

УДК 537.876.23

## АНАЛИЗ ДНЕВНЫХ СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ДВУМЕРНЫМ КАРТАМ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ И ИОНОГРАММАМ

*Р.О. Шерстюков, А.Д. Акчурин*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

### Аннотация

Плотная сеть приемников (более 150 шт.) глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), использованная для построения двумерных карт вариаций полного электронного содержания (ПЭС) с высоким разрешением, применена к анализу среднеширотных среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений (СМ ПИВ). Впервые дневные СМ ПИВ в форме их основной сигнатуры (полосчатой структуры) на таких картах с высоким пространственным разрешением сопоставлены с данными ионозонда с высоким временным разрешением. На примере двух наиболее ярких случаев движущихся к юго-востоку возмущений ПЭС и эволюции следа  $F$ -слоя на ионограммах показана согласованность их изменений. Так, вариация критической частоты строго противофазна отклонениям ПЭС. Во время расположения над ионозондом полосчатой структуры с уменьшенным плазменным содержанием (по данным ПЭС-карт) критическая частота  $F$ -слоя повышается и, наоборот, во время расположения полосчатой структуры с повышенным плазменным содержанием критическая частота убывает. Обсуждаются два возможных объяснения данного эффекта. Одним из объяснений может быть большая наклонность радиолуча от вертикали во время расположения над ионозондом полосы с повышенным плазменным содержанием, о чем свидетельствует отсутствие кратных отражений и повышенная частота появления дополнительных каспообразных следов. Другим возможным объяснением может быть перераспределение электронного содержания во внешней ионосфере с небольшим снижением концентрации в пике  $F$ -слоя при небольшом увеличении ПЭС вдоль луча спутник – приемник. Анализ вариаций критической частоты показал, что наблюдаемым вариациям ПЭС 0.4 и 0.8 TECU, связанным с СМ ПИВ, соответствуют относительные вариации электронной концентрации в пике  $F$ -слоя, равные 13% и 28% соответственно.

**Ключевые слова:** ионосфера, среднemasштабные перемещающиеся ионосферные возмущения, неоднородности ионосферной плазмы,  $F_2$ -слой, двумерные карты вариаций полного электронного содержания, ионозонд, GPS/GLONASS

### Введение

Ионосфера в целом представляет из себя спокойную плазму с малоинтенсивными и постоянно перемещающимися неоднородностями, называемыми перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИВ). Уже более шести десятилетий они исследовались с помощью приборов, которые используются как дистанционные радиозонды в различных частотных диапазонах, а также как устройства на иных физических принципах. Сначала заметный вклад в исследования ПИВ внесло коротковолновое (КВ) оборудование (доплеровские и ионозондовые измерения),

с помощью которого ПИВ разделили на три вида (крупного, среднего и мелкого масштабов) и сформировали первоначальное грубое представление о вертикальной структуре крупномасштабных ПИВ (КМ ПИВ) и среднемасштабных ПИВ (СМ ПИВ) (о наклоне волнового фронта от вертикали и о том, что в горизонтальной плоскости они представляют из себя фронтальные неоднородности) [1, 2]. Если не принимать во внимание специальные интерференционные измерения [3, 4], то ионозонды / доплеровские зонды в основном применялись в исследованиях КМ ПИВ [5], которые имеют большую амплитуду и длину волны, чем СМ ПИВ.

Значимые результаты в отношении не только КМ ПИВ, но и СМ ПИВ были достигнуты с помощью радаров некогерентного рассеяния (выявлена детальная вертикальная структура [6] с потенциально возможной 3D-картиной при наличии возможности управления пучком [7]), имиджеров свечения ночного неба и карт вариаций полного электронного содержания (ПЭС) (выявлена горизонтальная полосчатая структура на площади с большим пространственным охватом, устойчивая статистика направления распространения полос [8–10]). Обобщение этих измерений вместе со спутниковыми измерениями и измерениями на когерентных радарх привело к пересмотру теоретических представлений о происхождении КМ ПИВ и СМ ПИВ. Так, безраздельно господствующее мнение о СМ ПИВ как о пассивном трассере внутренних гравитационных волн было изменено в сторону учета иных механизмов по крайней мере в ночное время.

Одним из возможных механизмов генерации СМ ПИВ является неустойчивость Перкинса [11], так как вытянутость фронтов неоднородностей с северо-востока на юго-запад в северном полушарии и с северо-запада на юго-восток в южном полушарии согласуется с условиями роста неустойчивости Перкинса. Тем не менее линейная скорость роста неустойчивости Перкинса слишком мала, чтобы объяснить экспериментальные результаты [12]. Моделирование электродинамического взаимодействия между  $E$ - и  $F$ -слоями [13, 14] показало, что поляризионные поля в  $F$ -области, вызванные нейтральным ветром в нижней [15] и средней атмосфере [16, 17], очень важны для развития неустойчивости Перкинса в  $F$ -слое. По экспериментальным данным, полученным в Японии [18, 19], неоднородности в  $E$ -слоях, как и СМ ПИВ, имеют горизонтальную полосчатую структуру, вытянутую с северо-запада на юго-востока, что также свидетельствует о том, что электродинамическое взаимодействие  $E$ - и  $F$ -слоев может играть значимую роль в генерации СМ ПИВ.

В настоящее время дальнейший прогресс в понимании устройства СМ ПИВ (особенно дневных) зависит от совместного использования приборов, осуществляющих измерения в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Значительный прогресс в исследованиях ночных СМ ПИВ в низких широтах достигнут с помощью высокочувствительных радаров некогерентного рассеяния и камер свечения неба. Отсутствие высокочувствительных радаров некогерентного рассеяния в средних широтах не позволяет расширить сферу действия этих приборов. Однако столь же плодотворной может стать объединение карт ПЭС-возмущений (по данным густой сети приемников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС)) и данных ионозонда с высоким временным разрешением. Результативность такого совместного использования данных в значительной мере зависит от выбора режима работы ионозонда и методов анализа ионограмм, позволяющих выделять столь типичные для средних широт слабые ( $\delta = \Delta N/N$  менее 10%) СМ ПИВ. Отметим, что ранее потенциал ионозондов для высокочувствительных измерений был раскрыт не полностью из-за сложностей с обработкой ионограмм с регистрацией на фотопленке во времена ионозондов [20] с ламповыми передатчиками большой импульсной мощности. Более того, использование лишь вариаций критических частот

как основной сигнатуры СМ ПИВ сформировало представление о низкой (меньше 10%) чувствительности ионозондов к неоднородностям. Такому положению вещей способствовало достаточно большое пространственное разнесение сетевых ионозондов (более 200 км), когда схожие вариации критических частот наблюдались лишь для интенсивных (свыше 10%) ПИВ с большой горизонтальной длиной волны во время повышенной геомагнитной активности, традиционно относимых к КМ ПИВ.

Ввиду неспособности ионозондов к прямой регистрации горизонтального распределения электронной плотности, устойчивое выделение СМ ПИВ возможно, как мы полагаем, лишь при пространственном разнесении менее 200 км или при сопоставлении данных ионозонда с картой ПЭС-возмущений с разрешением, значительно лучшим 200 км. В последнее время с развертыванием близ ионозонда CYCLON (около г. Казань) плотной сети ГНСС-приемников нам стало доступно получение карт с таким разрешением, что дало возможность проверить наличие одновременного присутствия одного и того же ПИВ на ионограммах и картах ПЭС-возмущений. Это важный вопрос, так как оценить чувствительность измерений ПЭС-возмущений сложно, что обусловлено интегральным характером измерений со значительным вкладом в ПЭС внешней ионосферы и сильной зависимостью ПЭС от угла (ракурсный эффект) между линией спутник – приемник и плоскостью вертикального фронта ПИВ. Разная чувствительность УКВ-трансионосферного (просветного) зондирования и КВ-зондирования снизу может привести к тому, что с их помощью будут наблюдаться разные по масштабу и интенсивности неоднородности, как это происходило, например, при измерениях ионозондов и радиотелескопов в кампании WAGS I [21].

Все мультинструментальные измерения с использованием ионозондов были нацелены на изучение СМ ПИВ во время геомагнитных штормов [22, 23]. Для таких исследований основными параметрами являются критическая частота  $f_oF_2$  и высота  $h_mF_2$  (летний  $F$ -слой принято обозначать через  $F_2$ ). Однако ионограммы могут содержать различные сигнатуры, например  $F$ -рассеяние (удвоение следов), клювики [24], серпики [25, 26], крючки [27], традиционно относящиеся к СМ ПИВ.

Одновременная регистрация СМ ПИВ на ионограммах и картах ПЭС-возмущений позволит построить классификацию сигнатур СМ ПИВ на ионограммах и в дальнейшем установить причины их возникновения.

## 1. Метод и результаты

Как известно, интерпретацию ионограмм сильно затрудняют как сложности процессов отражения и поглощения, действующих вблизи плазменной частоты, так и постоянные наклоны отражающей поверхности, связанные с прохождением ПИВ.

Действие вышеуказанных факторов приводит к тому, что на ионограммах появляются дополнительные следы, меняющие свое положение от ионограммы к ионограмме и связанные в первую очередь с боковыми отражениями от перемещающейся наклоненной отражающей поверхности. Дополнительные следы могут быть как полными копиями основного следа  $F$ -слоя, смещенными по высоте, так и неполными копиями, повторяющими лишь часть (обычно касповую) основного следа, смещенную и по частоте, и по высоте. Все вышеуказанные дополнительные следы могут иметь различную форму и появляться в многочисленных различных комбинациях, в силу чего в настоящий момент отсутствует их общепринятая классификация. Основной трудностью в ее создании является неопределенность пространственной формы ПИВ, породившей данные конкретные дополнительные следы.

По данным вертикального зондирования невозможно однозначно восстановить форму ПИВ. Облегчить задачу восстановления могла бы информация о горизонтальном распределении электронной концентрации, отсутствие которой часто

сводит результаты вертикального зондирования к определению вариаций критической частоты. Доступность ПЭС-карт позволяет провести начальный анализ искажений основного следа и форм дополнительных следов на ионограммах вертикального зондирования и не ограничиваться анализом вариаций критической частоты, поэтому ниже будут сопоставлены данные ионозонда и ПЭС-карты.

Спутниковые данные о задержке радиосигналов в ионосфере на двух разных частотах позволяют исследовать ионосферные возмущения типа СМ ПИВ, которые могут иметь интенсивность неоднородности  $\Delta N/N < 10\%$ , которая определяется как  $\Delta N/N = 2\Delta f_o F_2 / f_o F_2$ . Изучить параметры пространственной структуры таких неоднородностей позволяет метод представления спутниковых данных в виде двумерных карт вариаций ПЭС. Для построения ПЭС-карт необходимо иметь следующие данные: значения вариаций ПЭС, азимуты луча спутник–приемник, углы места луча спутник–приемник, координаты подионосферных точек. Удобным исходным форматом для хранения и передачи спутниковых данных являются RINEX-файлы.

Метод определения ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям [29] хорошо подходит для решения задач, не требующих получения абсолютных значений ПЭС. Наклонное ПЭС  $I_s$  – суммарная электронная плотность вдоль всей линии прямой видимости между приемником и спутником – может быть получена с помощью следующей формулы:

$$I_s = \frac{1}{40.38} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const}_{1,2} + \sigma L], \quad (1)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – рабочие частоты,  $L_1$  и  $L_2$  – число оборотов фазы несущих на частотах  $f_1$  и  $f_2$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – длины волн несущих,  $\text{const}_{1,2}$  – неоднозначность фазовых измерений,  $\sigma L$  – ошибка фазовых измерений. Значения  $L_1$  и  $L_2$  содержатся в RINEX-файлах. Используемые приемники сигналов ГНСС выдают данные о фазовых задержках сигналов на рабочих частотах  $f_1$  и  $f_2$  ( $f_1 = 1575.42$  МГц,  $f_2 = 1227.60$  МГц для приемников GPS-сигналов и  $f_1 = 1602 + n \cdot 0.5625$  МГц,  $f_2 = 1246 + n \cdot 0.4375$  МГц для приемников GLONASS-сигналов, где  $n$  – номер канала,  $n = -7, -6, -5, \dots, 0, \dots, 6$ ).

Вертикальное ПЭС  $I_v$  рассчитывается по формуле (2):

$$I_v = I_s \theta_s, \quad (2)$$

где  $\theta_s$  – угол места луча спутник–приемник. Формула применима в случае, когда кривизной Земли можно пренебречь, то есть если  $\theta_s > 30^\circ$ .

Для отображения ПИВ используются только относительные вариации ПЭС, поэтому при использовании описываемого метода ошибками фазовых измерений, неоднозначностью фазовых измерений можно пренебречь. Вариации ПЭС могут быть получены путем удаления тренда с помощью одночасового скользящего среднего. Этот метод удаления тренда является простым и подходящим для исследований ПИВ при помощи густой сети спутниковых навигационных приемников [28].

Азимут  $\alpha_s$  и угол места  $\theta_s$  навигационного искусственного спутника Земли (НИСЗ) принято рассчитывать на основе геодезических координат НИСЗ и точки наблюдения. С достаточной для практических целей точностью азимут и угол места НИСЗ определяются следующими выражениями:

$$\alpha_s = \arccos \left( \frac{\sin \Phi_s - \sin \Phi \cos \Psi_s}{\sin \sigma \cos \Phi} \right), \quad (3)$$

$$\theta_s = \arctg \left( \frac{\cos \Psi_s - R_E/R_S}{\sin \Psi_s} \right), \quad (4)$$

$$\Psi_s = \arccos(\sin \Phi \sin \Phi_s + \cos \Phi \cos \Phi_s \cos(\Lambda_s - \Lambda)), \quad (5)$$

где  $R_s$  – радиус орбиты НИСЗ,  $R_E$  – радиус Земли,  $\Phi$ ,  $\Lambda$  – геодезические широта и долгота точки наблюдения (приемника НИСЗ),  $\Phi_s$ ,  $\Lambda_s$  – геодезические широта и долгота НИСЗ,  $\Psi_s$  – центральный угол между точкой наблюдения и НИСЗ. Используемые параметры данные  $R_s$ ,  $\Phi$ ,  $\Lambda$ ,  $\Phi_s$ ,  $\Lambda_s$  могут быть получены из навигационных RINEX-файлов.

Ионосферной точкой принято считать точку пересечения луча НИСЗ с  $F_2$ -слоем на высоте, на которой достигается максимум ионизации. Высота  $F_2$ -слоя изменяется в диапазоне от 250 до 350 км в зависимости от времени суток и географических факторов. Подионосферной точкой является проекция ионосферной точки на поверхность Земли. Ионосферная и подионосферная точки имеют одинаковые географические координаты (широту и долготу). Расчет географической широты  $\varphi_P$  и географической долготы  $l_P$  подионосферной точки проводится по формулам

$$\phi_p = \arcsin(\sin \phi_B \cdot \cos \psi_p + \cos \phi_B \cdot \sin \psi_p \cdot \cos \alpha_s), \quad (6)$$

$$l_P = l_B + \arcsin(\sin \psi_p \cdot \sin \alpha_s \cdot \sec \phi_p), \quad (7)$$

$$\psi_p = \frac{\pi}{2} - \theta_s - \arcsin\left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \cdot \cos \theta_s\right), \quad (8)$$

где  $\varphi_B$  и  $l_B$  – географические координаты точки наблюдения (приемника НИСЗ), могут быть получены из RINEX-файлов,  $\psi_p$  – центральный угол между точкой наблюдения и ионосферной точкой. Соотношения (1)–(8) для нахождения подионосферной точки, углов места, азимутов, наклонного ПЭС взяты из [29].

В работе мы использовали данные, полученные с более чем 150 точек приема сигналов НИСЗ, расположенных в средних широтах (на европейской части России) удаленных друг от друга на расстояние около 40 км (см. рис. 1), и с временным разрешением 30 с, что позволяет осуществлять поиск неоднородностей с пространственными размерами не менее 80 км. Для построения ПЭС-карт возможно одновременное использование данных с нескольких спутников НИСЗ, увеличение количества лучей спутник – приемник позволяет увеличить пространственный охват ПЭС-карт, а также увеличить их пространственное разрешение. От 3 до 6 спутников НИСЗ в любой момент времени имеют приемлемые углы места для построения ПЭС-карт, это означает, что количество точек на ПЭС-картах может быть увеличено до 900.

Каждый луч спутник – приемник в определенный момент времени характеризуется значениями вариации ПЭС, азимутом, углом места, координатой подионосферной точки. На основе данных для всех лучей спутник – приемник формируются ПЭС-карты. С этой целью строится сетка координат с шагом в один пиксель, равный  $0.15^\circ$  широты  $\times$   $0.15^\circ$  долготы. Расчетные координаты подионосферных точек округляются до  $0.15^\circ$  как по широте, так и по долготе. Для определенного момента времени в соответствии с координатами подионосферных точек на координатной сетке цветом обозначаются значения вариаций ПЭС для всех подионосферных точек. Чтобы увеличить количество точек на ПЭС-картах, на нее наносятся все подионосферные точки и значения вариации ПЭС за ближайшие 5 мин, в течение которых подионосферная точка перемещается на расстояние  $\sim 25$  км. Такое усреднение является приемлемым для сети ГНСС-приемников с расстоянием между приемниками  $\sim 40$  км. Общее число лучей спутник – приемник после пятиминутного временного усреднения может быть более 5000. На заключительном этапе значения вариаций ПЭС на картах сглаживаются по пространству со скользящим средним шагом  $4 \times 4$  пикселя ( $0.6^\circ$  широты  $\times$   $0.6^\circ$  долготы).

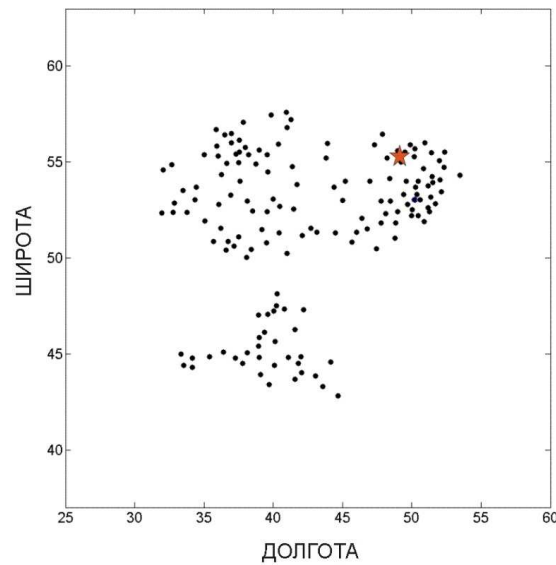


Рис. 1. Расположение приемников ГНСС-сигналов и ионозонда (красная звездочка)

На рис. 2 показаны ионограммы и ПЭС-карты для дневного времени суток с 15-минутным интервалом (13:30–14:15 по местному времени (09:30 UT–10:15 UT), 21 сентября 2016 г.). Чувствительность спутников НИСЗ сильно зависит от ракурсных условий на исследуемой трассе, это значит, что для уверенного детектирования неоднородностей необходимо, чтобы луч спутник–приемник и вертикальная плоскость фронта неоднородности типа ПИВ были параллельны. Этому условию удовлетворяют один спутник GPS-сигналов (G18) и один спутник GLONASS-сигналов (R03). На ПЭС-картах наблюдаются полосчатые структуры с волновыми фронтами, вытянутыми с северо-востока на юго-запад и перемещающимися в юго-восточном направлении. По параметрам неоднородностей можно сделать вывод, что это дневные СМ ПИВ [30]. Такие неоднородности распространяются со скоростью  $\sim 70$  м/с, имеют длину волны  $\sim 200$  км и амплитуду вариаций ПЭС более 0.4 TECU. В то же время наблюдаются вариации критической частоты  $F_2$ -слоя с максимальным отклонением 0.3 МГц. Периоды вариаций ПЭС и критической частоты  $f_oF_2$  совпадают и равны  $\sim 50$  мин. Интенсивность неоднородности может быть оценена как  $\Delta N/N = 10\%$ .

Отметим, что в дневное время суток постоянно наблюдается совпадение данных ПЭС-карт и ионозондовых данных, если имеются СМ ПИВ. Поэтому мы посчитали необходимым продемонстрировать еще одно событие, в котором присутствуют дневные СМ ПИВ. На рис. 3 показаны ионограммы и ПЭС-карты для дневного времени суток с 15-минутным интервалом (11:50–12:40 по местному времени, 07:50 UT–08:45 UT, 11 февраля 2017 г.). Были использованы данные спутников GLONASS (R15, R16), поскольку только они оказались пригодными для детектирования СМ ПИВ. На ПЭС-картах так же, как и в первом событии, наблюдаются полосчатые структуры с волновыми фронтами, вытянутыми с северо-востока на юго-запад и перемещающимися в юго-восточном направлении. Эти СМ ПИВ имеют интенсивность неоднородности  $\Delta N/N = 25\%$ . Скорость, с которой распространяются эти СМ ПИВ,  $\sim 80$  м/с, длина волны  $\sim 250$  км и амплитуда вариаций ПЭС более 0.8 TECU. Периоды вариаций ПЭС и критической частоты  $F_2$ -слоя также совпадают и равны  $\sim 50$  мин. Отсюда следует, что дневные вариации критической частоты слоя  $F_2$  достоверно являются откликом на прохождение над ионозондом

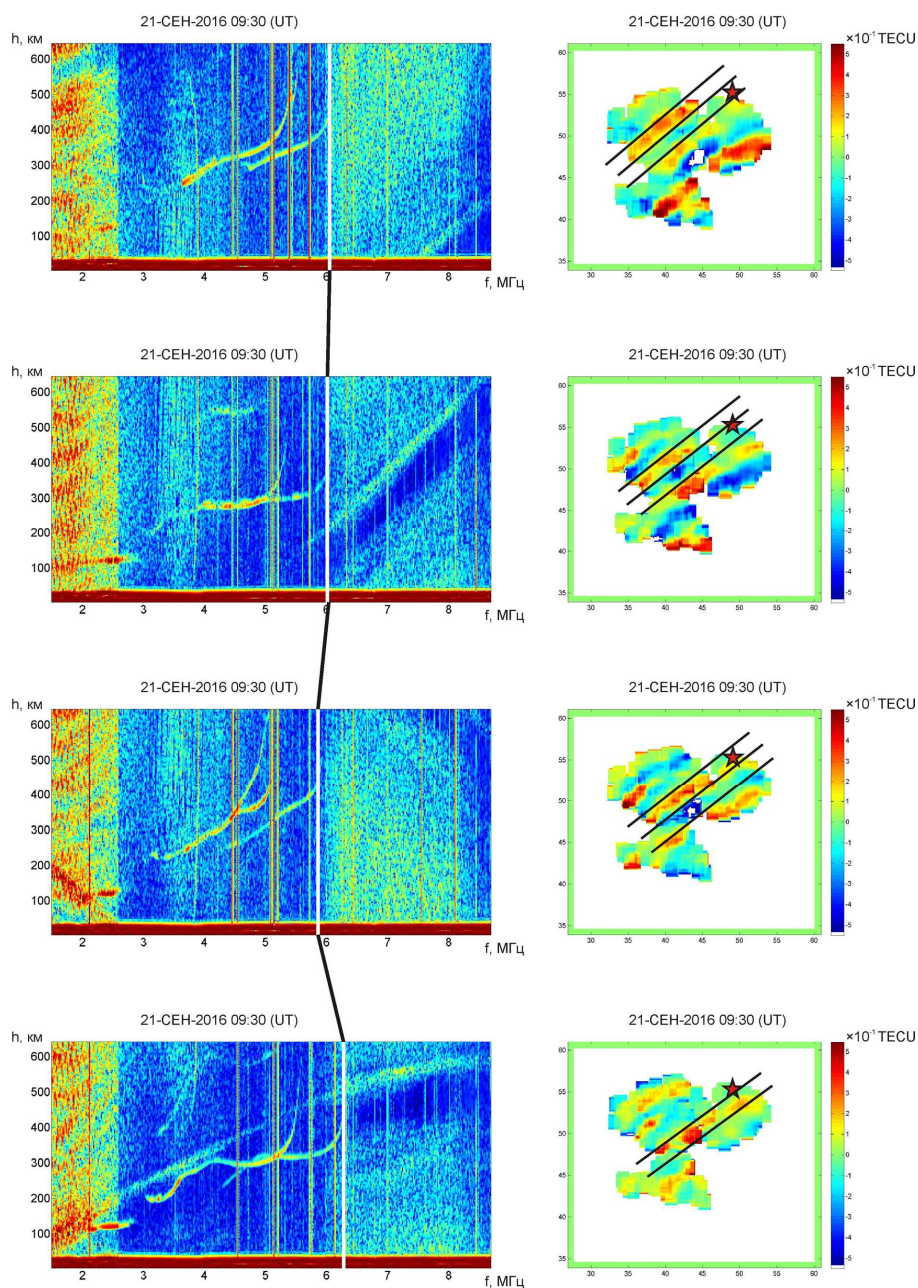


Рис. 2. Ионограммы вертикального зондирования (слева) и ПЭС-карты (справа), построенные в один и тот же момент времени, 21 сентября 2016 г. Белые сплошные линии на ионограммах указывают на значение  $f_oF_2$ ; черные сплошные полосы на ПЭС-картах обозначают фронты полосчатой структуры. Расположение ионозонда отмечено красной звездочкой

СМ ПИВ. Найдено, что максимальное положительное отклонение критической частоты  $f_oF_2$  соответствует зоне пониженных значений ПЭС на ПЭС-картах.

Во время прохождения СМ ПИВ над ионозондом на ионограммах присутствуют также сигнатуры типа «кловтики» и «серпики» (см. рис. 4). Эти сигнатуры

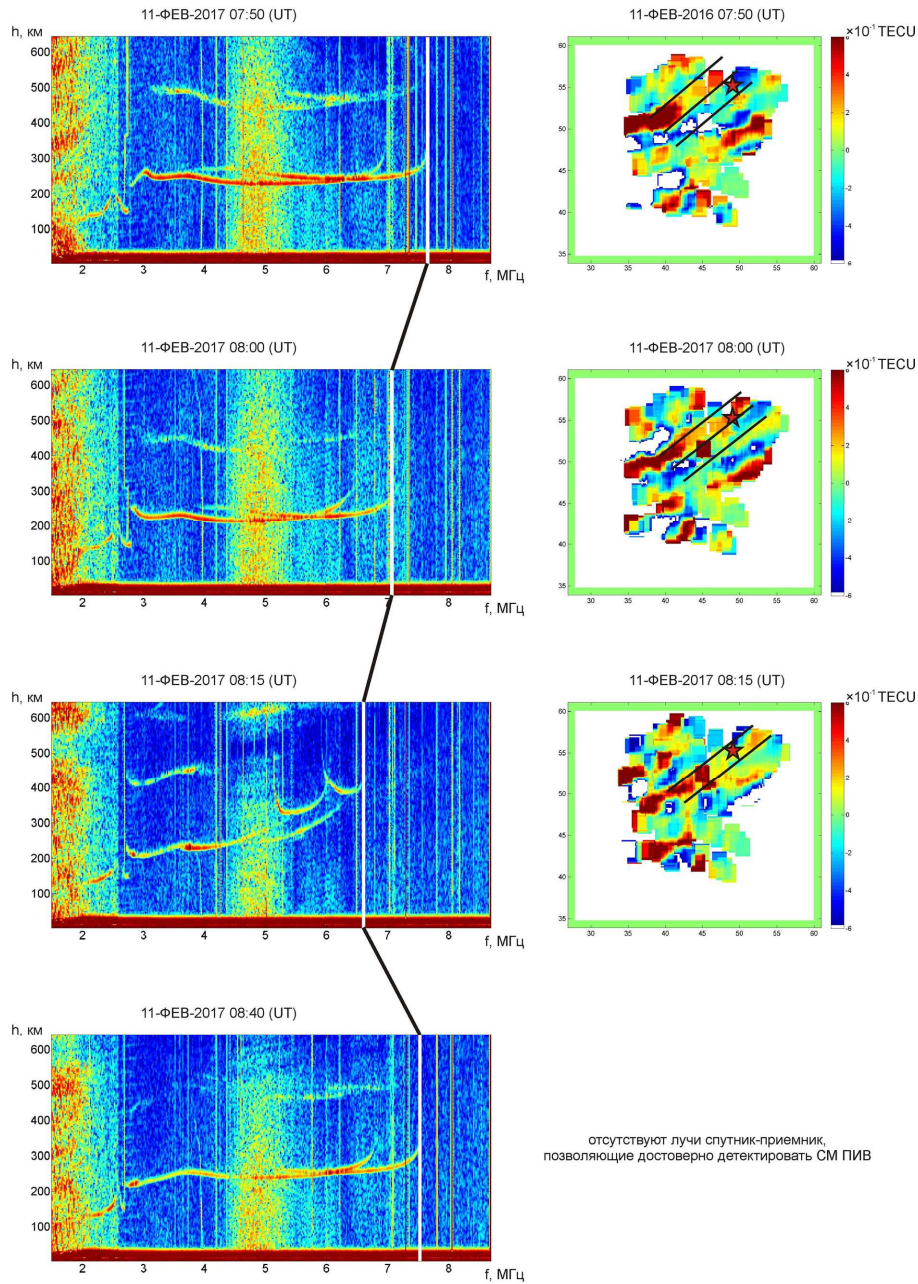


Рис. 3. Ионogramмы вертикального зондирования (слева) и ПЭС-карты (справа), построенные в один и тот же момент времени, 11 февраля 2017 г. Белые сплошные линии на ионogramмах отсекают на оси частот значение  $f_oF_2$ ; черные сплошные полосы на ПЭС-картах обозначают фронты полосчатой структуры. Расположение ионозонда отмечено красной звездочкой

традиционно считаются проявлениями СМ ПИВ на ионogramмах, однако в наших исследованиях время жизни этих сигнатур (наблюдаемое время жизни 8–12 мин) и время прохождения полосчатой структуры над ионозондом не совпадают.



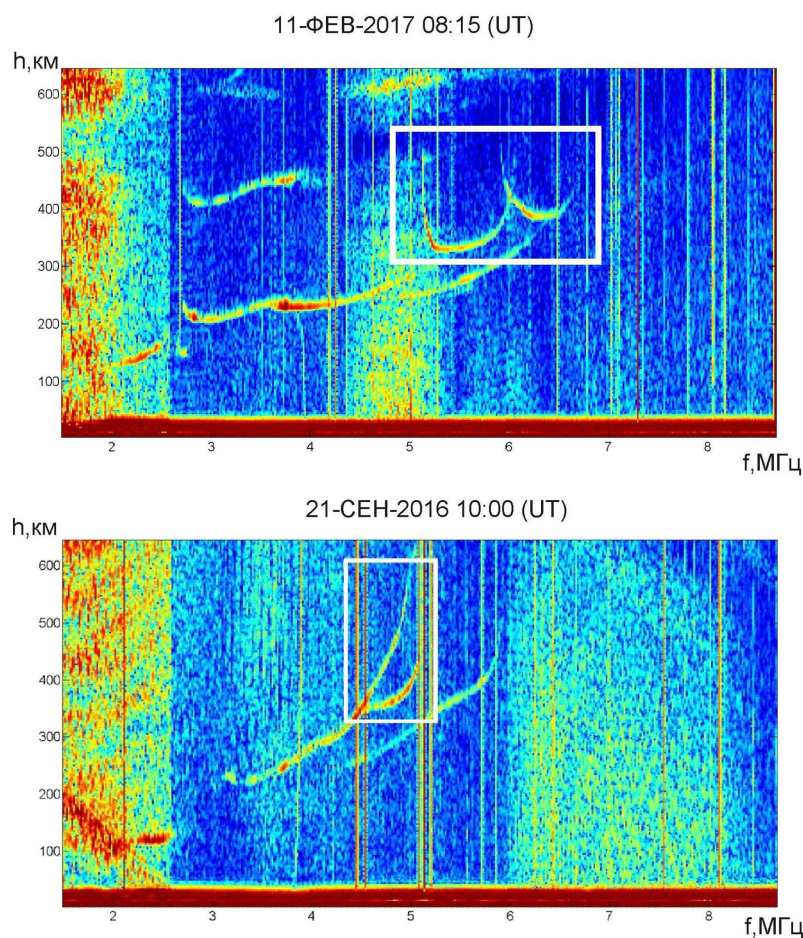


Рис. 4. Ионogramмы вертикального зондирования с присутствующими на них сигналами типа «клювики» и «серпики»

## 2. Обсуждения и заключение

На данный момент доминирует точка зрения, что с помощью ионозондов можно наблюдать только КМ ПИВ с интенсивностью неоднородности  $\Delta N/N > 10\%$ . Это мнение основано на свойстве КМ ПИВ перемещаться на расстояния более 1000 км без значительного затухания. Указанное свойство позволяет наблюдать КМ ПИВ при помощи оборудования с низкой чувствительностью к неоднородностям плазмы, приборы при этом могут располагаться на расстояниях 500 км друг от друга [31]. В настоящее время исследования такого рода проводятся в основном с помощью ионозондов.

Проведенный нами анализ лишь частично подтверждает отмеченное выше, поскольку выявлена четкая связь между полосчатой структурой и вариацией критической частоты. Полученные вариации критической частоты указывают на то, что интенсивность перемещающихся неоднородностей превышает 10%. Несмотря на то что предыдущие исследования показали, что такую интенсивность обычно имеют крупномасштабные неоднородности с источником в авроральной зоне, другие параметры волны, установленные нами, указывают на наличие неоднородностей среднего масштаба. Анализ ионogramм показывает, что во время прохождения полосы

с пониженной концентрацией критическая частота имеет наибольшее значение, а отражения близки к вертикальным (если принять в расчет положение кратных отражений). Тот факт, что критическая частота и вариации ПЭС находятся в противофазе, может быть следствием как наклонных отражений, так и влияния на ПЭС верхней части ионосферы.

В настоящей работе показано, что наблюдения за СМ ПИВ при помощи ионозонда возможны. Мы использовали ПЭС-карты, чтобы найти параметры дневных СМ ПИВ. Были обнаружены дневные СМ ПИВ со скоростями 70 и 80 м/с, длинами волн 200 и 250 км и периодом вариаций ПЭС 50 мин. Периоды вариаций критической частоты  $f_oF_2$  и вариаций ПЭС примерно равны, обе эти вариации являются откликом на прохождения СМ ПИВ. Для двух событий найдено соответствие между интенсивностью неоднородности  $\Delta N/N$  и максимальными отклонениями ПЭС. Максимальные значения вариаций ПЭС, равные 0.4 и 0.8 TECU, соответствуют значениям  $\Delta N/N$ , равным 10% и 25% соответственно. Во время прохождения СМ ПИВ над ионозондом наблюдаются клювообразные и серпообразные сигнатуры, но время жизни этих сигнатур не совпадает с периодом СМ ПИВ, значит, неоднородности, ассоциирующиеся с этими сигнатурами, имеют меньшие размеры, чем СМ ПИВ.

**Благодарности.** Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (№ 3.7400.2017/8.9), и за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

#### Литература

1. *Georges T.M.* HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances // J. Atmos. Terr. Phys. – 1968. – V. 30, No 5. – P. 735–736.
2. *Bowman G.G.* Movements of ionospheric irregularities and gravity waves // J. Atmos. Terr. Phys. – 1968. – V. 30, No 5. – P. 721–734.
3. *Bowman G.G.* Ionization troughs below the F2-layer maximum // Planet. Space Sci. – 1969. – V. 17, No 5. – P. 777–796.
4. *Bowman G.G., Dunne G.S.* Some initial results on mid-latitude spread-F irregularities using a directional ionosonde // J. Atmos. Terr. Phys. – 1981. – V. 43, No 12. – P. 1295–1307.
5. *Petrova I.R., Bochkarev V.V., Teplov V.Yu., Sherstyukov O.N.* The daily variations of Doppler frequency shift of ionospheric signal on middle-latitude radio lines // Adv. Space Res. – 2007. – V. 40, No 6. – P. 825–834.
6. *Seker I., Livneh D.J., Mathews J.D.* A 3-D empirical model of F region Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance bands using incoherent scatter radar and all-sky imaging at Arecibo // J. Geophys. Res. – 2009. – V. 114, No A6. – Art. A06302, P. 1–10. – doi: 10.1029/2008JA014019.
7. *Semeter J., Butler T., Heinselman C., Nicolls M., Kelly J., Hampton D.* Volumetric imaging of the auroral ionosphere: Initial results from PFISR // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2009. – V. 71, No 6–7. – P. 738–743. – doi: 0.1016/j.jastp.2008.08.014.
8. *Shiokawa K., Otsuka Y., Ihara C., Ogawa T., Rich F.J.* Ground and satellite observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbance at midlatitude // J. Geophys. Res. – 2003. – V. 108, No A4. – Art. 1145, P. 1–13. – doi: 10.1029/2002JA009639.

9. *Otsuka Y., Suzuki K., Nakagawa S., Nishioka M., Shiokawa K., Tsugawa T.* GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe // *Ann. Geophys.* – 2013. – V. 31 – P. 163–172. – doi: 10.5194/angeo-31-163-2013.
10. *Zakharenkova I., Astafyeva E., Cherniak I.* GPS and GLONASS observations of large-scale traveling ionospheric disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 2016. – V. 121, No 12. – P. 12,138–12,156. – doi: 10.1002/2016JA023332.
11. *Perkins F.* Spread F and ionospheric currents // *J. Geophys. Res.* – 1973. – V. 78, No 1. – P. 218–226.
12. *Kelley M.C., Makela J.J.* Resolution of the discrepancy between experiment and theory of midlatitude F-region structures // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. – V. 28, No 13. – P. 2589–2592.
13. *Yokoyama T., Hysell D., Otsuka Y., Yamamoto M.* Three dimensional simulation of the coupled Perkins and  $E_s$ -layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere // *J. Geophys. Res.* – 2009. – V. 114, No A3. – Art. A03308, P. 1–16. – doi: 10.1029/2008JA013789.
14. *Yokoyama T., Hysell D.L.* A new midlatitude ionosphere electrodynamics coupling model (MIECO): latitudinal dependence and propagation of mediumscale traveling ionospheric disturbances // *Geophys. Res. Lett.* – 2010. – V. 37, No 8. – Art. L08105, P. 1–5. – doi: 10.1029/2010GL042598.
15. *Akchurin A.D., Sherstyukov O.N., Zыkov E.Yu.* The influence of lower atmosphere dynamics on the mid-latitude sporadic E-layer // *Adv. Space Res.* – 1997. – V. 20, No 6. – P. 1309–1312.
16. *Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N., Yasnitsky D.S.* The influence of the irregular movements in the lower thermosphere on the ionospheric Es-Layer by radiometeor observations in Kazan (56° N, 49° E) // *Phys. Chem. Earth (C)*. – 2001. – V. 26, No 6. – P. 445–448. – doi: 10.1016/S1464-1917(01)00028-9.
17. *Sherstyukov O.N., Ryabchenko E.Yu.* Synoptic oscillations in the parameters of the mid-latitude sporadic E layer // *Geomagnetism and Aeronomy* – 2004. – V. 44, No 5. – P. 610–616.
18. *Otsuka Y., Onoma F., Shiokawa K., Ogawa T., Yamamoto M., Fukao S.* Simultaneous observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances and E region field-aligned irregularities at midlatitude // *J. Geophys. Res.* – 2007. – V. 112, No A6. – Art. A06317, P. 1–9. – doi: 10.1029/2005JA011548.
19. *Saito S., Yamamoto M., Hashiguchi H., Maegawa A., Saito A.* Observational evidence of coupling between quasi-periodic echoes and medium scale traveling ionospheric disturbances // *Ann. Geophys.* – 2007. – V. 25, No 10. – P. 2185–2194. – doi: 10.5194/angeo-25-2185-2007.
20. *Morgan M.G., Calderon C.H.J., Ballard K.A.* Techniques for the study of TID's with multistation rapid-run ionosondes // *Radio Sci.* – 1978. – V. 13, No 4. – P. 729–741. – doi: 10.1029/RS013i004p00729.
21. *Williams P.J.S., Viridi T.S., Lewis R.V., Lester M., Rodger A.S., McCrea I.W., Freeman K.S.C.* Worldwide atmospheric gravity-wave study in the European sector 1985–1990 // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1993. – V. 55, No 4–5. – P. 683–696.
22. *Habarulema J.B., Katamzi Z.T., McKinnell L.-A.* Estimating the propagation characteristics of large-scale traveling ionospheric disturbances using ground-based and satellite data // *J. Geophys. Res. Space Physics* – 2013. – V. 118, No 12. – P. 7768–7782. – doi: 10.1002/2013JA018997.

23. *Ding F., Wan W., Ning B., Zhao B., Li Q., Wang Y., Hu L., Zhang R., Xiong B.* Observations of poleward-propagating large-scale traveling ionospheric disturbances in southern China // *Ann. Geophys.* – 2013. – V. 31, No 2. – P. 377–385. – doi: 10.5194/angeo-31-377-2013.
24. *Bowman G.G.* A review of some recent work on mid-latitude spread-F occurrence as detected by ionosondes // *J. Geomag. Geoelectr.* – 1990. – V. 42, No 2. – P. 109–138.
25. *Lobb R.J., Titheridge J.E.* The effects of travelling ionospheric disturbances on ionograms // *J. Geophys Res.* – 1977. – V. 39, No 2. – P. 129–138.
26. *Akchurin A.D., Bochkarev V.V., Ildiryakov V.R., Usupov K.M.* TID selection and research of its characteristics on ionograms // 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium. – 2011. – P. 1–4. – doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6050965.
27. *Cooper J., Cummack C.H.* The analysis of a travelling ionospheric disturbance with non-linear ionization response // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1986. – V. 48, No 1. – P. 61–71.
28. *Tsugawa T., Otsuka Y., Coster A.J., Saito A.* Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America // *Geophys Res. Lett.* – 2007. – V. 34, No 22. – Art. L22101, P. 1–5. – doi: 10.1029/2007GL031663.
29. *Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ ИЦ РВХ ВСИЦ СО РАН, 2006. – 480 с.
30. *Kotake N., Otsuka Y., Ogawa T., Tsugawa T., Saito A.* Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the GPS networks in Southern California // *Earth Planet. Sp.* – 2007. – V. 59, No 2. – P. 95–102. – doi: 10.1186/BF03352681.
31. *Evans J.V., Holt J.M., Wand R.H.* A differential-Doppler study of traveling ionospheric disturbances from Millstone Hill // *Radio Sci.* – 1983. – V. 18, No 3. – P. 435–451. – doi: 10.1029/RS018i003p00435.

Поступила в редакцию  
12.04.17

---

**Шерстюков Руслан Олегович**, младший научный сотрудник лаборатории «Мониторинг неоднородной структуры ионосферы и атмосферы»

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [sheer-ksu@mail.ru](mailto:sheer-ksu@mail.ru)

**Акчурин Адель Джавидович**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоастрономии

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [Adel.Akchurin@kpfu.ru](mailto:Adel.Akchurin@kpfu.ru)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.  
 SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI  
 (Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)  
 2017, vol. 159, no. 3, pp. 374–389

## Analysis of Daytime Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances by Two-Dimensional Maps of Total Electron Content Perturbation and Ionograms

*R.O. Sherstyukov\**, *A.D. Akchurin\*\**

*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

E-mail: \**sher-ksu@mail.ru*, \*\**Adel.Akchurin@kpfu.ru*

Received April 12, 2017

### Abstract

To analyze midlatitude medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs), the sufficiently dense network of GNSS receivers (more than 150 ground-based stations) have been used. For the first time, daytime MSTIDs in the form of their main signature (band structure) on high-resolution two-dimensional maps of the total electron content perturbation (TEC maps) have been compared with ionosonde data with a high temporal resolution. For a pair of events, a relationship between southwestward TEC perturbations and evolution of  $F_2$  layer traces has been established. So,  $F_2$  peak frequency varied in antiphase to TEC perturbations. The ionograms show that during the moving of plasma depletion band (overhead ionosonde) the  $F_2$  peak frequency is the highest, and vice versa, for the plasma enhancement band, the  $F_2$  peak frequency is the lowest. One possible explanation may be a greater inclination of the radio beam from the vertical during the placement of a plasma enhancement band above the ionosonde, as evidenced by the absence of multiple reflections and the increased occurrence rate of extra cusp trace. Another possible explanation may be the redistribution of the electron content in the topside ionosphere with a small decrease in the  $F$  peak concentration of the layer with a small increase in TEC along the line-of-sight. The analysis of  $F_2$  peak frequency variation has shown that the observed values of TEC perturbations equal to 0.4 and 0.8 TECU correspond to the values of  $\Delta N/N$  equal to 10% and 25%. The need for further research is evident.

**Keywords:** ionosphere, medium-scale traveling ionospheric disturbances, perturbations of ionospheric plasma,  $F_2$  layer, two-dimensional maps of total electron content perturbation, ionosonde, GPS/GLONASS

**Acknowledgments.** This study was supported by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment in the area of scientific activities (project no. 3.7400.2017/8.9) and by the the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University.

### Figure Captions

Fig. 1. Location of GPS/GLONASS receivers and ionosonde. Black dots represent the location of the GPS/GLONASS receivers. The red star represents the location of the ionosonde.

Fig. 2. Two-dimensional TEC perturbation maps in the right side of the figure and ionograms in the left side of the figure, September 21, 2016. White lines in the ionograms show

$F_2$  peak frequency. The red star on the TEC map represents the location of the ionosonde, the solid lines represent the wavefronts of band structures.

Fig. 3. Two-dimensional TEC perturbation maps in the right side of the figure and ionograms in the left side of the figure, February 11, 2017. White lines in the ionograms show  $F_2$  peak frequency. The red star on the TEC map represents the location of the ionosonde, the solid lines represent the wavefronts of band structures.

Fig. 4. The ionograms with hook signatures. The hook signatures are circled by the white quadrates.

#### References

1. Georges T.M. HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1968, vol. 30, no. 5, pp. 735–736.
2. Bowman G.G. Movements of ionospheric irregularities and gravity waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1968, vol. 30, no. 5, pp. 721–734.
3. Bowman G.G. Ionization troughs below the F2-layer maximum. *Planet. Space Sci.*, 1969, vol. 17, no. 5, pp. 777–796.
4. Bowman G.G., Dunne G.S. Some initial results on mid-latitude spread-F irregularities using a directional ionosonde. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1981, vol. 43, no. 12, pp. 1295–1307.
5. Petrova I.R., Bochkarev V.V., Teplov V.Yu., Sherstyukov O.N. The daily variations of Doppler frequency shift of ionospheric signal on middle-latitude radio lines. *Adv. Space Res.*, 2007, vol. 40, no. 6, pp. 825–834.
6. Seker I., Livneh D.J., Mathews J.D. A 3-D empirical model of F region Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance bands using incoherent scatter radar and all-sky imaging at Arecibo. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, no. A6. doi: 10.1029/2008JA014019.
7. Semeter J., Butler T., Heinselman C., Nicolls M., Kelly J., Hampton D. Volumetric imaging of the auroral ionosphere: Initial results from PFISR. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2009, vol. 71, nos. 6–7, pp. 738–743. doi: 0.1016/j.jastp.2008.08.014.
8. Shiokawa K., Otsuka Y., Ihara C., Ogawa T., Rich F.J. Ground and satellite observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbance at midlatitude. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 108, no. A4, art. 1145, pp. 1–13. doi: 10.1029/2002JA009639.
9. Otsuka Y., Suzuki K., Nakagawa S., Nishioka M., Shiokawa K., Tsugawa T. GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe. *Ann. Geophys.*, 2013, vol. 31, pp. 163–172. doi: 10.5194/angeo-31-163-2013.
10. Zakharenkova I., Astafyeva E., Cherniak I. GPS and GLONASS observations of large-scale traveling ionospheric disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2016, vol. 121, no. 12, pp. 12,138–12,156. doi: 10.1002/2016JA023332.
11. Perkins F. Spread F and ionospheric currents. *J. Geophys. Res.*, 1973, vol. 78, pp. 218–226.
12. Kelley M.C., Makela J.J. Resolution of the discrepancy between experiment and theory of midlatitude F-region structures. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, vol. 28, no. 13, pp. 2589–2592.
13. Yokoyama T., Hysell D., Otsuka Y., Yamamoto, M. Three dimensional simulation of the coupled Perkins and  $E_s$ -layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, no. A3, art. A03308, pp. 1–16. doi: 10.1029/2008JA013789.
14. Yokoyama T., Hysell D. L. A new midlatitude ionosphere electrodynamics coupling model (MIECO): :Latitudinal dependence and propagation of mediumscales traveling ionospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, 2010, vol. 37, no. 8, art. L08105, pp. 1–5. doi:10.1029/2010GL042598.

15. Akchurin A.D., Sherstyukov O.N., Zikov E.Yu. The influence of lower atmosphere dynamics on the mid-latitude sporadic E-layer. *Adv. Space Res.*, 1997, vol. 20, no. 6, pp. 1309–1312.
16. Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N., Yasnitsky D.S. The influence of the irregular movements in the lower thermosphere on the ionospheric Es-Layer by radiometeor observations in Kazan (56° N, 49° E). *Phys. Chem. Earth, Part C*, 2001, vol. 26, no. 6, pp. 445–448.
17. Sherstyukov O.N., Ryabchenko E.Yu. Synoptic oscillations in the parameters of the mid-latitude sporadic E layer. *Geomagn. Aeron.*, 2004, vol. 44, no. 5, pp. 610–616.
18. Otsuka Y., Onoma F., Shiokawa K., Ogawa T., Yamamoto M., Fukao S. Simultaneous observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances and E-region field-aligned irregularities at midlatitude. *J. Geophys. Res.*, 2007, vol. 112, no. A6, art. A06317, pp. 1–9. doi: 10.1029/2005JA011548.
19. Saito S., Yamamoto M., Hashiguchi H., Maegawa A., Saito A. Observational evidence of coupling between quasi-periodic echoes and medium scale traveling ionospheric disturbances. *Ann. Geophys.*, 2007, vol. 25, no. 10, pp. 2185–2194. doi: 10.5194/angeo-25-2185-2007.
20. Morgan M.G., Calderon C.H.J, Ballard K.A. Techniques for the study of TIDs with multistation rapid-run ionosondes. *Radio Sci.*, 1978, vol. 13, no. 4, pp. 729–741. doi: 10.1029/RS013i004p00729.
21. Williams P.J.S., Viridi T.S., Lewis R.V., Lester M., Rodger A.S., McCrea I.W., Freeman K.S.C. Worldwide atmospheric gravity-wave study in the European sector 1985–1990. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, vol. 55, nos. 4–5, pp. 683–696.
22. Habarulema J.B., Katamzi Z.T., McKinnell L.-A. Estimating the propagation characteristics of largescale traveling ionospheric disturbances using ground-based and satellite data. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2013, vol. 118, no. 12, pp. 7768–7782. doi: 10.1002/2013JA018997.
23. Ding F., Wan W., Ning B., Zhao B., Li Q., Wang Y., Hu L., Zhang R., Xiong B. Observations of poleward-propagating large-scale traveling ionospheric disturbances in southern China. *Ann. Geophys.*, 2013, vol. 31, no. 2, pp. 377–385. doi: 10.5194/angeo-31-377-2013.
24. Bowman G.G. A review of some recent work on mid-latitude spread-F occurrence as detected by ionosondes. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 1990, vol. 42, no. 2, pp. 109–138.
25. Lobb R.J., Titheridge J.E., The effects of travelling ionospheric disturbances on ionograms. *J. Geophys. Res.*, 1977, vol. 39, no. 2, pp. 129–138.
26. Akchurin A.D., Bochkarev V.V., Ildiryakov V.R., Usupov K.M. TID selection and research of its characteristics on ionograms. *Proc. 30th URSI Gen. Assem. Sci. Symp.*, 2011, pp. 1–4. doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6050965
27. Cooper J., Cummack C.H. The analysis of a travelling ionospheric disturbance with non-linear ionization response. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1986, vol. 48, no. 1, pp. 61–71.
28. Tsugawa T., Otsuka Y., Coster A.J., Saito A. Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, no. 22. doi: 10.1029/2007GL031663.
29. Afraimovich E.L., Perevalova N.P. GPS-Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere. Irkutsk, GU NTs RVKh VSNTs SO RAMN, 2006. 480 p.
30. Kotake N., Otsuka Y., Ogawa T., Tsugawa T., Saito A. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the GPS networks in Southern California. *Earth, Planets Space*, 2007, vol. 59, no. 2, pp. 95–102. doi: 10.1186/BF03352681.

- 
31. Evans J.V., Holt J.M., Wand R.H., A differential-Doppler study of traveling ionospheric disturbances from Millstone Hill. *Radio Sci.*, 1983, vol. 18, no. 3, pp. 435–451. doi: 10.1029/RS018i003p00435.
- 

*Для цитирования:* Шерстюков Р.О., Акчурин А.Д. Анализ дневных среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений по двумерным картам вариаций полного электронного содержания и ионограммам // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2017. – Т. 159, кн. 3. – С. 374–389.

*For citation:* Sherstyukov R.O., Akchurin A.D. Analysis of daytime medium-scale traveling ionospheric disturbances by two-dimensional maps of total electron content perturbation and ionograms. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2017, vol. 159, no. 3, pp. 374–389. (In Russian)