



УДК 550.388.1

## ПОГРЕШНОСТЬ ОЦЕНКИ ВЫСОТЫ МАКСИМУМА СЛОЯ F2 В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

И. В. Крашенинников<sup>1,2</sup>, Л. Н. Лещенко<sup>2</sup><sup>1</sup> *Институт прикладной геофизики им акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия*<sup>2</sup> *ИЗМИРАН, г. Москва, Россия*

Анализируются погрешности в оценке параметров главного ионосферного максимума —  $foF2$  и  $hmF2$  автоматизированными системами обработки данных вертикального радиозондирования ионосферы на ст. ИЗМИРАН в 2018 г — году низкой солнечной активности. Исследовались результаты работы двух наиболее распространенных в мировой практике обсерваторских наблюдений состояния ионосферы программ: Artist 5 в составе ионозонда DPS-4 и Autoscala, адаптированной для ионозонда «Парус-А». В качестве эталона для сравнения результатов использовалась независимая система операторской обработки ионограмм на ионозонде «Парус-А». Оба ионозонда работают на ст. ИЗМИРАН с временным разнесением сеансов зондирования в 1 минуту. Показано, что программа Artist дает систематическое отрицательное отклонение в высоте максимума слоя F2, особенно сильно выраженное в локально полуденное время и существенно зависящее от сезона года. Статистические значения отклонений оценок высоты максимума слоя F2 ионосферы близки к результатам с данными радара некогерентного рассеяния в Millston Hill.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРА, ИОНОГРАММА ВЗ, ВЫСОТА СЛОЯ F2, ИОНОЗОНД, РАСПОЗНАВАНИЕ ИОНОГРАММ.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Основным источником корректно локализованных данных о положении главного ионосферного максимума — слоя F2 являются ионозонды вертикального радиозондирования ионосферы. Несмотря на то, что их функционирование может быть основано на различных типах локационных сигналов, интерпретация данных радиозондирования — ионограмм ВЗ выполняется, в основном, двумя программами автоматического распознавания следов на ионограмме и восстановления высотного профиля электронной плотности. По степени распространенности можно их расположить следующим образом: ARTIST, используемая только в ионозондах DPS-4 [1], и более универсальная — Autoscala [2], адаптируемая для различных ионозондов [3]. В каждой из программ можно выделить два базовых модуля: распознавание трека зависимости действующей высоты от

частоты с выделением областей отражений от ионосферных слоев и инверсия нормализованной ионограммы в высотный профиль электронной плотности. В силу того, что ионограммы ВЗ формируются в условиях зависимости распределения ионосферной плазмы от гелиогеофизических условий, 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 эталонных образцов и при значительных отклонениях от них ионограмма может быть классифицирована как неподходящая для обработки или интерпретирована некорректно. При ошибочном распознавании треков параметры главного ионосферного максимума, в частности, будут определены с ошибкой, что в последующем может проявиться, например, в наличии систематической погрешности в ионосферных моделях, основанных на статистических ионосферных данных.

В [4] приведены результаты сопоставления работы программ автоматической обработки ионограмм Artist (версия 4) и Autoscala для плазменной частоты в максимуме слоя F2 -  $foF2$  на данных, полученным одним ионозондом — DPS-4 (Рим) в 2005-2006 гг., и показано, что, в целом, обе программы имеют сравнимую эффективность в оценке данного параметра, различаясь в конкретных случаях особенностей в структуре исходных данных и их интерпретации. Что касается анализа высоты максимума слоя F2, то, по-видимому, только в работе [5] приведены такие результаты. Показано, что в сравнении с практически, прямыми измерениями пика слоя F2 радаром некогерентного рассеяния (НР) в Millstone Hill отмечается систематическое отрицательное отклонение значений, полученных из данных ионозонда Digisonde 256 с системой обработки Artist 4 с максимум в июле месяце.

В данной работе представлены результаты анализа оценки параметров максимума слоя F2 ионосферы [ $foF2$ ,  $hmF2$ ] двумя системами автоматического масштабирования, функционирующими в ионозондах DPS-4 и «Парус-А» в ИЗМИРАН, для 2018 г. — года низкой солнечной активности.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ИЗМИРАН ведутся регулярные обсерваторские наблюдения состояния ионосферы двумя ионозондами: «Парус-А» [6 — Гивишвили, 2019], на котором, наряду с автоматической системой интерпретации данных ВЗ — Autoscala [7 — Krasheninnikov], производится независимая операторская обработка часовых данных и DPS-4 с программой распознавания ионограмм Artist (версия 5) [8]. Каждая система обработки данных ВЗ имеет в своем составе модуль восстановления высотного профиля электронной плотности —  $Ne(h)$ -профиля [9, 10] из высотной зависимости группового пути (действующей высоты) от частоты зондирования. Разность во времени съема ионограмм составляет 1 минуту, что можно рассматривать как, практически, одновременную работу ионозондов. На рисунке 1 приведен пример ионограмм, полученных двумя ионозондами и обработанными соответствующими программами распознавания, и видно, что они, в высокой степени, идентичны, что и проявляется в оценке  $foF2$  — 5.60 МГц в обоих случаях. Но в высоте максимума  $hmF2$  расхождение очень 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 оценивается как 156 км системой Artist и 174 км — системой Autoscala. Операторская обработка ионограммы с программой оценки  $N(h)$ -профиля на основе [11] — дает значение для  $hmF2$  в 207 км и с более реалистичным высотным ходом электронной плотности в области слоя F1 для осеннего сезона с высотой максимума — 158 км (рис. 2).

Из рисунка 1 видны особенности алгоритмов работы программ распознавания ионограмм ВЗ. Для алгоритма программы ARTIST характерно выделение трека всего следа обыкновенной ветви ионограммы (рис. 1, верхняя панель). Этому способствует технология работы ионозонда с отдельным 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 производится только при определении стартовой точки с учетом области ненаблюдаемой ионизации (D-область) и E-F «долины» межслоевой ионизации [8].

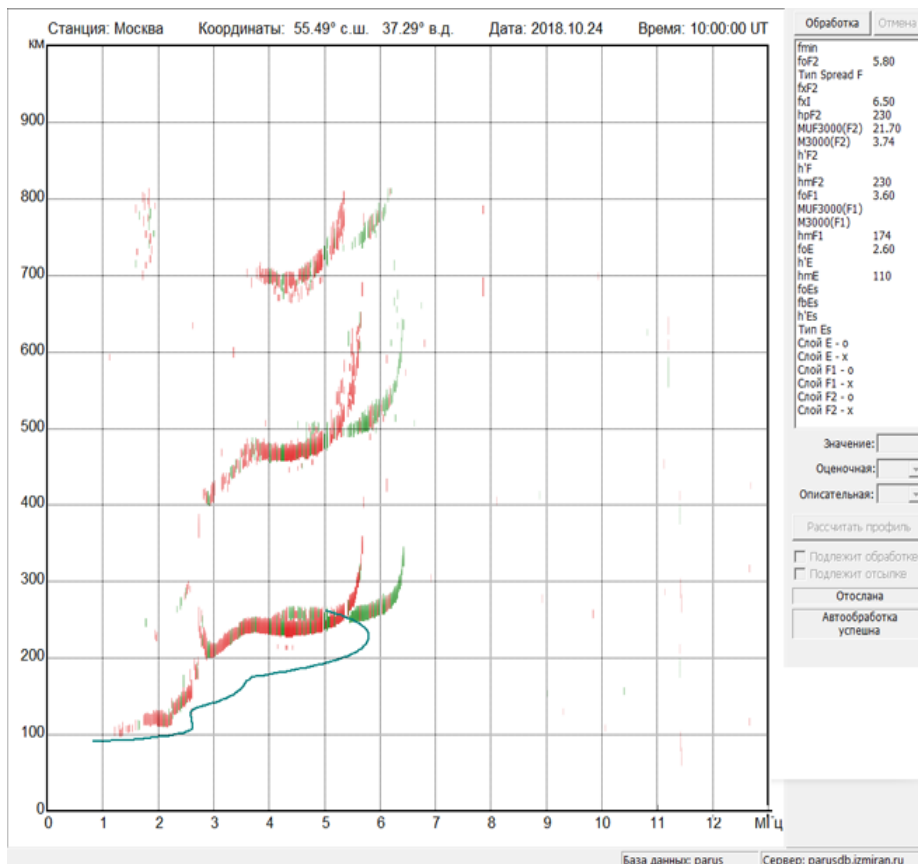
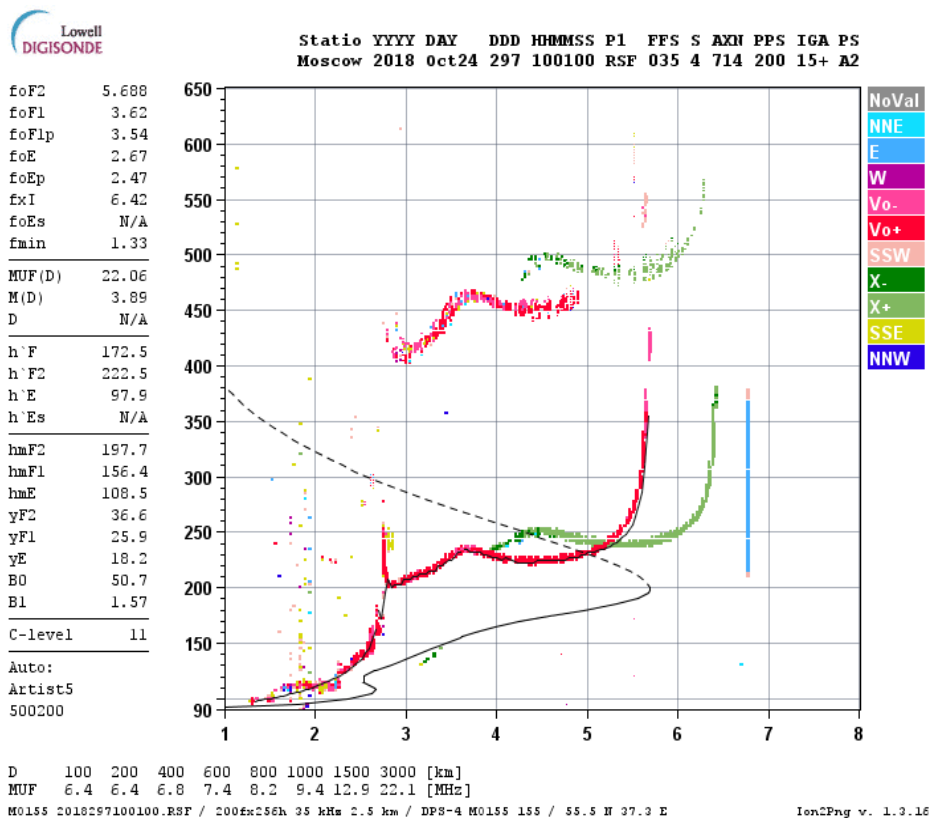


Рис. 1. Ионogramмы ВЗ на ст. ИЗМИРАН 24/10/2018: 10:01 UT — ионозонд DPS-4 (верхняя панель) и 10:00 UT — ионозонд «Парус-А» (нижняя панель) с высотными профилями электронной плотности, полученными автоматическими программами Artist и Autoscala.

В алгоритме Autoscala выделяются только треки следов отражения от слоя F2 до точки смыкания со следами моды F1 (или слоя E при отсутствии F1) и для работы программы не требуется иметь строгое разделение магнитоионных ветвей ионограммы. Она может функционировать даже при отсутствии такого разделения, что определяет ее универсальность и возможность адаптации к различным ионозондам [3], 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, что, в частности, можно видеть из хода электронной плотности на высотах слоя F1 (рис. 1), сравнивая его с результатами операторской оценки  $Ne(h)$ -профиля (рис. 2) — максимум слоя выражен слишком преувеличенным.

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 [12]. Восстановление высотного профиля выполняется программой MPOLAN, являющейся модификацией программы POLAN [11] с добавлением модели СМИ-88 для описания D- и нижней части E-слоев ионосферы, как областей ненаблюдаемой ионизации (рис. 2). В программе POLAN имеется существенное отличие от программ восстановления  $Ne(h)$ -профиля в автоматических программах Artist и Autoscala — обязательно выполняется процедура экстраполяции высотного профиля электронной плотности в окрестности высоты максимума слоя F2 на основе его аналитического представления слоем Чепмена (отмечено овалом на рис. 2).

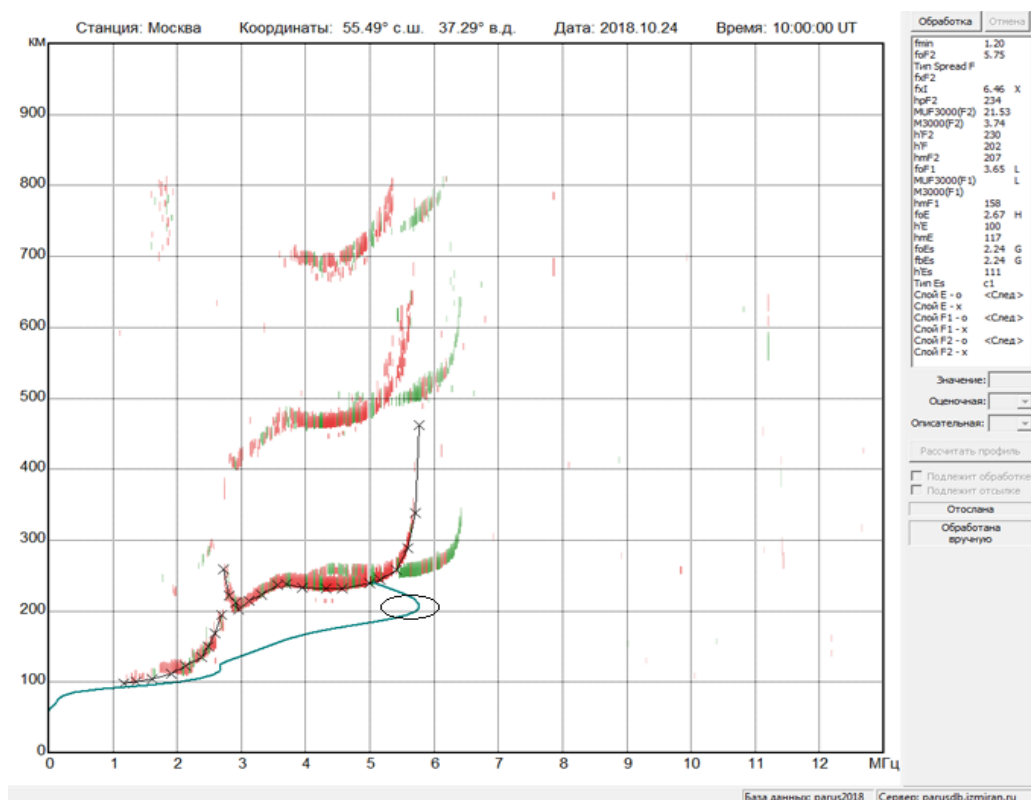


Рис. 2. Ионограмма V3 на ст. ИЗМИРАН 24/10/2018 10:00 UT - ионозонд «Парус-А»: с обработкой оператором и высотным профилем плазменной частоты. Разность в оценке высоты максимума слоя F2 составляет: +25 км для Autoscala и -10 км для Artist.

Крестиками отмечены точки трека O-компоненты, выбранные оператором.

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 локально полуденное время имеется систематическое отрицательное отклонение данного параметра, определенного по данным радиозондирования ионозонда DPS-4 для всех месяцев года, от эталонной зависимости. Наибольшее расхождение

приходится на летний сезон — июль. Для него также наблюдается максимальное расхождение с эталонной обработкой и для комплекса Парус-Autoscala. Минимальное расхождение приходится на осенний сезон, когда структура ионограмм наиболее близка к классифицированным образам. Средние значения часовых среднеквадратичных отклонений от медианных значений приведены в таблице 1, что дает представление о достоверности методов оценки параметра  $hmF2$  — операторская обработка данных ВЗ дает минимальный статистический разброс для множества измерений в фиксированное время суток.

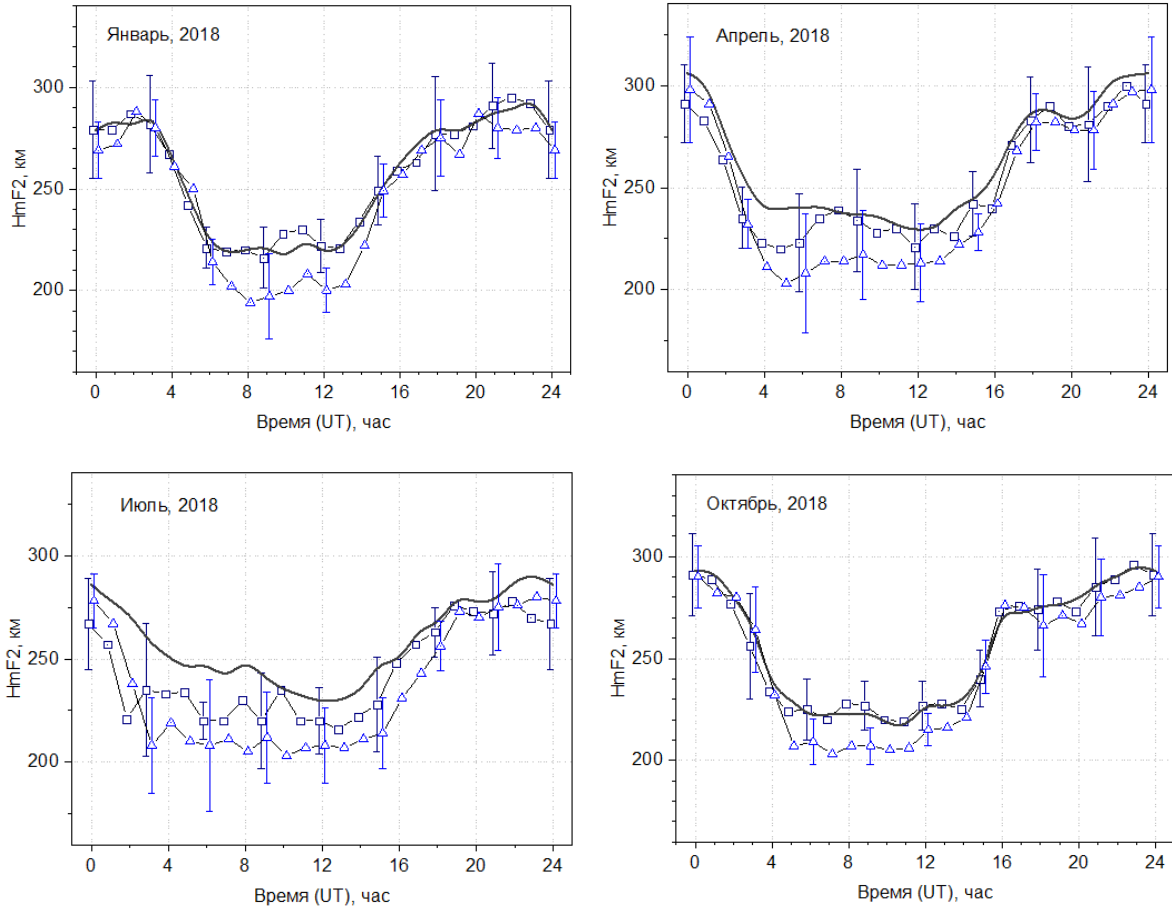


Рис. 3. Суточная зависимость медианных значений с доверительными интервалами высоты слоя F2, полученных в автоматизированных системах (полые квадратики — Autoscala, полые треугольники — Artist) и операторской обработки ионограмм ВЗ (сплошная линия) для средних месяцев сезонов 2018 г.

Таблица 1. Стандарт отклонения от медианных значений  $hmF2$

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

На рисунке 4 представлены распределения отклонений параметра  $hmF2$  от эталона для зимнего (январь) и летнего (июль) сезонов года в автоматических процедурах анализа данных ВЗ ионосферы, а числовые значения медианных отклонений  $foF2$  и  $hmF2$  сведены в таблицу 2, где  $\Delta f_p$  — критическая частота, а  $\Delta h_p$  — истинная высота максимума слоя F2. Можно видеть

существенные различия в оценке данного параметра 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 Парус-Autoscala такое поведение отмечается только для летнего сезона и существенно менее значимо по величине эффекта.

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

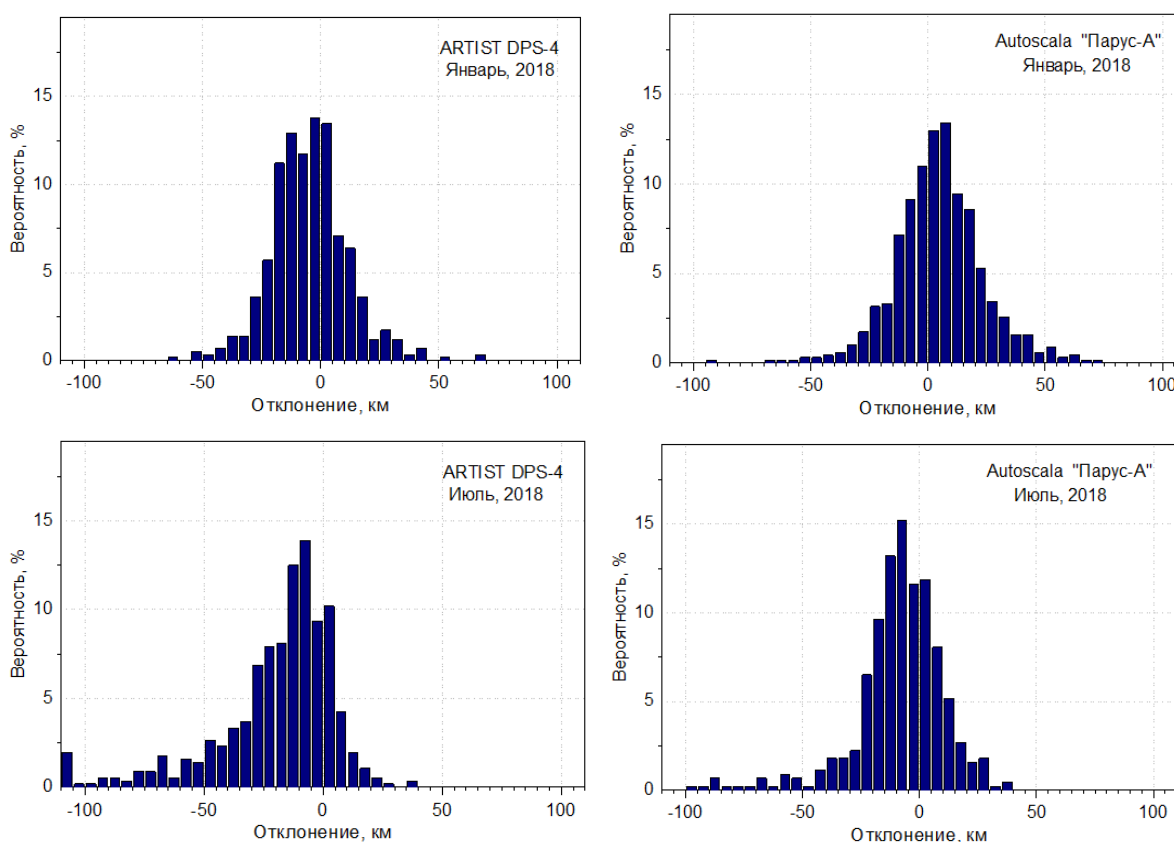


Рис. 4. Распределение отклонений высоты слоя F2, полученных в автоматизированных системах Artist и Autoscala по отношению к операторской обработке ионограмм ВЗ для зимнего и летнего сезонов 2018 г.

### 3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Отличительной особенностью отклонений высоты  $hmF2$  от эталонных значений в июле месяце для DPS-Artist является не только большое значение медианы, но и сильная асимметрия их функции вероятности (рис. 4) со значительной долей случаев с аргументом, лежащим в интервале 40—50 км. Асимметрия распределения является причиной значительного расхождения медианы и среднего функции отклонений: медиана — -18 км, среднее — -24 км. По-видимому, причиной является крайне сложная структура ионограмм ВЗ в летнее околополуденное время при низкой солнечной активности, в которой след отражения от слоя F2 имеет малый частотный интервал существования, а зачастую он практически вырождается, например, при повышенном уровне



геомагнитной возмущенности. Напротив, след отражения от слоя F1 является хорошо развитым, поскольку уровень солнечной и геомагнитной активности влияет на него значительно слабее, чем на слой F2. Пример такой ионограммы можно видеть на рис. 5 (верхняя панель) для 03:01 UT 10/07/2018, когда имело место локальное временное возрастание геомагнитной возмущенности (индекс Kp~4 в интервале 00-06UT), для которого Artist ошибочно принял след отражения от слоя F1 за F2 и, как следствие, определил высоту положения главного ионосферного максимума на 184 км и соответственно  $foF2$  — 3.1 МГц. В режиме операторской обработки высота максимума слоя F2 имеет вполне корректное значение — 262 км и  $foF2$  — 3.4 МГц. У программы Autoscala асимметрия функции распределения для июля гораздо ниже (рис. 4, правая панель), но это не признак более корректной работы со сложными ионограммами — зачастую, как, например, для случая рис. 5, верхняя панель, она может интерпретировать след необыкновенной компоненты за базовый трек O-компоненты и по нему получить завышенное значение  $foF2$  или просто не дать никакого результата обработки.

Другой причиной, формирующей отрицательное значение медианы отклонений  $hmF2$ , может быть не учет асимптотического характера действующей высоты вблизи максимума слоя, в основе которого лежит фактор поглощения зондирующих радиоволн в ионосферной плазме [13]. Его можно оценить, анализируя соотношение для столкновительного механизма поглощения в изотропной плазме,

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

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 электронов с нейтральными молекулами и ионами газов ионосферной плазмы,  $L$  – лучевая траектория,  $\mu$  — вещественная часть показателя преломления,  $k_0$  — модуль волнового вектора. Для любой информативной рабочей частоты ионозонда существует два выделенных участка вдоль лучевой траектории, на которых поглощение 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, не существует частоты, которая 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. 5, верхняя панель, для E-слоя ионосферы, где имеется значительный частотный интервал между асимптотиками конечного следа E и начального следа F1 мод. При инверсии данных ВЗ в  $Ne(h)$ -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 аналитического представления плазменной частоты в окрестности пика слоев Чепмена [13]

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

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

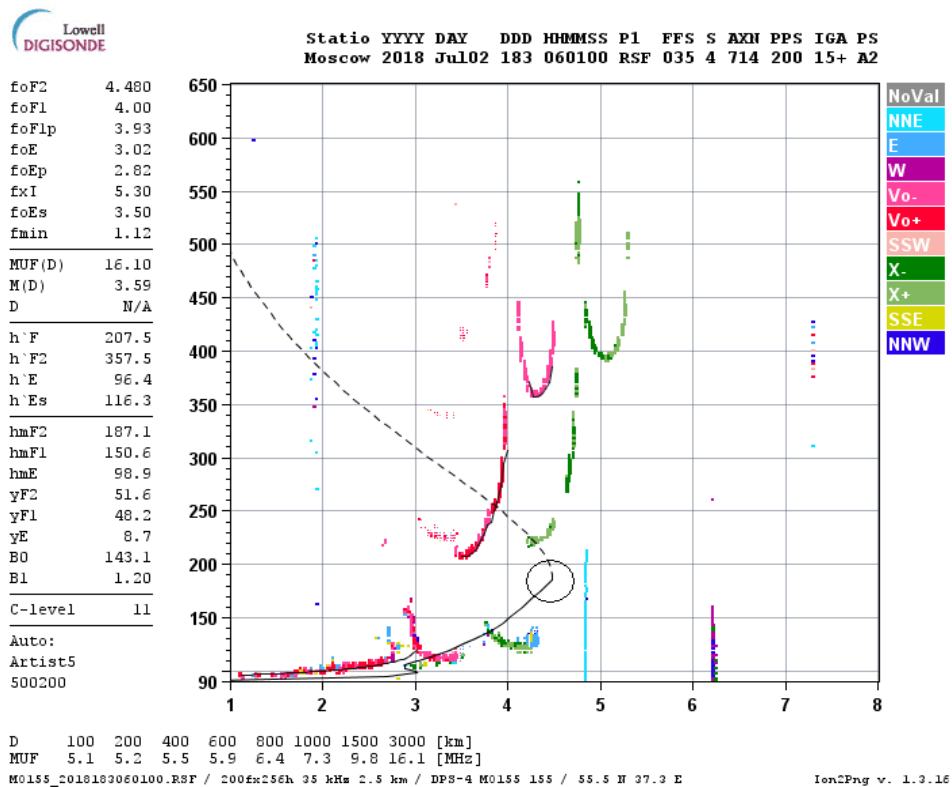
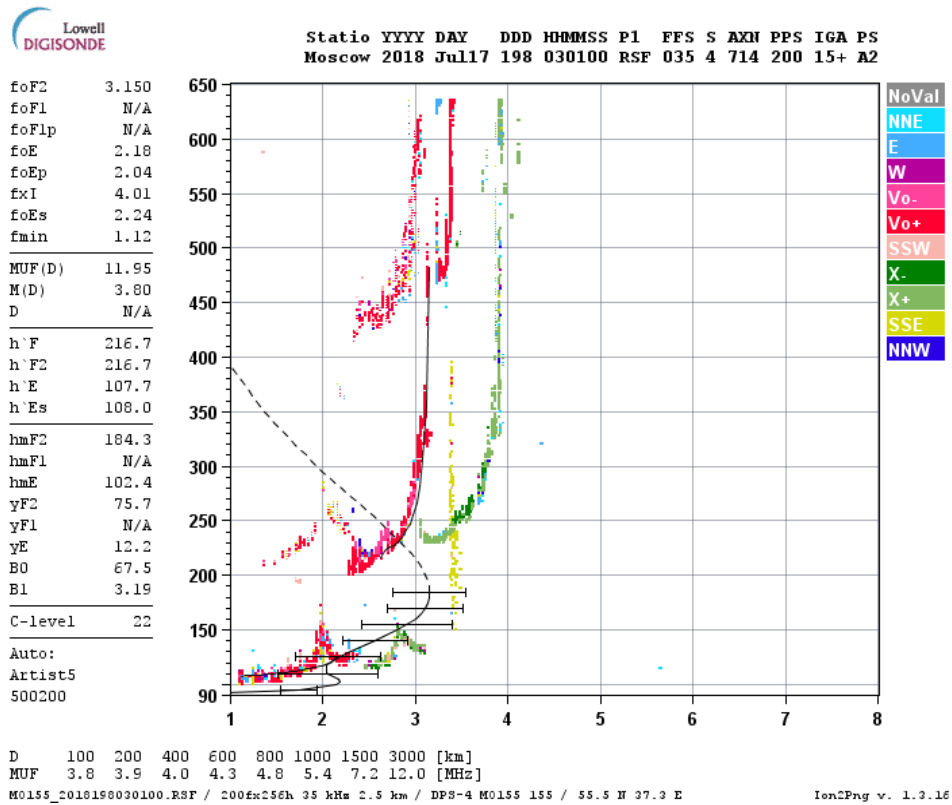


Рис. 5. Ионограммы ВЗ на ст. ИЗМИРАН, снятые ионозондом DPS-4: 17/07/2018 03:01UT (верхняя панель) с ошибочным результатом интерпретации *hmF2* и 02/07/2018 06:01UT (нижняя панель) – с явным разрывом производной плазменной частоты по высоте в точке, принимаемой за истинную высоту максимума слоя F2.



$$I[f_N^2(h)] = \sum_{i=1}^M w_i [f_{N_p}^2(h_i) - f_{N_e}^2(h_i)]^2, \tag{3}$$

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  $N_e(h)$  — профиля слоя.

Подобная процедура работает в программе MPOLAN, но, по-видимому, она отсутствует в системах DPS-Artist и Autoscala, в которых за максимум слоя принимается последняя точка профиля, полученная по экспериментальным данным. На рис. 5, нижняя панель, это проявляется в наличии явного разрыва производной плазменной частоты по высоте в точке, принимаемой за максимум слоя F2, где происходит сшивка экспериментальных данных с аналитическим эмпирическим продолжением  $N_e(h)$ -профиля на высоты верхней ионосферы. Следствием является заниженное значение  $foF2$  и  $hmF2$ : 4.5 МГц и 187 км против 4.6 МГц и 227 км в операторской обработке. Заниженные значения параметров максимума F2-слоя в данном случае дает и система Autoscala: 4.5 МГц и 187 км соответственно.

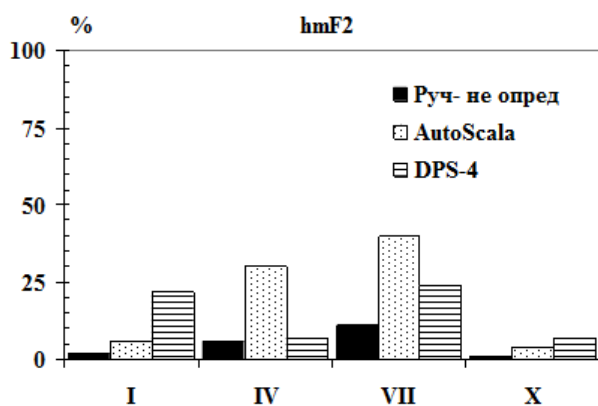


Рис. 6. Процентное содержание неподдающихся обработке ионограмм ВЗ автоматизированными системами DPS-Artist, Парус-Autoscala и операторской обработки данных ионозонда «Парус» по сезонам 2018 г.

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 ионозонда. Так для условий среднего уровня солнечной активности усредненное за год значение надежности обработки оценивается в ~ 85% для DPS-Artist и DPS-Autoscala [4]. Результативность может достигать до 90% в период высокой солнечной активности. Наименьший показатель надежности систем ионозонд-интерпретатор имеет место в годы низкой солнечной активности, что видно из

рис. 6 — 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 [4], для системы DPS-Artist 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, левая панель для июля месяца 2018 г. В целом же, надежность рассматриваемых систем автоматической обработки примерно одинакова, что также соответствует выводам работы [4]. Основные причины провала работы автоматизированных систем обработки: слабое превышение критической частоты слоя F2 над F1 и ослабленная амплитуда трека 1F2, экранировка отражений от слоя F2 следом спорадического слоя Es 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. 6).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В задаче радиофизической диагностики ионосферы единственным методом прямого экспериментального измерения высоты максимума слоя F2 является метод некогерентного рассеяния радиоволн на свободных электронах плазмы, в котором интенсивность обратного рассеянного сигнала пропорциональна 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, приведены в работе [4] для 1990г. — года максимума солнечной активности и представлены на рис. 7 в виде распределения отклонений ионозондовых данных от эталонных — радара HP. Средние значения отклонений на месячном интервале представлены цифрами на графиках. Сравнение с аналогичными распределениями (рис. 4, DPS-Artist и табл. 1) показывает, что средние значения отклонения от стандарта для января (-4 км и -9 км), апреля (-14 км и -19 км) и июля (-17 км и -24 км) принципиально близки, хотя в условиях низкой солнечной активности они системно несколько выше. 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 и, по-видимому, это связано, в значительной степени, с отсутствием операции экстраполяции полученного  $N(h)$  — профиля на максимум слоя F2.

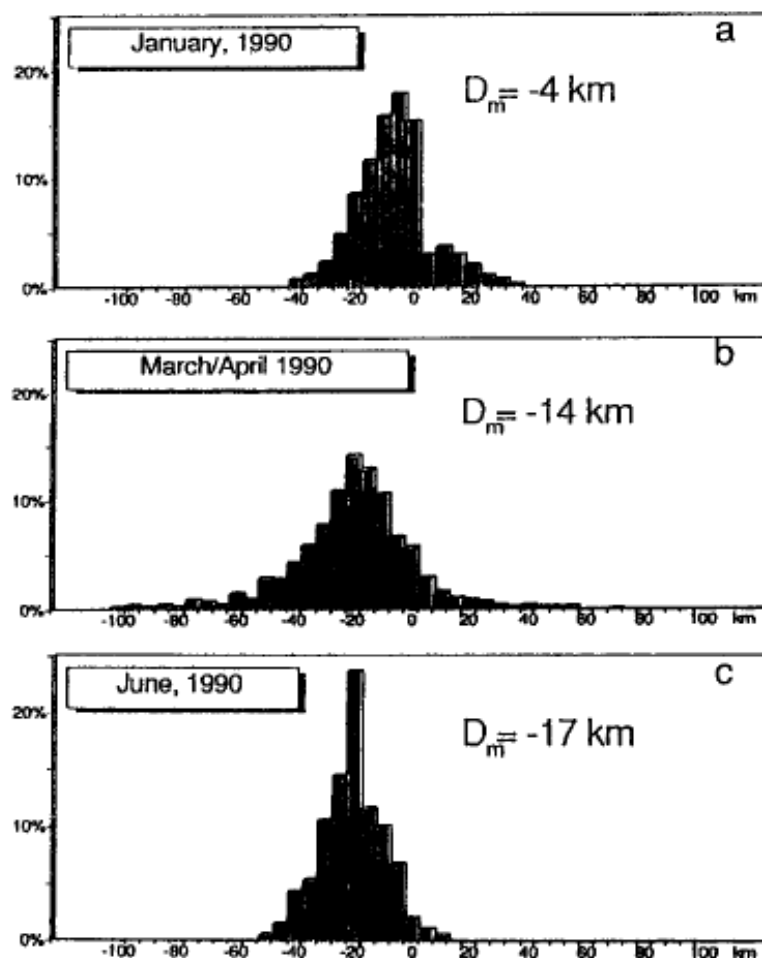


Рис. 7. Распределение отклонений высоты максимума слоя F2, полученных в автоматизированной системе Digisonde-Artist, по отношению к данным радара некогерентного рассеяния в Millstone Hill для сезонов 1990 г. — года максимума солнечной активности.

Экспериментальные ионосферные параметры  $foF2$ ,  $hmF2$  в локальных точках являются статистической основой для эмпирических моделей ионосферы, по которым формируются сферические коэффициенты разложения. В международной модели ионосферы IRI исторически  $foF2$  — стандартный параметр ионозонды, а  $hmF2$  — определялась из  $foF2$  и  $M3000F2$  на основе приближенных соотношений. Этот подход является базовой опцией представления высоты максимума слоя F2 — BSE-1979 [14]. В настоящее время при наличии достаточно больших массивов данных о положении главного ионосферного максимума как из источников наземных (ионозонды и радары HP), так и спутниковых (в основном, радиозатменный метод) средств диагностики ионосферы появляется возможность реализовать аналогичную с  $foF2$  процедуру и для  $hmF2$  [15, 16]. Поскольку, как показано выше, система DPS-Artist, дающая основной вклад в класс ионозондовых данных, может высоту слоя F2 заменять высотой слоя F1 (в меньшей степени это может быть и с программой Autuscala), то необходимо применять некий нижний порог для фильтрации допустимых значений  $hmF2$ . В модели SIMP [15] такое ограничение составляет 180 км, а в дальнейших реализациях рассматриваемого подхода к моделированию ионосферы нижний предел допустимых значений был увеличен до 200 км — модель GDMI [17] (Global Dynamic Model of the Ionosphere). На рисунке 8 представлены медианные суточные зависимости  $hmF2$  за январь и июль 2018 г.: экспериментальные (сплошные квадратики) и рассчитанные в моделях IRI и GDMI. Обе модельные кривые  $hmF2$  построены для среднемесячных оптимизированных параметров числа солнечных пятен  $R_m^g$  (IRI) и потока радиоизлучения F10.7 —  $F_m^g$  (GDMI) [18], которые в условиях низкой активности близки к фактическим: для 01/2018 —  $R_m^g=14$ ,  $F_m^g=74$  (реальные сглаженные 14 и 74) и для 07/2018 —  $R_m^g=8$ ,  $F_m^g=70$  (реальные сглаженные 7 и 70).

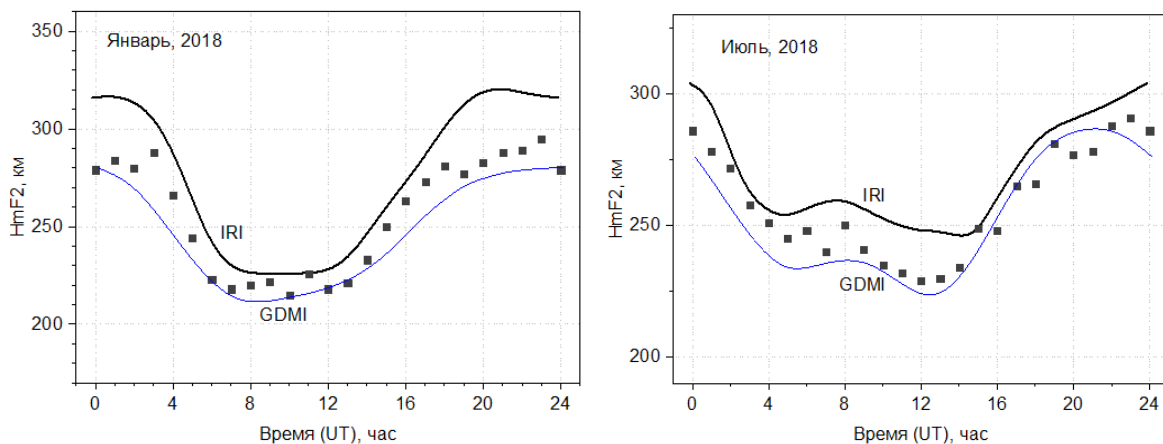


Рис. 8. Суточный ход медианных значений  $hmF2$  на ст. ИЗМИРАН и модельные зависимости для января и июля месяцев 2018 г.

В применении модели GDMI к медианным данным индекс геомагнитной возмущенности  $K_p$  равнялся 2, что, в общем, отражает усредненное значение на месячном интервале. Видно, что для обоих месяцев имеется общее сходство в характере и особенностях суточного хода модельных кривых и экспериментальных данных, но для модели IRI имеет место общее положительное, а для модели GDMI — общее отрицательное отклонение от измеренных значений. Среднее систематическое смещение составляет: для января — модель IRI - +20 км, модель GDMI — -7 км, а для июля — модель IRI — +12 км, модель GDMI — -4 км. Среднеквадратичное отклонение составляет: для января — модель IRI — 20 км, модель GDMI — 10 км, а для июля — модель IRI — 13 км, модель GDMI — 10 км. Т. е., в целом, прямой учет экспериментальных данных по высоте максимума слоя F2 дает существенное улучшение в точности его модельного представления.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление результатов автоматической, в системах DPS-Artist и Парус-Autoscala, и операторской обработки ионограмм в условиях низкой солнечной активности — 2018 год показывают:

1. высота главного ионосферного максимума —  $hmF2$  в автоматической системе DPS-Artist оценивается со значительным систематическим отрицательным отклонением, существенно зависящим от сезона и фактора геомагнитной активности, в частности, погрешность максимальна в околополуденное время в летний сезон;
2. в целом, система Парус-Autoscala показывает меньшее отклонение от эталонных величин  $hmF2$  и также имеет максимум погрешности в околополуденное время в летний сезон;
3. общий показатель надежности обработки ионограмм примерно одинаков для обоих комплексов: DPS-Artist и Парус-Autoscala;
4. использование в ионосферном моделировании массивов прямых данных по  $hmF2$  позволяет существенно повысить точность пространственно-временного описания данного ионосферного параметра.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Galkin I. A., Khmyrov G. M., Kozlov A. V., Reinisch B. W., Huang X. and Paznukhov V. V. The ARTIST 5//Radio Sounding and Plasma Physics, AIP Proceedings, 974, 2008.
2. Pezzopane, M. and 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, 47(6), P. 1783–1790, 2004.
3. Pezzopane, M., Scotto, C., Tomasik, L. et al. Autoscala: an aid for different ionosondes // Acta Geophys. 58, P. 513–526, <https://doi.org/10.2478/s11600-009-0038-1>, 2010.
4. Pezzopane, M., C. Scotto. Automatic scaling of critical frequency foF2 and MUF(3000)F2: A comparison between Autoscala and ARTIST 4.5 on Rome data // Radio Sci., 42, RS4003, doi:10.1029/2006RS003581, 2007
5. Chen C. F., Reinisch B. W., Scali J. L. et al. The accuracy of ionogram-derived N(h) profiles // Adv Space Res, V. 14, No. 12, P. 43-46, 1994.
6. Гвишвили Г. В., Лещенко Л. Н. Сетевой ионозонд ПАРУС-А: опыт эксплуатации//Системный мониторинг ионосферы — М.: ФИЗМАТЛИТ, 416 с., ISBN 978-5-9221-1878-1, 2019.
7. Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C. Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde // Computer & Geosciences, V 36, P. 628-635, 2010.
8. Панченко В. А. Ионозонд DPS-4. Десять лет в ИЗМИРАН // Системный мониторинг ионосферы — М.: ФИЗМАТЛИТ, 416 с., ISBN 978-5-9221-1878-1, 2019.
9. Scotto C. Electron density profile calculation technique for Autoscala ionogram analysis // Advances in Space Research, V. 44, No. 6, P. 756-766, 2009.
10. 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.
11. Titheridge J. E. The real height of ionograms: a generalized formulating // Radio Science. V. 23, No. 5, P. 831-849, 1988.
12. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Перевод с англ. второго издания «URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction» под ред. Н.В. Медниковой. М.: Наука, 342 с., 1978.
13. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 502 с., 1973.
14. 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, doi:10.1002/2016SW00159, 2017.

15. Демин М. Г., Михайлов А. В., Михайлов В. В., Шубин В. Н., Цибуля К. Г. Ионосферное моделирование и прогнозирование // Системный мониторинг ионосферы — М.: ФИЗМАТЛИТ, 416 с., ISBN 978-5-9221-1878-1, 2019.
16. Шубин В. Н., Демин М. Г. Глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия, Т. 59, № 4, С. 461–473, 2019.
17. Шубин В. Н. Частное сообщение, 2020.
18. 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.

## **ERROR IN ESTIMATION OF THE F2 LAYER PEAK HEIGHT IN AUTOMATIC SYSTEMS FOR PROCESSING IONOGRAMS OF VERTICAL RADIO SOUNDING OF THE IONOSPHERE UNDER LOW SOLAR ACTIVITY**

Krasheninnikov I. V., Leshchenko L. N.

Errors and reliability in estimating the main ionospheric peak parameters —  $f_oF2$  and  $hmF2$  by automated systems for processing vertical radio sounding data of the ionosphere at st. IZMIRAN in 2018 — the year of low solar activity are estimated. Were analyzed results of the two most widespread programs in observatory observations of the ionosphere in the world practice: Artist 5 as part of the DPS-4 ionosonde and Autoscala, adapted for the Parus-A ionosonde. Independent system of operator processing of VI ionograms on the Parus-A ionosonde was used as a reference for comparing the results. Both ionosondes operate with one minute spacing of sounding sessions. It was shown that the Artist program gives a systematic negative deviation in the height of the F2 layer peak, which is especially pronounced at the local noon time and significantly depends on the season. The statistical values of the deviations are principally similar to the results based on the incoherent scatter radar at Millston Hill. In the Autoscala case this effect is expressed considerably weaker. Common reliability for the systems DPS-Artist and Parus-Autoscala is practically the same.

**KEYWORDS:** IONOSPHERE, VI IONOGRAM, F2 LAYER PEAK HEIGHT, IONOSONDE, IONOGRAM SCALING.