

УДК 537.876.23

ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА МАЛОИНТЕНСИВНЫМИ СРЕДНЕМАСШТАБНЫМИ ПЕРЕМЕЩАЮЩИМИСЯ ИОНОСФЕРНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ С ПОМОЩЬЮ ГНСС-СИСТЕМ

Р.О. Шерстюков, А.Д. Акчури

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

Аннотация

В работе рассмотрены проблемы детектирования среднеширотных среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений с малой интенсивностью неоднородности электронной концентрации $\Delta N/N$ с помощью метода трансionoсферного зондирования сигналами ГНСС. Для сбора данных была использована плотная сеть ГНСС-приемников (более 150 шт.), расположенная на территории Российской Федерации. На основе полученных экспериментальных данных показана избирательность метода трансionoсферного зондирования к среднemasштабным перемещающимся ионосферным возмущениям в зависимости от геометрических условий наблюдения. Так, использование двумерных карт вариаций полного электронного содержания позволило одновременно наблюдать сигнатуры среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений с помощью спутников R03, G18, имеющих схожие геометрические условия наблюдения, и не наблюдать их с помощью спутника R18. Для данного пространственного расположения среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений максимальные амплитуды вариаций полного электронного содержания наблюдались при углах места зрительных осей спутник – приемник около 50° , а резкое падение амплитуды наблюдалось при углах места более 70° . На основе ГНСС-данных и представлений о пространственной форме, полученных с помощью радаров некогерентного рассеяния, построена схематическая модель, объясняющая причины ракурсности метода ГНСС трансionoсферного зондирования. Предложенная модель позволила создать методику определения вертикального наклона среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений по данным ГНСС. Методика подразумевает наблюдение за динамикой амплитуды вариаций полного электронного содержания в зависимости от ракурсных условий.

Ключевые слова: ионосфера, среднemasштабные перемещающиеся ионосферные возмущения, неоднородности ионосферной плазмы, слой F2, двумерные карты вариаций полного электронного содержания, ионозонд, GPS/GLONASS

Введение

Самым распространенным в средних широтах ионосферным явлением являются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). В первом приближении ПИВ – это неоднородности электронной концентрации, достаточно протяженные в зональном (фронтальном) направлении (не менее 1000 км), которые могут наблюдаться как одно, так и несколько пространственных колебаний (и не обязательно с равноудаленными друг от друга фронтами). Расстояние между соседними пространственными колебаниями (фронтами) называют горизонтальной длиной волны, причем длина волны, как выше отмечено, может изменяться внутри одного цуга от фронта к фронту. Различают крупномасштабные и среднemasштабные ПИВ

(КМ ПИВ и СМ ПИВ), отличающиеся по горизонтальной длине волны и периоду. Длина волны и период, разделяющие КМ ПИВ от СМ ПИВ, составляют 500 км и 1 ч соответственно [1, 2]. Данная граница является условной, главное же отличие состоит в том, что КМ ПИВ в средних широтах проявляется во время геомагнитных возмущений, тогда как СМ ПИВ наблюдаются в среднеширотной ионосфере в геомагнитно-спокойное время [3]. Практически СМ ПИВ присутствуют постоянно и двигаются от авроральной зоны к экваториальной (в обоих полушариях). Принято считать, что физической причиной существования СМ ПИВ являются внутренние гравитационные волны (ВГВ) тропосферно-стратосферного происхождения (см. [4, 5], а также библиографию в [4]). В целом, действительно, в основных проявлениях СМ ПИВ могут объясняться проявлением ВГВ. Однако имеется множество фактов, труднообъяснимых с этой точки зрения. В частности, не понятно, почему СМ ПИВ (а значит, и ВГВ) движутся почти исключительно в направлении экватора, а их фронты – почти всегда прямые (или с довольно слабым искривлением) [6]. Вертикальная структура СМ ПИВ слабо изрезана вертикальной структурой ветра [7], хотя для вертикальной структуры ВГВ, берущих начало в тропосфере, это было бы логичным. И самый сложный вопрос – это постоянное присутствие СМ ПИВ в ионосфере, хотя тропосферные источники существуют не всегда, да и ВГВ могут блокироваться, например, в термосфере и мезосфере [8]. Эти несоответствия можно объяснить тем, что ПИВ – это интегральное следствие проявления ВГВ, воздействующее на объемное распределение электронной концентрации в радиусе не менее 500 км. На сегодняшний день не существует ни одной энергетической модели, способной адекватно описать данную картину. Одним из наиболее информативных методов для регистрации ПИВ является метод некогерентного рассеяния. Радары, работающие на этом принципе, выявили наиболее детальные структуры исследуемых СМ ПИВ и других неоднородностей. Для изучения наиболее интенсивных изменений в ионосфере, а значит, и в случае радиосвязи, НР-радары размещались в основном в экваториальных и авроральных широтах, в местах наиболее интенсивных и разнообразных по форме неоднородностей. Одновременно исследования проводились радарными когерентного рассеяния, чья эффективность измерений находится в сильной зависимости от расположения силовых геомагнитных линий (необходима перпендикулярность луча излучения радара силовой линии), поэтому такие радары не располагаются в средних широтах [9].

Из-за экваториально-аврорального расположения основного исследовательского инструментария практически не изученными оказались среднеширотные СМ ПИВ – самые слабые по интенсивности из наблюдаемых ПИВ. Постоянно действующим инструментом, способным обнаруживать среднеширотные неоднородности, являются ионозонды, однако присущие им ограничения по пространственной регистрации неоднородностей и относительная редкость расположения сетевых ионозондов по сути сводят их деятельность лишь к наблюдению крупномасштабных ПИВ (КМ ПИВ) на основе анализа вариаций критической частоты. Чтобы установить и исследовать пространственные параметры СМ ПИВ, необходимо увеличить частоту регистраций ионограмм до 1 мин, а также желательно иметь сеть близко-расположенных ионозондов на расстояниях до 50 км (при типовой 500 км). В настоящей работе нам удалось реализовать первое из условий, что не потребовало значительных финансовых затрат [10]. Ионозонд в указанной работе использовался лишь как контрольный прибор, удостоверяющий проявление СМ ПИВ на ионограммах. Основным инструментом, позволяющим определять горизонтальное распределение электронной плотности СМ ПИВ, стала появившаяся в последнее время в средних широтах сеть ГНСС-приемников, обеспечивающая трансionoсферное просвечивание ионосферы сигналами геостационарных (высокоорбиталь-

ных) спутников. Результатом использования сети ГНСС-приемников явился массив оценок наклонного полного электронного содержания (ПЭС) по всем возможным направлениям (или зрительным осям) ГНСС-спутник и наземный приемник. Хотя такой подход, через пересчет наклонных ПЭС в вертикальные и удалению влияния фоновой ионосферы, и дал в целом замечательные 2D-карты возмущений, но в целом все же имеет относительно низкую чувствительность, позволяющую в средних широтах легко выделять лишь КМ ПИВ (для которых вполне достаточно порога выделения ПИВ с отсечением шумовой компоненты, равной 0.5 TECU [11]). Низкая чувствительность связана в первую очередь с большой рабочей частотой сигналов ГНСС-спутников, что примерно в 100 раз превышает критические частоты F-слоя. Во-вторых, такой высокий порог – следствие различных процедур пространственного усреднения вариаций фазы сигнала для удаления пространственного шума. Наиболее оптимистичные оценки точности наклонного ПЭС приближаются к 0.01–0.02 TECU [12], однако в реальности выделение СМ ПИВ возможно при пороговых значениях отсека шумов – 0.2 TECU [12, 13].

Как показывает практика, такого порога достаточно для выделения СМ ПИВ в приэкваториальных средних широтах (южнее 45°), где достаточно интенсивное СМ ПИВ не требует для своего выделения учета ориентации зрительных осей (углов азимута и возвышения). Это также относится к регистрациям проявления сильнейших землетрясений. Однако на более высоких средних широтах (севернее 45°) ситуация иная, когда, не имея непосредственной возможности увеличения чувствительности при радиоприеме, порог регистрации СМ ПИВ можно повысить за счет отбора наблюдений, когда параметры сигналов зрительных осей спутник–приемник обладают наибольшей чувствительностью к СМ ПИВ. Это проявляется во времена, когда на всем пути следования радиолуча будут находиться области только с одним знаком отклонений электронной плотности от фона. Другими словами, конкретные зрительные оси должны лежать в областях либо с повышенной относительно фона, либо с пониженной электронной концентрациями. Так как измерение ПЭС носит интегральный характер, следует избегать зрительных осей, пересекающих несколько зон с повышенной и пониженной концентрациями, поскольку это приведет к нивелированию регистрируемых параметров с точки зрения выделения наибольших вариаций ПЭС. Такой отбор полезен также для получения 3D-портрета возмущений в ПЭС при составлении соответствующей системы уравнений. Однако построит такую 3D-картину пока невозможно из-за недостаточного количества ГНСС-приемников в реальной сети. С другой стороны, подход с удачным выбором расположения зрительных осей спутник–приемник таким, чтобы каждая из них целиком лежала в области только с пониженной/повышенной концентрацией, может оказаться плохо реализуемым, если у нас будет отсутствовать априорная информация о проходящих ПИВ. Это связано с большими временными затратами по перебору и поиску зрительных осей с ориентацией, при которой разность ПЭС между ними будет максимальной, если нам ничего не известно о горизонтальной, а самое главное о вертикальной структуре ПЭС. Но, обладая накопленной информацией о СМ ПИВ, расположенных в более южных широтах, где сами СМ ПИВ являются более интенсивными (и, следовательно, легче детектируемыми), это возможно, в частности, на основе измерений самого чувствительного НР-радар в Аресибо, Пуэрто-Рико.

Чувствительность данного радара достигнута не только за счет превосходных мощностных показателей, но и во многом за счет работы в дневное время на плазменной (электронной) линии, усиленной фотоэлектронами, что позволяет получать значения плазменной частоты с точностью, достигающей 0.3 кГц [14]. Однако повышенная точность достигается как за счет повышенной энергетики системы, так

и из-за постоянства измерения в определенных направлениях. Система является плохо перестраиваемой по зрительной оси (радиолучу), поэтому картина внутренней структуры СМ ПИВ не является чисто пространственной, а представляет собой временные изменения в области неподвижного вертикального конуса излучаемого радиолуча. При допущении сходства основных черт южных среднеширотных СМ ПИВ (в районе Аресибо) и северных среднеширотных СМ ПИВ (в среднем Поволжье) можно воспользоваться описанием структуры СМ ПИВ, наблюдаемых в Аресибо, для выбора благоприятных осей спутник – приемник для выявления СМ ПИВ в среднем Поволжье.

Если до недавнего времени вопрос выбора ориентаций зрительных осей, по которым ведется подсчет наклонного ПЭС для построения карт ПЭС и выделения на них возмущений, внимательно не рассматривался, так как изначально выделялись КМ ПИВ или интенсивные СМ ПИВ, то сейчас для выделения СМ ПИВ этот учет начал производиться. Отметим, что значительный опыт учета ориентаций зрительных осей накоплен при измерениях на астрономических радиоинтерферометрах [15, 16], в ионосферных измерениях также осуществлялись попытки как-то промоделировать этот эффект для дальнейшего экспериментального обнаружения [17]. Таким образом, в настоящей работе нами представлена методика выбора зрительных осей спутник – приемник для выделения СМ ПИВ, а также результаты анализа с ее применением на основе измерений сети среднеширотных станций ГНСС.

1. Метод и результаты

В работе используются данные, полученные на среднеширотной сети станций ГНСС-сигналов, охватывающей свыше 150 приемных пунктов. Их взаимное расположение схематически представлено на рис. 1. Звездочкой отмечено расположение ионозонда Казанского федерального университета (55.5° с.ш., 49° в.д.) Все приемники ГНСС-сигналов являются двухчастотными и способны регистрировать данные о фазовых задержках на двух частотах $f_1 = 1575.42$ МГц, $f_2 = 1227.60$ МГц, в то время как несущие частоты спутников GPS изменяются, $f_1 = 1602 + n \cdot 0.5625$ МГц, несущие частоты спутников ГЛОНАСС $f_2 = 1246 + n \cdot 0.4375$ МГц, где n – номера частотных каналов ($n = -7, -6, -5, 0, , 6$). Наклонное ПЭС, обозначаемое как I_s (суммарная электронная плотность вдоль всей зрительной оси между приемником и спутником) может быть получено 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 , λ_1 и λ_2 – длины волн несущих, $\text{const}_{1,2}$ – неоднозначность фазовых измерений, σL – ошибка фазовых измерений.

Нами анализируются вариации ПЭС, которые получены с помощью удаления низкочастотной составляющей (вычитания одночасового скользящего среднего) из регистрируемых значений ПЭС (1). Такой метод удаления тренда является наиболее простым для исследований ПИВ при помощи густой сети спутниковых навигационных приемников [6].

Каждая зрительная ось спутник – приемник в определенный момент времени характеризуется значениями вариации ПЭС и координатами подионосферной точки (проекция на поверхность Земли точки пересечения зрительной оси спутник – приемник с максимумом области F2). Для каждого наблюдаемого момента времени в соответствии с координатами подионосферных точек значения вариаций ПЭС

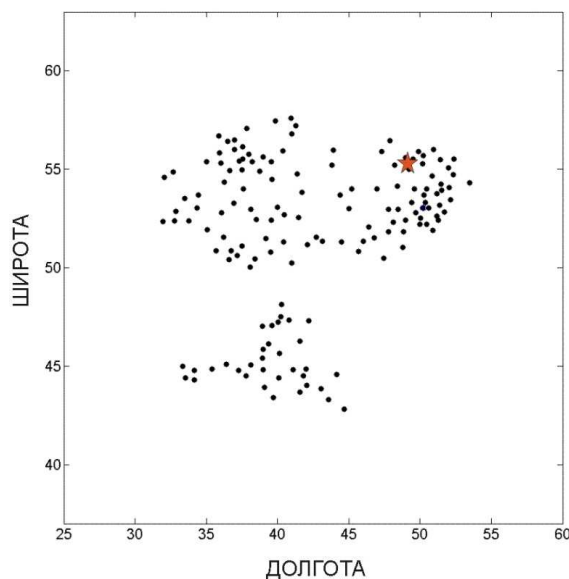


Рис. 1. Схематическое расположение на карте координат приемников (точки) ГНСС-сигналов и координат ионозонда (красная звездочка)

фиксируются на координатной сетке. Данные для всех регистрируемых подионосферных точек позволяют сформировать двумерные карты вариаций ПЭС (ПЭС-карты) (вопрос построения ПЭС-карт рассмотрен в [18]).

Дневные СМ ПИВ в средних широтах могут иметь интенсивность неоднородности электронной концентрации $\Delta N/N < 10\%$, при этом длины волн составляют менее 100 км. Небольшие размеры неоднородностей делают их практически незаметными для наблюдения с помощью метода трансionoсферного зондирования ГНСС-сигналами, поэтому они не всегда отображаются на двумерных картах вариаций ПЭС. Данный метод обладает высокой точностью (≈ 0.02 TECU) определения неоднородности электронной концентрации. Однако величина ПЭС является интегральной, поэтому на нее будут влиять пространственная форма и расположение неоднородностей. Более того, некоторые неоднородности могут оставаться незамеченными или детектироваться искаженно. Поэтому для данного метода важен учет геометрического расположения зрительных осей спутник – приемник относительно пространственного расположения неоднородности [17].

На основе экспериментальных данных сети ГНСС-приемников рассмотрим влияние на вариации ПЭС расположения зрительных осей спутник – приемник относительно фронтов ПИВ. 2D-карты вариаций ПЭС строились для измерений 21 августа 2016 г. (9:45 ÷ 10:35 UT) со спутников ГНСС G18, R03, R18. На рис. 2 (сверху) представлены двумерные карты вариаций ПЭС с присутствующими полосчатыми структурами (сигнатуры СМ ПИВ на ПЭС-картах) для трех различных спутников ГНСС-сигналов (G18, R03, R18) в 10:00 UT. На ПЭС-картах, построенных для спутников G18 и R03, в широкой области пространства (более 1000 км²) наблюдаются перемещающиеся в юго-восточном направлении полосчатые структуры с амплитудами вариаций ПЭС до 1 TECU, в это же время на ПЭС-карте со спутника R18 полосчатые структуры отсутствуют. Понаблюдаем за вариациями ПЭС на одном из приемных пунктов ГНСС-сигналов с координатами 34.7° с.ш., 53° в.д. На рис. 2 (снизу) видно, что после 10:00 UT вариации ПЭС по данным со спутников G18 и R03 имеют примерно одинаковые периоды положительного отклонения

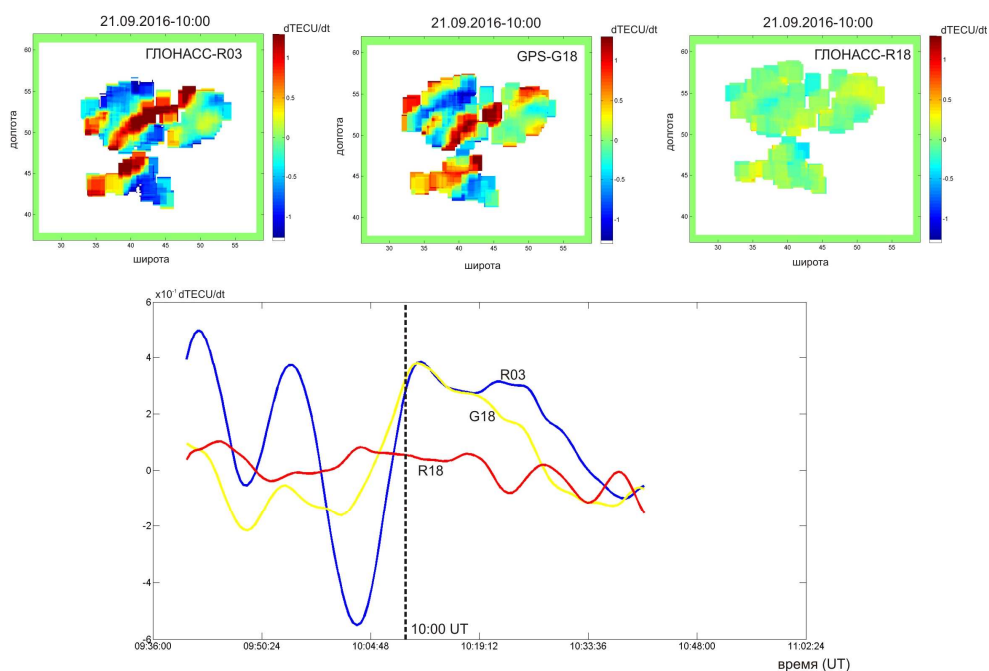


Рис. 2. Двумерные карты вариаций ПЭС для спутников R03, G18, R18 (сверху) и вариации ПЭС на приемнике ГНСС-сигналов с координатами 34.7° с.ш., 53° в.д. (снизу)

(30 мин) и амплитуды около 0.4 TECU. В это же время амплитуда вариации ПЭС для спутника R18 не превышает 0.1 TECU, а период вариаций в несколько раз меньше, чем для R03, G18.

Рассмотрим взаимное расположение зрительных осей спутник – приемник (для спутников R03, R18, G18) и горизонтального фазового фронта ПИВ в период с 9:45 до 10:35 UT (рис. 3, слева). Пунктирные линии на рис. 3 (слева), соединяющие подионосферные точки (синие окружности на рисунке) и точку расположения приемника (синий круг), являются зрительными осями спутник – приемник. Горизонтальные фазовые фронты ПИВ обозначены прямыми черными линиями, а стрелки указывают на направление их движения. Рассмотрим отдельно перемещение спутника R18, для которого СМ ПИВ на ПЭС-картах не наблюдаются в период $9:45 \div 10:10$ и $10:10 \div 10:35$ UT. Зрительная ось спутника R18 в период $9:45 \div 10:10$ UT направлена в сторону уходящего фронта СМ ПИВ. Снова обратимся к рис. 2 (снизу), в этом промежутке времени амплитуды вариации ПЭС для R18 не превышают 0.1 TECU. В период $10:10 \div 10:35$ UT азимут зрительной оси изменился на 60° относительно горизонтального фазового фронта волны. Такое быстрое во времени изменение геометрических условий наблюдения можно заметить в виде высокочастотных вариаций ПЭС (период 10 мин) на рис. 2, снизу. Эти вариации не являются сигнатурами неоднородности, а вызваны лишь изменением условий наблюдения. Отметим, что углы места зрительной оси R18 за все время наблюдения изменились с 63° до 80° , важность выбора углов места для наблюдения за СМ ПИВ будет рассмотрена ниже.

Далее рассмотрим геометрические условия наблюдения для спутников R03, G18. Оба спутника имеют схожую траекторию, а сигнатуры СМ ПИВ присутствуют на ПЭС-картах. Зрительные оси спутников направлены в сторону приближающихся фазовых фронтов СМ ПИВ в течение всего времени наблюдения,

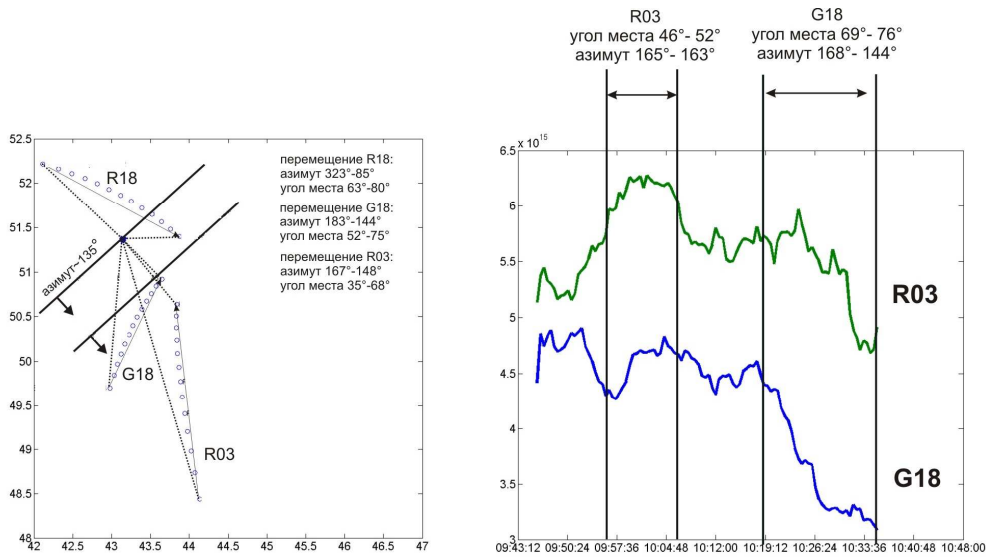


Рис. 3. Расположение зрительных осей спутников R03, R18, G18 и фронтов СМ ПИВ (слева) и среднее арифметическое модулей вариаций ПЭС со всех приемных пунктов (справа)

а их азимуты изменяются не более чем на 40° . Такие изменение азимута и расположение зрительных осей относительно фазового фронта волны не влияют значительно на амплитуду вариаций ПЭС (пояснение данного тезиса приведены ниже), поэтому для R03, G18 можно детально рассмотреть влияние углов места зрительных осей на амплитуду вариаций ПЭС. Рассчитаем для каждого момента времени среднее арифметическое модулей вариаций ПЭС со всех приемных пунктов (см. рис. 3, справа). Усредненные значения вариаций ПЭС для R03 начинают расти в 9:50 UT и достигают максимума в 10:00 UT, максимальные амплитуд вариаций ПЭС наблюдаются при углах места 50° . Для спутника G18 максимальные значения усредненных амплитуд вариаций ПЭС наблюдаются в 9:45 ÷ 9:50 UT при углах места зрительной оси $52^\circ \div 54^\circ$. После 10:20 UT для G18 и после 10:30 для R03 наблюдается быстрое уменьшение усредненных амплитуд вариаций ПЭС, в это время углы места зрительных осей больше 70° .

На основе экспериментальных данные можно заключить следующее: сигнатуры СМ ПИВ наблюдаются на ПЭС-картах (видны в вариациях ПЭС) только, когда зрительная ось спутник – приемник направлена в сторону приближающегося фазового фронта СМ ПИВ, а амплитуда вариаций ПЭС сильно зависит от угла места зрительной оси спутник – приемник.

Рассмотрим схематическое трехмерное представление СМ ПИВ и его проекций на горизонтальную ось географических широт и долгот (см. рис. 4), которое поможет объяснить экспериментально полученное изменение амплитуды вариаций СМ ПИВ для разных зрительных осей. Представления о вертикальной форме СМ ПИВ взяты из результатов наблюдения радара в Аресибо [12]. Зрительные оси отображены красными и синими линиями (различия будут описаны ниже), приемник находится в стационарном положении, а спутник перемещается в пространстве. Упрощенным схематическим пространственным представлением неоднородности электронной концентрации типа СМ ПИВ являются наклонные плиты (на рис. 4, сверху), которые имеют наклон в вертикальной плоскости и вытянуты в горизонтальной плоскости от сотен километров до нескольких тысяч километров. Эти

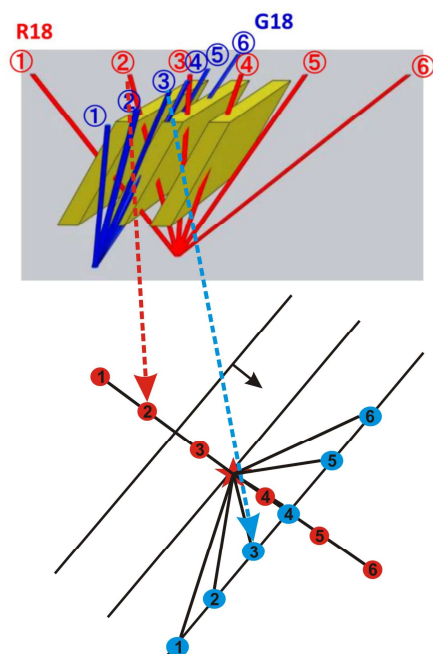


Рис. 4. Схематическое трехмерное представление СМ ПИВ (сверху) и его проекция на горизонтальную ось географических широт и долгот (снизу)

неоднородности проявляются как чередующиеся зоны повышенной и пониженной электронной концентрации [14]. Как было определено ранее, приемники ГНСС-сигналов детектируют интегральную задержку фазы радиосигнала на всем пути распространения через ионосферу. Таким образом, СМ ПИВ, наблюдаемые с помощью синих зрительных осей, будут иметь максимальные вариации ПЭС, так как суммарный набег фазы будет аккумулирован распространением сквозь всю толщу конкретной зоны неоднородности (плиты) повышенной/пониженной электронной концентрации. Сравним гипотетический результат измерений и реальные измерения сигнала со спутников R03 и G18. Схожие геометрические условия наблюдения имеют синяя зрительная ось 3 (рис. 4, снизу) и экспериментальные зрительные оси спутников R03, G18 в 09:50 ÷ 10:00 UT (рис. 3, слева). По-видимому, наибольшие отклонения азимута зрительных осей от направления распространения фазового фронта неоднородности (синие точки 1 и 6) будут давать наибольший эффект накопления фазовой задержки и, соответственно, улучшать условия детектирования СМ ПИВ.

На рис. 4 (сверху) видно, что красные зрительные оси пересекают зоны как пониженной, так и повышенной электронной концентрации. При таких геометрических условиях наблюдения суммарный набег фазы будет минимальным, а СМ ПИВ могут остаться незамеченными. Если сравнивать гипотетический результат измерения (красные точки 1–6 на рис. 4, снизу) и реальные измерения сигнала со спутника R18 (рис. 3, слева), то будут наблюдаться схожие геометрические условия наблюдения для красных точек 4, 5, 6 и экспериментальных данных для спутника R18 в 09:40 ÷ 10:00 UT (рис. 3, слева).

Очевидно, что большое влияние на амплитуду вариаций ПЭС имеет соотношение вертикального наклона СМ ПИВ и угла места зрительной оси спутник–приемник, так как это влияние может приводить не только к изменению амплитуды сигнала, но и к полной «слепоте» метода наблюдения.

На основе анализа данных со спутника R03 было получено, что максимальные значения вариаций ПЭС наблюдаются для углов места, близких к 50° . Рассмотренная гипотетическая модель трансionoсферного зондирования через наклонные неоднородности (плиты) с высокой долей достоверности (так как данные усреднены с более чем 150 приемных пунктов) устанавливает, что в результате эксперимента наблюдались СМ ПИВ с вертикальным наклоном фазового фронта неоднородности (в области F2 максимума слоя) около 50° в сторону направления движения.

2. Обсуждения и заключение

В работе представлена методика обнаружения среднемасштабных среднеширотных СМ ПИВ методом трансionoсферного зондирования с помощью сигналов ГНСС. Показано, что часть СМ ПИВ может оставаться незамеченными или детектированными искаженно. Из-за трехмерной пространственной формы СМ ПИВ их детектирование требует подбора зрительных осей спутник – приемник. Проведенный эксперимент позволил определить критерии подбора спутников, для уверенного детектирования СМ ПИВ, а также выявил согласованность трехмерной формы СМ ПИВ в средних широтах в виде вытянутых зон повышенной/пониженной электронной концентрации (наклоненных плит) (см. рис. 4), с представлениями о форме по данным радара Аресибо [14]. На основе данных с более чем 150 ГНСС-приемников выявлено, что отношения обоих углов зрительной оси (зенитного и азимутального) к фазовому фронту влияют на обнаружение СМ ПИВ. Несовпадение зенитного угла зрительных осей и наклона фазового фронта в вертикальной плоскости приводит к частичному или полному нивелированию набега фазы в результате прохождения радиолуча сквозь обе зоны повышенной и пониженной электронной концентрации. Так как СМ ПИВ в вертикальной плоскости наклонены в сторону движения фазового фронта, то наблюдения за ними со спутников, располагающихся позади удаляющихся СМ ПИВ, будет некорректным (см. рис. 4, красный луч (1)). Опираясь на одномоментные данные со спутников (R03, R18, G18), нам удалось достоверно показать, что в присутствии СМ ПИВ один из спутников (R18) их не детектирует, что позволяет судить об избирательности метода трансionoсферного зондирования к СМ ПИВ в зависимости от геометрических условий наблюдения.

Подбор зенитных углов зрительной оси спутник – приемник определяет детектирование конкретной зоны повышенной/пониженной электронной концентрации, исключает суммирование набега фазы от соседних зон. Особенность метода трансionoсферного зондирования осложняет детектирование СМ ПИВ, однако является индикатором, содержащим информацию о вертикальном наклоне фазового фронта неоднородности. Такая информация необходима для поиска причин возникновения СМ ПИВ. Так, например, при ассоциации СМ ПИВ с ВГВ необходимо, чтобы параметры неоднородности удовлетворяли дисперсионному соотношению. В работе показано, что при углах места зрительных осей спутников G18, R03 около 50° усредненные амплитуды вариаций ПЭС с более чем 150 приемников ГНСС максимальны. Таким образом, мы косвенно определяем вертикальный наклон СМ ПИВ равным 50° .

При углах места более 70° наблюдается резкое падение усредненной амплитуды вариаций ПЭС. Суммирование набега фазы от соседних зон повышенной и пониженной электронной концентрации становится критичным для детектирования СМ ПИВ, полосчатые структуры на двумерных ПЭС-картах исчезают. В работе установлено, что взаимное расположение проекций зрительных осей на горизонтальную плоскость (широт и долгот) и направлений движения горизонтального

фазового фронта волны влияет только на амплитуды наблюдаемых вариаций ПЭС, не приводит к ошибкам детектирования. Минимальные значения вариаций ПЭС наблюдаются, если зрительная ось и направления движения фазового фронта коллинеарные. Таким образом, большее влияние на способность метода ГНСС трансферного зондирования детектировать СМ ПИВ оказывает соотношение вертикального наклона СМ ПИВ и угла места зрительной оси спутник–приемник, так как это влияние может приводить не просто к изменению амплитуды сигнала, а к полной «слепоте» метода наблюдения за СМ ПИВ.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00593.

Литература

1. *Georges T.M.* HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1968. – V. 30, No 5. – P. 735–746. – doi: 10.1016/S0021-9169(68)80029-7.
2. *Hunsucker R.D.* Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1982. – V. 20, No 2. – P. 293–315. – doi: 10.1029/RG020i002p00293.
3. *Francis S.H.* Global propagation of atmospheric gravity waves: A review // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1975. – V. 37, No 6–7. – P. 1011–1054. – doi: 10.1016/0021-9169(75)90012-4.
4. *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // *Ann. Geophys.* – 1996. – V. 14. – P. 917–940. – doi: 10.1007/s00585-996-0917-6.
5. *Akchurin A.D., Sherstyukov O.N., Zykov 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. – doi: 10.1016/S0273-1177(97)00793-X.
6. *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.
7. *Djuth F.T., Sulzer M.P., Elder J.H., Wickwar V.B.* High-resolution studies of atmosphere-ionosphere coupling at Arecibo Observatory, Puerto Rico // *Radio Sci.* – 1997. – V. 32, No 6. – P. 2321–2344. – doi: 10.1029/97RS02797.
8. *Livneh D.J., Seker I., Djuth F.T., Mathews J.D.* Omnipresent vertically coherent fluctuations in the ionosphere with a possible worldwide-midlatitude extent // *J. Geophys. Res.* – 2009. – V. 114, No A6. – Art. A06303, P. 1–12. – doi: 10.1029/2008JA013999.
9. *Fejer B.G., Kelley M.C.* Ionospheric irregularities // *Rev. Geophys.* – 1980. – V. 18, No 2. – P. 401–454. – doi: 10.1029/RG018i002p00401.
10. *Sherstyukov R.O., Akchurin A.D., Sherstyukov O.N.* Collocated ionosonde and dense GPS/GLONASS network measurements of midlatitude MSTIDs // *Adv. Space Res.* – 2018. – V. 61, No 7. – P. 1717–1725. – doi: 10.1016/j.asr.2017.11.026.
11. *Ding F., Wan W., Li Q., Zhang R., Song Q., Ning B., Liu L., Zhao B., Xiong B.* Comparative climatological study of large-scale traveling ionospheric disturbances over North America and China in 2011–2012 // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 2014. – V. 119, No 1. – P. 519–529. – doi: 10.1002/2013JA019523.
12. *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, No 2. – P. 163–172. – doi: 10.5194/angeo-31-163-2013.

13. *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. – V. 59, No 2. – P. 95–102. – doi: 10.1186/BF03352681.
14. *Djuth F.T., Zhang L.D., Livneh D.J., Seker I., Smith S.M., Sulzer M.P., Mathews J.D., Walterscheid R.L.* Arecibo's thermospheric gravity waves and the case for an ocean source // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115, No A8. – Art. A08305, P. 1–22. – doi: 10.1029/2009JA014799.
15. *Hoogeveen G.W., Jacobson A.R.* Improved analysis of plasmasphere motion using the VLA radio interferometer // *Ann. Geophys.* – 1997. – V. 15, No 2. – P. 236–245. – doi: 10.1007/s00585-997-0236-6.
16. *Kirkland M.W., Jacobson A.R.* Drift-parallax determination of the altitude of traveling ionospheric disturbances observed with the Los Alamos radio-beacon interferometer // *Radio Sci.* – 1998. – V. 33, No 6. – P. 1807–1826. – doi: 10.1029/98RS02033.
17. *Afraimovich E.L., Terekhov A.I., Udodov M.Iu., Fridman S.V.* Refraction distortions of trasionospheric radio signals caused by changes in a regular ionosphere and by travelling ionospheric disturbances // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1992. – V. 54, No 7–8. – P. 1013–1020. – doi: 10.1016/0021-9169(92)90068-V.
18. *Шерстюков Р.О., Акчурин А.Д.* Анализ дневных среднемасштабных 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.

Поступила в редакцию
27.06.18

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: sher-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

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
 SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
 (Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)
 2018, vol. 160, no. 4, pp. 603–616

Observation of Daytime Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances Using GNSS Systems

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

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

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

Received July 27, 2018

Abstract

The paper considers the problems of detecting midlatitude MSTIDs with a low intensity of disturbance $\Delta N/N$ using the method of transionospheric sounding with GNSS signals. For data collection, a dense network of GNSS receivers (> 150) located in the territory of the Russian Federation has been used. On the basis of the obtained experimental data, we have shown the selectivity of the method of transionospheric sensing to the MSTID depending on the geometric conditions of observation. Thus, the use of two-dimensional maps of TEC variations has allowed us to simultaneously observe the signatures of the MSTID with the help of the R03 and G18 satellites (with similar geometric observation conditions). They have not been observed upon the usage of the R18 satellite. For a given spatial arrangement of the MSTID, the maximum amplitudes of TEC variations have been observed at elevation angles of the satellite-receiver lines-of-sight at about 50° . The sharp drop in amplitudes has been observed at elevation angles more than 70° . Using our GNSS data and representations of the spatial form obtained using incoherent scatter radars, a schematic model has been constructed to explain the reasons for the geometric conditions dependence of the GNSS method of transionospheric sounding. The proposed model has allowed us to obtain a method for determining the vertical slope of the MSTID using GNSS data. The technique implies observation of the dynamics of the amplitude of TEC variations depending on the geometric observation conditions.

Keywords: ionosphere, MSTID, LSTID, perturbations of ionospheric plasma, F2 layer, TEC map, ionosonde, GPS/GLONASS

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-35-00593.

Figure Captions

Fig. 1. Schematic mapping of the GNSS signal receivers (dots) and ionosonde (red asterisk) coordinates.

Fig. 2. Two-dimensional TEC maps for the R03, G18, and R18 satellites (upwards) and TEC variations for the GNSS signal receiver at 34.7° N, 53° E (downwards).

Fig. 3. Arrangement of the optical axes of the R03, R18, G18 satellites and the MSTID fronts (on the left) and the arithmetic mean of the modules of variations in TEC from all receiving sites (on the right).

Fig. 4. Schematic three-dimensional representation of MSTID (upwards) and its projection onto the horizontal axis of geographic latitudes and longitudes (downwards).

References

1. Georges T.M. HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1968, vol. 30, no. 5, pp. 735–746. doi: 10.1016/S0021-9169(68)80029-7.
2. Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1982, vol. 20, no. 2, pp. 293–315. doi: 10.1029/RG020i002p00293.
3. Francis S.H. Global propagation of atmospheric gravity waves: A review. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1975, vol. 37, nos. 6–7, pp. 1011–1054. doi: 10.1016/0021-9169(75)90012-4.
4. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophys.*, 1996, vol. 14, no. 9, pp. 917–940. doi: 10.1007/s00585-996-0917-6.
5. 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. doi: 10.1016/S0273-1177(97)00793-X.
6. 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, art. L22101, pp. 1–5. doi: 10.1029/2007GL031663.
7. Djuth F.T., Sulzer M.P., Elder J.H., Wickwar V.B. High-resolution studies of atmosphere-ionosphere coupling at Arecibo Observatory, Puerto Rico. *Radio Sci.*, 1997, vol. 32, no. 6, pp. 2321–2344. doi: 10.1029/97RS02797.
8. Livneh D.J., Seker I., Djuth F.T., Mathews J.D. Omnipresent vertically coherent fluctuations in the ionosphere with a possible worldwide-midlatitude extent. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, no. A6, art. A06303, pp. 1–12. doi: 10.1029/2008JA013999.
9. Fejer B.G., Kelley M.C. Ionospheric irregularities. *Rev. Geophys.*, 1980, vol. 18, no. 2, pp. 401–454. doi: 10.1029/RG018i002p00401.
10. Sherstyukov R.O., Akchurin A.D., Sherstyukov O.N. Collocated ionosonde and dense GPS/GLONASS network measurements of midlatitude MSTIDs. *Adv. Space Res.*, 2018, vol. 61, no. 7, pp. 1717–1725. doi: 10.1016/j.asr.2017.11.026.
11. Ding F., Wan W., Li Q., Zhang R., Song Q., Ning B., Liu L., Zhao B., Xiong B. Comparative climatological study of large-scale traveling ionospheric disturbances over North America and China in 2011–2012. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2014, vol. 119, no. 1, pp. 519–529. doi: 10.1002/2013JA019523.
12. 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, no. 2, pp. 163–172. doi: 10.5194/angeo-31-163-2013.
13. 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.
14. Djuth F.T., Zhang L.D., Livneh D.J., Seker I., Smith S.M., Sulzer M.P., Mathews J.D., Walterscheid R.L. Arecibo's thermospheric gravity waves and the case for an ocean source. *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115, no. A8, art. A08305, pp. 1–22. doi: 10.1029/2009JA014799.
15. Hoogeveen G.W., Jacobson A.R. Improved analysis of plasmasphere motion using the VLA radio interferometer. *Ann. Geophys.*, 1997, vol. 15, no. 2, pp. 236–245. doi: 10.1007/s00585-997-0236-6.
16. Kirkland M.W., Jacobson A.R. Drift-parallax determination of the altitude of traveling ionospheric disturbances observed with the Los Alamos radio-beacon interferometer. *Radio Sci.*, 1998, vol. 33, no. 6, pp. 1807–1826. doi: 10.1029/98RS02033.

17. Afraimovich E.L., Terekhov A.I., Udodov M.Iu., Fridman S.V. Refraction distortions of trasionospheric radio signals caused by changes in a regular ionosphere and by travelling ionospheric disturbances. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, vol. 54, nos. 7–8, pp. 1013–1020. doi: 10.1016/0021-9169(92)90068-V.
 18. 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)
-

Для цитирования: Шерстюков Р.О., Акчурин А.Д. Особенности наблюдения за малоинтенсивными среднemasштабными перемещающимися ионосферными возмущениями с помощью ГНСС-систем // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 4. – С. 603–616.

For citation: Sherstyukov R.O., Akchurin A.D. Observation of daytime medium-scale traveling ionospheric disturbances using GNSS systems. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2018, vol. 160, no. 4, pp. 603–616. (In Russian)