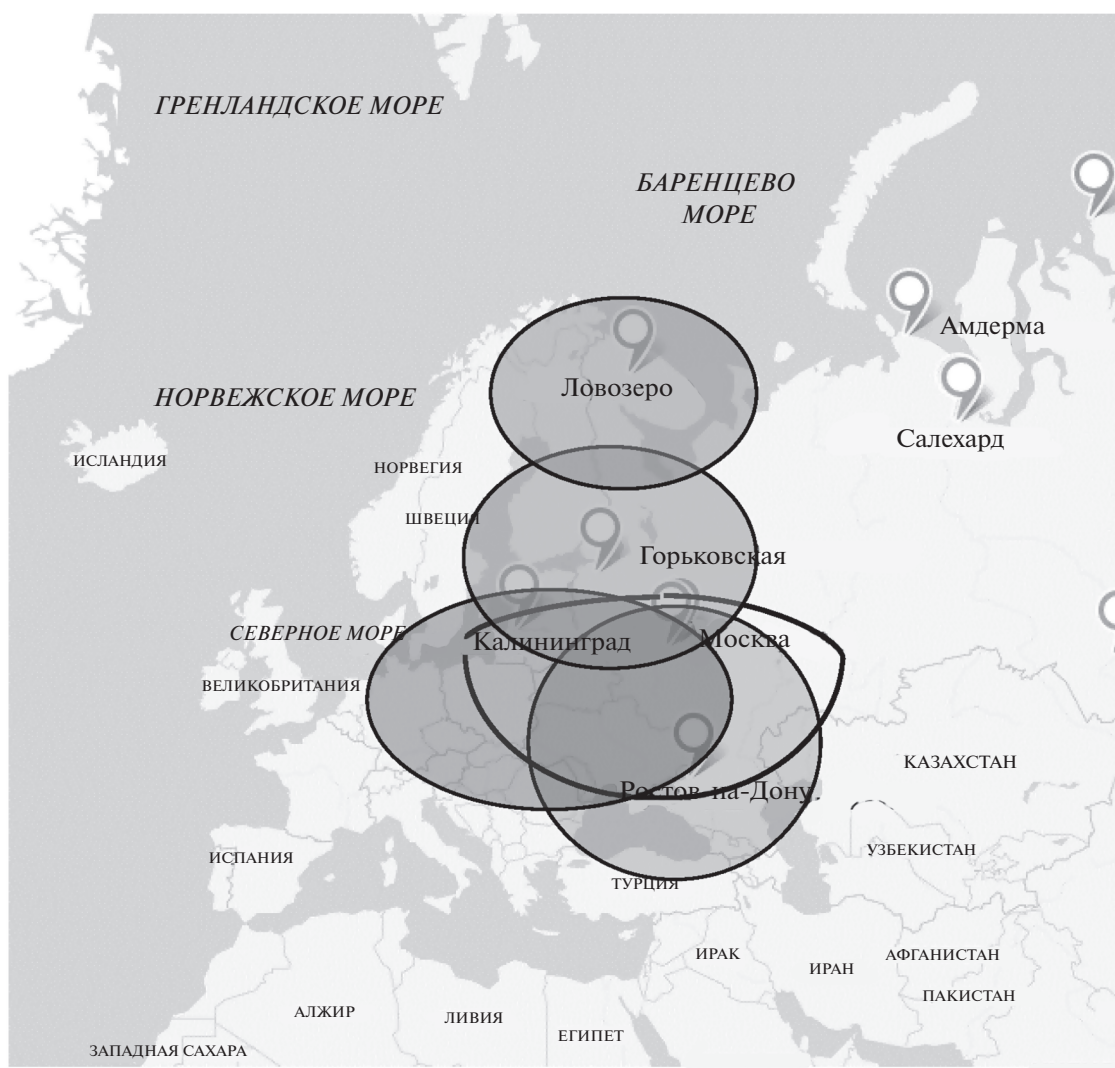


Рис. 1. Зоны в окрестности наблюдательных пунктов, в которых возможно эффективное использование климатических моделей, скорректированных по их наблюдениям.

варьировалось в интервале от 0.3 до 0.5 МГц для всех моделей и сезонно-суточных вариаций.

В качестве критерия эффективности проведенной коррекции использовалась вероятность того, что относительная ошибка в определении критической частоты слоя $F2$ ионосферы по сравнению с наблюдаемыми значениями будет менее 20%. Увеличение этой вероятности хотя бы на 5% заметно и является обоснованием возможности коррекции ионосферных моделей в этой области по данным одного наблюдательного пункта.

Показано, что области, в которых коррекция медианных моделей IRI, NeQuick, SIMP-STANDARD действительно заметна по сравнению с медианными моделями без коррекции, составили в европейском регионе в среднем 7° по широте и 15° по долготе.

Ионозонды государственной наблюдательной сети в европейской части находятся на больших расстояниях, и отсутствие данных хотя бы одного из них не может быть компенсировано ближайшим ионозондом. Исключение составляет пара ионозондов в Москве и Калининграде, находящихся почти на одной широте. Пара ионозондов Москва—Ростов-на-Дону также позволяют проводить коррекцию ионосферных моделей по данным друг друга, но с минимальной 5% эффективностью.

Таким образом, существующая на территории Российской Федерации система ионозондов государственной ионосферной сети является минимально достаточной для определения параметров ионосферы в западном и центральном районе Европейского региона. Восточная часть европейского региона не входит в зону покрытия государ-

ственной ионосферной наблюдательной сети, что обуславливает необходимость ее дополнения ионозондами на Урале, например, в Екатеринбурге.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Арефьев В.И., Кочерова М.К., Талалаев А.Б., Тихонов В.В.* Методы диагностики характеристик ионосферы для заданного региона и коррекция моделей ионосферы в интересах повышения точности прогнозирования распространения радиоволн декаметрового диапазона // Вестн. Тверского гос. ун-та. Серия: прикладная математика. № 1. С. 33–51. 2016.
- *Киселева М.В., Кияновский М.П., Князюк В.С., Ляхова Л.Н., Юдович Л.А.* Прогнозирование критических частот области F2 / Ионосферные возмущения и их влияние на радиосвязь. М.: Наука. С. 74–99. 1971.
- *Козлов В.Н., Коротун В.М.* Принципы коррекции модели ионосферы с разработкой программно-алгоритмического обеспечения для оценки предельно допустимой пропускной способности ДКМВ-радиоканала // Радиопромышленность. № 3. С. 40–45. 2016.
- *Лапшин В.Б., Михайлов А.В., Данилов А.Д., Деминов М.Г. и др.* Модель SIMP как новый государственный стандарт распределения концентрации электронов в ионосфере (ГОСТ 25645.146) // Материалы XXV Всероссийской конфер. по распространению радиоволн. С. 51–57. 2016. <https://symp.iao.ru/files/symp/gwp/25/Tom1.pdf>
- МСЭ-R P.1239-3. Эталонные характеристики ионосферы, разработанные МСЭ-R.
- *Репин А.Ю., Анишин М.М., Барабашов Б.Г., Демин Д.С., Денисова В.И., Журавлев С.В., Котонаева Н.Г., Цыбуля К.Г.* Сервис долгосрочного и оперативного прогноза условий распространения радиоволн КВ диапазона // Материалы XXVI Всероссийской конфер. по распространению радиоволн. Т. 1. С. 75–82. 2019. https://kpfu.ru/portal/docs/F_700851079/RWP26_Vol1_Final_compressed.pdf
- *Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X.* International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. V. 15. P. 418–429. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016SW001593>
- *Galkin I.A., Reinisch B.W., Huang X., Bilitza D.* Assimilation of GIRO data into a real-time IRI // Radio Sci. V. 47. № 4. P. 1–10. 2012.
- *Giovanni G.Di., Radicella S.M.* An analytical model of the electron density profile in the ionosphere // Adv. Space Res. V. 10. № 11. P. 27–30. 1990.
- *Gulyaeva T.L., Stanislawska I., Tomasik M.* Ionospheric weather: cloning missed *foF2* observations for derivation of variability index // Ann. Geophysicae. V. 26. № @. P. 315–321. 2008.
- *Liu R., Smith P., King J.* A new solar index which leads to improved *foF2* predictions using the CCIR atlas // Telecommun. J. № 50. P. 408–414. 1983.
- *Turner J.F.* The development of the ionospheric index T // IPS Series R Report, R11, June, 1968.