

Поступила в редакцию07.11.2021 г.Опубликована25.12.2021 г.

ISSN 2304-7380

УДК 551.510.535

КОРРЕКЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ В ПЕРИОД НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Ю.В. Калайда¹, Н.Г. Котонаева², В.В. Михайлов²

¹Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова г. Королев, Московская область, Россия

²Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

Рассмотрены вопросы построения локальных моделей ионосферы по данным вертикального радиозондирования ионосферы в период экстремально низкой солнечной активности. Показано, что массив данных наблюдений за предыдущие десятилетия нельзя распространить на конец 24 солнечного цикла из-за низких значений эффективных ионосферных и солнечных индексов. Предложено генерировать дополнительные значения ионосферных параметров для построения регрессии, используя модели, построенные по данным радиозатменных наблюдений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ, ЛОКАЛЬНАЯ ИОНОСФЕРНАЯ МОДЕЛЬ, РЕГРЕССИЯ, ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

DOI: 10.54252/2304-7380_2021_32_61

1. ВВЕДЕНИЕ

В практике ионосферного мониторинга и ионосферного моделирования особое место занимает информация с ионозондов вертикального радиозондирования. В результате этих исследований информация о плазменных критических частотах ионосферы измеряется непосредственно. По всему земному шару развернуто большое количество ионосферных наблюдательных пунктов, оборудованных ионозондами. Наблюдения на многих из них ведутся не одно десятилетие. Это позволяет активно использовать эти данные в ионосферных моделях. При создании глобальных ионосферных моделей одним из инструментов является включение в них локальных регрессионных моделей по отдельным ионосферным наблюдательным пунктам. Локальная модель прогнозирует поведение ионосферы в конкретной точке в зависимости от значения ионосферного или солнечного индекса. Последний солнечный цикл характеризовался особо низкой солнечной активностью, что привело к тому, что в глобальной ионосферной модели [1] отдельные области показывали серьезные ошибки определения значений критических частот слоя F2. Встал вопрос об изменении алгоритма построения локальных ионосферных моделей в этот период.

2. ЛОКАЛЬНЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ МОДЕЛИ

Локальная модель для ионосферной станции представляет собой одномерную регрессионную зависимость для медианного значения критической частоты ионосферы *foF2*, аргументом которой является тот или иной индекс солнечной активности, например, ионосферный австралийский индекс Т,

ФГБУ «ИПГ» 129128; Россия, Москва ул. Ростокинская, 9.

Электронная почта авторов для переписки:

Калайда Юлия Викторовна, e-mail: kalaida_yuliya@mail.ru Котонаева Надежда Геннадьевна, e-mail: kotonaeva@ipg.geospace.ru Михайлов Вадим Валерьевич, e-mail: vadim.svet1320@yandex.ru

по типу относящийся к «истинно-ионосферным» индексам, который рассчитывается Австралийской Прогностической Службой [2]. Индекс Т считается одним из точных, так как обеспечивает наилучшую регрессионную зависимость для месячных медиан *foF2* по сравнению с числом солнечных пятен.

Локальная модель позволяет осуществлять долгосрочный прогноз фоновых значений *foF2* для места расположения ионосферной станции.



Рис. 1. Результат построения регрессии по наблюдениям станции Ростов в 00 часов для января (вверху) и февраля (внизу)

В привычном понимании локальная модель строится по совокупности значений месячных медиан значений foF2 за все годы наблюдений для каждого месяца и 24 моментов времени UT методом наименьших квадратов как зависимость: foF2 = f(Ci, T(UT, homep mecsua)), где Ci - коэффициенты

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

регрессии. В качестве регрессионной зависимости выбран полином третьей степени. Кубическое уравнение регрессии для имеет вид:

$$foF2_{med} = aT^3 + bT^2 + cT + d,$$
 (1)

где *f* oF2_{med} – зависимая искомая переменная, отвечающая за прогнозирование медианного значения критической частоты слоя F2.

Для примера на рисунках 1–6 представлены построенные описанным выше способом регрессии ночные локальные ионосферные модели по станции Ростов в 00 UT для каждого месяца.



Рис. 2. Результат построения регрессии по наблюдениям станции Ростов в 00 часов для марта (вверху) и апреля (внизу)





Рис. 3. Результат построения по наблюдениям станции Ростов в 00 часов для мая (вверху) и июня (внизу)

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова





Рис. 4. Результат построения по наблюдениям станции Ростов в 00 часов для июля (вверху) и августа (внизу)





Рис. 5. Результат построения по наблюдениям станции Ростов в 00 часов для сентября (вверху) и октября (внизу)

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова





Рис. 6. Результат построения по наблюдениям станции Ростов в 00 часов для ноября (вверху) и декабря (внизу)

Поиск оптимального проведения регрессионной зависимости для значений индекса, соответствующих условиям средней солнечной активности, достигается методом многократного проведения регрессионной кривой с выявлением и последующим удалением из выборки на каждом шаге одного из наблюдаемых медианных значений foF2, имеющих максимальное отклонение от проведенной кривой. В зависимости от величины выборки кратность этой процедуры (выявление оптимального тренда) может достигать от 4-х до 12-ти раз, что существенно снижает разброс данных наблюдений относительно окончательной регрессионной кривой (локальной модели).

С использованием значений, поученных по (1) для каждого часа и каждого месяца при конкретном значении ионосферного индекса T строится суточный ход изменения *foF2*. Данный суточный ход и представляет собой локальную модель состояния критической частоты слоя F2 в данной точке при данном прогнозном значении индекса T. Пример построения суточного ходы приведен на рисунке 7 для станции Ростов январь при T = 25.



Рис. 7. Дневной ход медианы критической частоты слоя F2 для января при T = 25 (время UT)

В таблице 1 представлены значения коэффициентов регрессионных многочленов (2) по станции Ростов, рассчитанные по массиву данных ионозонда вертикального радиозондирования, и коэффициенты корреляции.

По имеющимся многолетним данным построены модели по станциям, перечисленным в Таблице 2. Часть этих станций продолжает быть активной, и информация с них доступна, часть прекратили сеансы вертикального радиозондирования либо информация с них не доступна.

Локальные ионосферные модели используются как вспомогательный элемент общей системы мониторинга ионосферы в разделах долгосрочного и краткосрочного прогнозирования.

Месяц	Час	a	b	с	d	Коэффициент	dF (МГц)
				корреляции			
JAN	0	8.69*10 ⁻⁷	-2.28*10 -4	2.35*10 -2	2.49	0.72845	0.44
FEB	0	$1.35*10^{-6}$	-3.36*10 -4	3.29*10 -2	2.36	0.83410	0.64
MAR	0	8.39*10 -7	$-1.77*10^{-4}$	2.67*10 -2	2.57	0.95265	0.24
APR	0	5.97*10 -7	-1.13*10 -4	2.87*10 -2	2.74	0.96241	0.28
MAY	0	$3.27*10^{-7}$	-9.83*10 -5	3.18*10 -2	3.21	0.97158	-0.13
JUN	0	$1.79*10^{-7}$	-6.92*10 -5	2.87*10 -2	3.49	0.96877	0.13
JUL	0	$-2.91*10^{-7}$	4.74*10 -5	2.23*10 -2	3.24	0.97533	0.10
AUG	0	7.03*10 -7	-1.68*10 -4	2.94*10 -2	3.02	0.95703	0.43
SEP	0	$8.40*10^{-7}$	-2.35*10 -4	3.61*10 -2	2.62	0.93322	0.61
OCT	0	$1.52*10^{-6}$	-3.60*10 -4	3.47*10 -2	2.81	0.91417	0.75
NOV	0	1.46*10 -6	-3.27*10 -4	2.67*10 -2	2.83	0.75971	0.69
DEC	0	1.22*10 -6	-3.20*10 -4	2.87*10 -2	2.63	0.62983	0.96

Таблица 1. Статистические данные, полученные по результатам построения регрессионных зависимостей, для станции Ростов

Таблица 2. Перечень ионосферных наблюдательных пунктов, по данным которых построены локальные модели

Станция	Координаты	Страна Станция		Координаты	Страна	
1	1 2		4	5	6	
AHMEDABAD	23.0N 72.6E	Индия	NORILSK	69.5N 88.0E	РФ	
AKITA	39.7N 140.1E	Япония	NOVOKAZALINSK	45.5N 62.1E	Казахстан	
ALMA ATA	43.2N 76.9E	Казахстан	NOVOSIBIRSK	54.6N 83.2E	РФ	
ARKHANGELSK	64.6N 40.5E	РΦ	NURMIJARVI	60.5N 24.6E	Финляндия	
ASHKHABAD	37.9N 58.3E	Туркмения	OKINAWA	26.5N 127.8E	Япония	
BEKESCSABA	46.7N 21.2E	Венгрия	OTTAWA	45.4N 283.8E	Канада	
BELGRAD	44.8N 20.5E	Сербия	OUAGADOUGOU	12.4N 358.5E	Буркина- Фасо	
BOMBAY	19.0N 72.8E	Индия	PETERSBURG	60.0N 30.7E	РФ	
BOULDER	40.0N 254.7E	США	PETROPAVLOVSK	53.0N 158.6E	РФ	
DAKAR	14.8N 342.6E	Сенегал	PODKAMENNAYA TUNGUSKA	61.6N 90.0E	РФ	
DE BILT	52.1N 5.2E	Нидерланды	POINT_ARGUELLO	35.6N 239.4E	CIIIA	
DIKSON	73.5N 80.4E	РΦ	POITIERS	46.6N 0.4E	Франция	
DJIBOUTI	11.5N 42.8E	Джибути	PROVIDENIYA	64.7N 186.6E	РФ	
DOURBES	50.1N 4.6E	Бельгия	PRUHONICE	50.0N 14.6E	Чехия	
FREIBURG	48.1N 7.6E	Германия	ROME	41.8N 12.5E	Италия	
GIBILMANNA	37.6N 14.0E	Италия	ROSTOV	47.2N 39.7E	РФ	
GODHAVN	69.4N 306.5E	Гренландия	SALEKHARD	66.5N 66.5E	РФ	
GOOSE_BAY	53.3N 299.6E	Канада	SINGAPORE	1.3N 103.8E	Сингапур	
GORKY	56.1N 44.3E	РФ(Нижний Новгород)	SLOUGH	51.5N 359.4E	Великобрита ния	
GRAND_BAHAM A	26.6N 281.8E	США (Багамские острова)	SODANKYLA	67.4N 26.6E	Финляндия	
GRAZ	47.1N 15.5E	Австрия	SOFIA	42.7N 23.4E	Болгария	
IRKUTSK	52.5N 104.0E	РФ	SOUTH_UIST	57.4N 352.7E	Великобрита ния (Шотландия)	

Продолжение табл. 2									
1	2	3	4	5	6				
JULIUSRUH/RU GEN	54.6N 13.4E	Германия	ST_JOHNS	17.6N 307.2E	Антигуа и Барбуда				
KALININGRAD	54.7N 20.6E	РΦ	SVERDLOVSK	56.4N 58.6E	РФ				
KARAGANDA	49.8N 73.1E	Казахстан	TASHKENT	41.3N 69.6E	Узбекистан				
KHABAROVSK	48.5N 135.1E	РΦ	TOMSK	56.5N 84.9E	РФ				
KHEYSA ISL	80.6N 58.0E	РΦ	TBILISI	41.8N 44.7E	Грузия				
KIEV	50.5N 30.5E	Украина	THULE/QAANAAG 77.5N 290.8E		Гренландия				
KODAIKAN	10.2N 77.5E Индия		TIKSI_BAY	71.6N 128.9E	РФ				
KOKUBUNJI	35.7N 139.5E	Япония	UPPSALA	59.8N 17.6E	Швеция				
LANNION	48.5N 356.7E	Франция	WAKKANAI	45.4N 141.7E	Япония				
LOPARSKAYA 68.0N 33.0E Pd		РΦ	WALLOPS_ISL	37.8N 284.5E	CIIIA				
(Ловозеро)									
LYCKSELE 64.6N 18.8E		Швеция	WASHINGTON	38.8N 282.9E	США				
MAGADAN	60.0N 151.0E	РФ	WHITE_SANDS	32.3N 253.5E	CIIIA				
MANILA	14.7N 121.0E	Филиппины	YAKUTSK	62.0N 129.6E	РФ				
MAUI	20.9N 203.5E	США	YAMAGAWA	31.2N 130.6E	Япония				
MIEDZESZYN	52.2N 21.2E	Польша	YUZHNO- SAKHALINSK 47.0N 142.		РФ				
MOSCOW	55.5N 37.3E	РΦ							

3. ВАЛИДАЦИЯ ИОНОСФЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ПЕРИОД НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Проверим возможность использования локальных моделей, построенных по данным нескольких предшествующих солнечных циклов, в период 2018–2020 гг., которые характеризовались экстремально низкими значениями индекса Т.

На рисунках 1–6 розовым цветом нанесены данные рассчитанных по наблюдениям медиан критической частоты слоя F2 за 2019 г., а синими точками выделены точки регрессионного многочлена при соответствующем значении индекса Т. Видим, что используемое для построения регрессий облако точек находится при больших значениях индекса Т.

В последнем столбце приведенной табл. 1 находятся значения, обозначенные dF. Этот параметр характеризует разность между значением, наблюдаемого значения медианы *foF2*, и значением, которое было рассчитано с помощью кубической регрессии. Эта величина дает представление о погрешности модели.

Результаты показывают, что при низкой солнечной активности в летнее время модели можно использовать (погрешность составляет 0,1 МГц), то ночью, начиная с августа, ошибка моделирования растет составляет более 0,5 МГц в отдельных случаях, например, в 5 UT в ноябре было зафиксировано отклонение 1,5 МГц, что для локальных моделей является очень большой величиной. Днем ситуация несколько лучше, в период с 9 – 18 UT зимой отклонения составляли менее 0,2 МГц.

Объяснение такого явления состоит в том, что наблюдаемая в конце 24 солнечного цикла активность Солнца была крайне низкая, не зафиксированная в последние несколько десятилетий, поэтому кубический многочлен, построенные по одному интервалу значений аргумента, не может отражать физику явления на другом интервале. Особенно ярко это выразилось на станции Goose Bay в январе ночью (рис. 7 а). Кривая кубического многочлена имеет минимум в точке T = 20 и при меньших значениях становится умывающей функцией, то есть с уменьшением T критическая частота возрастает, что противоречит физике явления (рис. 7 б).

70

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова



Рис. 7. а) - регрессионный многочлен на станции Goose Bay (Январь 01 UT) с нанесенными точками наблюдений; б) – математический вид того же многочлена на большем интервале; в) – измененный вид регрессионного многочлена с добавлением значений на нижней границе

Исследования показывают, что применение локальных моделей, построенных по массиву вертикального радиозондирования за предыдущие циклы солнечной активности, в ионосферном мониторинге ночью зимой и осенью при низкой солнечной активности ведет к существенным ошибкам. Была поставлена задача модернизировать существующие локальные модели на интервал значений T от минус 16 (минимально возможное значение индекса) до плюс 20.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ИОНОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ SIMP 2 Для расширения интервала применимости локальных моделей

Из вышесказанного следует, что в периоды очень низкой и очень высокой солнечной активности, в которые значение аргумента выходит за пределы интерполяционного участка регрессионной зависимости foF2, требуется уточнение регрессионной зависимости. Для этого использовалась медианная модель слоя F2 вошедшая в систему мониторинга и прогноза ионосферы SIMP [3]. Отметим, что модель слоя F2 в модели SIMP построена с использованием данных радиозатменного зондирования Шубиным В.Н. Для устранения возможных серьезных ошибок в крайних точках диапазона изменения уровня солнечной активности, используется уточнение:

- по каждой уже рассчитанной в соответствии с (1) локальной модели вычисляются медианные значения foF2 при фиксированных UT и номере месяца по всем значениям индекса T от 20 до 200 (max T) с шагом 10 единиц;

- эти рассчитанные 19 модельных значений *foF*2 принимаются за наблюдаемые;

- для диапазона малых значений индекса T<20 рассчитывается по медианной динамической модели *foF2* [3] еще одно, значение *foF2*, соответствующее самой минимальной солнечной активности, абсолютно спокойному Солнцу. В этом состоянии отсутствует всякая вспышечная активность, но остается фоновое излучение хромосферной области Солнца (так называемый фоновый индекс) в ультрафиолетовом диапазоне. В этом случае значение F10,7 достигает своего минимального значения равного 66 (наблюдалось 19 июля 2009 года). Магнитные условия спокойные Ap = 0. Принимается, что этому рассчитанному значению foF2 соответствует минимальное значение индекса T=-16. Затем, увеличивался статистический вес этой 20-ой точки, повторив ее трижды, как 3 одинаковых "измерения";

- совокупность этих 22 значений *foF2* аппроксимируется по методу наименьших квадратов полиномом 3-ей степени, получая 4 окончательных значения коэффициентов разложения.

На рисунке 7 в показан измененный вид кривой регрессии при применении алгоритма, изложенного выше.

71

Изложенный алгоритм расширяет возможности построения локальных ионосферных моделей может быть применен к наблюдательным пунктам с короткими рядами наблюдений.

К примеру, на станции Токио наблюдения в январе проводились только 5 лет, корреляционный многочлен, построенный по ним не физичен (рис. 8), однако не использовать эти наблюдения в системе мониторинга было бы не рачительно. В этом случае по динамической модели рассчитываются значения при наименьшем и наибольшем значениях Т. По получившемуся множеству из 7 значений строится кривая регрессии (рис. 8 б), которую уже можно ассимилировать в общую систему мониторинга ионосферы.



Рис. 8. а – регрессионный многочлен на станции Токио (Январь 12 UT) с нанесенными точками наблюдений; б – измененный вид регрессионного многочлена с добавлением значений на всем диапазоне значений индекса Т

5. СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ МОДКЕЛЕЙ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Для сопоставления результатов расчета foF2, вычисленной программой расчета локальных моделей использовалась остаточная дисперсия, которая вычислялась по формуле (2):

$$D = \left(\sum_{i=1}^{N} (x_{\mathsf{SKCII}_i} - x_{\mathsf{MOA}_i})^2\right) / N,$$
⁽²⁾

где $x_{\mathfrak{s}\kappa c \mathfrak{n}_i}$ – i-е экспериментальное значение медианы foF2;

 $x_{\text{мод}_i}$ – i-е модельное значение медианы foF2;

N – общий объем наблюдений на станции (указан в таб. 3);

 $d = \sqrt{D}$ – среднеквадратичное остаточное отклонение;

δ - среднее относительное отклонение от наблюдений по объему выборки N,

М – среднее отклонение от наблюдений по объему выборки N. Сравнивались модели:

SIMP 2 – динамическая модель ионосферного мониторинга и прогноза [3];

IRI 12 - международный стандарт ионосферы [4];

SIMP1 – климатическая модель ионосферного мониторинга и прогноза [1];

RGM – локальные модели ионосферы

SMI88 – российский стандарт ионосферы.

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Станция Модели	Москва N = 17039			Ростов N = 12182		Калининград N = 10182			Петербург N = 16696			
ионосферы	d, МГц	М, МГц	δ %	d, МГц	М, МГц	δ %	d, МГц	М, МГц	δ %	d, МГц	М МГц	δ %
SIMP 2	0.52	0.02	7.75	0.54	0.14	0.42	0.42	0.00	6.54	0.57	-0.25	12.71
IRI 12	0.57	-0.03	8.73	0.57	-0.05	0.50	0.50	-0.02	7.62	0.61	-0.19	12.14
SIMP1	0.32	-0.00	4.93	0.36	-0.02	0.27	0.27	0.00	4.23	0.32	-0.01	5.60
RGM	0.30	0.00	4.66	0.35	0.00	0.26	0.26	0.01	4.09	0.30	0.00	5.23
SMI88	0.69	-0.04	11.34	0.59	0.04	0.64	0.64	-0.08	11.09	0.76	-0.01	14.62

Таблица 3. Сравнение точностей медианных моделей foF2 с локальными моделями по европейским станциям России

Из таблицы 3 следует, что, как и указывалось в [1], локальные модели обладают большей точностью по сравнению с прочими медианными моделями. Модель SIMP1 близка по своим характеристикам к локальным моделям, поскольку построена на их совокупности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обновленный алгоритм построения локальных моделей позволил расширить область применения локальных моделей ионосферы на области очень низкой солнечной активности, вплоть до отрицательных значений индекса Т. Совместное применение регрессионного алгоритма построения локальных моделей и динамической ионосферной модели на основе данных радиозатменного зондирования дает возможность построения локальных моделей на станциях с короткими рядами наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Лещинская Т.Ю., Михайлов В.В. Модель SIMP-1: картирование месячных медиан foF2 по северному полушарию/ Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 6. С. 772-780.
- 2. Space Weather Services/ T Index FAQ/ https://www.sws.bom.gov.au/Educational/5/2/1
- 3. Системный мониторинг ионосферы. Сборник научных трудов / Под ред. доктора физ.-мат. наук Н.Г. Котонаевой. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. — 416 с. — ISBN 978-5-9221-1878-1.
- 4. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y. et al. The International Reference Ionosphere 2012 a model of international collaboration // J. Space Weather Space Clim. V. 4. A07. 2014. doi 10.1051/swsc/2014004

CORRECTION OF LOCAL IONOSPHERIC MODELS DURING LOW SOLAR ACTIVITY

Y. V. Kalaida, N.G. Kotonaeva, V.V. Mikhailov

The issues of constructing local models of the ionosphere based on the data of vertical radiosonding of the ionosphere during the period of extremely low solar activity are considered. It is shown that the array of observational data for the previous decades cannot be extended to the end of the 24th solar cycle due to low values of effective ionospheric and solar indices. It is proposed to generate additional values of ionospheric parameters for regression construction using models based on radio-frequency observations.

KEYWORDS: IONOSPHERE, VERTICAL IONOSPHERIC RADIOSONDING, LOCAL IONOSPHERIC MODEL, REGRESSION, SOLAR ACTIVITY CYCLE