

УДК 621.396

БЫСТРЫЕ ВАРИАЦИИ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ, ОБНАРУЖЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ИОНОЗОНДА ИЗМИРАН

© 2020 г. А. В. Браницкий¹, В. Ю. Ким¹, *, В. П. Полиматиди¹, **

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

*e-mail: vkim@izmiran.ru

**e-mail: vppolima@izmiran.ru

Поступила в редакцию 28.12.2018 г.

После доработки 23.05.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Представлена новая методика измерения быстрых вариаций электронной концентрации в ионосфере, основанная на быстром измерении ионограмм вертикального зондирования. В новой методике время регистрации ионограмм сокращается за счет применения широкополосных импульсных сигналов, спектр которых может охватывать одновременно весь диапазон зондирующих частот. Метод был реализован в ИЗМИРАН на экспериментальной установке с использованием ионозонда Базис-М и другой промышленной аппаратуры, при этом было получено значительное сокращение времени регистрации одной ионограммы до ~2 с. На данной экспериментальной установке был проведен цикл наблюдений быстрых естественных изменений параметров ионосферы. С помощью численного алгоритма решения обратной задачи зондирования были исследованы расслоения в слоях $F1$ и $F2$ ионосферы. Показано, что в слабо возмущенной среднеширотной ионосфере возникают локальные возмущения профиля электронной концентрации ~5%, которые могут перемещаться вниз со скоростью ~50 м/с. Обнаружено также, что при горизонтальных расслоениях профили электронной концентрации могут совершать циклические вертикальные перемещения с амплитудой ~5 км и периодом ~90 с.

DOI: 10.31857/S0016794020010046

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионограммы вертикального зондирования (ВЗ) являются основным источником информации об ионосфере и ее динамике. Постоянно функционирует и развивается мировая сеть ионосферных станций, унифицируются методы обработки и интерпретации массивов экспериментальных ионограмм. Детальные описания техники и методик наземных и спутниковых наблюдений ионосферы с помощью ионозондов можно найти в спецвыпусках Трудов ИПГ им. акад. Е.К. Фёдорова [Радиозондирование ионосферы, 2008, 2014], а также в работах [Описание ионозонда DPS-4, Wright and Pitteway, 1979a, b; Wright et al., 1980; Погода, 1981; Zabolin et al., 2006].

По ионосферным данным исследуются проявления разнообразных геофизических процессов в ионосфере, для этого наиболее часто используют данные о критической частоте $foF2$, получаемые в режиме пятнадцатиминутной регистрации ионограмм на мировой сети ионосферных станций. Таким способом были исследованы нестационарные процессы в ионосфере с длительностями порядка часов, суток и более:

нарные процессы в ионосфере с длительностями порядка часов, суток и более:

– ионосферные проявления магнитных бурь в ионосфере [Пирог и др., 2003], в том числе в условиях Арктики [Благовещенская и др., 2005];

– поведение главного ионосферного провала по данным ионосферных наблюдений одновременно с полным электронным содержанием по GPS-измерениям [Афраймович и др., 2005, 2006];

– отклик среднеширотной ионосферы на экстремальные события на Солнце [Боярчук и др., 2005].

Большой объем экспериментальных данных, полученных по пятнадцатиминутным данным о критической частоте foE , был использован для исследований образования и динамики ионосферного слоя E в работах [Иванов-Холодный и Нусинов, 1979; Антонова и др., 1996]. Применение современных математических методов обработки многомерных рядов ионограмм позволило провести исследование различных ионосферных слоев, получена связь Es с планетарными волна-

ми и волновой структурой нижней термосферы [Haldoupis and Pancheva, 2002; Akchurin et al., 2009]. В работе [Шерстюков и Рябченко, 2004] на основе анализа вычисленных вейвлет-спектров параметра f_oE_s для ст. Москва в 1986 г. определен период планетарной волны, показано, что в летнее время наблюдаются волновые возмущения с периодами 20–24 сут и отдельные всплески с периодами 4–6 сут.

Обычно с помощью ионозондов решают задачи диагностики ионосферных неоднородностей с характерными временами развития от минут до нескольких часов. В работе [Акчурин и др., 2013] на основе снятых в одноминутном режиме ионограмм был проведен анализ годовых временных рядов ионограмм, что позволило детально исследовать быстропротекающие квазипериодические вариации с периодами от 5 до 20 мин.

В ионосфере могут происходить и более быстрые естественные изменения, например, в начальной фазе воздействия солнечной вспышки, в моменты вторжения потоков заряженных частиц в ионосферу, а также при различных видах искусственного воздействия на ионосферу, в том числе при воздействии мощными радиоволнами. Быстрые процессы при нагреве ионосферы мощными КВ-радиоволнами экспериментально исследовались с помощью многочастотного доплеровского зондирования ионосферы на фиксированных частотах (количество частот 4–16), которые имели области отражения в разных слоях ионосферы и в разных характерных точках (ленгмюровский и нижний гибридный резонансы). В работе [Lobachevsky et al., 1992] были представлены результаты экспериментов по активному воздействию на ионосферу в Норвегии (Тромсё), когда исследовались области резонансного воздействия мощных радиоволн на ионосферу. Доплеровская диагностика в резонансной области мощной волны позволила исследовать динамику высотного профиля искусственного возмущения электронной концентрации ионосферы и было получено, что характерные времена развития составляют ~1 с.

При зондировании внешней ионосферы с борта ИСЗ от скорости измерения ионограммы зависит горизонтальная пространственная локализация получаемых высотных профилей электронной концентрации. Например, на спутнике Интеркосмос-19 с помощью ионозонда ИС-338 ионограммы регистрировались на 338 фиксированных частотах и при частоте повторения зондирующих импульсов $F_{\Pi} \sim 60$ Гц время измерения одной ионограммы составляло $T_{\Pi} \sim 6$ с [Васильев и др., 1980]. За время T_{Π} спутник перемещается по орбите на расстояние ~50 км, что определяет минимальное горизонтальное пространственное разрешение наблюдений ионосферы с борта ИСЗ.

Таким образом, возникает задача уменьшения времени регистрации ионограмм с помощью ионозондов, что давало бы возможность наблюдать быстрые возмущения электронной концентрации одновременно во всей толще ионосферы.

Целью настоящей работы является разработка метода быстрого измерения ионограмм вертикального зондирования, создание соответствующих аппаратных и программных средств реализации метода и исследование быстрых нестационарных процессов в ионосфере.

2. МЕТОД БЫСТРОЙ РЕГИСТРАЦИИ ИОНОГРАММ

Ближайший к поверхности Земли ионосферный E -слой, наблюдаемый на ионограммах ВЗ, расположен на высоте ~105 км, поэтому этот слой дает задержку отраженного импульсного сигнала ~700 мкс и это ограничивает длительность зондирующего радиосигнала. Этот факт используется в современных ионозондах [Описание ионозонда DPS-4] для увеличения энергетического потенциала зондирования путем применения сложно манипулированных сигналов, например, фазово-кодированных (ФКМ) сигналов, с длительностью ~600 мкс и полосой излучаемого сигнала ~100 кГц. При этом зондирующие ФКМ-радиосигналы на фиксированной частоте состоят из K смещенных по времени элементарных импульсов длительностью $\Delta t \sim 50$ мкс каждый с манипуляцией начальной фазы от импульса к импульсу. Длительность такого зондирующего сигнала $T_C = K\Delta t$, например при $K = 13$, $T_C = 650$ –700 мкс. Так, например, время регистрации ионограммы T_{Π} при числе зондирующих частот на $N = 400$ и при частоте повторения зондирующих сигналов $F_{\Pi} = 50$ Гц составит $T_{\Pi} = 8$ с.

Для ускорения процесса регистрации ионограммы в данной работе рассматривается предложенный в работе [Способ получения ионограмм, 2015] новый способ формирования зондирующего радиосигнала, в котором излучаемый радиосигнал состоит из непрерывной последовательности K частотных элементов и где каждый элемент представляет собой синусоидальный сигнал длительностью Δt . При этом частота каждого элемента может быть произвольной из диапазона зондирования, например, от 1 до 20 МГц и поэтому такой сигнал можно считать широкополосным радиосигналом. Назовем зондирующий радиосигнал с таким набором частотных элементов сигналом с дискретно-частотным спектром (ДЧС).

Пусть в каждом такте зондирования излучается радиосигнал ДЧС с K элементами неповторяющихся частот, тогда через N/K тактов будут излучены все N рабочих частот ионограммы, следовательно, время регистрации ионограммы T_{Π} может

быть уменьшено в K раз по сравнению с обычной ионограммой. Например, возьмем длительность импульса на каждой частоте $\Delta t = 100$ мкс и пусть число элементов $K = 5$ и, следовательно, длительность сигнала ДЧС составит $T_C = 500$ мкс. Тогда при частоте повторения импульсов зондирования $F_{\Pi} = 50$ Гц и при $N = 500$ частот зондирования ионограмма будет зарегистрирована за время $T_{\text{и}} = 2$ с. Если длительность ДЧС увеличить до $T_C = 600$ мкс и взять значение $\Delta t = 60$ мкс, то число элементов в сигнале ДЧС будет $K = 10$ и тогда время регистрации ионограммы при $N = 500$ рабочих частот составит 1 с. При ВЗ нередко применяют повышенную частоту повторения, например, $F_{\Pi} = 100$ Гц, тогда при $K = 10$ время регистрации составит $T_{\text{и}} = 0.5$ с. Эта величина является практической оценкой наименьшего времени измерения “быстрой” ионограммы. Как будет показано ниже, число зондирующих частот N может быть уменьшено, если учитывать то, что для решения обратной задачи восстановления высотного профиля электронной концентрации n_e в ионосфере обычно используемая величина N является избыточной и может быть значительно уменьшена. Например, при $N = 250$, $F_{\Pi} = 100$ Гц и $K = 10$ время регистрации составит $T_{\text{и}} = 0.25$ с.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ИОНОЗОНДА

Для аппаратной реализации описанного выше метода быстрого измерения ионограмм в ИЗМИРАН была создана экспериментальная установка с использованием ионосферного комплекса Базис-М и другой промышленной аппаратуры. В качестве излучателя радиоволн использовался передатчик Базис-М, который позволяет излучать широкополосные сигналы мощностью не менее 10 кВт при длительности импульса до 800 мкс. В качестве задающего генератора для возбуждителя передатчика использовалось специально разработанное устройство прямого цифрового синтеза сигналов, с помощью которого программно формировались 4-элементные сигналы ДЧС. При измерениях использовались отдельные передающая и приемная антенны ионосферного комплекса Базис-М типа “модифицированный ромб” для передачи и антенна типа “дельта” для приема.

Для приема сигналов ДЧС с использованием приемников типа “Катран” была создана 4-канальная приемно-регистрирующая система, позволяющая осуществлять в каждом такте зондирования одновременную цифровую регистрацию на 4 зондирующих частотах.

Синхронное управление приемными каналами быстродействующего ионозонда осуществлялось с помощью специализированного программного обеспечения в центральной ПЭВМ,

которая управляла как работой микропроцессоров в блоке синтезатора сигналов ДЧС, так и в блоке управления 4-канальной приемно-регистрирующей системой. Сигналы с выходов РПУ на промежуточной частоте 215 кГц оцифровывались с помощью 4-канального АЦП типа E20-10 (частота оцифровки сигналов 2.5 МГц на канал), и полученный массив данных сохранялся на диске ПЭВМ в виде специального файла сигнальных данных. Цифровая обработка файла данных ионограммы проводилась на ПЭВМ с помощью специального программного обеспечения, при этом проводилась квадратурная обработка сигналов на каждой частоте зондирования, амплитудная селекция отражений и вывод графика ионограммы на монитор ПЭВМ. График ионограммы строился с учетом начальной относительной задержки между частотными элементами в сигнале ДЧС.

Экспериментальные ионограммы, впервые зарегистрированные в 2014 г., представлены на рис. 1, при этом количество зондирующих частот было равно 256, длительность одного частотного элемента в сигнале ДЧС составляла $\Delta t = 80$ мкс, длительность всего сигнала ДЧС составляла $T_C = 320$ мкс. Полный интервал времени регистрации одной ионограммы при тактовой частоте зондирования $F_{\Pi} \sim 33$ Гц составлял $T_{\text{и}} \sim 2$ с. На рис. 1а показана одна из первых быстрых ионограмм, снятая 12 марта 2014 г. в 08:13:29 UT. Видно, что начальная частота ионограммы равна ~ 1.4 МГц, критическая частота слоя E составляет $f_oE \sim 3.3$ МГц, а критическая частота слоя $F2$ составляет $f_oF2 \sim 11$ МГц.

На рисунке 1б показана ионограмма, снятая в 08:58:15 UT 24 июня 2014 г. в период возмущенных условий в ионосфере. Здесь начальная частота ионограммы равна ~ 1.2 МГц, критическая частота слоя $F1$ составляет $f_oF1 \sim 4.5$ МГц, а критическая частота слоя $F2$ составляет $f_oF2 \sim 6.3$ МГц. Видно, что в возмущенной ионосфере обыкновенная компонента ионограммы в слое $F2$ состоит из двух ветвей и это свидетельствует о существовании на высотах слоя $F2$ крупномасштабной неоднородной структуры.

4. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ

Обработка цифровых ионограмм, полученных с помощью сигналов ДЧС, практически не отличается от известных методик обработки обычных ионограмм. Здесь более подробно обсудим вопросы погрешности измерения действующей высоты $h' = c\Delta t/2$, (c – скорость света, Δt – групповая задержка радиосигнала), полагая, что частота зондирующего радиосигнала f известна с высокой точностью. Погрешность измерений влияет на качество решения обратной задачи восстановле-

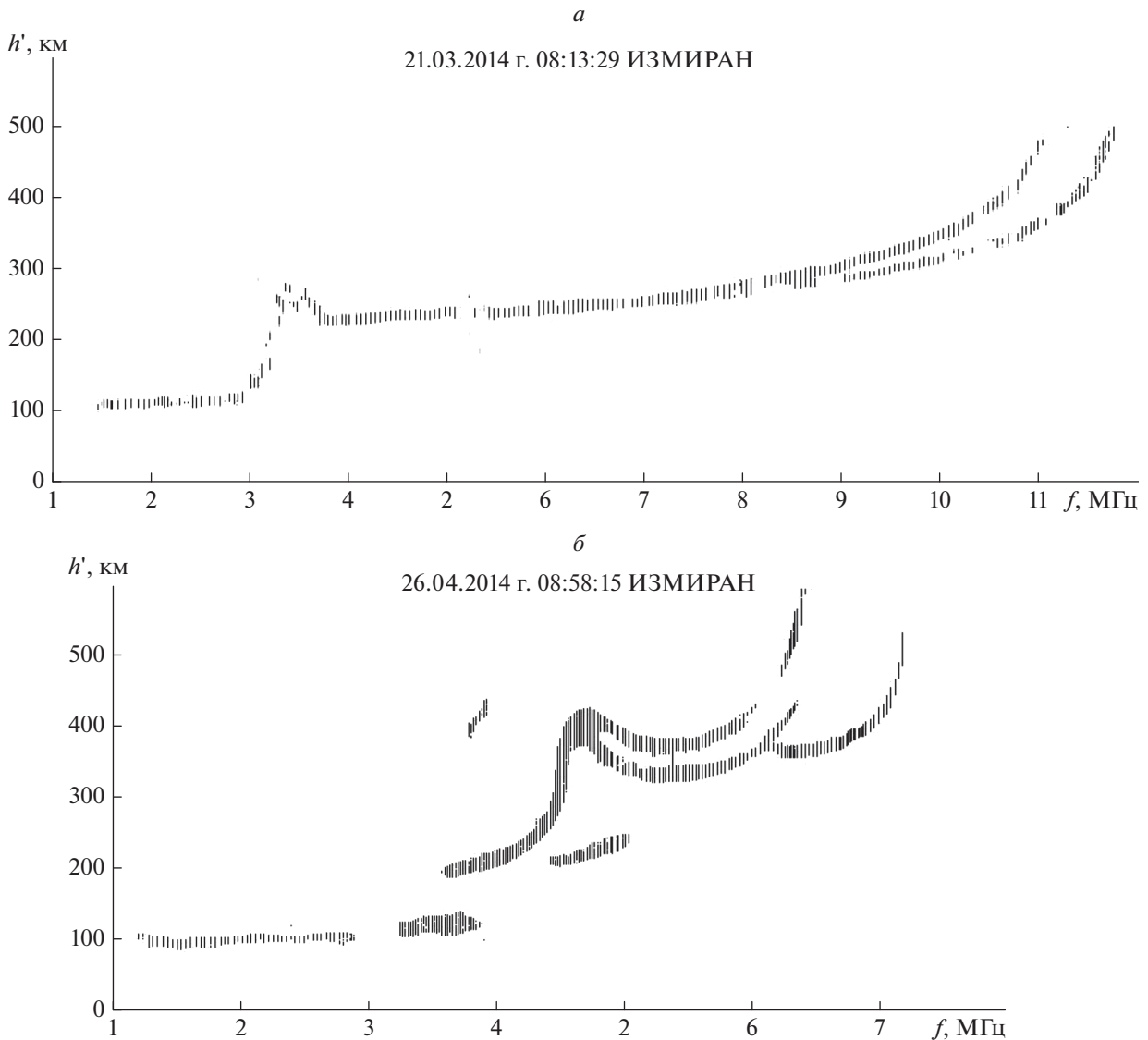


Рис. 1. Ионограммы ионозонда “Базис-М”, полученные в режиме быстрой регистрации при различных ионосферных условиях: *a* – при спокойных условиях в ионосфере 21.03.2014 в 08:13:29 UT, *b* – в условиях возмущенной ионосферы 24.06.2014 в 08:58:15 UT. Количество зондирующих частот 256, длительность сигнала ДЧС 320 мкс, тактовая частота зондирования $F_{\Pi} \sim 33$ Гц, время регистрации ~ 2 с.

ния высотного профиля электронной концентрации, и это будет обсуждаться ниже в п. 5.

Вопросы точности отсчета характеристик при обработке ионограмм рассмотрены в Руководстве URSI по интерпретации и обработке ионограмм [Руководство ..., 1977], рекомендованные в этом руководстве минимальные погрешности $\Delta h'$ при определении действующей высоты ионосферы в различных слоях ионосферы приведены в табл. 1.

По вопросу ошибки измерения задержки Δt отраженного импульса ионограммы на фоне помех, можно обратиться к монографиям [Ванштейн и Зубаков, 1960; Галкин и др., 1971]. В слу-

чае слабых шумов (помех), когда $\mu \gg 1$ (μ – отношение сигнал/шум), для оценки погрешности момента прихода сигнала Δt_c применимо выражение: $\Delta t_c = (2\pi\delta_c f_c \sqrt{\mu})^{-1}$, где $\delta_c f_c$ – полоса частот, занимаемая спектром зондирующего радиосигнала. Тогда для оценки ошибки отсчета действующей высоты ионосферы h' имеем: $\Delta h' = c(4\pi\delta_c f_c \sqrt{\mu})^{-1}$. При этом теоретически достижимая потенциальная точность при $\mu = 4$ и $\delta_c f_c = 10$ кГц составит $\Delta h' = 1.2$ км. При $\mu = 10$ и той же полосе $\delta_c f_c = 10$ кГц потенциальная точность составит $\Delta h' = 0.75$ км. Видно, что максимальная точность

Таблица 1. Погрешности отсчета h' и f при обработке ионограмм

Точность отсчета	Область E		Область F
	слой E	слой E_s	
Высота h'	2 км	2 км	5 км
Частота	0.05 МГц	0.1 МГц	0.1 МГц
M(3000)			0.05 МГц

возрастает с ростом уровня полезного сигнала. Полученные оценки соответствуют условиям реальных ионосферных измерений с помощью обычных ионозондов, которые оперируют с импульсами длительностью ~ 100 мкс и полосой приемного устройства ~ 10 кГц. Как будет видно далее, эта оценка близка к обычной точности определения группового запаздывания по амплитудным характеристикам отраженных сигналов.

Практические методики обработки цифровых ионограмм на ст. “Сойка” в ИЗМИРАН были описаны в работе [Кольцов и др., 1986]. В этой работе было исследовано влияние различных способов обработки амплитуды сигналов на качество цифровых ионограмм в борьбе с шумами и помехами:

- накопление по амплитуде сигнала, при котором зондирование на каждой частоте ведется в течение нескольких тактов зондирования и полученные данные суммируются для отражений на фиксированных дальностях;

- пороговое обнаружение, когда регистрируются сигналы, амплитуда которых превышает некоторый порог, устанавливаемый в зависимости от уровня помех на данной частоте зондирования;

- селекция по длительности, когда не учитываются данные отраженных импульсов, превышающих некоторую установленную длительность, связанную с длительностью излучаемого импульса.

В данной работе при анализе экспериментальных ионограмм $h'(f)$ проводилась как автоматическая пороговая обработка амплитуды, так и дополнительное графическое редактирование оператором. Пороговая амплитудная обработка на каждой зондирующей частоте f_i , ($i = 1, 2, \dots, N$), состояла в том, что проводился автоматический поиск таких отраженных сигналов, у которых максимум огибающей импульса на некоторой дальности h'_i превышает по уровню значение 0.9 от максимума амплитуды сигнала на данной частоте. В результате создавался массив данных цифровой ионограммы $\{f_i, (h'_i)\}$, где f_i – частота зондирования, (h'_i) – некоторый набор действующих высот отражения, которые формально соответствовали принятому здесь амплитудному

критерию поиска сигналов. Однозначный выбор значения h'_i , соответствующего частоте f_i , осуществлялся оператором с помощью графического интерфейса. Редактирование ионограммы состояло в выделении сигналов обыкновенной поляризации на каждой зондирующей частоте с одновременным удалением отражений необыкновенной компоненты и частот с помехами. В результате создавался двумерный массив экспериментальных данных $\{f_j, h'_j\}_\Theta$, $j = 1, 2, \dots, L$, причем $L < N$. В дальнейшем массив $\{f_j, h'_j\}_\Theta$ используется при решении обратной задачи восстановления высотного профиля плазменной частоты $h(f_0)$ и, соответственно, профиля электронной концентрации $n_e(h)$. Ошибки измерения действующей высоты $\Delta h'$ здесь можно оценить как $\Delta h' \approx 2$ км, что дает оценку относительной погрешности от $\delta h' \sim 5 \times 10^{-2}$ в E -слое до $\delta h' \sim 5 \times 10^{-3}$ в F -слое ионосферы.

5. МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ

Задача восстановления высотного профиля плазменной частоты $h(f_0)$ по измеренной ионограмме $h'(f)$ рассматривалась в работах [Данилкин и Мальцева, 1977], [Радиозондирование, 2008, 2014]. При этом исходили из погрешности экспериментальных данных $\Delta h' \approx 1.5$ км. Учет влияния погрешностей $\Delta h'$ измерения действующей высоты важен для корректного восстановления высотного профиля плазменной частоты $h(f_0)$ и соответствующего профиля электронной концентрации.

Как известно [Гинзбург, 1967], действующая высота отражения радиосигнала при вертикальном зондировании ионосферы на частоте f определяется как

$$h'(f) = \int_0^{z_R} \frac{c}{v(f, z)} dz, \quad (1)$$

где z_R – высота отражения волны; f – частота зондирующего радиосигнала. Групповая скорость v при вертикальном зондировании определяется формулой

$$v(f, z) = \frac{c}{\frac{\partial}{\partial f} [f \sqrt{\epsilon_{1,2}(f, z)}]}, \quad (2)$$

где $\epsilon_{1,2}(f, z)$ – диэлектрическая проницаемость плазмы для обыкновенной (1) и необыкновенной (2) магнитоионных компонент зондирующей радиоволны. В дальнейшем для определенности будем рассматривать только волну обыкновенной поляризации и индексы в формуле (2) опустим.

Уравнение (1) с учетом (2) можно преобразовать в интегральное уравнение для определения высотного профиля плазменной частоты $z(f_0) \equiv h(f_0)$ по данным о действующей высоте $h'(f)$, получаемой из ионограммы. Тогда обратная задача восстановления профиля $z(f_0)$ из ионограммы вертикального зондирования может быть сведена к решению интегрального уравнения

$$\int_{f_1}^f \frac{\partial}{\partial f} \left[f \pi \frac{\partial}{\partial p} \sqrt{\epsilon(f, p)} \right] u(p) dp = h'(f) - h_1', \quad (3)$$

где

$$u(p) = \frac{dz(p)}{dp}, \quad p = f_0. \quad (4)$$

Величина h_1' в (3) определяется как начальная действующая высота и связана с нижним пределом f_1 интеграла в (3). Величина f_1 зависит от диапазона рабочих частот ионозонда и определяется как минимальная наблюдаемая на ионограмме частота. Для дневной ионосферы величина h_1' связана обычно с отражением от слоя E на частоте зондирования $f_1 \sim 1$ МГц, вблизи этой частоты ионограмма имеет почти горизонтальный ход, поэтому можно положить, что величина h_1' практически равна начальной высоте ионосферы z_1 . Тогда для интегрирования уравнения (4) можно положить начальные условия в виде

$$z(f_1) = z_1 \quad \text{и} \quad u(f_1) = 0, \quad (5)$$

здесь второе условие означает плавное продолжение профиля ионосферы от начальной высоты z_1 , в предположении, что ниже этой высоты $p = 0$. Условия (5) могут быть заданы иначе, если априори известен профиль ионосферы ниже высоты z_1 , например, из какой-либо модели нижней ионосферы.

Уравнение (3) является линейным интегральным уравнением типа Вольтера 1-го рода и его можно записать компактно в операторном виде

$$Au = y, \quad (6)$$

А означает интегральный оператор

$$\int_{f_1}^f K_A(f, p) dp, \quad (7)$$

где ядро

$$K_A(f, p) = \frac{\partial}{\partial f} \left[f \pi \frac{\partial}{\partial p} \sqrt{\epsilon(f, p)} \right], \quad (8)$$

а правая часть $y(f) = h'(f) - h_1'$ представляет собой экспериментально определяемую функцию. Таким образом, обратная задача сводится к совместному решению интегрального уравнения (6) и обыкновенного дифференциального уравнения (4) с начальными условиями (5).

Решение уравнения (6), ядро которого $K_A(f, p)$ содержит производную от показателя преломления для магнитоактивной плазмы, не имеет аналитического решения и может быть найдено численно с некоторой точностью. При этом правая часть уравнения (6) определяется по экспериментальным данным с некоторой погрешностью δy , что может приводить к значительным вариациям решения $u(p)$. Дискретизация уравнения (6) при его численном решении вносит дополнительную погрешность δA в вычисление элементов матрицы оператора A , что также вносит погрешность в конечный результат. Поэтому представляется целесообразным использовать для приближенного решения уравнения (6) метод регуляризации А.Н. Тихонова [Тихонов и др., 1983] аналогично тому, как это было сделано для решения обратной задачи многочастотного доплеровского зондирования искусственных ионосферных возмущений [Ким, 1989]. Так же, как в работе [Ким, 1989], при использовании метода регуляризации для решения уравнения (6) необходимо подобрать параметр регуляризации β , а также использовать априорную информацию о величинах δy и δA .

Значение погрешности правой части δy может задаваться как средняя относительная ошибка измерения действующей высоты, которая может оцениваться величиной от $\delta y \sim 10^{-2}$ до $\delta y \sim 10^{-4}$ в зависимости от способа измерения $h'(f)$.

Погрешность задания оператора δA связана с погрешностью вычисления ядра $K_A(f, p)$, которое получено в рамках приближения геометрической оптики (ГО) для распространения радиоволн в ионосфере. Для оценок можно воспользоваться тем, что групповая задержка определяется через набег фазы радиоволны $\varphi(f)$ по формуле [Гинзбург, 1967]

$$\Delta t = d\varphi(f)/df \quad (9)$$

и в ГО-приближении расчет фазы волны при полном внутреннем отражении отличается от точно-

го решения на величину $\sim \pi/2$. Тогда, например, для полного фазового пути L_ϕ при отражении зондирующей радиоволны от слоя F ионосферы можно положить $L_\phi \sim 300$ км и при длине зондирующей волны $\lambda \sim 60$ м получим оценку $\delta A \sim 5 \times 10^{-5}$.

Отметим также, что здесь при вычислении диэлектрической проницаемости в (8) для учета влияния магнитного поля Земли значение гирочастоты электронов бралось равным 1.35 МГц, а магнитное наклонение считалось равным 19° .

Предлагаемая здесь методика получения профиля $z(p) \equiv h(f_0)$ состоит из трех этапов:

1 – представление правой части $y(f)$ уравнения (6) в виде дискретной функции $\{y(f_i)\}$ на равномерной сетке из k частот $\{f_i\}$, $i = 1, 2, \dots, k$, путем интерполяции измеренных значений $h'(f)$ с помощью сглаживающих кубических сплайнов;

2 – вычисление элементов матрицы оператора $A\{A_{ij}\}$, $i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, k$; численное решение уравнения (6) методом регуляризации и получение решения в виде дискретной функции $\{u(p_i)\}$, $i = 1, 2, \dots, k$;

3 – вычисление профиля $z(f_0) = \int_{f_1}^{f_0} u(p) dp$ с помощью какой-либо квадратурной формулы и в результате приближенное решение получается в виде дискретной функции $\{z(f_{0i})\}$, $i = 1, 2, \dots, k$.

Здесь отметим, что при анализе профилей $z(f_0)$ наряду с дискретной функцией $\{z(f_{0i})\}$ удобно рассматривать дискретную функцию решения $\{u(p_i)\}$, которая тождественна производной от $z(f_0)$, т.е. $\{u(p_i)\} \equiv \{z'(f_{0i})\}$, $i = 1, 2, \dots, k$.

Наконец, с использованием $\{z'(f_{0i})\}$ может проводиться расчет профиля электронной концентрации в ионосфере в виде дискретной функции $\{n_e(z_i)\}$ по формуле [Гинзбург, 1967] $n_e(z_i) = 1.24 f_{0i}^2 10^4$, где $\{n_e(z_i)\}$ – в см^{-3} , z_i – в км, f_{0i} – в МГц, $i = 1, 2, \dots, k$.

Важной особенностью предлагаемой здесь методики является представление ионограммы в виде интерполирующей кубической сплайн-функции $\{h'(f_i)\}$, $i = 1, 2, \dots, k$, которая обладает достаточной степенью гладкости на интервале зондирующих частот для корректного решения обратной задачи. Выше в п. 4 было показано, что после обработки реальной ионограммы получается дискретная функция $\{f_j, h'_j\}_{\exists}$, $j = 1, 2, \dots, L$, с использованием которой находится кубический сплайн правой части $\{y(f_i)\}$ на равномерной сетке из k частот $\{f_i\}$, $i = 1, 2, \dots, k$, причем $k > L$. Для заданной экспериментальной функции $\{f_j, h'_j\}_{\exists}$ интерполирующий сплайн $\{y(f_i)\}$ является наилучшим приближением из класса функций с непрерывными первой и второй производными.

Поэтому сплайн $\{y(f_i)\}$ можно рассматривать как практически точно известную правую часть уравнения (6), а погрешность восстановленных профилей учитывать после решения обратной задачи, полагая, что в силу линейности уравнения (6) относительная погрешность решения соответствует погрешности правой части.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Эксперименты проводились в ИЗМИРАН с помощью ионосферного комплекса Базис-М, который был модернизирован в части формирования ДЧС-радиосигналов для возбудителя передатчика, как это было описано выше в п. 3.

Интересные явления с точки зрения исследования быстрой динамики естественной ионосферы наблюдались 24 июня 2014 г. в ИЗМИРАН, когда в ионосфере происходили возмущения. Об этом можно было судить по виду ионограмм ВЗ, полученных с помощью ионозонда Парус-А при мониторинге ионосферы в 15-минутном режиме.

Две серии ионограмм, которые наблюдались в дневное время 24 июня 2014 г., представлены на рис. 2 и 3. Они были получены в режиме 15-секундного зондирования с помощью быстродействующего ионозонда Базис-М. Первая серия ионограмм на рис. 2 снималась в интервале времени с 08:56:45 UT по 08:59:45 UT и видно, что в начале серии на рис. 2 на панелях от a до $ж$ четко видны две ветви o -компоненты в слое $F2$. На рисунке 2 на панелях от $з$ до $и$ кроме раздвоения ионограммы в слое $F2$ можно также заметить появление и развитие локального возмущения в слое $F1$, которое проявляется на ионограмме в виде следа типа “серп”. Здесь наблюдается процесс формирования раздвоения на ионограмме $F1$ -слоя, при этом на рис. 2 на панелях $л$, $м$ и $н$ можно наблюдать формирование третьей ветви ионограммы в $F2$ -слое. Отметим, что описанные трансформации ионограмм происходили менее чем за 3 мин наблюдений. Похожую структуру можно наблюдать на ионограмме ионозонда Парус-А, рис. 2о, полученной в 09:00:00 UT через 15 с после завершения сеанса работы ионозонда Базис-М.

Рисунок 3 представляет собой другую серию ионограмм, снятую через 15 мин после серии ионограмм, показанных на рис. 2. На серии рисунков от $3a$ до $3л$, снятых в период с 09:11:45 UT по 09:14:15 UT, видно, что раздвоения следов o -компоненты ионограммы в слое $F2$ уже нет, тогда как в слое $F1$ наблюдается раздвоение o -компоненты на две ветви. Двойная структура следов ионограммы в слое $F1$ сохранялась в течение почти 3 мин наблюдений, хотя величина раздвоения с течением времени несколько изменялась. На

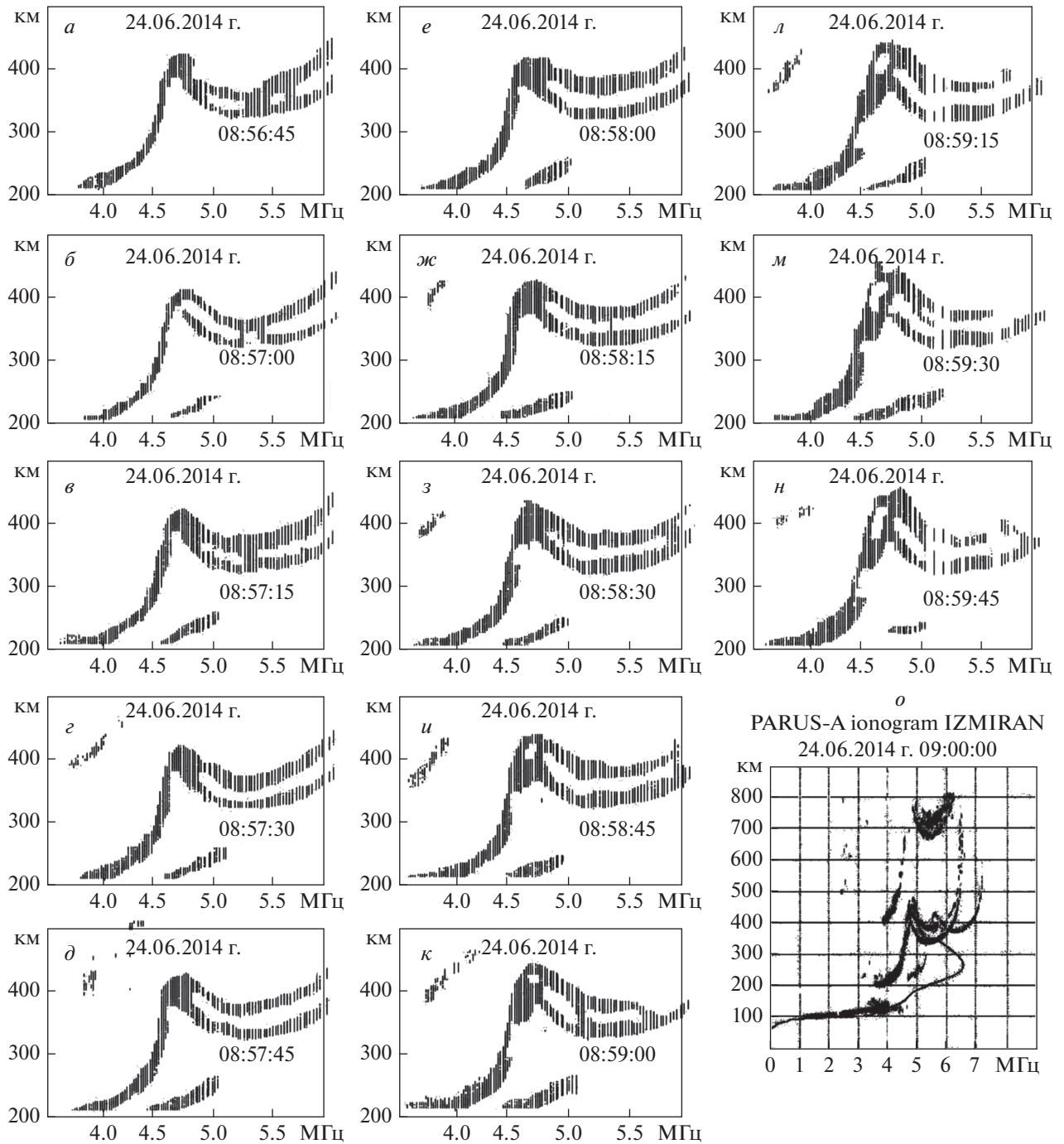


Рис. 2. Фрагменты 13 ионограмм, полученные в режиме 15 с в период с 08:56:45 UT по 08:59:45 UT 24.06.2014 г. Фрагменты показаны в выделенных окнах – по действующей высоте от 200 до 500 км, по частоте от 3.5 до 6 МГц. На панели *o* показана ионограмма ионозонда Парус-А в ИЗМИРАН, снятая в 09:00:00 UT 24.06.2014 г.

рис. 3м показана ионограмма ионозонда Парус-А, снятая в 24.06.2014 г. в 09:15:00 UT, на которой в слое F1 также можно наблюдать две ветви ионограммы.

Процедура последовательной обработки ионограммы показана на рис. 4 на примере обработки сеанса зондирования в 08:57:30 UT, фрагмент

этой ионограммы показан на рис. 2г. На рисунке 4а показан вид ионограммы после амплитудной селекции, как это было описано в разделе 4, знаками *л1* и *л2* показаны две ветви *o*-компоненты ионограммы в слое F2. На рисунке 4б черными залитыми квадратами *1* показаны точки ионограммы (всего 34 точки), координаты которых

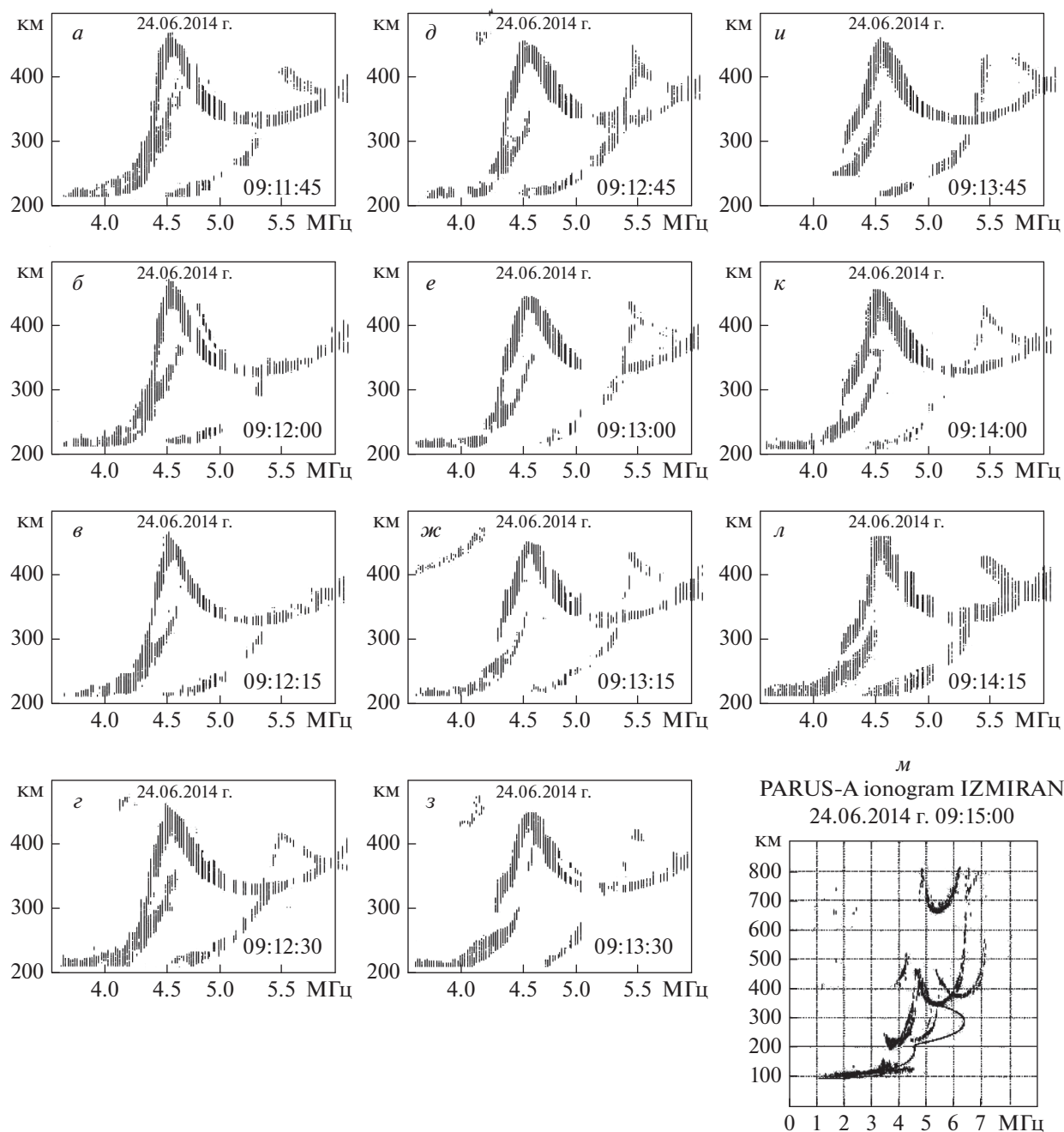


Рис. 3. Фрагменты 11 ионограмм, полученные в режиме 15 с в период с 09:11:45 UT по 09:14:15 UT 24.06.2014 г. Фрагменты показаны в выделенных окнах – по действующей высоте h' от 200 до 500 км, по частоте от 3.5 до 6 МГц. На панели *м* показана ионограмма ионозонда Парус-А в ИЗМИРАН, снятая в 09:15:00 UT 24.06.2014 г.

были выбраны оператором для включения в экспериментальный массив $\{f_j, h'_j\}_\Omega$, ($j = 1, 2, \dots, 34$), для верхнего следа ионограммы (ветвь *л1* на рис. 4а). Здесь точками 2 показан график сглаживающей сплайн-функции, интерполирующий экспериментальные точки $\{f_j, h'_j\}_\Omega$. С помощью полученной сплайн-модели ионограммы вычислялся массив $\{f_i, h'_i\}$, ($i = 1, 2, \dots, k$), который использовался для задания правой части уравнения (6).

Для дискретизации интегрального оператора (7) был выбран шаг по частоте 50 кГц, соответственно, система линейных алгебраических уравнений обратной задачи (6) имела порядок $k = 98$. Начальные данные в данном конкретном случае были следующими: значение начальной частоты ионограммы $f_1 = 1.49$ МГц, конечная частота ионограммы была $f_2 = 6.34$ МГц, а начальная высота $h'_1 = 96.8$ км. Результатом решения интеграль-

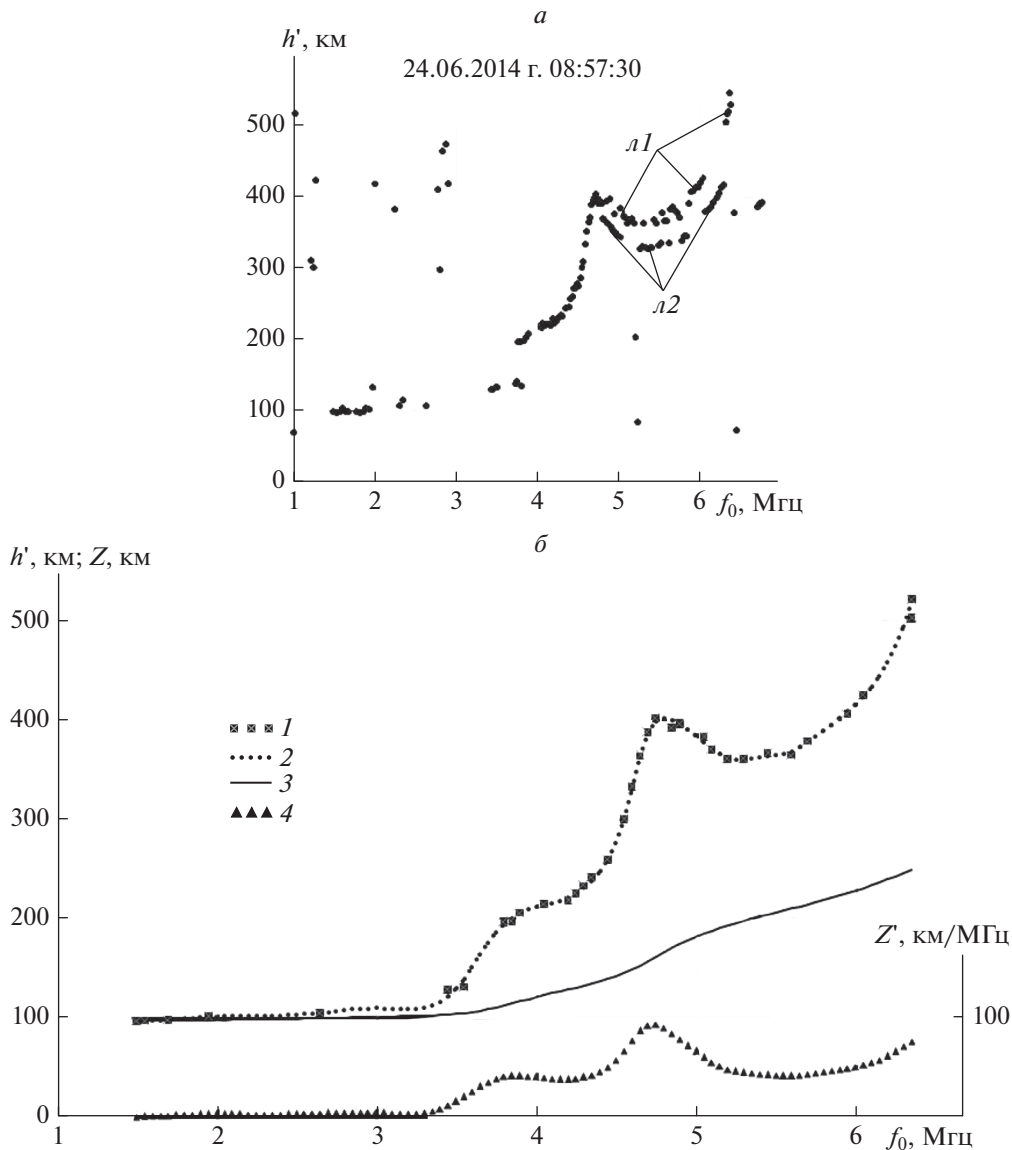


Рис. 4. Методика обработки ионограммы. На панели (а) показана ионограмма, снятая в 08:58:15 UT, 24.06.2014г. после предварительной амплитудной фильтрации, $l1$ – основной след, $l2$ – дополнительный след. На панели (б) залитыми квадратами 1 показаны экспериментальные точки основного следа, выбранные оператором для дальнейшей обработки. Точками 2 показан результат интерполяции выбранных точек с помощью сглаживающих кубических сплайнов. Сплошной линией 3 показан восстановленный профиль $z(f_0)$, а залитыми треугольниками 4 показан график решения обратной задачи $z'(f_0)$.

ного уравнения (6) является дискретная функция $\{z'(f_{0i})\}$, ($i = 1, 2, \dots, 98$), график которой на рис. 4б показан линией 4. Далее с использованием квадратурной формулы Гаусса проводилось численное решение уравнения (4) и в результате получали дискретную функцию $\{z(f_{0i})\}$, ($i = 1, 2, \dots, 98$), – искомый профиль плазменной частоты, график которой показан на рис. 4б линией 3.

Отметим, что число точек L в массивах типа $\{f_j, h'_j\}_Э$ было значительно меньше (примерно в 7 раза) числа зондирующих частот $N = 256$ в рабо-

чем диапазоне частот от 1 до 8 МГц, (см. рис. 2), и это обстоятельство в будущем может быть использовано для сокращения числа рабочих частот и уменьшения времени регистрации ионограммы $T_{И}$ при зондировании ионосферы в спокойных условиях.

С использованием полученной выше правой части $\{f_i, h'_i\}$, ($i = 1, 2, \dots, k$), было проведено численное моделирование обратной задачи для оптимального подбора значения параметра регуляризации β . При этом погрешность оператора за-

давалась величиной $\delta A \sim 10^{-5}$ в соответствии с оценкой применимости ГО-приближения, полученной выше в п. 5, а величина погрешности δy задания правой части уравнения варьировалась от $\delta y \sim 10^{-5}$ до $\delta y \sim 10^{-2}$. В результате расчетов получено, что для хорошей сходимости обратной задачи (6) достаточно положить $\beta \sim 10^{-3}$. Решение обратной задачи z' , представленное на рис. 4б залитыми треугольниками, было получено с использованием следующих значений параметров: $\delta A = 5 \times 10^{-5}$, $\delta y = 4 \times 10^{-5}$, $\beta = 1.4 \times 10^{-3}$.

Результаты численного моделирования обратной задачи, показанные на рис. 5, были получены при задании различных значений погрешности δy правой части уравнения (6), и при этом использовались фиксированные значения параметра $\delta A = 5 \times 10^{-5}$ и параметра регуляризации $\beta = 1.4 \times 10^{-3}$. Решение z' при $\delta y = 4 \times 10^{-5}$, показанное на рис. 5 линией 1, можно считать предельно “точным решением”, так как выяснилось, что дальнейшее уменьшение величины δy не влияло на результат решения. Решение z' при значении $\delta y = 4 \times 10^{-4}$ показано на рис. 5 линией 2, а решение z' при значении $\delta y = 4 \times 10^{-3}$ показано линией 3. Видно, что решение z' при значении $\delta y = 4 \times 10^{-4}$ (линия 2) проходит достаточно близко к решению при $\delta y = 4 \times 10^{-5}$, (линия 1), тогда как решение при $\delta y = 4 \times 10^{-3}$ (линия 3) значительно отличается от линии 1 в окрестности экстремумов функции $z'(f_0)$. Поэтому в дальнейшем при решении обратной задачи использовалось фиксированное значение параметра $\delta y = 4 \times 10^{-4}$, как дающее хорошее приближение к предельно “точному решению”. Кроме того, далее везде при расчетах использовались фиксированные значения параметров $\delta A = 5 \times 10^{-5}$ и $\beta = 1.4 \times 10^{-3}$.

Важным свойством функции $z'(f_0)$ является то, что $z'(f_0) \geq 0$ в области определения, поэтому восстанавливаемый профиль $z(f_0)$ является монотонной функцией. Другим важным свойством функции решения $z'(f_0)$ является то, что ее экстремумы указывают на переходы между слоями E , $F1$ и $F2$ ионосферы. Максимумы $z'(f_0)$ указывают на расположение по оси плазменных частот f_0 максимумов слоев ионосферы, на рис. 5 стрелками a , b и c показаны значения критических частот foE , $foF1$ и $foF2$ соответственно.

Результаты решения обратной задачи для обеих ветвей $l1$ и $l2$ ионограммы, показанной на рис. 4а, показаны на рис. 6. Ионограмма с ветвью $l2$ была обработана в соответствии с описанной выше процедурой решения обратной задачи для $l1$ и был получен профиль плазменной частоты $z(f_0)$ для ветви $l2$. На рисунке 6а сплошной линией 1 показан профиль $z(f_0)$ для ветви $l1$, а точками показан профиль $z(f_0)$ для ветви $l2$. Разность высот

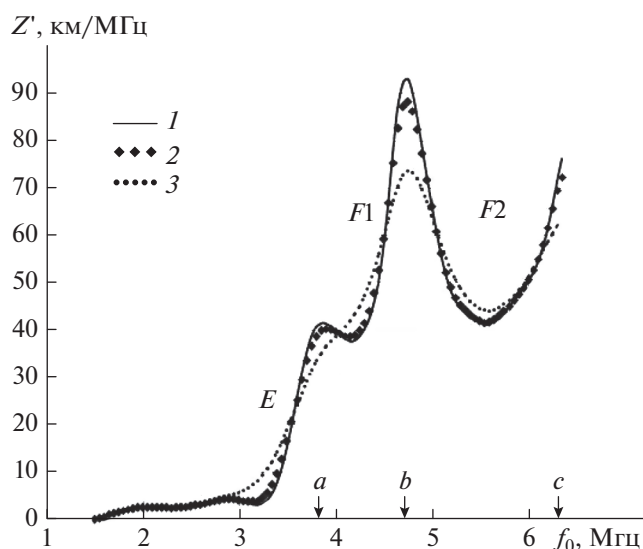


Рис. 5. Зависимость решения $z'(f_0)$ обратной задачи от погрешности δy задания правой части уравнения (6). Сплошная линия 1 – $\delta y = 4 \times 10^{-5}$; заштрихованные ромбы 2 – $\delta y = 4 \times 10^{-4}$; точки – $\delta y = 4 \times 10^{-3}$. На оси частот стрелками a , b и c показаны значения критических частот для слоев E , $F1$ и $F2$ соответственно.

Δz между профилями для ветвей $l1$ и $l2$ показана на рис. 6б залитыми треугольниками и видно, что величина Δz растет с высотой и достигает значения ~ 18 км.

Результаты обработки ионограмм в период возникновения на ионограммах возмущения типа “серп” в слое $F1$ показаны на рис. 7. Невозмущенная ионограмма, показанная на рис. 7 линией 1, является результатом сплайн-интерполяции ионограммы в 08:58:15 UT, которая соответствует рис. 2ж. Линией 2 показана сплайн-модель ионограммы в 08:58:45 UT, которая соответствует рис. 2и, а линией 3 показана сплайн-модель ионограммы в 08:59:45 UT, которая соответствует ионограмме на рис. 2н. На рис. 7 врезкой в увеличенном масштабе показан ход ионограмм в окрестности возмущения типа “серп” и видно, что за интервал времени ~ 60 с действующая высота уменьшилась на величину ~ 40 км.

Результаты решения обратной задачи для ионограмм на рис. 7 показаны на рис. 8 и 9. На рисунке 8 показан результат восстановления высотных профилей плазменной частоты $z(f_0)$: линией 1 показан профиль для исходной ионограммы в 08:58:15 UT; точками 2 показан профиль $z(f_0)$ для ионограммы с “серпом” в 08:58:45 UT; линией 3 показан профиль $z(f_0)$ для ионограммы с “серпом” в 08:59:45 UT. На врезке эти профили показаны крупным планом (место врезки на основном рисунке показано прямоугольником, ограниченным штриховой линией). Видно, что рост плазменной частоты f_0 на некотором локаль-

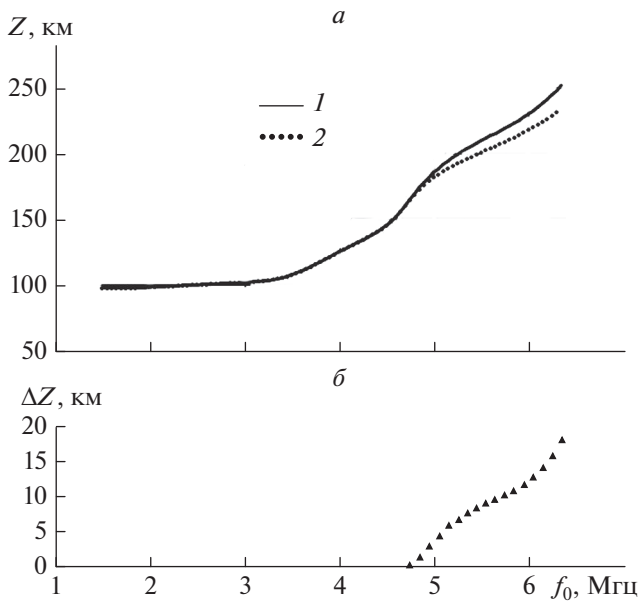


Рис. 6. Сравнение решений обратной задачи для двух ветвей ионограммы, показанных на рис. 4а. На панели *a* – рассчитанные профили плазменной частоты $z(f_0)$: сплошная линия 1 – для основного луча $l1$, точки 2 – для бокового луча $l2$. На нижнем рис. 4б заливными треугольниками показана разность высот $\Delta z(f_0)$ между профилями $z(f_0)$ на рис. 6а.

ном интервале высот в ионосфере приводит к появлению на ионограммах искажений типа “серп” вблизи максимума слоя $F1$.

Более детально развитие локального возмущения на профиле $z(f_0)$ можно увидеть на рис. 9, где представлены результаты решения обратной задачи $z'(f_0)$ для ионограмм с искажениями типа “серп”, показанных выше на рис. 7. На рисунке 9а показаны решения $z'(f_0)$: линией 1 показано решение для ионограммы в 08:58:45 UT, линией 2 – решение для ионограммы в 08:59:45 UT. Видно, что решение $z'(f_0)$ для слоя $F1$ имеет дополнительный локальный максимум между максимумом слоя E и максимумом слоя $F1$. Это свидетельствует о появлении дополнительного “слоя” в слое $F1$ ионосферы, а темп перемещения дополнительного локального максимума вниз говорит о скорости формирования дополнительной ветви в слое $F1$.

На рисунке 9б показаны графики разности Δz между высотными профилем $z(f_0)$ до начала возмущения в 08:58:15 UT и профилями $z(f_0)$ в 08:58:45 UT (линия 1) и в 08:59:45 UT (линия 2). Видно, к моменту 08:58:45 UT локальный рост плазменной частоты f_0 привел к уменьшению высоты профиля максимально на величину $\Delta z \sim 2$ км, а к моменту времени 08:59:45 UT на величину $\Delta z \sim 5$ км. Отсюда можно оценить скорость перемещения вниз локального возмущения как ~ 50 м/с, что может служить оценкой скорости

формирования бокового следа на ионограмме в слое $F1$ ионосферы.

Результаты обработки серии ионограмм за 24.06.2014 г. показаны на рис. 10, на которых двойные ветви ионограммы наблюдались в слое $F1$ ионосферы в период с 09:11:45 UT по 09:14:15 UT. На рис. 10 показаны пять восстановленных профилей электронной концентрации $z(n_e)$, здесь линия 1 соответствует основной ионограмме в 09:12:00 UT, а линии 2, 3, 4 и 5 относятся к ионограммам с дополнительными ветвями, снятым с интервалом 30 с соответственно в 09:12:00 UT, 09:12:30 UT, 09:13:00 UT и в 09:13:30 UT, (фрагменты ионограмм которых показаны на рис. 3, панели б, г, е, з соответственно). Видно, что профили $z(n_e)$ для дополнительных ветвей ионограмм проходят ниже профилей для основной ветви ионограммы, причем смещение вниз профилей $z(n_e)$ для дополнительных ветвей максимально в слое $F1$ и постепенно уменьшается к вершине слоя $F2$.

В увеличенном масштабе ход профилей $z(n_e)$ и функции разности профилей $\Delta z(n_e)$ в слое $F1$ показан на рис. 11. На рис. 11а можно проследить динамику профилей $z(n_e)$ для дополнительных ветвей ионограмм. Видно, что в момент времени 09:12:00 UT профиль $z(n_e)$ для дополнительной ветви (линия 2) проходит ниже профиля для основной ветви (линия 1); через 30 с в 09:12:30 UT профиль $z(n_e)$ для дополнительной ветви (линия 3) проходит ниже линии 2, т.е. происходит опускание профиля $z(n_e)$. Далее еще через 30 с в 09:13:00 UT профиль $z(n_e)$ для дополнительной ветви (линия 4) проходит выше линии 3, что указывает на подъем профиля $z(n_e)$; и, наконец, в 09:13:30 UT профиль $z(n_e)$ для дополнительной ветви (линия 5) почти совпадает с кривой 2 и таким образом завершает цикл опускания и подъема профиля $z(n_e)$.

Наблюдаемую динамику профилей $z(n_e)$ для дополнительных ветвей ионограмм в слое $F1$ ионосферы хорошо иллюстрирует рис. 11б, на котором показаны графики разности высот $\Delta z(n_e)$ между основным профилем $z(n_e)$ в 09:12:00 UT и боковыми профилями $z(n_e)$, относящимися к временам 09:12:00 UT (линия 1), 09:12:30 UT (линия 2), 09:13:00 UT (линия 3) и 09:13:30 UT (линия 4). Видно, что в 09:12:00 UT максимум Δz_m функции $\Delta z(n_e)$ при значении концентрации электронов $n_e \sim 2.65 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ составляет величину $\Delta z_m \sim 14$ км, затем в 09:12:30 UT наблюдаем рост Δz_m до ~ 18 км, далее в 09:13:00 UT происходит уменьшение $\Delta z_m \sim 16$ км и, наконец, в 09:13:30 UT величина $\Delta z_m \sim 14$ км. Подобное поведение $\Delta z(n_e)$ наблюдается в широком интервале значений n_e от $n_e \sim 2.2 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ в слое $F1$ до $n_e \sim 3.9 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ в слое $F2$ ионосферы и это свидетельствует о том, что весь

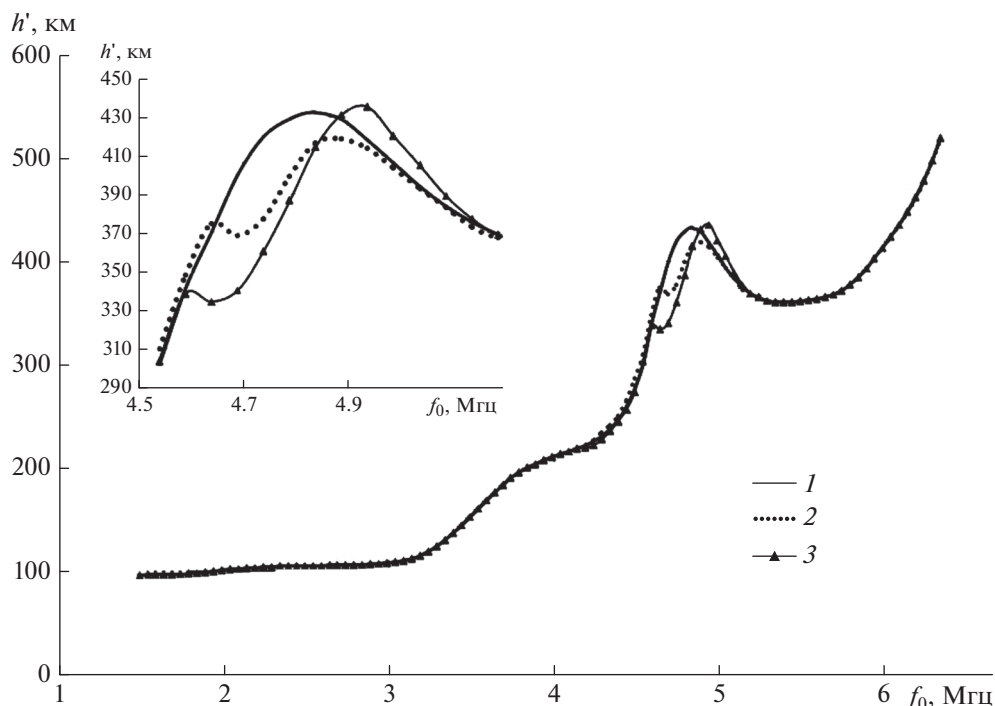


Рис. 7. Появление ионограммы с возмущением типа “серп”: сплошная линия 1 – невозмущенная ионограмма в 08:58:15 UT; точки 2 – ионограмма с “серпом” в 08:58:45 UT; линия с залитыми треугольниками 3 – ионограмма с “серпом” в 08:59:45 UT.

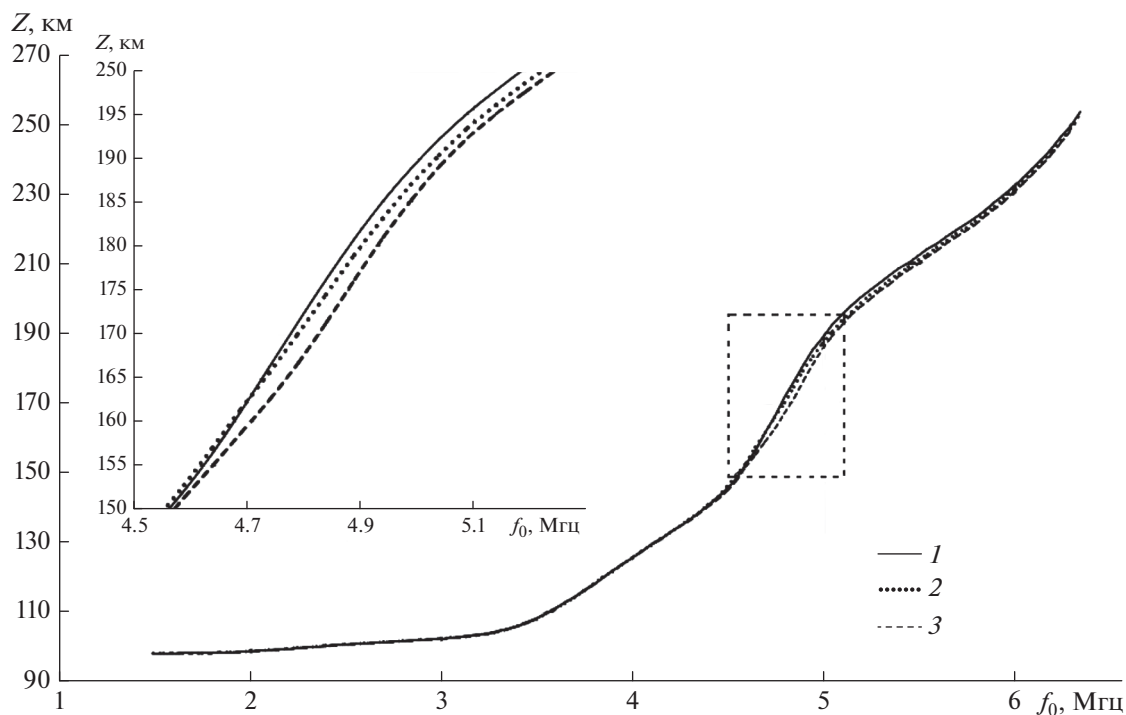


Рис. 8. Восстановленные высотные профили $z(f_0)$: сплошная линия 1 – профиль для исходной ионограммы в 08:58:15 UT; точки 2 – профиль для ионограммы с “серпом” в 08:58:45 UT; штриховая линия 3 – профиль для ионограммы с “серпом” в 08:59:45 UT. На врезке фрагменты этих профилей показаны крупным планом (место врезки на основном рисунке показано прямоугольником, ограниченным штриховой линией).

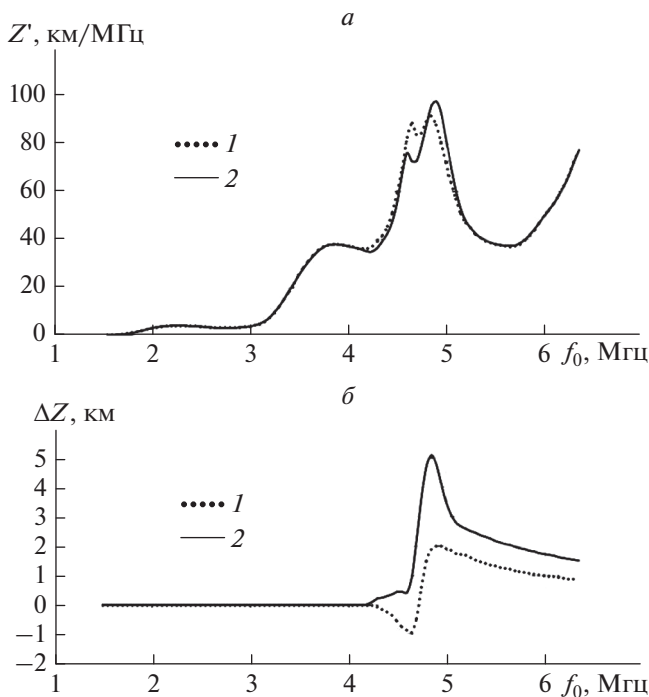


Рис. 9. Особенности решения обратной задачи для ионограмм с “серпом”: на панели *a* точками 1 показано решение $z'(f_0)$ для ионограммы в 08:58:45 UT, сплошной линией 2 – решение $z'(f_0)$ для ионограммы в 08:59:45 UT. На панели *б* показаны графики зависимости разности Δz между высотными профилями $z(f_0)$ до начала возмущения в 08:58:15 UT и профилями $z(f_0)$ в 08:58:45 UT (точки 1) и в 08:59:45 UT (сплошная линия 2).

боковой профиль $z(n_e)$ целиком опускается и возвращается практически на прежний уровень за интервал времени ~ 90 с.

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В литературе вопрос о появлении расслоений на ионограммах ВЗ в различных областях ионосферы в естественных условиях широко исследовался. Наблюдаемые вертикальные расслоения в ионосфере связывают с воздействием различных факторов таких, как атмосферные гравитационные волны [Hines, 1960], внезапные изменения электрического поля [Acasofu et al., 1965] и вариациями магнитного поля Земли [Васильев и др., 1967; Козина, 1989]. В частности, анализ результатов низкоширотных экспериментов на шхуне “Заря” [Васильев и др., 1967], в ходе которых был получен большой объем ионозондовых и магнитометрических данных, показал связь расслоений на ионограммах с изменчивостью S_q -вариаций магнитного поля Земли, а также показана связь расслоений на ионограммах ВЗ с вертикально перемежающимися ионосферными возмущениями (ПИВ). В работе [Козина, 1989] по ионограммам

ВЗ, снятыми в 15-минутном режиме, расслоения типа ПИВ наблюдались в низкочастотной части ионограмм между слоями E и $F1$ и между слоями $F1$ и $F2$, что позволило говорить о связи появления расслоений на ионограммах с S_q -вариациями магнитного поля Земли. В отличие от указанных публикаций, в которых результаты были получены путем регистрации ионограмм в 15-минутном режиме, в нашем случае измерения проводились в 15-секундном режиме, поэтому удалось наблюдать быструю динамику ионограмм и соответствующих профилей ионизации $z(n_e)$. Полученная оценка истинной вертикальной скорости распространения ПИВ ~ 50 м/с несколько выше, чем значения скорости, полученные в работе [Васильев и др., 1967]. Однако полученная здесь оценка представляется более достоверной, так как была получена путем восстановления вертикальных профилей $z(n_e)$.

Представленная на рис. 11 динамика профилей $z(n_e)$ для боковых ветвей ионограммы указывает на циклический характер вертикальных движений одновременно в слоях $F1$ и $F2$ ионосферы. Полученная оценка периода колебания ~ 90 с может быть связана с распространением сверхнизкочастотных электромагнитных колебаний с вертикальным направлением электрической компоненты поля. Отметим, что в период наших наблюдений 24.06.2014 г., судя по данным магнитной обсерватории ИЗМИРАН, не было значительных отклонений от обычных суточных вариаций магнитного поля и индекс $K_p \leq 3$.

Расслоения на ионограммах, показанные выше на рис. 2 и рис. 3, можно также связать с распространением в ионосфере ПИВ между слоями $F1$ и $F2$. В работе [Калихман, 1991] путем численного траекторного моделирования ионограмм вертикального зондирования было показано, что при наличии ПИВ в ионосфере на ионограммах ВЗ могут появляться дополнительные ветви, связанные с отражениями с боковых направлений. В работе [Ларюнин, 2016] с помощью траекторного синтеза для параболической модели слоя $F2$ ионосферы исследовалось влияние горизонтальных градиентов на образование серповидных следов на ионограммах ВЗ. В нашем случае также можно считать, что дополнительные следы на ионограммах (например, дополнительная ветвь (след l_2) на рис. 4а) связаны с нарушением сферически-слоистой структуры ионосферы, приводящим к появлению боковых отражений зондирующих радиоволн от наклонной структуры в ионосфере, смещенной по горизонтали на некоторое расстояние от вертикали над ионозондом. При решении обратной задачи восстановления профилей $z(n_e)$ для каждой ветви ионограммы эти ветви рассматривались как полученные для различных вертикальных профилей электронной

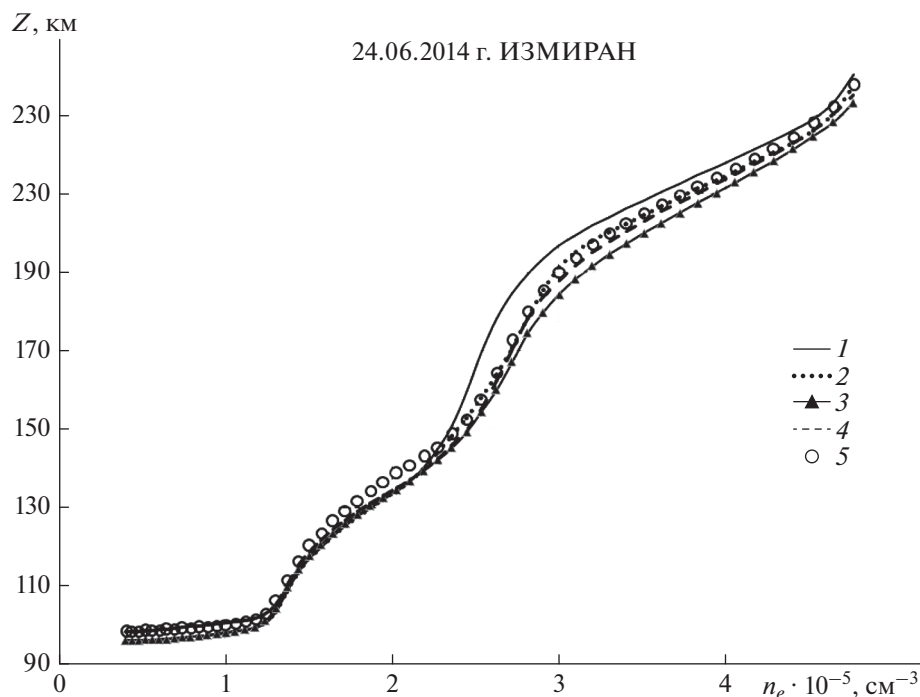


Рис. 10. Динамика высотных профилей электронной концентрации $z(n_e)$: сплошной линией 1 – $z(n_e)$ для основной ветви ионограммы в 09:12:00 UT; для ионограмм с боковыми ветвями в слое F1, полученных последовательно в 09:12:00 UT (точки 2), в 09:12:30 UT (линия с заштрихованными треугольниками 3), в 09:13:00 UT (штриховая линия 4) и в 09:13:30 UT (кружки 5).

концентрации $z(n_e)$ в различных по горизонтали областях ионосферы.

Если полагать, что ионосфера в целом имеет сферически-слоистую структуру с радиусом кривизны $R_{\text{и}} \sim R_3$ (радиус Земли $R_3 = 6400$ км), то можно предположить, что в области формирования бокового отражения $\lambda 2$ (рис. 4) радиус кривизны ионосферы $R_{\text{и}}$ меньше величины R_3 . При отражении зондирующей волны на высотах слоя F2 для бокового отражения можно положить $R_{\text{и}} \ll R_3$. Минимальный горизонтальный разнос ΔD высот отражения зондирующей радиоволны между основным и боковым профилями $z(n_e)$ можно оценить как величину, которая превышает радиусы зон Френеля $R_{\text{ф}} \sim \sqrt{z\lambda_0}$, (λ_0 – длина волны) на соответствующих высотах z для каждого из этих профилей. Если учесть, что высотные профили $z(f_0)$ для основного и дополнительного отражений близки, то для оценок можно использовать, например, профиль $z(f_0)$ для основной ионограммы, тогда получим для разнеса точек отражения $\Delta D > 2R_{\text{ф}}$. Для численных оценок можно обратиться к рисунку 6а, где выберем, например, частоту $f_0 = 6$ МГц, $\lambda_0 = 50$ м, тогда при высоте отражения радиосигнала $z_R = 230$ км получим $\Delta D > 6.8$ км. Отсюда можно получить оценку минимального горизонтального угла наклона ψ изо-

линий равной плазменной частоты, при котором можно наблюдать боковое отражение, как $\psi > 1.7^\circ$. Реальную величину угла ψ можно получить лишь путем измерения углов прихода отраженных от ионосферы зондирующих радиоволн и тогда анализ ионограмм следует проводить с привлечением траекторных расчетов [Zabotin et al., 2006].

Разработанная здесь методика анализа ионограмм вертикального зондирования позволяет восстанавливать высотные профили плазменной частоты для слоистой структуры ионосферы в классе монотонных функций. В обычной ионограмме ВЗ нет информации о межслоевой ионизации в т. н. “долине” между слоями E и F1, поэтому получаемые путем решения обратной задачи высотные профили можно считать эквивалентными профилями. Получаемые профили эквивалентны в том смысле, что они соответствуют реальной ионограмме, которая измеряется с конечной точностью и в ограниченном снизу диапазоне зондирующих частот. Проблема учета влияния нижней ионосферы на решение обратной задачи сейчас решается путем использования известных эмпирических моделей профиля $z(n_e)$ для высот $z \leq 90$ км, что, по сути, является привлечением дополнительной априорной информации о характере решения.

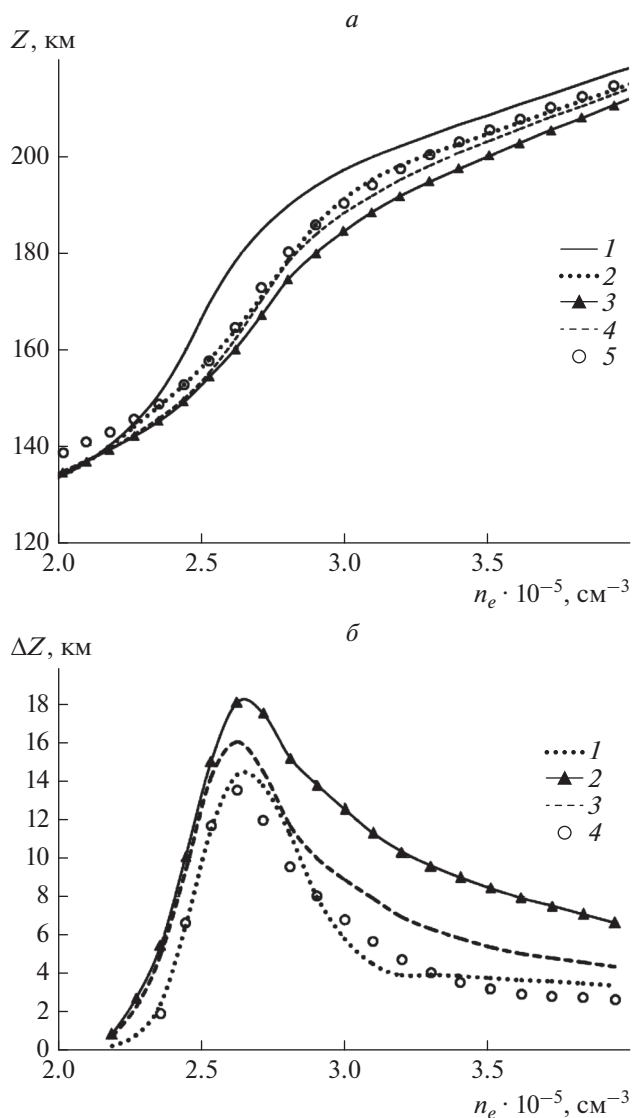


Рис. 11. Динамика высотных профилей $z(n_e)$. На панели (а) крупным планом показаны фрагменты пяти профилей $z(n_e)$ из рис. 10: сплошной линией 1 – $z(n_e)$ для основной ветви ионограммы в 09:12:00 UT; для ионограмм с боковыми ветвями в слое F1, снятых последовательно в 09:12:00 UT (точки 2), в 09:12:30 UT (линия с залитыми треугольниками 3), в 09:13:00 UT (штриховая линия 4) и в 09:13:30 UT (круги 5). На панели (б) показаны графики разности высот $\Delta z(n_e)$ между основным профилем в 09:12:00 UT и боковыми профилями в различные моменты времени: в 09:12:00 UT (точки 1), в 09:12:30 UT (линия с залитыми треугольниками 2), в 09:13:00 UT (штриховая линия 3) и в 09:13:30 UT (круги 4).

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен новый метод быстрой регистрации ионограмм вертикального зондирования, который позволяет значительно повысить информативность ВЗ при экспериментальных исследованиях ионосферы. Созданная в ИЗМИРАН

экспериментальная установка продемонстрировала возможность реализации метода на основе использования промышленной аппаратуры, при этом было получено время регистрации одной ионограммы ~ 2 с. В принципе, при использовании современной цифровой электроники, время регистрации одной ионограммы может быть уменьшено до ~ 0.25 с.

Проведенные эксперименты показали, что новый метод получения ионограмм вместе с регулирующим алгоритмом решения обратной задачи позволяет исследовать быструю динамику высотного профиля электронной концентрации в ионосфере. Получено, что в слабо возмущенной среднеширотной ионосфере могут возникать локальные возмущения электронной концентрации с $\Delta n_e \sim 2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ и которые перемещаются вниз со скоростью ~ 50 м/с. Обнаружено, что в слоях F1 и F2 боковые профили $z(n_e)$ могут совершать циклические вертикальные перемещения с амплитудой $\Delta z \sim 5$ км и периодом ~ 90 с, что может указывать на распространение электромагнитных колебаний в волноводе Земля–ионосфера.

Предложенный метод быстрой регистрации ионограмм может быть применен не только для ВЗ, но и для других известных видов ВЧ-зондирования ионосферы на трассах НЗ и ВНЗ. При внешнем зондировании ионосферы с помощью ИСЗ быстродействующий ионозонд позволит исследовать не только крупномасштабную структуру ионосферы, но также с высоким разрешением наблюдать ионосферные неоднородности с горизонтальными масштабами ~ 10 км. Особый интерес представляет использование быстрого метода зондирования для диагностики искусственных возмущений электронной концентрации, возникающих в результате нагрева ионосферы мощными радиоволнами, что важно для изучения физических механизмов модификации во всей толще ионосферы одновременно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Акчурун А.Д., Юсупов К.М., Шерстюков О.Н., Ильдиряков В.Р. Выделение быстротекущих и мелкомасштабных неоднородностей на одноминутных ионограммах ионозонда Циклон // Гелиогеофизические исследования. Вып. 4. Технологии и результаты зондирования ионосферы и распространения радиоволн. С. 101–110. 2013.
 – Антонова П.А., Иванов-Холодный Г.С., Чертопруд В.Е. Аэрoномия слоя E. Учет вариаций УФ-излучения Солнца и геомагнитных возмущений // М.: Изд. Янус. 168 с. 1996.
 – Афраймович Э.Л., Лесюта О.Г., Первалова Н.П., Пирог О.М., Смирнов В.Ф., Зиндер Э.К., Бондарь Е.Д. Исследование главного ионосферного провала по данным GPS и ионосферных станций в районе Якутска // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 45. № 2. С. 215–220. 2005.

- *Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Первалова Н.П., Ратовский К.Г.* Крупномасштабные вариации аврорального происхождения во время магнитных бурь 29–31 октября 2003 г. и 7–11 ноября 2004 г. по данным сети GPS и ионозондов // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 46. № 5. С. 637–642. 2006.
- *Благовещенская Н.Ф., Благовещенский Д.В., Корниенко В.А., Борисова Т.Д., Москвин И.В., Берникова М.Ю., Янжура А.С.* Ионосферные эффекты в главную фазу магнитной бури 20 ноября 2003 г. в Европейском регионе Арктики // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 45. № 1. С. 64–74. 2005.
- *Боярчук К.А., Иванов-Холодный Г.С., Коломийцев О.П., Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н.* Отклик среднеширотной ионосферы Земли на экстремальные события на Солнце в октябре–ноябре 2003 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 45. № 1. С. 84–91. 2005.
- *Ванштейн Л.А., Зубаков В.Д.* Выделение сигналов на фоне случайных помех // М.: Сов. радио. 447 с. 1960.
- *Васильев Г.В., Гончаров Л.П., Кушнеревский Ю.В., Мигулин В.В., Флигель М.Д.* Спутниковая система импульсного зондирования ионосферы ИС-338 / Аппаратура для исследования внешней ионосферы // М.: ИЗМИРАН. С. 13–29. 1980.
- *Васильев К.Н.* Геомагнитный эффект в вертикальных перемещениях ионизации в области F – ионосферы // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 7. № 3. С. 469–474. 1967.
- *Галкин А.И., Ерофеев Н.М., Казимировский Э.С., Кокауров В.Д.* Ионосферные измерения. М.: Наука. 174 с. 1971.
- *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука. 684 с. 1967.
- *Данилкин Н.П., Мальцева О.А.* Ионосферные радиоволны. Теория, алгоритмы, программы. Ростов-н/Д.: изд-во Рост. ун-та. 176 с. 1977.
- *Иванов-Холодный Г.С., Нусинов А.А.* Образование и динамика дневного среднеширотного слоя E ионосферы / *Тр. Института прикладной геофизики*. Вып. 37. М.: Госкомгидромет. 129 с. 1979.
- *Калихман А.Д.* Моделирование ионограмм среднеширотного F-рассеяния // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 31. № 1. С. 126–132. 1991.
- *Ким В.Ю.* Численное решение обратной задачи многочастотного доплеровского зондирования искусственного возмущения электронной концентрации в ионосфере / *Взаимодействие высокочастотных радиоволн с ионосферой*. М.: ИЗМИРАН. С. 55–64. 1989.
- *Козина П.Е.* Геомагнитный эффект расслоений в E–F области ионосферы / *Ионосферные волновые возмущения*. Алма-Ата: Наука. С. 186–190. 1989.
- *Кольцов В.В., Мирохин А.М., Панова И.Н.* Первичная обработка сигналов в темпе радиозондирования ионосферы / *Цифровые ионозонды и их применение*. М.: ИЗМИРАН. С. 22–29. 1986.
- *Ларюнин О.А.* Численный синтез серпообразных особенностей на ионограммах в рамках модели комбинированного параболического слоя / *Тр. 25 конференции “ВКРР”*. Томск, 4–9 июля 2016 г. Т. 1. С. 185–188. 2016.
- Описание ионозонда DPS-4 // <http://www.digisonde.com/dps-4dmanual.html>
- *Пирог О.М., Полев Н.М., Чистякова Л.В., Благовещенский Д.В.* Ионосферные проявления магнитной бури 15–16 мая 1997 г. в разных долготах северного полушария // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 43. № 1. С. 68–73. 2003.
- *Погода Э.В.* Диагностический ионосферный комплекс “Базис” и его модификации / *Экспериментальные методы исследования ионосферы*. М.: ИЗМИРАН. С. 145–152. 1981.
- Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами. Ред. Авдюшин С.И. / *Тр. Института прикладной геофизики им. акад. Е.К. Фёдорова*. Спецвыпуск 87, посвященный 70-летию Данилкина Н.П. // М.: ИПГ. 210 с. 2008.
- Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами. Изд. 2. Ред. Лапшин В.Б. / *Тр. Института прикладной геофизики им. акад. Е.К. Фёдорова*. Спецвыпуск 91, посвященный 75-летию Данилкина Н.П. // М.: ИПГ. 309 с. 2014.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Ред. Медникова Н.В. Перевод с английского языка // М.: Наука. 155 с. 1977.
- Способ получения ионограмм // Патент на изобретение РФ 2552530. Приоритет 01.08.2013 г. Авт. Ким В.Ю., Полиматиди В.П. Патентообладатель ИЗМИРАН. 2015.
- *Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.* Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука. 198 с. 1983.
- *Шерстюков О.Н., Рябченко Е.Ю.* Синоптические колебания в параметрах среднеширотного спорадического E // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 44. № 5. С. 661–667. 2004.
- *Acasofu S.J., Chapman S., Meng C.-I.* The polar electrojet // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 27. № 11/12. P. 1275–1305. 1965.
- *Akchurin A.D., Sherstyukov O.N., Zykov E.Yu.* Effects of planetary waves in parameters of the midlatitude sporadic E layer // *Geomagn. Aeronomy*. V. 49. № 49. P. 519–524. 2009.
- *Hines O.O.* Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // *Can. J. Phys.* V. 38. № 11. P. 1441–1481. 1960.
- *Haldoupis C., Pancheva D.* Planetary waves and midlatitude sporadic E layers: strong experimental evidence for a close relationship // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A6. 2002. <https://doi.org/10.1029/201JA000212>
- *Lobachevsky L.A., Gruzdev Yu.V., Kim V.Yu. et al.* Observations of ionospheric modification by the Tromsø heating facility with the mobile diagnostic equipment of IZMIRAN // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 54. № 1. P. 75–85. 1992.
- *Wright J.W., Pitteway V.L.V.* Real-time data acquisition and interpretation capabilities of the Dynasonde. 1. Data acquisition and real-time display // *Radio Sci.* V. 14. P. 815–825. 1979a.
- *Wright J.W., Pitteway V.L.V.* Real-time data acquisition and interpretation capabilities of the Dynasonde. 2. Determination of magnetoionic mode and echolocation using a small spaced receiving array // *Radio Sci.* V. 14. P. 827–835. 1979b.
- *Wright J.W., Paul A.K., Pitteway V.L.V.* On the accuracy and interpretation of Dynasonde virtual height measurements // *Radio Sci.* V. 15. P. 617–626. 1980.
- *Zabotin N.A., Wright J.W., Zhabankov G.A.* NeXtYZ: Three-dimensional electron density inversion for dynasonde ionograms // *Radio Sci.* V. 41. RS6S32. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005RS003352>