

УДК 621.371/372

## ПОГРЕШНОСТЬ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МАКСИМУМА СЛОЯ $F_2$ В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. И. В. Крашенинников<sup>1</sup>, \*, Л. Н. Лещенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

\*e-mail: krash@izmiran.ru

Поступила в редакцию 24.12.2020 г.

После доработки 23.03.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

Проанализированы погрешности в оценке параметров главного ионосферного максимума: плазменной частоты –  $foF_2$  и высоты –  $hmF_2$  автоматизированными системами обработки данных вертикального радиозондирования ионосферы на ст. ИЗМИРАН в 2018 г. – в период низкой солнечной активности. Исследовались результаты работы двух наиболее распространенных в мировой практике обсерваторских наблюдений состояния ионосферы программ: ARTIST 5 в составе ионозонда DPS-4 (комплекс DPS-ARTIST) и Autoscala 5.1, адаптированной для ионозонда “Парус-А” (комплекс Парус-Autoscala). В качестве эталона для сравнения результатов использовалась независимая система операторской обработки ионограмм на ионозонде “Парус-А”. Показано, что оценки  $foF_2$  автоматизированными системами достаточно достоверны со среднеквадратичным отклонением 0.1 МГц. Погрешности в оценке  $hmF_2$  существенно различаются для рассматриваемых комплексов и характеризуются наличием общего систематического отрицательного смещения, наиболее значимо выраженного в локально полуденное время и зависящего от сезона года. Статистические значения отклонений  $hmF_2$  существенно больше для системы DPS-ARTIST и принципиально сравнимы с результатами сопоставления с данными радара некогерентного рассеяния в Millstone Hill.

DOI: 10.31857/S0016794021050072

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Основным источником корректно локализованных данных о положении главного ионосферного максимума – пика слоя  $F_2$  ионосферы являются ионозонды вертикального радиозондирования (ВЗ) ионосферы. Несмотря на то, что их функционирование может быть основано на различных типах локационных сигналов, интерпретация данных радиозондирования – ионограмм ВЗ выполняется в мировой практике, в основном, двумя программами автоматического распознавания регистрируемых следов отражения от ионосферы и последующего восстановления высотной зависимости электронной плотности. По степени применимости их можно расположить следующим образом: ARTIST, используемая только в ионозондах DPS-4 [Galkin et al., 2008], и более универсальная – Autoscala [Pezzopane, Scotto, 2004], адаптируемая для различных ионозондов [Pezzopane et al., 2010]. В каждой из программ можно выделить два базовых модуля: распознавание частотной зависимости группового

запаздывания сигналов однократного отражения от ионосферы с выделением следов отражений от ионосферных слоев на ионограмме и инверсии нормализованной ионограммы в высотный профиль электронной плотности. В силу того, что ионограммы ВЗ формируются в условиях зависимости распределения ионосферной плазмы от геологического фона, а также, учитывая факторы ионосферной изменчивости, неопределенности и динамических (волновых) возмущений, их структура может быть очень сложной. Задача распознавания образов, как правило, основана на наборе определенных стандартных образцов данных и при значительных отклонениях от них ионограмма может быть классифицирована как неподходящая для обработки или интерпретирована некорректно. При неправильном распознавании треков на ионограмме ионосферные параметры и, в частности, положение главного ионосферного максимума будут определены со значительной погрешностью, что в последующем может проявиться, например, в наличии система-

тической особенности в ионосферных моделях, основанных на статистических экспериментальных данных.

В работе [Pezzopane, Scotto, 2007] приведены результаты сопоставления точностных характеристик программ автоматической обработки ионограмм ARTIST (версия 4) и Autoscala для плазменной частоты в максимуме слоя  $F2 - foF2$  на данных, полученных одним ионозондом — DPS-4 (Рим) в 2005—2006 гг. в условиях среднего уровня солнечной активности. Показано, что, в целом, обе программы имеют сравнимую эффективность в оценке данного параметра, различаясь в конкретных случаях вследствие особенностей в структуре исходных данных. Погрешности в оценке высоты максимума слоя  $F2$  исследовались в работе [Chen et al., 1994] для системы DPS (Digisonde)-ARTIST для сезонов 1990 г. — максимума солнечной активности. Показано, что в сравнении с практически прямыми измерениями пика слоя  $F2$  радаром некогерентного рассеяния (НР) в MillstoneHill, отмечается систематическое отрицательное отклонение значений, полученных из данных ионозонда Digisonde 256 с системой обработки ARTIST 4 с наибольшим значением для июня месяца  $\sim -17$  км. В публикации [Perrone et al., 2020], также на основе данных НР в MillstoneHill, но только в локально полуденное время, за период 2000—2016 гг. в спокойных условиях (селектированные данные), отмечается, что для результатов DPS-Autoscala усредненное расхождение в высоте максимума слоя  $F2$  существенно меньше и составляет  $\sim -1$  км со стандартом  $\sim 11$  км. Более расширенное исследование тех же данных на суточном интервале времени [Scotto and Sabbagh, 2020] дает большие оценочные значения для статистических параметров  $hmF2$ : среднее смещение  $\sim -10$  км со стандартом отклонения  $\sim 16$  км для DPS-Autoscala и с несколько большей систематической погрешностью для комплекса DPS-ARTIST.

В данной работе представлены результаты анализа оценки параметров максимума слоя  $F2$  ионосферы [ $foF2$ ,  $hmF2$ ] двумя системами автоматического масштабирования ионосферных параметров, функционирующими в составе ионозондов DPS-4 (DPS-ARTIST) и “Парус-А” (Парус-Autoscala) в ИЗМИРАН, для 2018 г. — года низкой солнечной активности.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ИЗМИРАН ведутся регулярные обсерваторские наблюдения состояния ионосферы двумя ионозондами: “Парус-А” [Гвишвили, Лещенко, 2019], данные которого наряду с автоматической системой их интерпретации — Autoscala [Krasheninnikov et al., 2010] подвергаются независимой операторской обработке часовых регистраций, и

DPS-4 с программой распознавания ионограмм ARTIST (версия 5) [Панченко, 2019]. Каждая система обработки данных ВЗ имеет в своем составе модуль восстановления высотной зависимости электронной плотности —  $N(h)$ -профиля [Scotto, 2009; Reinisch, Huang, 1983]. Разность во времени съема ионограмм составляет 1 мин, что можно рассматривать, как практически одновременную работу ионозондов. На рисунке 1 приведен пример ионограмм ВЗ, полученных двумя ионозондами и обработанных соответствующими программами распознавания. Видно, что они, в высокой степени, идентичны, что и проявляется в оценке  $foF2$ : 5.60 МГц в обоих случаях. Но в высоте максимума расхождение существенное: 198 км для системы DPS-ARTIST и 230 км — для Парус-Autoscala. Также можно видеть и заметное различие в высотных профилях электронной плотности, в частности, в области слоя  $F1$ , для которого высота максимума —  $hmF1$  оценивается как 156 км системы DPS-ARTIST и 174 км — системой Парус-Autoscala. Операторская обработка ионограммы с программой оценки  $N(h)$ -профиля на основе метода [Titheridge, 1988] дает значение для  $hmF2$  в 207 км и с более реалистичным высотным ходом электронной плотности в области слоя  $F1$  для осеннего сезона с максимальной высотой — 158 км (рис. 2). (Для слоя  $F1$  в данной ситуации более корректно говорить не о высоте максимума, а о максимальной высоте, поскольку слой является частично развитым).

Из рисунка 1 видны особенности алгоритмов работы программ автоматической обработки ионограмм ВЗ. Для алгоритма программы ARTIST характерно выделение трека всего следа обыкновенной ветви ионограммы (рис. 1, левая панель). Этому способствует технология работы ионозонда с раздельным излучением волн круговой поляризации, что видно по качественному разделению следов магнитоионных компонент зондирующих волн. Инверсия дискретизированных точек трека выполняется по классической схеме — от начала следа слоя  $E$  до последней точки отражения от слоя  $F2$  и последующей модельной экстраполяцией на внешнюю часть ионосферы. Обращение к модельным представлениям ионосферы при расчете  $N(h)$ -профиля производится только при определении стартовой точки с учетом области ненаблюдаемой электронной концентрации ( $D$ -область) и  $E-F$  “долины” межслоевой ионизации.

В алгоритме Autoscala (версия 5.1) выделяются только треки магнитоионных компонент отражения от слоя  $F2$  до точки смыкания со следами моды  $F1$  (или слоя  $E$  при отсутствии  $F1$ ) и определяется критическая частота слоя  $F1$  [Pezzopane, Scotto, 2008]. Для работы программы не требуется иметь строгого разделения магнитоионных ветвей ионограммы в приемном устройстве ионо-

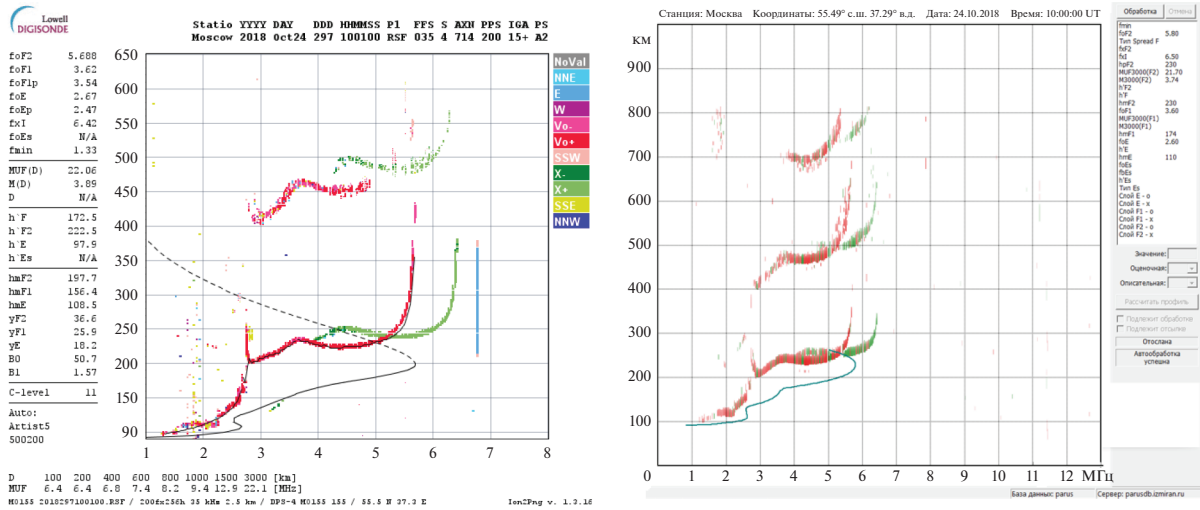


Рис. 1. Ионограммы ВЗ на ст. ИЗМИРАН 24.10.2018 г.: 10:01 UT – ионозонд DPS-4 (левая панель) и 10:00 UT – ионозонд “Парус-А” (правая панель) с высотными профилями электронной плотности, полученными автоматическими программами ARTIST и Autoscala.

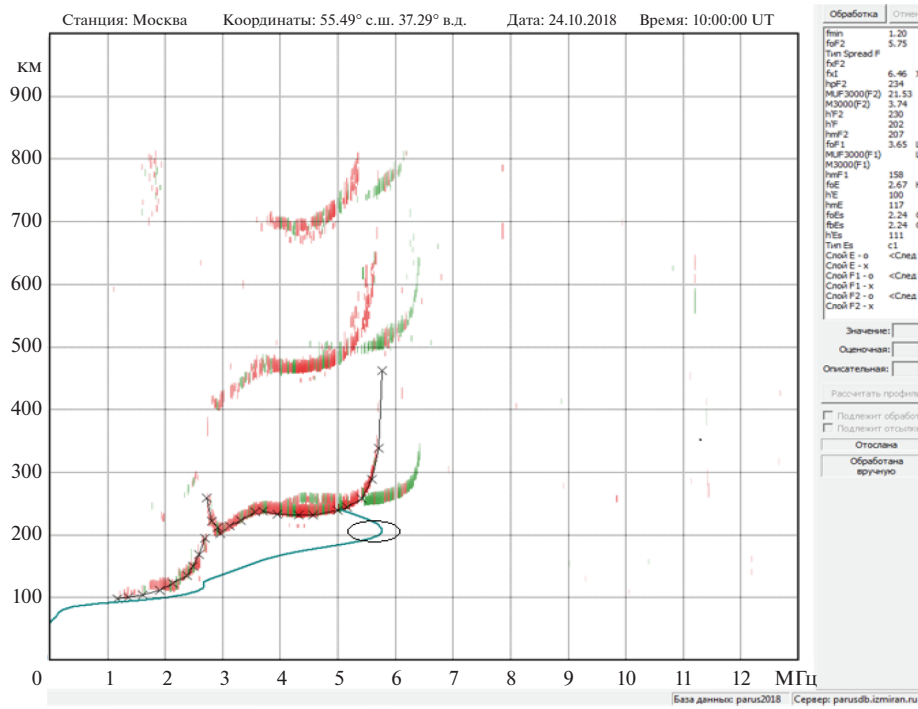


Рис. 2. Ионограмма ВЗ на ст. ИЗМИРАН 24.10.2018 г. 10:00 UT – ионозонд “Парус-А” с обработкой оператором и высотным профилем плазменной частоты. Разность в оценке высоты максимума слоя F2 составляет: +25 км для Autoscala и –10 км для ARTIST. Крестиками отмечены точки трека O-компоненты, выбранные оператором.

зонда. Она может функционировать даже при отсутствии такого разделения, что определяет ее универсальность и возможность адаптации к различным ионозондам [Pezzorane et al., 2010], в том числе и не имеющим ортогональных приемных

антенн. Однако привлечение внешних модельных представлений более широкое. И поскольку модели медианные, то в конкретных условиях они могут иметь существенные отличия от текущих зависимостей ионосферных параметров,

**Таблица 1.** Стандарт отклонения от медианных значений  $hmF2$ 

	ARTIST	Autoscala	Оператор
Январь	17.6	20.7	13.1
Апрель	17.3	20.7	17.0
Июль	19.3	19.1	18.2
Октябрь	16.5	17.3	14.5

**Таблица 2.** Медианные отклонения параметров максимума слоя  $F2$ 

Месяц	ARTIST		Autoscala	
	$\Delta f_p$ , МГц	$\Delta h_p$ , км	$\Delta f_p$ , МГц	$\Delta h_p$ , км
Январь	-0.1	-9.0	-0.1	0.0
Апрель	0.0	-13.0	-0.1	-7.0
Июль	0.0	-17.5	-0.1	-11.0
Октябрь	0.0	-9.0	-0.1	-1.0

что, в частности, можно видеть из хода электронной плотности на высотах слоя  $F1$  (рис. 1). Сравнивая его с результатами операторской оценки  $N(h)$ -профиля (рис. 2) и программы ARTIST (рис. 1) можно заключить: слой в целом выглядит преувеличенным в своем развитии для данного сезона (такая форма слоя  $F1$  более характерна для летнего сезона) и имеет завышенную максимальную высоту слоя  $F1 - hmF1$  (174 км против 156 км – рис. 1 и 158 км – рис. 2).

В операторской обработке данных, здесь и далее рассматриваемой как эталон, распознавание следов по ионосферным областям и выделение треков выполняется квалифицированным оператором в соответствии с правилами URSI по интерпретации ионограмм [Руководство, 1978]. Восстановление высотного профиля выполняется программой MPOLAN, являющейся модификацией программы POLAN [Titheridge, 1988] с добавлением модели СМИ-88 для описания  $D$ - и нижней части  $E$ -слоев ионосферы, как областей ненаблюдаемой электронной плотности (рис. 2). В алгоритме POLAN имеется существенное отличие от программ восстановления  $N(h)$ -профиля ARTIST и Autoscala: всегда выполняется процедура экстраполяции высотного профиля электронной плотности до высоты максимума слоя  $F2$ , как обязательно развитого слоя, на основе его аналитического представления слоем Чепмена (отмечено овалом на рис. 2).

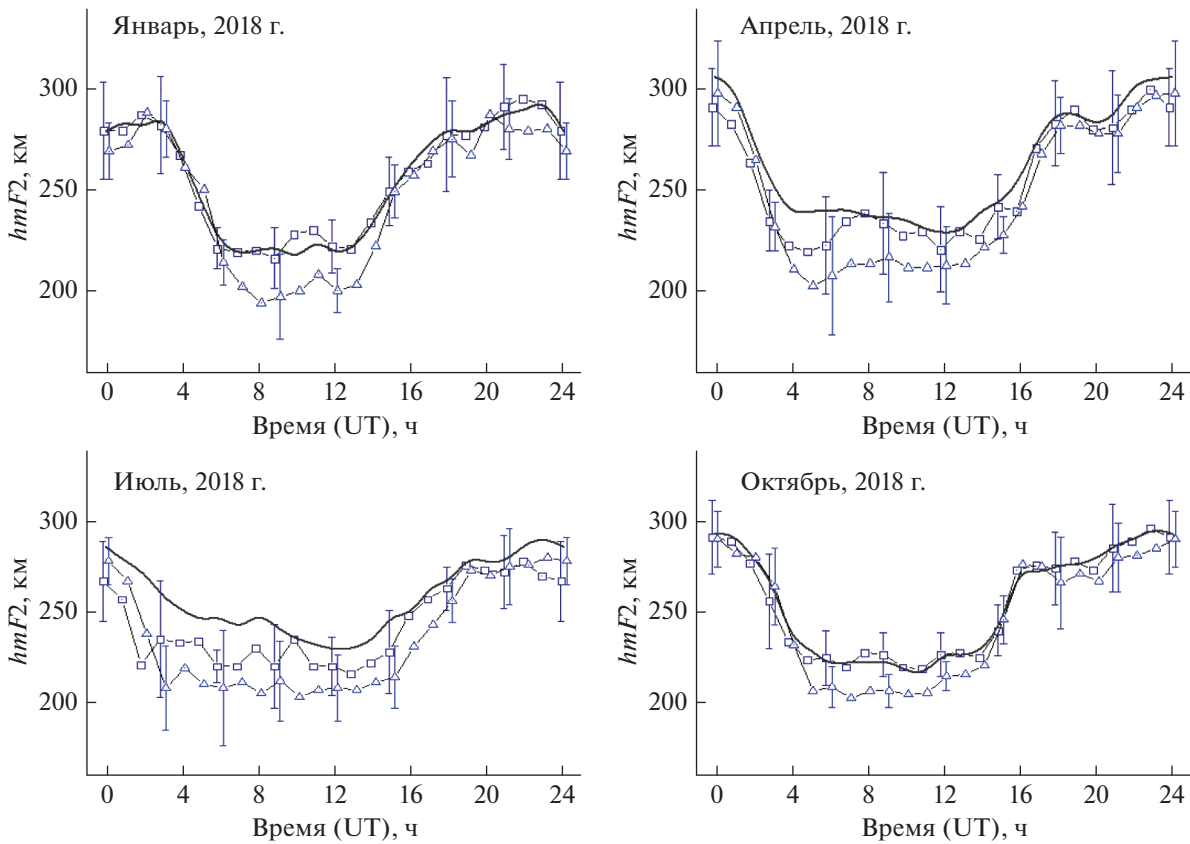
Массив анализируемых данных составили часовые ионограммы в средние месяцы сезонов 2018 г.: январь, апрель, июль и октябрь. Медианные значения  $hmF2$  для каждого часа представлены на рис. 3, и видна общая закономерность:

в околополуденное время имеется систематическое отрицательное отклонение результатов DPS-ARTIST для всех сезонов года. Наибольшее расхождение приходится на летний сезон – июль. Для данного месяца наблюдается значительное расхождение с эталонной обработкой и для комплекса Парус-Autoscala, хотя, в целом по году, оно статистически существенно менее значимо. Минимальное расхождение приходится на осенний сезон, когда структура ионограмм наиболее близка к классифицированным образам. Средние значения часовых среднеквадратичных отклонений от медианных значений приведены в табл. 1, что дает представление об устойчивости методов оценки параметра  $hmF2$  – операторская обработка данных ВЗ дает минимальный статистический разброс на множестве измерений.

На рисунке 4 представлены распределения отклонений параметра  $hmF2$  от эталона для зимнего (январь) и летнего (июль) сезонов года (как имеющие минимальные и максимальные статистические моменты 1-го порядка) в автоматических процедурах анализа данных ВЗ ионосферы. Числовые значения медианных отклонений  $foF2$  и  $hmF2$  сведены в табл. 2, где  $\Delta f_p$  относится к плазменной частоте, а  $\Delta h_p$  – к истинной высоте максимума слоя  $F2$ . Можно видеть существенные различия в оценке высоты главного ионосферного максимума двумя рассматриваемыми автоматическими средствами распознавания ионограмм ВЗ, в частности, систематическое значительное занижение  $hmF2$  в локально полуденное время в результатах работы системы DPS-ARTIST, что особенно ярко выражено для летнего периода. Для комплекса Парус-Autoscala такое поведение отмечается только для летнего сезона и существенно менее значимо по величине эффекта. Распределение отклонений плазменной частоты в максимуме слоя  $F2$  для июля 2018 г. – рис. 5, показывает наличие значимого локального максимума в результатах комплекса DPS-ARTIST для аргумента  $-0.5$  МГц, что отсутствует для комплекса Парус-Autoscala.

### 3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отличительной особенностью отклонений высоты  $hmF2$  от эталонных значений в июле месяце для DPS-ARTIST является не только большее значение медианы, но и сильная асимметрия функции распределения (рис. 4) со значительной долей случаев с аргументом, лежащим в интервале  $-40-50$  км. Асимметрия функции распределения является причиной значительного расхождения медианы и среднего отклонения: медиана –  $-18$  км, среднее –  $-24$  км. По-видимому, причиной является крайне сложная структура

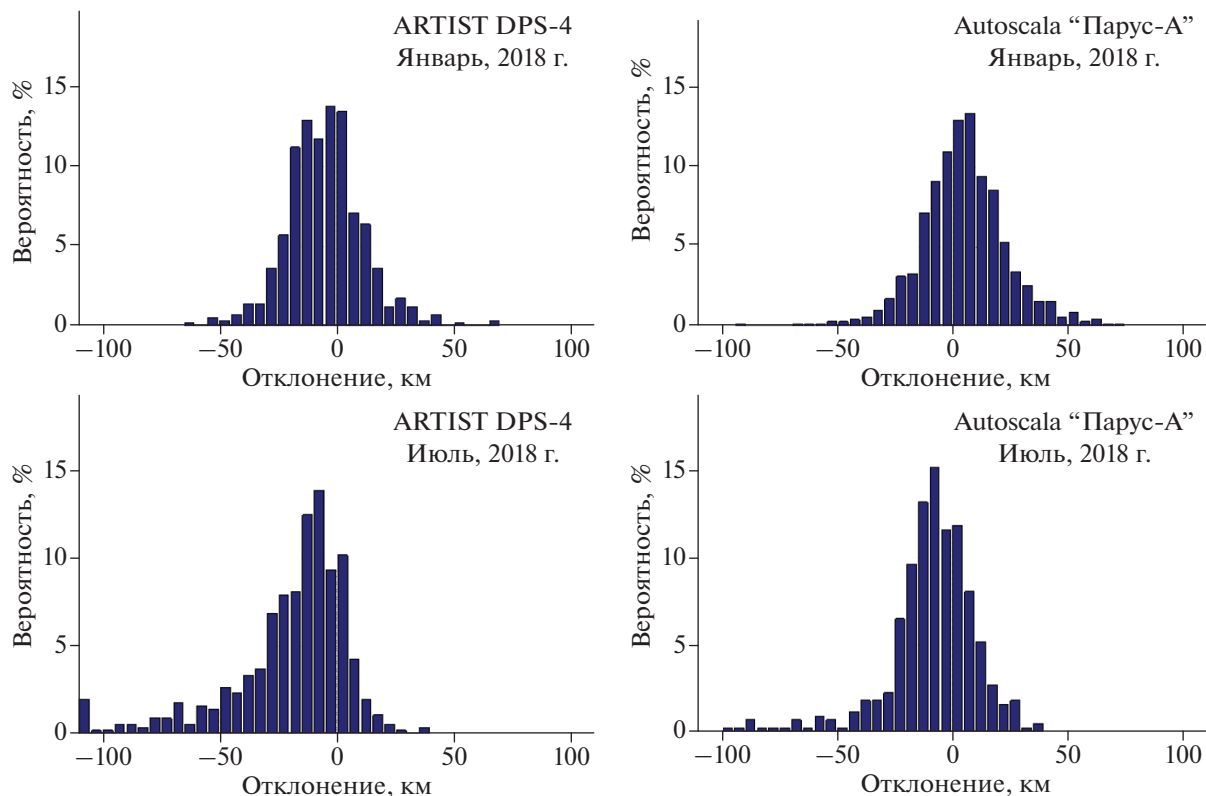


**Рис. 3.** Суточная зависимость медианных значений с доверительными интервалами высоты слоя  $F_2$ , полученных в автоматизированных системах обработки ионограмм ВЗ для средних месяцев сезонов 2018 г.: полые квадратики – Auto-scala, полые треугольники – ARTIST. Результаты операторской обработки представлены сплошными линиями.

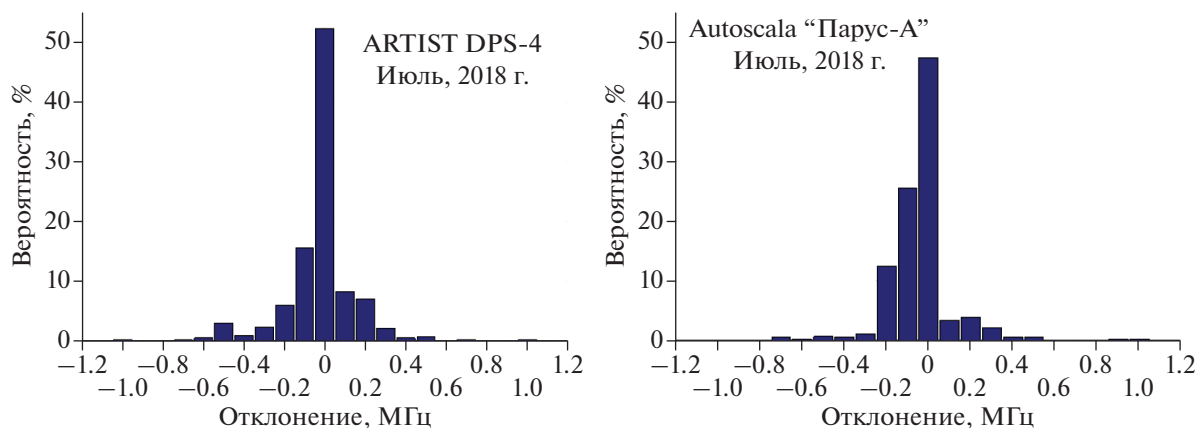
ионограмм ВЗ в летнее околополуденное время при низкой солнечной активности, в которой след отражения от слоя  $F_2$  имеет малый частотный интервал существования, а зачастую он практически вырождается, например, при повышенных значениях геомагнитной возмущенности. Напротив, след отражения от слоя  $F_1$  является хорошо развитым, поскольку уровень солнечной и геомагнитной активности влияет на него значительно слабее, чем на слой  $F_2$ . Пример такой ионограммы можно видеть на рис. 6 (левая панель) для 03:01 UT 10.07.2018 г., когда имело место локальное временное возрастание геомагнитной возмущенности (индекс  $K_p \sim 4$  в интервале 00–06 UT), для которого ARTIST ошибочно принял след отражения от слоя  $F_1$  за трек  $1F_2$  и, как следствие, определил высоту положения главного ионосферного максимума на 184 км и соответственно  $foF_2 - 3.1$  МГц. В режиме операторской обработки высота максимума слоя  $F_2$  имеет вполне корректное, несколько более высокое, чем в спокойных условиях, значение – 262 км и  $foF_2 - 3.4$  МГц. Статистически данное обстоятельство отражается и в наличии локального максимума в

отклонениях плазменной частоты на рис. 5, левая панель с аргументом  $\sim -0.5$  МГц. У программы Autoscala асимметрия функции распределения  $\Delta h_p$  для июля гораздо ниже (рис. 4, правая панель), но это не признак более достоверной работы со сложными ионограммами. Зачастую, как например, для случая рис. 6, левая панель, она может интерпретировать след необыкновенной компоненты как базовый трек O-компоненты и по нему получить завышенное значение  $foF_2$  или просто не дать никакого результата обработки.

Другой причиной, формирующей отрицательное значение медианы отклонений  $hmF_2$ , может быть пренебрежение асимптотическим характером действующей высоты вблизи максимума слоя, в основе которого лежит фактор поглощения зондирующих радиоволн в ионосферной плазме [Дэвис, 1973], особенности которого при вертикальном радиозондировании рассмотрены в работе [Zawdie et al., 2017]. Его физические основы можно понять, анализируя соотношение для столкновительного механизма поглощения в изотропной плазме [Дэвис, 1973],



**Рис. 4.** Распределение отклонений высоты максимума слоя  $F_2$ , полученных в автоматизированных системах DPS-ARTIST и Парус-Autoscala по отношению к операторской обработке ионограмм ВЗ для зимнего и летнего сезонов 2018 г.



**Рис. 5.** Распределение отклонений плазменной частоты в максимуме слоя  $F_2$ , полученных в автоматизированных системах DPS-ARTIST и Парус-Autoscala по отношению к операторской обработке ионограмм ВЗ ионозонда "Парус-A" для летнего сезона 2018 г.

$$I = \exp \left\{ -k_0 \int_L \chi ds \right\}, \quad (1)$$

где  $\chi = XZ/2\mu$ ,  $X = \omega_N^2/\omega^2$ ,  $Z = v_e/\omega$ ,  $\mu^2 = 1 - X$ ;  $\omega_N = 2\pi f_N$  – циклическая плазменная частота;  $v_e$  – эффективная частота соударений электро-

нов с нейтральными молекулами и ионами газов ионосферной плазмы;  $L$  – лучевая траектория;  $\mu$  – вещественная часть показателя преломления;  $k_0$  – модуль волнового вектора. Для радиоволны рабочей частоты ионозонда, отражающейся от ионосферы, существует два выделенных участка вдоль лучевой траектории, на которых поглоще-

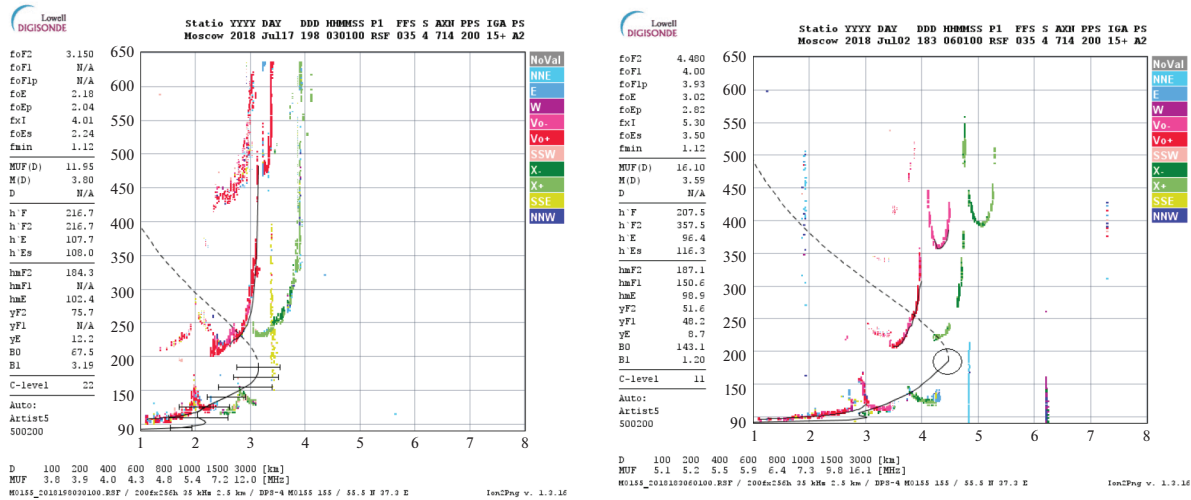


Рис. 6. Ионограммы ВЗ на ст. ИЗМИРАН, снятые ионозондом DPS-4: 17.07.2018 г. 03:01 UT (левая панель) с ошибочным результатом интерпретации  $foF2$  и  $hmF2$  и 02.07.2018 г. 06:01 UT (правая панель) — с явным разрывом производной плазменной частоты по высоте в точке, принимаемой за истинную высоту максимума слоя  $F2$ .

ние проявляется наиболее значимо: а) при прохождении слоя  $D$  и нижней части слоя  $E$ , где значения произведения эффективной частоты соударений и плазменной частоты электронов максимальны и б) вблизи точки отражения, где показатель преломления  $\mu$  обращается в нуль. Если поглощение на первом участке уменьшается по мере увеличения частоты, то на втором — оно резонансно растет с приближением точки отражения к максимуму ионосферного слоя, в силу возрастания длины участка лучевой траектории с малым показателем преломления из-за слабого высотного градиента электронной плотности. Следовательно, в силу ограниченности излучаемой мощности не существует информативной частоты, для которой зондирующая радиоволна отражалась бы идеально в максимуме ионосферного слоя, где производная плазменной частоты по высоте обращается в нуль, т.е. критические частоты явно выраженных ионосферных слоев являются асимптотическими величинами. Это можно видеть на примере ионограммы, приведенной на рис. 6, левая панель, для  $E$ -слоя ионосферы, где имеется значительный частотный интервал между асимптотами конечного следа  $E$  и начального следа  $F1$  мод. При инверсии данных ВЗ в  $N(h)$ -профиль отсутствующие частотные участки, такие, например, как от нуля до начальной частоты ионограммы, замещаются модельными представлениями, а от последней точки восстановленного профиля, в общем случае, необходимо выполнить операцию экстраполяции до точки разворота высотной зависимости электронной плотности. Такая экстраполяция может, например, выполняться в предположении анали-

тического представления плазменной частоты в окрестности пика слоев Чепмена [Дэвис, 1973]

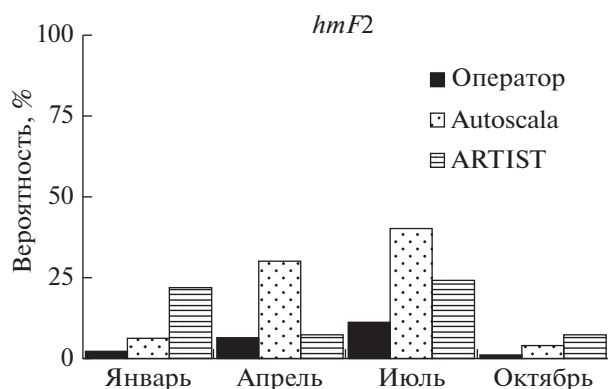
$$f_{N_p}^2(h) = f_{N_{max}}^2 \exp\left\{\frac{1-z-\exp(-z)}{2}\right\}, \quad z = \frac{h-h_m}{y_m}, \quad (2)$$

где  $f_{N_{max}}^2$  — значение плазменной частоты в максимуме;  $h_m, y_m$  — высота и характерный масштаб слоя. Требуется построить функцию такую, чтобы функционал

$$I[f_{N_p}^2(h)] = \sum_{i=1}^M w_i [f_{N_p}^2(h_i) - f_{N_e}^2(h_i)]^2,$$

где  $w_i$  — весовые коэффициенты экспериментальных точек профиля  $f_{N_e}^2(h_i)$  данного слоя, определяющие степень влияния слагаемого, имел минимальное значение. Величины весовых коэффициентов уменьшаются при удалении от последней экспериментальной точки  $N(h)$ -профиля анализируемого слоя.

Подобная процедура работает в программе MPOLAN, но, по-видимому, она отсутствует в программах ARTIST и Autoscala, в которых за максимум слоя принимается последняя точка высотного профиля, полученная по экспериментальным данным. На рисунке 6, правая панель, это проявляется в наличии явного разрыва производной плазменной частоты по высоте в точке, принимаемой за максимум слоя  $F2$ , где происходит соединение экспериментальных данных с аналитическим эмпирическим продолжением  $N(h)$ -профиля на высоты верхней ионосферы. Следствием являются заниженные значения  $foF2$  и  $hmF2$ : 4.5 МГц и 187 км против 4.6 МГц и 227 км



**Рис. 7.** Процентное содержание неподдающихся обработке ионограмм ВЗ автоматизированными системами DPS-ARTIST, Парус-Autoscala и операторской обработки данных ионозонда “Парус” по сезонам 2018 г.

в операторской обработке. Заниженные значения параметров максимума  $F2$ -слоя в данном случае дает и система Парус-Autoscala: 4.5 МГц и 187 км соответственно.

Важным аспектом работы автоматизированных систем распознавания ионограмм ВЗ является процентное содержание случаев успешной интерпретации следов отражений от ионосферы и последующей оценки ионосферных параметров. Вероятность корректной интерпретации данных ВЗ существенно зависит от сезона, от уровня солнечной активности и технических возможностей комплекса ионозонд – интерпретатор. Так, для условий среднего уровня солнечной активности усредненное за год значение надежности обработки оценивается в ~85–90% для DPS-ARTIST и DPS-Autoscala [Pezzopane, Scotto, 2007]. Наименьший показатель надежности систем ионозонд – интерпретатор имеет место в годы низкой солнечной активности, что видно из рис. 7 – для летнего месяца процентное содержание необработанных данных ВЗ может достигать ~40% для системы Парус-Autoscala со средним значением надежности в ~80%. Из приведенных данных может показаться, что система DPS-ARTIST 5 имеет более высокий уровень надежности, но это не так. Как отмечалось в статьях [Pezzopane, Scotto, 2007; Scotto, Sabbagh, 2020], для системы DPS-ARTIST наблюдается существенно более высокий процент некорректной обработки ионограмм с результатами оценки  $hmF2$ , значительно выходящими за характерные для данного времени диапазона значений, что можно видеть, в частности, и из рис. 4 и рис. 5, левая панель для июля месяца 2018 г. В целом же, надежность рассматриваемых систем автоматической обработки примерно одинакова, что также соответствует выводам работ [Pezzopane, Scotto, 2007; Scotto, Sabbagh, 2020].

Основные причины провала работы автоматизированных систем обработки: слабое превышение критической частоты слоя  $F2$  над  $F1$  и ослабленная амплитуда трека  $1F2$ , экранировка отражений от вышележащих слоев спорадическим слоем  $E_s$  и фрагментарность следов ионограммы, обусловленная вариациями ионосферного ослабления зондирующих радиоволн, например, при ионосферных возмущениях. Опытный оператор в значительной степени может компенсировать ряд отрицательных факторов в ионограмме, что и отражается в уровне достоверности результатов операторской обработки данных ВЗ (рис. 7).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В задаче радиофизической диагностики ионосферы единственным методом практически прямого экспериментального измерения высоты максимума слоя  $F2$  является метод некогерентного рассеяния (НР) радиоволн на свободных электронах плазмы, основанный на пропорциональности интенсивности обратного рассеянного сигнала от электронной плотности в области его формирования. Ионозонды ВЗ дают опосредованную величину  $hmF2$  через процедуру инверсии ионограмм в высотный профиль электронной плотности. Результаты достаточно репрезентативного сравнения этих двух технологий в Millstone Hill, для одновременно работающих установок [Chen et al., 1994] для 1990 г. – года максимума солнечной активности – приведены в табл. 3 в виде среднего распределения отклонений ионозондовых данных от эталонных – радара НР. Сравнение с аналогичными распределениями комплекса DPS-ARTIST для 2018 г. (рис. 4) показывает, что средние значения отклонений составляют (табл. 3): для января (–4 км и –9 км), апреля (–14 км и –19 км) и июля (–17 км и –24 км) соответственно. В целом, они принципиально близки, хотя в условиях низкой солнечной активности системно несколько выше по абсолютной величине. Причиной является гелиофизический фактор: первые получены в максимуме, а вторые – в минимуме циклов солнечной активности. Как отмечалось выше, разность критических частот слоев  $F2$  и  $F1$  существенно больше в период высокой солнечной активности и соответственно след отражения от слоя  $F2$  выражен более значимо, что и определяет его более корректную распознаваемость и, как следствие, более достоверную оценку параметров максимума слоя  $F2$ . Это позволяет заключить: а) рассматриваемая в качестве эталона в данной работе операторская обработка ионограмм с оценкой высотного профиля электронной плотности достаточно достоверна и б) система DPS-ARTIST дает систематически заниженные значения высоты главного ионосферного максимума. По-видимому, это связано, в значи-



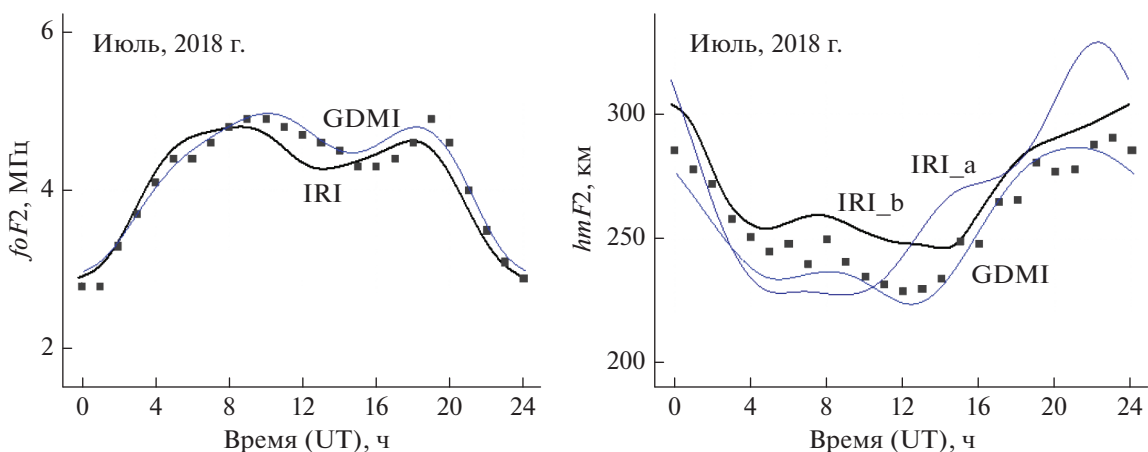
тельной степени, с отсутствием операции экстраполяции рассчитанного  $N(h)$ -профиля на максимум слоя  $F2$ , а в околополуденное время в весенне-летний сезон еще и с некорректной интерпретацией следа отражения от развитого слоя  $F1$ .

Экспериментальные ионосферные параметры:  $foF2$ ,  $hmF2$  в локальных точках являются статистической основой для эмпирического моделирования ионосферы, по которым формируются сферические коэффициенты разложения для пространственно-временного распределения ионосферных параметров. В международной модели ионосферы IRI исторически  $foF2$  – стандартный параметр ионозонда, а  $hmF2$  определялась из  $foF2$  и  $M3000F2$  на основе приближенных соотношений [Bilitza et al., 1979]. Этот подход является базовой опцией представления высоты максимума слоя  $F2$  – BSE-1979 [Bilitza et al., 2017]. В настоящее время, при наличии достаточно больших массивов данных о положении главного ионосферного максимума как из источников наземных (ионозонды и радары НР), так и спутниковых средств диагностики ионосферы, появляется возможность реализовать для  $hmF2$  аналогичную с  $foF2$  процедуру. В работе [Altadill et al., 2013] это было выполнено на базе данных только ионозондов ВЗ, а в публикациях [Shubin, 2015; Shubin, Gulayeva, 2021] – для обобщенных данных. Поскольку, как показано выше, комплекс DPS-ARTIST, дающий основной вклад в класс международных ионозондовых данных, может высоту слоя  $F2$  заменять высотой слоя  $F1$  (в меньшей степени это может быть и с программой Autoscala), то необходимо применять некий нижний порог для фильтрации допустимых значений  $hmF2$ . В модели [Shubin, 2015] такое ограничение составляют 180 км, а в дальнейших реализациях рассматриваемого подхода к моделированию ионо-

**Таблица 3.** Средние и медианы отклонений в системе DPS-ARTIST

Месяц	1990 г.			2018 г.		
	$[\Delta h_p]_a$ , км	$[\Delta h_p]_m$ , км	$[\Delta h_p]_a$ , км			
Январь	-4.0	-9.0	-8.9			
Апрель	-14.0	-13.0	-18.6			
Июль	-17.0	-17.5	-24.3			
Октябрь	-	-9.0	-8.2			

сферы нижний предел допустимых значений был увеличен до 200 км – модель GDMI (Global Dynamic Model of the Ionosphere) [Шубин, Деминов, 2019; Shubin, Gulayeva, 2021]. Медианные суточные зависимости  $foF2$  и  $hmF2$  за июль 2018 г., как наиболее представительные из ансамбля анализируемых данных, приведены на рис. 8: сплошными квадратиками – экспериментальные результаты и сплошными линиями – рассчитанные в моделях IRI и GDMI. Модельные кривые построены для среднемесячных оптимизированных параметров числа солнечных пятен (SSN)  $R$  –  $R_m^g$  (IRI) и потока радиоизлучения  $F10.7 - F_m^g$  (GDMI) [Крашенинников и др., 2017], которые в условиях низкой солнечной активности близки к фактическим гелиофизическим параметрам. (Число солнечных пятен рассматривается в версии SSN2). Так, для января 2018 г. –  $R_m^g = 14$ ,  $F_m^g = 74$  (реальные сглаженные  $R$  и  $F10.7$  – 14 и 74) и для июля 2018 г. –  $R_m^g = 8$ ,  $F_m^g = 70$  (реальные сглаженные – 7 и 70). В применении модели GDMI к медианным данным индекс геомагнитной возмущенности –  $Kp$  равнялся 2, что отражает его усредненное значение на месячном интервале.



**Рис. 8.** Суточный ход медианных значений  $foF2$  и  $hmF2$  на ст. ИЗМИРАН и соответствующие модельные зависимости для июля 2018 г.: левая панель – IRI и GDMI в базовых опциях для плазменной частоты; правая панель – IRI\_b – с базовой опцией (BSE-1979), IRI\_b с опцией AMTB2013 и GDMI – для высоты максимума слоя  $F2$  ионосферы.

Видно, что имеется общее сходство в характере и особенностях суточного хода модельных кривых и экспериментальных данных параметров максимума слоя  $F2$ . Так, обе модели достаточно достоверно описывают суточную зависимость  $foF2$ , что свидетельствует об общей корректности выбора управляющих параметров. Для  $hmF2$  следует отметить значительное расхождение модельного представления IRI – IRI\_a в варианте AMTB2013 [Altadill et al., 2013]. В базовой опции IRI – IRI\_b имеет место общее положительное, а для модели GDMI – общее отрицательное отклонение от измеренных значений. Среднее систематическое смещение составляет: модель IRI  $\sim +12$  км, модель GDMI  $\sim -4$  км. Среднеквадратичное отклонение составляет: модель IRI  $\sim 13$  км, модель GDMI  $\sim 10$  км. То есть, в целом, прямой учет экспериментальных данных по высоте максимума слоя  $F2$  дает существенное улучшение в точности его модельного представления для случая GDMI-модели, но значительно уступает базовому представлению для модели IRI – IRI\_a [Altadill et al., 2013], по крайней мере, в период низкой солнечной активности.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление результатов автоматической, в комплексах DPS-ARTIST и Парус-Autoscala, и операторской обработки ионограмм в условиях низкой солнечной активности – 2018 г. показывает следующее.

– Высота главного ионосферного максимума –  $hmF2$  в автоматической системе DPS-ARTIST рассчитывается со значительным систематическим отрицательным отклонением, существенно зависящим от сезона и фактора геомагнитной активности, в частности, погрешность максимальна в околополуденное время в летний сезон.

– В целом, система Парус-Autoscala показывает меньшее отклонение от эталонных величин  $hmF2$  и также имеет максимум погрешности в околополуденное время в летний сезон.

– Общий показатель надежности обработки ионограмм примерно одинаков для обоих комплексов.

– Использование в ионосферном моделировании массивов прямых экспериментальных данных по  $hmF2$  позволяет существенно повысить точность пространственно-временного описания данного ионосферного параметра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н. Сетевой ионозонд ПАРУС-А: опыт эксплуатации // Системный мониторинг ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ. С. 21–37. ISBN 978-5-9221-1878-1. 2019.

– Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир. 502 с. 1973.

– Крашенинников И.В., Павлова Н.М., Ситнов Ю.С. Модель IRI в задаче прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн в условиях высокой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 57. № 6. С. 774–782. 2017.

– Панченко В.А. Ионозонд DPS-4. Десять лет в ИЗМИРАН. Системный мониторинг ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ. С. 38–64. ISBN 978-5-9221-1878-1. 2019.

– Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Перевод с англ. Второго издания “URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction”. Ред. Н.В. Медникова. М.: Наука. 342 с. 1978.

– Шубин В.Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты  $F2$ -слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 4. С. 461–473. 2019.

– Altadill D., Magdaleno S., Torta J.M., Blanch E. Global empirical models of the density peak height and of the equivalent scale height for quiet conditions. // Adv. Space Res. V. 52. P. 1756–1769. 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.11.018>

– 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/10.1002/2016SW00159>

– Bilitza D., Sheikh N.M., Eyfrig R. A global model for the height of the  $F2$ -peak using M3000 values from CCIR // Telecommun J. V. 46. P. 549–553. 1979.

– Chen C.F., Reinisch B.W., Scali J.L. et al. The accuracy of ionogram-derived  $N(h)$  profiles // Adv. Space Res. V. 14. № 12. P. 43–46. 1994.

– Galkin I.A., Khmyrov G.M., Kozlov A.V., Reinisch B.W., Huang X., Paznukhov V.V. The ARTIST 5 // Radio sounding and plasma physics. AIP Conf. Proc. V. 974. № 1. P. 150–159. 2008.

<https://doi.org/10.1063/1.2885024>

– Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C. Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde // Comput. Geosci. V. 36. P. 628–635. 2010.

– Perrone L., Mikhailov A.V., Scotto C., Sabbagh D. Testing of the method retrieving a consistent set of aeronomic parameters with Millstone Hill ISR noontime  $hmF2$  observations // IEEE Geosci. Remote S. 2020.

<https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3007362>

– Pezzopane M., Scotto C. Software for the automatic scaling of critical frequency  $foF2$  and MUF(3000)F2 from ionograms applied at the Ionospheric Observatory of Gibilmanna // Ann. Geophys., Italy. V. 47. № 6. P. 1783–1790. 2004.

– Pezzopane M., Scotto C. Automatic scaling of critical frequency  $foF2$  and MUF(3000)F2: A comparison between Autoscala and ARTIST 4.5 on Rome data // Radio Sci. V. 42. RS4003. 2007.

<https://doi.org/10.1029/2006RS003581>

– Pezzopane M., Scotto C. A method for automatic scaling of  $F1$  critical frequency from ionograms // Radio Sci. V. 43. RS2S91. 2008.

<https://doi.org/10.1029/2007RS003723>

- *Pezzopane M., Scotto C., Tomasik L., Krasheninnikov I.* Autoscala: an aid for different ionosondes // *Acta Geophys.* V. 58. P. 513–526. 2010.
- *Reinisch B.W., Huang X.* Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms. Processing of bottomside ionograms // *Radio Sci.* V. 18. P. 477–492. 1983.
- *Scotto C.* Electron density profile calculation technique for Autoscala ionogram analysis // *Adv. Space Res.* V. 44. № 6. P. 756–766. 2009.
- *Scotto C., Sabbagh D.* The accuracy of real-time *hmF2* estimation from ionosondes // *Remote Sens.* V. 12(17). P. 2671. 2020.  
<https://doi.org/10.3390/rs12172671>
- *Shubin V.N.* Global median model of the F2-layer peak height based on ionospheric radio-occultation and ground-based Digisonde observations // *Adv. Space Res.* V. 56. P. 916–928. 2015.
- *Shubin V.N., Gulyaeva T.L.* Solar forcing on the ionosphere: Global model of the F2 layer peak parameters driven by re-calibrated sunspot numbers // *Acta Astronaut.* V. 179. P. 197–208. 2021.
- *Titheridge J.E.* The real height of ionograms: a generalized formulating // *Radio Sci.* V. 23. № 5. P. 831–849. 1988.
- *Zawdie K.A., Drob D.P., Siskind D.E., Coker C.* Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere // *Radio Sci.* V. 52. P. 767–783. 2017.  
<https://doi.org/10.1002/2017RS006256>