

ВЫДЕЛЕНИЕ БЫСТРОТЕКУЩИХ И МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ОДНОМИНУТНЫХ ИОНОГРАММАХ ИОНОЗОНДА ЦИКЛОН

А.Д. Акчурин, К.М. Юсупов, О.Н. Шерстюков, В.Р. Ильдиряков

*Казанский Федеральный Университет
Россия, Казань*

На основе примерно трехлетнего опыта работы вертикального зондирования ионосферы в одноминутном режиме съема ионограмм предложен способ компактного представления результатов зондирования за сутки в виде А- и Н-карт. Такие карты позволяют не только получить обычную информацию о регулярных медленных изменениях, но и информацию быстротекущих (с периодами 5-20 мин) и мелкомасштабных вариациях. Учет АЧХ (ВЧХ) слоев на А- и Н-картах позволит поднять чувствительность ионозонда к степени возмущенности $\Delta N/N$ с обычных 10^{-1} до $\sim 5 \cdot 10^{-3}$, что позволяет использовать сеть таких ионозондов в качестве глобального монитора среднеширотных ПИВ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОГРАММА, СВОДНАЯ КАРТИНА СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ, ПИВ, А-КАРТА, Н-КАРТА

ВВЕДЕНИЕ

Вертикальное зондирование, служившее ранее основным источником морфологического описания ионосферы, сформировало как эмпирические модели регулярной ионосферы (например [1]), так выделило основные формы нерегулярных и неоднородных образований, наблюдаемых на ионограммах. Ручная обработка ионограмм предопределила в прошлом основную 15-минутную периодичность в работе сетевых ионозондов, которой оказалось вполне достаточно для диагностики текущего состояния ионосферы и анализа ее регулярных (суточных, сезонных, годовых) вариаций, но недостаточной для прослеживания многих небольших неоднородностей. Осознавая необходимость исследования неоднородной структуры, различные научные группы разрабатывали исследовательские варианты ионозондов, которые имели повышенное временное и/или угловое разрешения [2-4] и способные выполнять сложную спектральную и корреляционную обработку для определения размеров неоднородностей и параметров их движения. Такие сложные режимы зондирования требовали более напряженной работы аппаратуры и персонала, поэтому выполнялись лишь в рамках не очень продолжительных измерительных кампаний. В настоящее время в связи с появле-

нием ионозондов, вобравших в себя современные схемные решения в цифровом синтезе сигналов при излучении и цифровую предобработку при приеме отраженного сигнала, и доступностью высокопроизводительных компьютеров становится возможной постоянная работа ионозондов в исследовательском режиме. В таких условиях на первый план выходит описание задач, которые могут и должны решать ионозонды, работая в исследовательском режиме. Данная статья посвящена выбору задач исследования и параметров зондирования и форм его представления в условиях одноточечных измерений и минимальных возможностей в техническом обслуживании ионозонда на основании почти трехлетнего опыта, полученного при одноминутном зондировании ионосферы.

РЕЖИМЫ ЗОНДИРОВАНИЯ

Имеющаяся в нашем распоряжении одна скрещенная дельта антенна не позволяет реализовать точную пеленгацию отраженных сигналов, поэтому основным каналом увеличения информативности является учащение работы до одной ионограммы в минуту. Такая скорость регистрации, с одной стороны, позволяет отслеживать самые короткоживущие перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), по

нашим наблюдениям ~ 5 мин, а, с другой, заметить скоротечные явления, таких как появление в зимнее время отражений Z моды (точнее O-Z-O моды [5]), Es-слоев и т.д. Это повышенное временное разрешение при регистрации может дополняться разработанной нами методикой определения действующей высоты с повышенной точностью (~300 м) на основе максимального правдоподобия в спектральной области (ММПСО) при обработке принятых данных [6, 7]. Отсутствие поляризационного разделения мод при приеме позволяет в случае наложения мод различать высоты отражения с высокой точностью (для интенсивных Es-слоев ~250 м) по параметрам интерференционных биений. Такое же высотное разрешение можно получить также на основе анализа фазового пути [2, 4]. Все перечисленные методы работают лишь для недиффузных отражений (а для ММПСО необходимо еще, чтобы отраженный сигнал был записан без ограничения амплитуды), поэтому перед их применением необходимо выделить подходящий фрагмент данных. Учитывая, что за сутки снимается 1440 ионограмм, будет крайне непродуктивно просматривать их все (тем более за более продолжительный период – месяц, год и т.д.). Более рациональным будет просмотр лишь специальной *сводной* (двумерной) *картины состояния ионосферы за сутки*, созданной для визуализации суточных вариаций и выявления временных интервалов существования интересных явлений за счет понижения размерности исходного массива ионограмм на единицу. Непосредственный вид сводной картины будет зависеть от того, какая координата (частота, высота, амплитуда) будет исключена (естественно, ось времени остается во всех сводных картинах) и каким способом.

Построение сводной картины в качестве первого шага требует установления координат расположения точек следов всех слоев на всех ионограммах: частоты, высоты, амплитуды (фазы). А это требует автоматической интерпретации всех следов, что не всегда можно выполнить, например, в случаях рассеяния, множественного расщепления следов и т.д. Поэтому в нашей обработке пока применяется «слепой» подход, когда в заданном высотном (частотном) интервале находится максимальная амплитуда с координатами ее расположения без учета местоположения максимумов в соседних интервалах. Такой подход, конечно, не является оптимальным, но хоть как-то позволяет заметить случаи множественного отражения (конечно, если их амплитуды будут

максимальными хотя бы на короткий период). Из-за наличия шума при слепом подходе важное имеет направление поиска (например, вдоль оси частот или оси высот), при котором найденный максимум наиболее часто будет относиться к отраженному сигналу, а не шуму. Из-за расположения сосредоточенных помех вдоль оси высот наиболее безошибочным является поиск максимумов вдоль этой оси (на каждой частоте). При таком поиске ошибки будут, в основном, на частотах помехи, тогда как при поиске максимумов вдоль оси частот (на каждой высоте) «соревноваться» в отборе будут, в основном, сосредоточенные помехи, затеняя отраженные сигналы. Все это приводит к тому, при составлении сводной картины из максимумов более предпочтительным является построение ее в координатных осях частота-время (подробности ниже). Для выработки представления в координатных осях высота-время из-за сильного влияния сосредоточенных помех используют не максимумы, а суммы амплитуд вдоль оси частот (часто называемых гистограммами). В данной статье мы будем придерживаться такого подхода. Сначала рассмотрим сводные картины в координатных осях частота-время на основе максимумов, а затем в координатных осях высота-время на основе сумм амплитуд вдоль частотной оси.

Сводная картина может быть построена на основе амплитуды отраженного сигнала (с исключением высоты), характеризуя отражательную способность (амплитудно-частотную зависимость) ионосферы, и на основе высоты отражения (с исключением амплитуды), характеризуя высотно-частотную дисперсию, или на основе комбинации двух подходов. Первое представление будет кратко называться *A-картой*, а второе *H-картой*.

ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СУТОЧНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (А- И H-КАРТЫ)

Для выявления структурных особенностей ионосферы сводная (за сутки) картина состояния ионосферы строилась на основе частотной зависимости амплитуды отраженного сигнала (раздельно для E и F слоев). Высотная зависимость удалялась за счет того, что в заданном высотном интервале на одной частоте бралась только амплитуда одного максимума (с потерей его высоты). Для упрощения обработки при составлении амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) выбранного слоя не делалось никаких проверок, относится ли найденное

максимальное значение в заданном высотном интервале к максимуму отраженного сигнала или к шуму. В настоящей обработке не различалась также принадлежность отражений к определенной магнитоионной моде. Полученная в такой обработке АЧХ слоя будет иметь смешанный состав: часть отражений будут принадлежать О-моде, часть – Х и часть – их наложению. Сводную картину состояния ионосферы на основе совместного отображения таких АЧХ слоев (рис.1 б, в), показанную на рис. 2а и 3а в единой цветовой шкале амплитуд, мы коротко назвали А-картой. Так как в первичной АЧХ слоев остаются значения шумового сигнала, сохраняющие во времени свою частоту (это, в основном, сосредоточенные помехи), то на А-карте они выглядят как горизонтальные линии или полосы. Для удобства представления отдельные АЧХ слоев Е и Es (так же как и F1, F2) не выделялись из их совместной первичной АЧХ.

А- и Н-карты Е слоя в координатных осях частота-время

Наш первоначальный интерес к А-карте связан с изучаемыми нами интерференционными биениями на следах слоя Es [8] (см. рис. 1 а-в; рис. 2 а, выделенная область 1). А-карта (для высот Е области) позволяет легко обнаружить появление биений на следах и изучить их свойства (частотные границы ($f_{\min b}Es$ и $f_{\max b}Es$) и времена появлений). Но кроме них по А-карте (см. рис. 2 а) можно легко наблюдать появление отражений необыкновенной компоненты. В среднем, для малоинтенсивных Es-слоев (у ко-

торых разность $foEs - foE$ не превышает половины гирочастоты f_H) минимальная частота необыкновенной компоненты $f_{\min x}$ следует за критической частотой Е слоя foE примерно на мегагерцовом удалении. На А-карте также легко выделять периоды Es-рассеяния (диффузного отражения от Es-слоя). Для малоинтенсивных Es-слоев эти периоды заметны как хаотические вариации (рис. 2 а, прямоугольник 10-11 ч и 3-4 МГц), для интенсивных Es-слоев (у которых разность $foEs - foE$ превышает гирочастоту f_H) – как разрушение устойчивой интерференционной картины (рис. 2 а, выделенная область 2). Интересно, что по нашим наблюдениям отражения от Е-слоя большую часть времени диффузные.

К достоинствам А-карты можно отнести легкость выделения (как ручного, так и автоматического) предельных частот слоя Es ($foEs$ и $fxEs$) по характерному спаду амплитуды отражения. Некоторые сложности имеются в определении $foEs$ при наложении следов интенсивных Es-слоев различных магнитоионных мод. К недостаткам А-карты можно отнести нечеткость определения критической частоты Е-слоя foE из-за достаточного протяженного промежутка с большим поглощением около foE , с одной стороны, и возможного появления экранирующего Es-слоя типа 'I' (рис. 2 а, прямоугольник с границами 6-7 ч и 2-3 МГц), с другой.

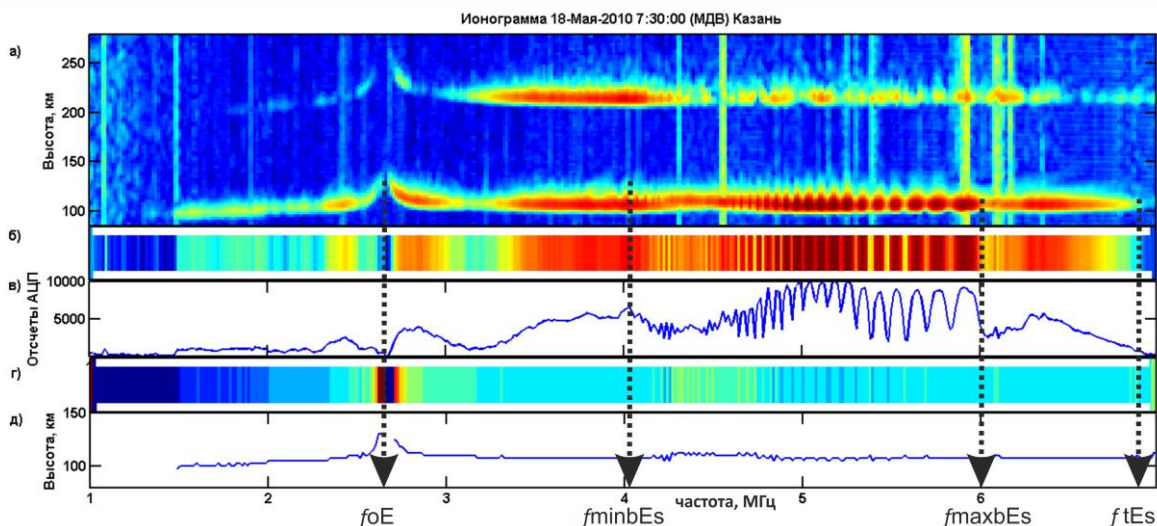


Рис.1. (а) Фрагмент ионограммы с интерференционными биениями на следе слоя Es; (б), (в) совместная АЧХ слоев Е и Es (амплитуда отражений первой кратности) в цветовой шкале и в форме графика соответственно; (г), (д) совместная ВЧХ слоев Е и Es (высота отражений первой кратности) в цветовой шкале и в форме графика соответственно

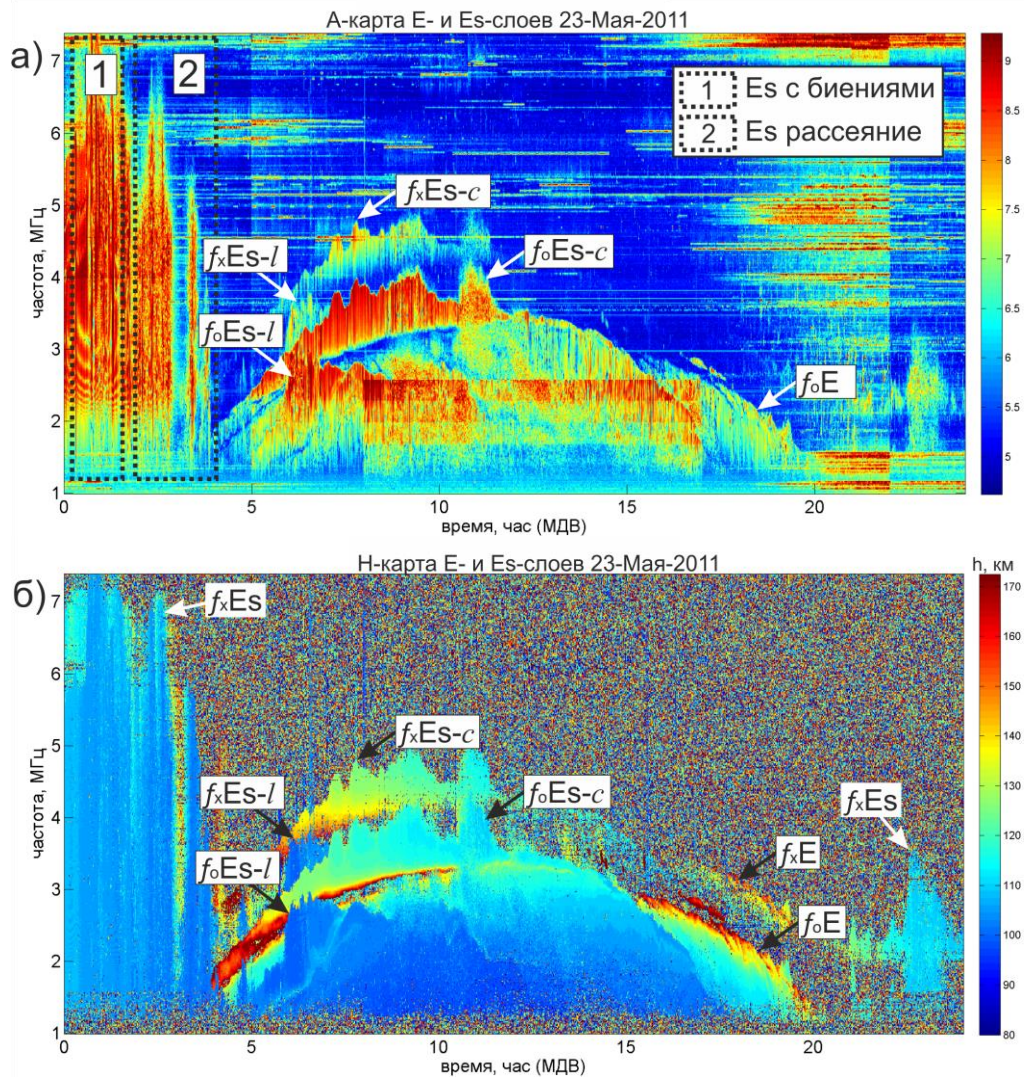


Рис.2. Сводная картина состояния E-области ионосферы за 23 мая 2011: (а) А-карта (собранный из АЧХ в форме, показанной на рис. 1 б); (б) H-карта (собранный из ВЧХ в форме, показанной на рис. 1 г). Резкие изменения в цветовой амплитуде в 5 утра и 10 вечера связаны с работой аттенюатора, усиливающего ослабление в ночное время на 10 дБ. Для увеличения отражений от слоя E аттенюатор дополнительно снижает ослабление на 10 дБ с 8 утра до 5 вечера в частотном диапазоне 1-2,7 МГц.

Указанные недостатки А-карты можно компенсировать, если переключиться на работу с H-картой (рис. 2б, 3б), составленной из высокочастотных характеристик (ВЧХ) следов (рис. 1 г, д). Вследствие сильной частотной дисперсии в области критических частот след любого ионосферного слоя имеет сильную задержку по времени (по высоте), поэтому область критических частот любого слоя на H-карте окрасится в цвета верхней высоты рога (каспа) слоя (для E-слоя эта высота ~ 150 км, а для F-слоя эта высота ~ 550 км; на представленных H-картах им соответствует красный цвет). Отсутствие полосы красного цвета в некоторые интервалы времени на H-карте E-слоя (рис. 2б) означает, что слой не имеет рога на конце слоя, и значит наблюдаемый слой, скорее всего, Es-слой типа

'I'. Таким образом, H-карты позволяют не только ярко выделять область критических частот, но и идентифицировать некоторые типы слоя Es. Предельные частоты Es-слоя $f_o Es$ и $f_x Es$ видны на H-карте (правда, не так ярко как на А-карте) как переход с «ровной площадки в шум», так как Es-слой на своем высокочастотном конце практически не имеет высотных вариаций. К недостаткам H-карты можно отнести ее слабую чувствительность к высотным вариациям слоев, связанным с ПИВ, которые на порядок слабее высотного размаха рога на конце E слоя (или в начале Es слоя).

А- и H-карты F слоя в координатных осях частота-время

Основное функциональное назначение А- и H-карт F слоя такое же как для E слоя: выделе-

ние (как визуальное, так и автоматическое) суточных вариаций критической частоты слоя F. Из-за отсутствия на нашем ионозонде поляри-

зационного разделения при приеме на А-карте легко выделяется лишь критическая частота

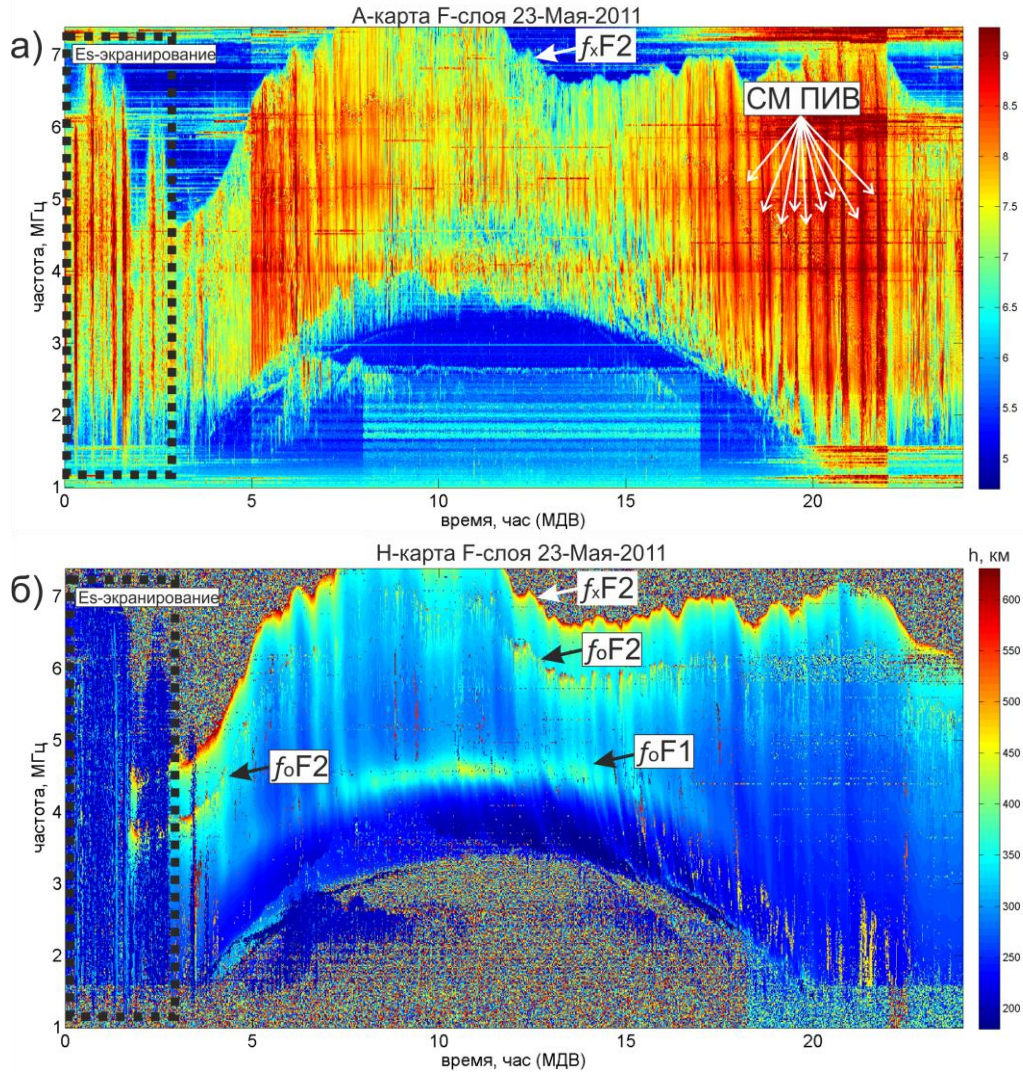


Рис.3. Сводная картина состояния F-области ионосферы за 23 мая 2011: (а) А-карта (собранная из АЧХ следов F-слоя); (б) H-карта (собранная из ВЧХ следов F-слоя). См. также замечания к рис. 2 о режиме работы аттенюатора приемника.

необыкновенной компоненты $f_x F2$ (см. рис.3). Частота $f_o F2$ на А-карте (H-карте) слабо просматривается из-за сильного ослабления отражения обыкновенной моды в области критических частот и особенностей построения из найденных максимумов первичных АЧХ (ВЧХ) следов, но ее легко получить из $f_x F2$ удалением половины гирочастоты. Критическая частота $f_x F2$ легче наблюдается на H-карте за счет красной окантовки (соответствующей большим высотам в области критических частот). Эта красная полоса по сути является f -графиком. Напомним, что приведенные карты построены только по максимумам, и это значит, что при минутном зондировании для по-

строения f -графика нет необходимости выполнять полную интерпретацию следов, достаточно только определить максимум на каждой частоте в заданном высотном интервале (затруднения возникают лишь в случае F-рассеяния).

Если не рассматривать случаи F-рассеяния, АЧХ следов F-слоя значительно отличаются от АЧХ следов малоинтенсивного Es-слоя своей неравномерностью. Эта неравномерность не связана с наложением эхо-сигналов различных мод как у следов интенсивного Es, так как участки перекрытия O- и X-следов занимают обычно (из-за расслоения F-слоя на F1 и F2) лишь небольшую часть полного следа F-слоя,

поэтому А-карта как инструмент выделения интерференционных биений на F-следах не столь эффективна. Наблюдаемая неравномерность АЧХ F-слоя (и ее значительная изменчивость от зондирования к зондированию) связана, по-видимому, со значительной неперпендикулярностью и фокусировкой отражений от F-слоя [9, 10]. Считается, что данные эффекты явно просматриваются на ионограммах, когда ПИВ с достаточной степенью возмущения ($\Delta N/N > 10\%$) перемещается вдоль основного следа как отдельный след в форме серпика или клюва (см рис. 4) [11]. В носовой части клюва (как, например, на частоте $\sim 4,3$ МГц) амплитуда примерно в 2-3 раза, чем остальных частях следа. Такое увеличение амплитуды принято связывать с фокусировкой при отражении от куполоподобной поверхности подходящих размеров [9, 10]. Показанный на рис. 4 случай интенсивных ПИВ, когда фокусировка наблюдается одновременно с видимым искажением основного F-следа, не является самым частым. Наиболее часто повторяющимся случаем на ионограммах является случай «простой» фокусировки (участок F-следа с повышенной амплитудой) без видимых искажений F-следа (при высотном разрешении хуже 1 км). Такое поведение АЧХ следа мы также

связываем с отражением от куполоподобной поверхности, но с меньшей степенью возмущенности $\Delta N/N < 10\%$. Для краткости такие события мы будем называть фокусирующим ПИВ. Фокусирующее ПИВ обычно перемещается по основному F-следу как и клювоподобное ПИВ: от высоких частот и высот к низким. В силу значительной амплитудной изменчивости F-следа из-за клювоподобных и фокусирующих ПИВ их поиск легко осуществить с помощью А-карты. На рис.3 приведена такая карта, где ПИВ видны в виде почти вертикальных темно-красных полос, соответствующих максимальным амплитудам. Заметить быстрое перемещение ПИВ вниз по частоте (то есть то, что темно-красные полосы часто немного наклонены от вертикали) не позволяет ограниченный горизонтальный размер рисунка, а быстрое перемещение ПИВ вниз по высоте на Н-карте не позволяют слабые высотные вариации, вносимые фокусирующими ПИВ.

Как показывает А-карта за 23 мая, ПИВ (рис. 3 а) почти постоянно присутствуют в суточных вариациях ионосферы и наиболее четко видны в вечернее и утреннее время (в ночное время 0-3 ч существовал экранирующий E-слой, вытеснив своим двукратным отражением

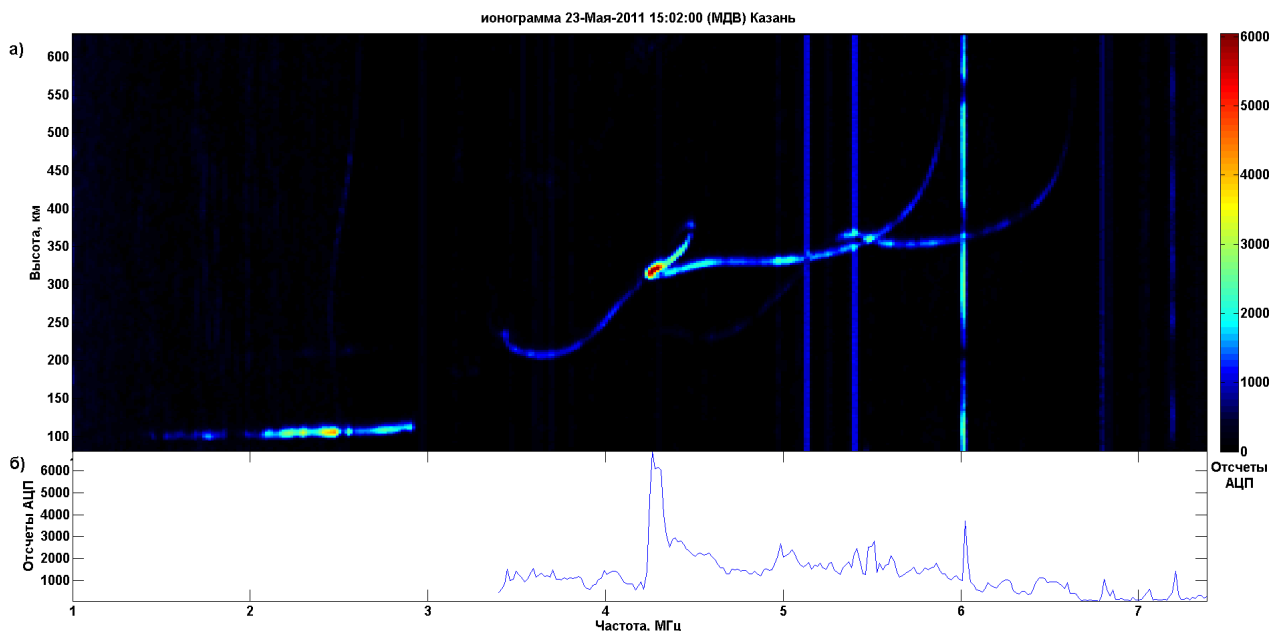


Рис.4. (а) Клювоподобное ПИВ на F-следе с увеличенной амплитудой в носовой части. (б) АЧХ комбинированного следа F-слоя, собранная из максимумов на высотах F-области для ионограммы на рис 4 а (по одному на каждой частоте), не различая поляризационной принадлежности.

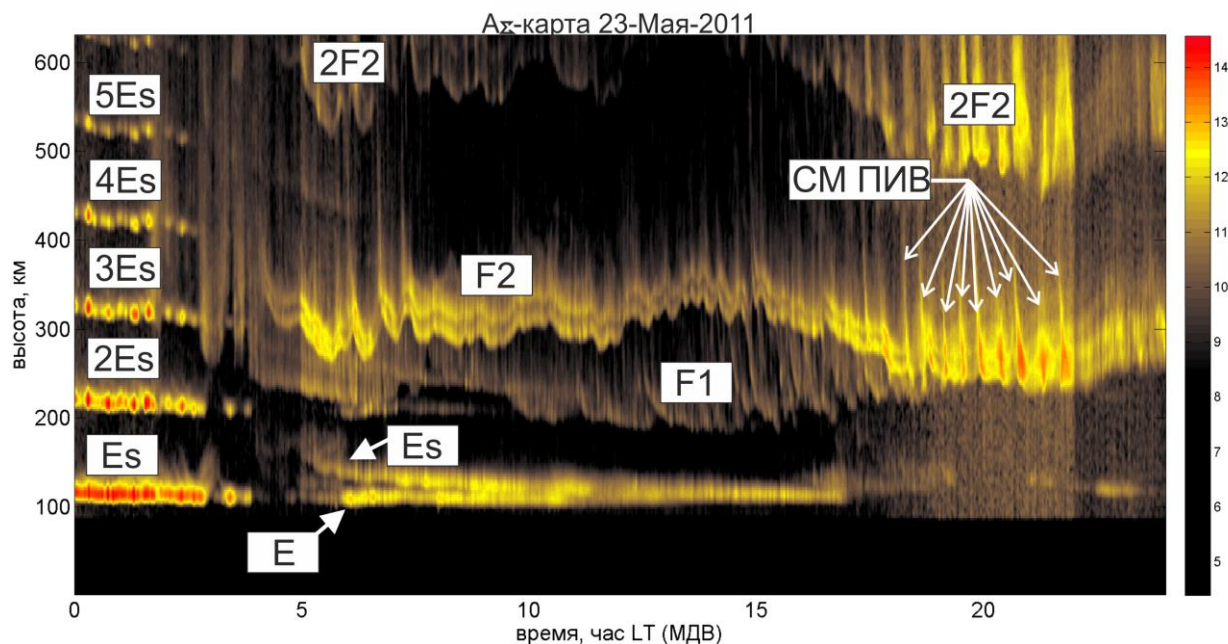


Рис. 5. Картина суточных высотных вариаций отражений от ионосферы с учетом их амплитуды и частотной протяженности в координатных осях высота-время.

отражения F-слоя, что не позволяет посмотреть ночную динамику ПИВ). Кажущееся снижение активности ПИВ на А-карте в дневное время связано с меньшей амплитудой отражений. Общий характер появляемости ПИВ квазипериодический с изменяющимся периодом в интервале 5-30 мин. Такой же периодический характер носят амплитудные вариации ночных Es-следов (в то время, когда они экранируют F-слой в 0-3 МДВ на рис. 3 а), указывая на возможную общность колебаний в ионосфере.

А₂-карта ионосферы в координатных осях высота-время

Еще более четкую периодическую картину усиленных (за счет фокусировки) отражений амплитуды можно наблюдать на сводной картине, собранной из сумм амплитуд отражений вдоль частотной оси на каждой высоте, или на А₂-карте (см. рис. 5). Схожую обработку ионограмм, но для других целей, ранее применяли многие исследователи. Так в [12] для выделения медленных суточных (полусуточных) высотных вариаций стремились по данным ВЗ получить представление, максимально близкое к RTI-представлению (range-time-intensity дальность-время-интенсивность) одночастотного радара, работающего на частотах выше критической. Свое представление авторы назвали НТИ plot (высота-время-интенсивность), где интенсивность – сумма амплитуд (мощностей) отражений на небольших частотных участках (не менее 4-х), удаленных от критических частот (для уменьшения расхождения между действующими и истинными высотами). Удалив

при такой обработке ПИВ, расположенные около критических частот, авторы НТИ-карт еще больше ослабили все ПИВ, применив дополнительное межсуточное усреднение. Таким образом, НТИ-карты полностью не пригодны для выделения короткоживущих ПИВ.

Еще один вариант сводной картины в осях дальность-время (range-time plots) можно найти в [13]. В ней на каждой высоте суммируется число точек ионосферного следа. Такое представление также не подходит для выделения ПИВ, так как исключен важный признак фокусировки – амплитуда.

Наша А₂-карта отличается от всех ранее используемых НТИ (RTI) карт своим предназначением – выделять (подчеркивать) короткопериодные высотные и амплитудные вариации. Для этого на каждой высоте выполняется суммирование амплитуд зарегистрированных сигналов и не делается никаких попыток по удалению сигналов близких к критическим частотам. Оба эти условия позволяют ясно наблюдать короткопериодные ПИВ по вытянутым вверх высотным вариациям (рис.5), где действующая высота сильно отклоняется от истинной, и по амплитудным усилениям, наблюдаемым по окрашиванию в красный цвет. В таком представлении видно, что в дневное время ПИВ появляются не реже, чем вечером и ночью. Днем период повторения ПИВ укладывается в интервал 5-20 минут, а вечером к 20-30 минут. Возможно низкая частота съема ионограмм (с периодом 5 минут и более) не позволила ранее [12, 13] увидеть такие колебания.

НЕОДНОРОДНОСТИ, ПИВ И ИХ НАБЛЮДАЕМОСТЬ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ

Представленные на картах свидетельства о постоянном присутствии в ионосфере неоднородной структуры не являются неожиданными. Разнообразные методы зондирования ионосферы, ранее позволили установить, что ПИВ представляют не эпизодическое локальное явление, а вполне регулярное явление, наблюдаемое на всех широтах и долготах. Наиболее интенсивные неоднородности образуются в экваториальных и авроральных широтах и их появление и интенсивность находятся в сильной зависимости от поведения местных электроджетов. В средних широтах интенсивность неоднородностей значительно меньше и для их наблюдения необходимо применять наиболее высокочувствительные методы.

Среди методов радиозондирования самыми чувствительными к отклонениям электронной концентрации ΔN_e от фона являются когерентные (фазовые, интерференционные) методы. При простом одноточечном приеме обычно регистрируется фазовый путь и/или доплеровская частота, а при частотно-пространственно-разнесенном приеме (с использованием цифровой обработки или наличия фазовой антенной решетки/линейки (ФАР)) к указанным параметрам добавляется регистрация углов прихода с 1-5° разрешением. Так по оценкам [9] такие методы имеют чувствительность $\Delta N_e/N_e = 10^{-4}$ - 10^{-2} . При горизонтальном движении синусоидальных неоднородностей такой степени возмущенности $\Delta N_e/N_e$ вариации фазового пути должны регистрироваться в диапазоне 30-3000 м [9].

Аналоговые ионозонды (на которых проделаны достаточно продолжительные наблюдения ПИВ в 50-80 гг.) с регистрацией группового пути имеют чувствительность $\Delta N_e/N_e = 0,1$ - $0,3$ [9], что примерно соответствует вариациям действующих высот 10-30 км. Современные цифровые сетевые ионозонды в своем обычном режиме работы (когда периодичность снятия ионограмм ≥ 5 мин, и АЧХ отраженного сигнала не анализируется) при выделении ПИВ опираются на высотные вариации в таком же интервале 10-30 км (обычно такой анализ включает также конвертирование ионограмм в $N_e(h)$ -профиль). В исследовательском режиме лучшие цифровые ионозонды могут регистрировать высотные вариации с точностью ~ 250 м (что эквивалентно $\Delta N_e/N_e =$

10^{-3} - 10^{-2}), однако периоды работы в таком режиме относительно коротки.

Радары некогерентного рассеяния имеют, в среднем, неплохую чувствительность к неоднородностям $\Delta N_e/N_e = 10^{-2}$ [9], при этом высота пика регистрируется с точностью 600 м (EISCAT). Наивысшая чувствительность ($\Delta N_e/N_e = 10^{-3}$) и дальностное разрешение (150 м) среди всех НР радаров имеет радар в Аресибо [14]. С помощью такого радара имеется возможность детально исследовать горизонтальную структуру, так как поперечный размер его антенного луча на высоте 100 км равен ~ 300 м [14], но такие измерения носят эпизодический характер.

Относительно невысокую чувствительность ($\Delta N_e/N_e = 0.1$), близкую к сетевым ионозондам, имеют КВ-УКВ радары обратного рассеяния (дальностное разрешение MU-радаров 20 км [15], SuperDARN-радаров 15-30 км [16]), правда, просматриваемый ими сектор имеет большие пространственные размеры $\sim 50^\circ$ по азимуту и до ~ 3000 км по дальности. Отметим, что последующие усовершенствования MU-радаров позволяют ему реализовывать режим повышенного разрешения 150/600 м [18].

Характерной особенностью рассмотренных методов является то, что если используемая установка имеет чувствительность не хуже $\Delta N_e/N_e = 10^{-2}$, то она постоянно регистрирует колебания с периодом 5-20 мин. Более грубые установки регистрируют лишь колебания с периодом более 20 мин.

Наибольшее пространственное покрытие имеет зондирование со спутников, однако самый массовый его сегмент (использование сигналов систем глобального позиционирования для выделения ионосферной задержки) имеет невысокую чувствительность к степени возмущенности электронной концентрации. Об этом, в частности, говорит то, что в спокойных геомагнитных условиях среднее значение амплитуды вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в диапазоне периодов 5-20 мин составляет 0,001-0,005 TECU. Для обозначения таких возмущений ПЭС некоторыми исследователями используется термин перемещающиеся волновые пакеты (ПВП) [17]. Из-за малости амплитуды ПВП выделяется довольно редко (наблюдаются не более чем на 0,1% рядов ПЭС длительностью порядка 1 ч). Значительно чаще наблюдаются (на 1-2% рядов ПЭС) другие ионосферные возмущения в форме одиночных аperiodических отрицательных возмущений ПЭС длительностью 5-10 мин – изолированные ионосферные неоднородности

(ИИН). Амплитуда одиночных выбросов ИИН значительно больше амплитуды колебаний ПВП ($\sim 0,35$ ТЕСУ), за исключением времени геомагнитных возмущений, когда амплитуда ПВП может возрасти на порядок до 0,1 ТЕСУ [17].

Указанные выше методы различаются и в чувствительности, и в просматриваемом объеме ионосферы, что приводит не только к тому, что регистрируемые ими параметры неоднородности (например, период повторения) имеют различные значения, но и к тому, что для описания неоднородностей используются различные названия: ПИВ, язык ионизации, ПВВ, ИИН, очаги рассеяния с квазипериодическим эхо (QPE) [18] и т.д. Дополнительную сложность в интерпретации неоднородностей создает разнообразие геометрических форм неоднородностей.

Если попытаться единообразно интерпретировать результаты зондирования ионосферы (самыми недорогими) средствами, а именно, на основе обработки сигналов GPS и использования ионозонда, включенного в учащенный режим с регистрацией и обработкой АЧХ, то можно заключить, что клювоподобным ПИВ соответствуют ИИН, а фокусирующим ПИВ – ПВП. Правда, из-за меньшей чувствительности сигналов GPS только редкие фокусирующие ПИВ обнаруживаются как ПВП. Недорогим, и достаточно чувствительным является также доплеровский метод (при частотно-пространственно-разнесенном приеме) и может быть использован при выделении фокусирующих ПИВ, однако он более сложен в интерпретации и требует значительно более сложной обработки сигнала (чем в ионозондах).

Связка из всех указанных инструментов: ионозондов (работающих в одноминутном режиме), GPS-приемников, частотно-пространственно-разнесенных приемников позволит построить недорогой глобальный монитор ПИВ, и, в первую очередь, тех, чьи периоды находятся в интервале 5-20 мин. Такие ПИВ относят [17] к возмущениям промежуточного (ПМ) с размерами 1-30 км и среднего (СМ) с размерами 50 до 300 км масштабов. Работа такого глобального монитора поможет разрешить проблему происхождения и существования таких ПМ и СМ ПИВ на основе изучения направления их распространения и их характерной формы.

В настоящий момент установлено, что пространственные размеры ПМ и СМ ПИВ часто

вытянуты (вдоль своего фронта) в направлении перпендикулярном их движению и степень вытянутости снижается с уменьшением интенсивности неоднородности. Так у ИИН наблюдается значительная вытянутость по долготе (горизонтальное сечение ИИН представляет собой эллипс с отношением малой и большой осей от 6 до 10), у ПВП фронтальные размеры и протяженность в глубину составляют 1000 и 300-500 км соответственно [17]. Учитывая, что в цуге ПВП 4-6 колебаний, то соотношение длины к ширине у одного колебания примерно такое же, как у ИИН. Для более слабых неоднородностей, регистрируемых при частотно-пространственно-разнесенном приеме, отношение осей эллипса изменяется от 1 до значений порядка 3-3,5 [9].

В отношении направления распространения и скоростей не найдено четких доминирующих направлений (имеется тенденция движения к экватору) и значений скорости, что не позволяет определить происхождение возмущений и физические механизмы переноса. Имеются также свидетельства того, что ПМ и СМ ПИВ являются не только проявлением распространения ВГВ в атмосфере, но и воздействия электрических полей [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование ионозонда в одноминутном режиме и представление результатов зондирования за сутки в виде предложенных А- и Н-карт позволяет как получать традиционную информацию о регулярных изменениях ионосферы, так и детально исследовать быстротекущие изменения, главным образом, квазипериодические вариации с периодами 5-20 мин. Это стало возможным благодаря тому, что при учете АЧХ и ВЧХ слоев стали выделяться фокусирующие ПИВ, слабо заметные при других режимах работы ионозонда. Такой подход повысит чувствительность ионозонда к неоднородностям $\Delta N/N$ от типового 10^{-1} до 10^{-2} - 10^{-3} (в зависимости от чувствительности радиоприемного тракта). Сеть из таких ионозондов позволит изучить причины существования и механизмов переноса в ионосфере малоисследованных ПИВ промежуточного и среднего масштабов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-05-00967а.

DISCLOSURE OF TRANSIENT AND SMALL-SCALE IRREGULARITIES IN THE ONE-MINUTE IONOGRAMS OF CYCLON IONOSONDE

A.D.Akchurin, K.M.Usupov, O.N.Sherstyukov, V.R.Ildiryakov

The way of compact representation of results of daily sounding in the form of A-and H-plots is offered on the basis of near three-year operational experience of vertical ionosphere sounding with the one-minute intervals between ionograms. These plots allow you to not only get the usual information about regular slow changes, but also the information of transient (with periods of 5-20 min) and small-scale variations. The account of the amplitude-frequency (height-frequency) characteristics of layers in A-and H-plots will increase the ionosonde sensitivity to the irregularity level $\Delta N/N$ from usual 10^{-1} to $\sim 5 \cdot 10^{-3}$, it will permit to use a network of such ionosonde as a global monitor of midlatitude TIDs.

KEYWORDS: IONOGRAM, IONOSPHERE STATE SUMMARY PLOT, TID, A-PLOT, H-PLOT

ЛИТЕРАТУРА

1. Bilitza D., Reinisch B. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Adv. in Space Res.* – 2008. – V. 42, Iss. 4. – P. 599-609.
2. Hammer P.H., Bourne P.R. A high resolution ionosonde. 1. Technique and analysis methods. 2. Equipment and preliminary results. // *J. Atmos. and Terr. Phys.* – 1976. – V. 38. – P. 935-956.
3. Bowman G.G., Dunne G.S. Grossly-distorted isotonic contours associated with spread-F occurrence at mid-latitudes // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1984. – V. 46, No. 12. – P. 1193-1205.
4. Wright J.W., Paul A.K., Pitteway M.L.V. On the accuracy and interpretation of Dynasonde virtual height measurements // *Radio Science* – 1980 – V. 15, N 3. – P. 617-626.
5. Rydbeck O. E. H. Magneto ionic triple splitting of ionospheric waves // *J. Appl. Phys.* – 1950. – V.21. – P. 1205-1214.
6. Akchurin A.D., Bochkarev V.V. Improved precision of virtual height measurements with coherent radio pulse sounding based on the maximum likelihood method // *Adv. Space Res.* – 2009. – V.43. – P.1595-1602.
7. Акчурин А.Д., Бочкарев В.В. Повышение высотного разрешения импульсного ионозонда при зондировании когерентными импульсными сигналами // *Уч. зап. КГУ.* – 2008. – Т.150, Кн.3. – С.5-12.
8. Акчурин А.Д., Юсупов К. М. Частотные свойства квазипериодических биений на АЧХ среднеширотного слоя Es. // *Уч. зап. КГУ.* – 2011. – Т.153, Кн.1. – С. 7-16
9. Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М.:Наука, 1982. – 198 с.
10. Wright J. W. The interpretation of ionospheric radio drift measurements—VII. Diffraction methods applied to E-region echo fading: Evidence of a focusing model. // *J. Atmos. and Sol.-Ter. Phys.* – 1974. – V. 36. – P. 721-740.
11. Крашенинников И.В., Лянной Б.Е. Об интерпретации одного вида перемещающегося ионосферного возмущения по ионограммам вертикального радиозондирования // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 1991. – Т.31, №3 – С.427-433.
12. Haldoupis C., Meek C., Christakis N., Pancheva D., Bourdillon A. Ionogram height-time-intensity observations of descending sporadic E layers at mid-latitude // *J. Atmos. and Sol.-Ter. Phys.* – 2006. – V. 68. – P.539-557.
13. Lynn K.J.W., Otsuka Y., Shiokawa K. Ionogram-based range-time displays for observing relationships between ionosonde satellite traces, spread F and drifting optical plasma depletions // *J. Atmos. and Sol.-Ter. Phys.* – 2013. – V. 98. – P.105-112.
14. Mathews J.D. Sporadic E: current views and recent progress // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 1998 – V. 60, Iss. 4. – P. 413-435.
15. Fukao S., Kelly M.C. Turbulent upwelling of the mid-latitude ionosphere 1. Observational results by the MU radar // *J. Geophys. Res.* – 1991. – V.96, N A3. – P.3725-3746.
16. Greenwald R.A., Baker K.B., Hutchins R.A., Hanuis C. An HF phased-array radar for studying small-scale structure in the high-latitude ionosphere // *Radio Sci.* – 1985. – V. 20, N 1. – P. 63-79.
17. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
18. Ogawa T., Yamamoto M., Fukao S. Middle and upper atmosphere radar observations of turbulence and movement of midlatitude sporadic E irregularities // *J. Geophys. Res.* – 1995. – V. 100, N A7. – P. 12173-12188.