

УДК 537.876.23

doi: 10.26907/2541-7746.2019.3.468-480

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ВЫШЕ И НИЖЕ МАКСИМУМА СЛОЯ F ПО ДАННЫМ ИОНОЗОНДА И СПУТНИКОВ SWARM

*А.Д. Акчурин, Г.С. Смирнов*

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

### Аннотация

Одним из подходов к определению высотной структуры среднеширотных среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (СМ ПИВ) выше пика слоя F является использование одновременных спутниковых измерений совместно с наземными ионозондовыми измерениями на примере г. Казани. Наиболее подходящими для наших целей оказались данные об электронной концентрации, полученные со спутниковой эскадры Swarm. Для точной пространственной привязки к спутниковым данным использовался строгий отбор данных дневных пролетов спутников: их траектория не должна удаляться от долготы Казани более 100 км вдоль широты, а пространственная протяженность неоднородности в измерениях плазмосферной электронной плотности должна быть не менее 100 км без более мелких (высокочастотных) неоднородностей. Из всех пролетов спутников за ~ 2 года (2016–2018 гг.) удалось выбрать только 7 таких случаев. Для найденных случаев были построены взаимные корреляционные функции последовательностей значений двух рядов критической частоты и электронной концентрации. Корреляционная функция имеет яркий отрицательный пик с разбросом в пределах 100 км, что с учетом типичной горизонтальной длины волны СМ ПИВ (~ 200 км) означает противофазное поведение электронных концентраций внутри СМ ПИВ ниже и выше пика слоя F дневной среднеширотной ионосферы.

**Ключевые слова:** ионосфера, СМ ПИВ, неоднородность ионосферной плазмы, F-область, верхняя ионосфера, ионозонд, спутниковое измерение

### Введение

В ионосфере Земли постоянно присутствуют неоднородности различных масштабов, для регистрации которых применяются различные методы от дистанционных до ракетных/спутниковых по месту (*in situ*). Однако ни один метод не может показать всю картину неоднородности с полным пространственным распределением концентрации всех основных компонентов плазмы и их температуры (а часто необходимо знать еще и распределение электрических полей). Все это не позволяет определить физическую причину образования неоднородностей и, как следствие, предсказать место и время их появления, а также их размеры и продолжительность существования. В частности, в средних широтах спорные вопросы в механизмах существования неоднородностей относятся к среднемасштабным перемещающимся ионосферным возмущениям (СМ ПИВ), постоянно присутствующим в магнитно-спокойные времена. Традиция отнесения всех ионосферных возмущений, перемещающихся на протяженные расстояния без значительного изменения формы, к волновому действию нейтральной атмосферы привела к устойчивому

безоговорочному мнению о СМ ПИВ как о результате простого безреактивного (без ответной реакции) перераспределения ионосферной плазмы под действием внутренней гравитационной волны (ВГВ) среднего масштаба. При таком подходе структура СМ ПИВ (в виде пространственного перераспределения ионосферной ионизации) представляет простой слепок структуры ветров внутри ВГВ, правда, с учетом геометрии расположения фронтов ВГВ по отношению к геомагнитным линиям [1]. Такому подходу к СМ ПИВ также способствовало то, что непосредственная регистрация параметров нейтральной атмосферы (в частности скорости ветра) крайне затруднительна, и практически было удобнее считать СМ ПИВ простым ионосферным трассером ВГВ.

С ростом экспериментальных свидетельств СМ ПИВ на различной приборной базе стало возникать не мало вопросов к возникшему в 60-х годах XX в. подходу к СМ ПИВ как о простом слепке ВГВ, которые рождаются в нижней атмосфере и постоянно «бомбардируют» среднюю и верхнюю ионосферу. В частности, СМ ПИВ имеют устойчивую тенденцию распространяться в направлении экватора во всех полушариях с непонятным отличием в направлении зональной составляющей: к востоку днем и к западу ночью [2, 3]. Для любых источников среднемасштабных ВГВ (если первоначально исключить те, что находятся в авроральной зоне) такое распространение их слепка, в виде СМ ПИВ, приводит к нестыковкам. И если, несмотря на достаточные противоречия в этой гипотезе, связанных с большой дальностью распространения, все же принять версию о генерации СМ ПИВ через ВГВ, то необходимо учитывать в рассмотрение электрические поля в авроральной зоне, возможно участвующие в возбуждении СМ ПИВ. А если эти поля как-то участвовали в создании СМ ПИВ, то интересно понять, могут ли они каким-либо образом сопровождать СМ ПИВ (или участвовать в сохранении СМ ПИВ) по мере их распространения через средние широты к низким. Из-за отсутствия в средних широтах достаточного мощного и быстро сканирующего НР-радара эту задачу можно решать лишь на мультиинструментальной базе не столь дорогостоящих и не столь информативных приборов.

Для выяснения наличия какой-либо связи между параметрами ионосферы выше и ниже слоя F2 требовался источник данных для высот от 300 до 1000 км. Самым доступным вариантом казалась попытка использовать низколетящий спутник, записывающий какие-либо параметры окружающего пространства, имеющие шанс быть связанными с явлениями, наблюдаемыми на данных наземного ионосферного зондирования.

## 1. Аппаратура и использованные данные

Наиболее подходящими для наших целей оказались данные об электронной концентрации, полученные с комплекса спутников Swarm и предоставляемые европейским космическим агентством. Спутниковая эскадра Swarm – группировка из трех спутников, запущенных европейским космическим агентством 22 ноября 2013 г. с целью изучения геомагнитного и электромагнитного полей Земли. Группировка состоит из спутников Swarm-A, Swarm-B, Swarm-C, летящих в меридиональной плоскости с наклоном орбиты  $87.4^\circ$  для спутников А и С и  $88^\circ$  для спутника В. Спутники А и С следуют параллельными траекториями со смещением около  $1.5^\circ$  по долготе на высоте около 470 км, а спутник В движется по более высокой орбите около 520 км. Одним из инструментов, установленном на всех спутниках Swarm и рассматриваемом в данной работе, является прибор электрического поля (EFI) [4], имеющий в составе два лентмюровских зонда, из которых один работает в режиме с высоким коэффициентом усиления, а другой – в режиме с низким

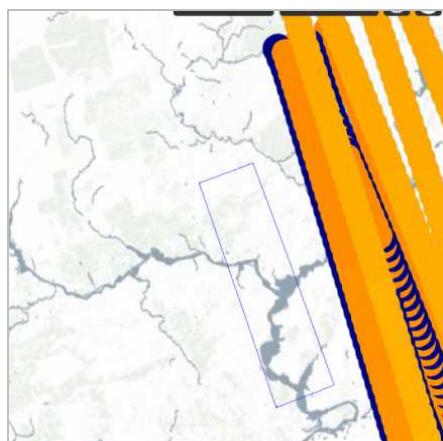


Рис. 1. Географическая область выборки, выделенная прямоугольником, и траектории пролета спутников над этой областью

коэффициентом усиления. Ленгмюровские зонды обеспечивают данные об электронной концентрации от зонда с высоким коэффициентом усиления. Данные вариаций электронной концентрации, а также электронной температуры от Swarm были сравнены и откалиброваны с данными средне- и низкоширотных радаров некогерентного рассеяния, низкоширотных ионозондов и спутников COSMIC в период с 2013 по 2016 г. Несмотря на некоторое систематическое смещение, данные о вариации электронной концентрации, полученные на Swarm, показали высокую корреляцию с другими источниками данных и при отсутствии необходимости в точных мгновенных значений могут быть использованы в качестве достоверно передающих относительные вариации [5]. В работе использовались измерения всех трех спутников для повышения размера в настоящей выборке. Данные взяты с файлового сервера (<ftp://swarm-diss.eo.esa.int>). Для выборки данных были использованы возможности предоставляемого ESA ресурса VirES (<https://vires.services>), позволяющего сортировать и графически отображать спутниковые данные, в том числе с ограничением по требуемым географическим координатам. Целевая географическая зона, использованная в нашем анализе и графически отображенная в VirES, показана на рис. 1. Оранжевыми и синими полосами отображаются отдельные участки траектории пролета спутников в различные дни.

Источником экспериментальной информации о неоднородной структуре нижней стороны слоя F является ионозонд «Циклон», расположенный под Казанью на  $55.8^\circ$  с.ш. и  $48.8^\circ$  в.д. Он предоставляет ионограммы в диапазоне частот 1.5–8.5 МГц. Путем автоматизированной обработки данных ионограмм были получены последовательности значений критической частоты слоя F2 с минутным разрешением по времени [6, 7].

## 2. Обработка данных

Первой задачей до анализа и обработки данных стал поиск тех моментов времени, когда геомагнитно отображенное на Землю вдоль магнитной силовой линии пространственное положение спутников было максимально близко к положению ионозонда, как показано на рис. 2. Из всех пролетов спутников требовалось выбрать те, в которых подионосферная точка спутника попадала в определенный диапазон по географической широте и долготе. Поскольку из-за большого наклона-

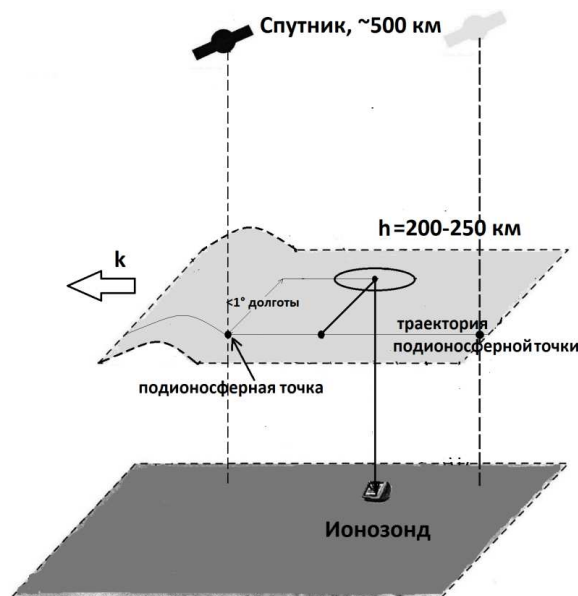


Рис. 2. Схема расположения используемых инструментов и исследуемой области. Круг отображает примерную зону зондирования ионозондом на высоте слоя F. Сплошной серой линией отражено перемещение подионосферой точки относительно зоны ионозондового зондирования (обозначенной кругом). Выпуклость/складка слева на высоте F2-слоя схематично представляет одно колебание СМ ПИВ с предполагаемым движением в южном направлении, показанном вектором  $k$

ния орбиты траектория пролета/прохода являлась практически меридиональной, первым шагом был поиск пролетов по соответствующему ионозонду меридиану в диапазоне не более  $1^\circ$  отклонения по долготы, как это схематично показано на рис. 2. Это условие оказалось достаточно жестким, так как значительно сократило среднее количество подходящих случаев в 3–4 раза по сравнению с десятиградусным окном, дающим до двух-трех десятков в течение месяца. Для рассмотрения использовалась информация за 2016–2018 гг., и в среднем количество приемлемых по близости траектории и времени пролетов составило порядка 90 случаев в год.

Кроме указанного ограничения на близость траектории зоне ионосферного зондирования, постоянное присутствие на ночных ионограммах сильного F-рассеяния, делающего невозможным корректное снятие значения критической частоты, привело к необходимости исключения из рассмотрения пролеты, происходившие в темное время суток.

Минутный режим работы ионозонда, в первую очередь, направлен на выделение неоднородностей с горизонтальной длиной волны порядка 50 км, и изначально именно они планировались как цель нашего изучения. Однако малое время существования таких неоднородностей потребовало их регистрации на ионозонде точно в момент пролета спутников над ним, что оказалось затруднительно из-за очень малого времени пролета спутника через такой участок пространства. По этим причинам в данный момент нам пришлось отказаться от рассмотрения мелкомасштабных неоднородностей и производить сопоставление с более крупными неоднородностями типа СМ ПИВ с горизонтальной длиной волны в диапазоне 100–400 км [8, 9], поскольку их свойство сохранять свою форму при перемещении на расстояния порядка тысяч километров [10] позволяет использовать менее жесткие критерии для отбора рассматриваемых диапазона широт.

Из-за отказа от выделения в спутниковых данных мелкомасштабных неоднородностей в пользу СМ ПИВ был повышен порог для их обнаружения в относительных вариациях электронной концентрации до характерного для них значения 10%. Таким образом, в настоящей работе из рассматриваемых спутниковых данных выбирались лишь те орбиты, где присутствовали 10%-ные относительные вариации электронной концентрации, а сама наземная проекция траектория орбиты не была удалена на более  $5^\circ$  по долготе относительно долготы ионозонда. Даже такие ослабленные требования не позволили значительно увеличить число подходящих орбит: за примерно 2 года удалось найти 7 подходящих случаев. Чтобы отделить средние широты от остальных, орбитальные данные (в форме картины широтных вариаций электронной концентрации на высоте  $\sim 500$  км) брались в диапазоне широт  $35\text{--}65^\circ$  с.ш. Принятые критерии отбора должны выделить лишь СМ ПИВ, и в силу этого выделенная картина широтных вариаций унаследует свойства СМ ПИВ, которые в основном сводятся к тому, что они будут двигаться к югу со скоростью 100–200 м/с [8, 9].

Для данных от ионозонда в качестве параметра сравнения выбрана критическая частота, поскольку она является традиционно используемым характерным показателем электронной концентрации на высоте пика слоя F2, а также проста в выделении и хорошо демонстрирует динамику процессов в ионосфере. Поиск взаимосвязи между необычными формами дополнительных ионограммных следов (например, в форме клювиков или серпиков) и спутниковыми данными оказался неудачным по указанным выше причинам: неоднородности, ответственные за появление дополнительных следов, имеют размеры порядка 50 км. Далее приводятся результаты анализа данных, полученных с учетом вышеизложенных требований.

Первым шагом при анализе данных стала попытка зафиксировать наличие каких-либо одновременных изменений в значениях электронной концентрации и критической частоты. Наиболее выраженный случай таких изменений представлен на рис. 3–5, на которых продемонстрированы последовательности изменений соответствующих параметров. На рис. 3 представлены исходные данные электронной концентрации, полученные со спутника за 7 марта 2018 г. в 19:05 по местному времени. Как видно из рисунка, в районе  $53\text{--}56^\circ$  с.ш. присутствует значительное относительное повышение электронной концентрации порядка 15%. Время пролета спутника над зоной зондирования ионозонда с отклонением по долготе в  $3^\circ$  составляет менее 1 мин и указано в заголовке по местному времени ионозонда.

На рис. 4 и 5 показаны фрагменты ионограмм, снятых в период с 18:50 до 19:20, в разных представлениях: одни «каскадом», другие внакладку. На рис. 4 представлен каскад необработанных ионограмм в последовательном порядке с шагом 5 мин, а на рис. 5 – обработанная версия с выделенным и усиленным отраженным от слоя F сигналом. И хотя по рис. 4 можно наблюдать изменения критической частоты, но также он приведен для демонстрации изменения амплитуды отраженного сигнала в области загиба (каспа) следа. Такие амплитудные вариации потенциально могут вызывать искажения при автоматическом снятии значений критической частоты из-за падения амплитуды до уровня шумов. По этой причине на рис. 5 показано послойное наложение соответствующих участков ионограмм друг на друга для того, чтобы убедиться в реальном факте ее уменьшения в указанное время.

Как можно видеть, критическая частота слоя F2 в промежуток после 19:00 испытывает видимое уменьшение ( $\sim 0.6$  МГц), а также изменение наклона каспа следа. График изменения критической частоты, соответствующий представленным ионограммам на рис. 4 и 5, приведен на рис. 6.

Из-за больших значений электронной концентрации в экваториальных широтах по сравнению со средними широтами в данных присутствует тренд увеличения фоновой концентрации в направлении низких широт, как это можно видеть

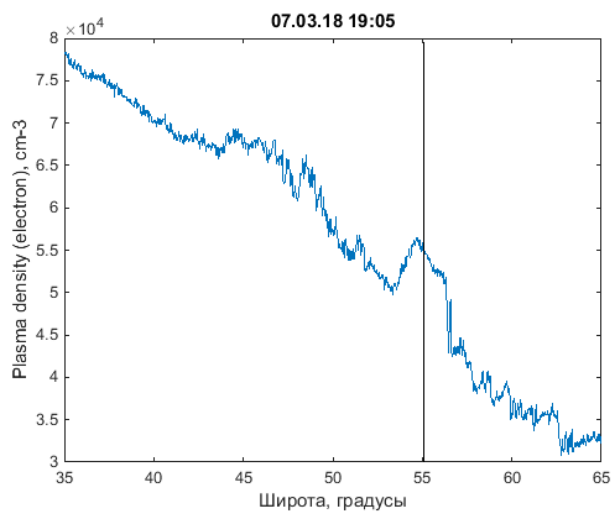


Рис. 3. Исходные данные об электронной концентрации со спутников Swarm. Вертикальной линией обозначена 55°-ная широта, находящаяся приблизительно в центре неоднородности и близкая к расположению ионозонда

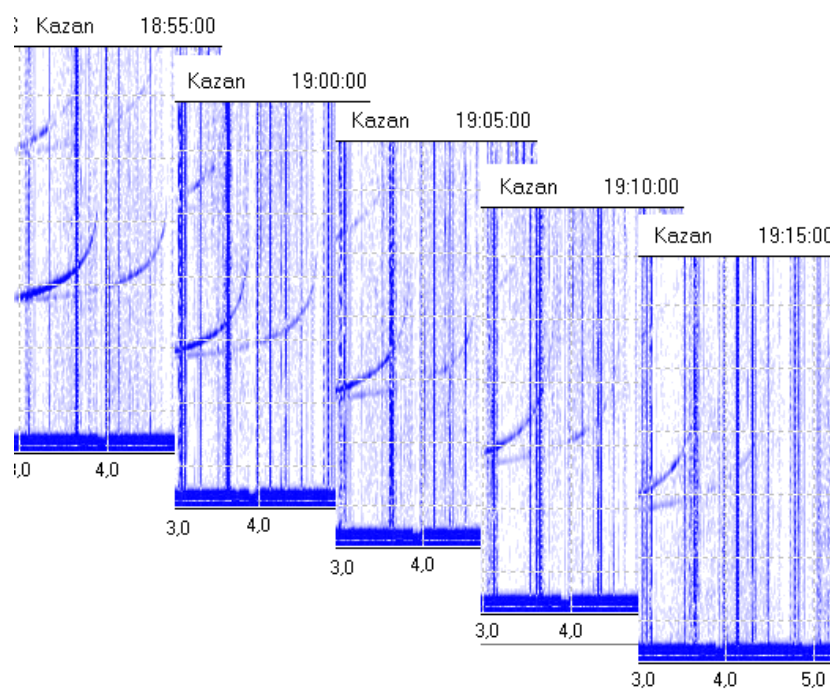


Рис. 4. Последовательность ионограмм за период 10 мин до и после пролета спутника Swarm над ионозондом от 07.03.18

на рис. 3. Для корректной интерпретации именно среднеширотных СМ ПИВ требовалось удаление этого тренда из временного ряда спутниковых данных, так же как и прочих крупномасштабных колебаний с периодом более 1 ч. Для удаления тренда использовался высокочастотный фильтр, удалявший указанные вариации и применявшийся к расширенному отрезку данных от 70° до 35° с.ш.

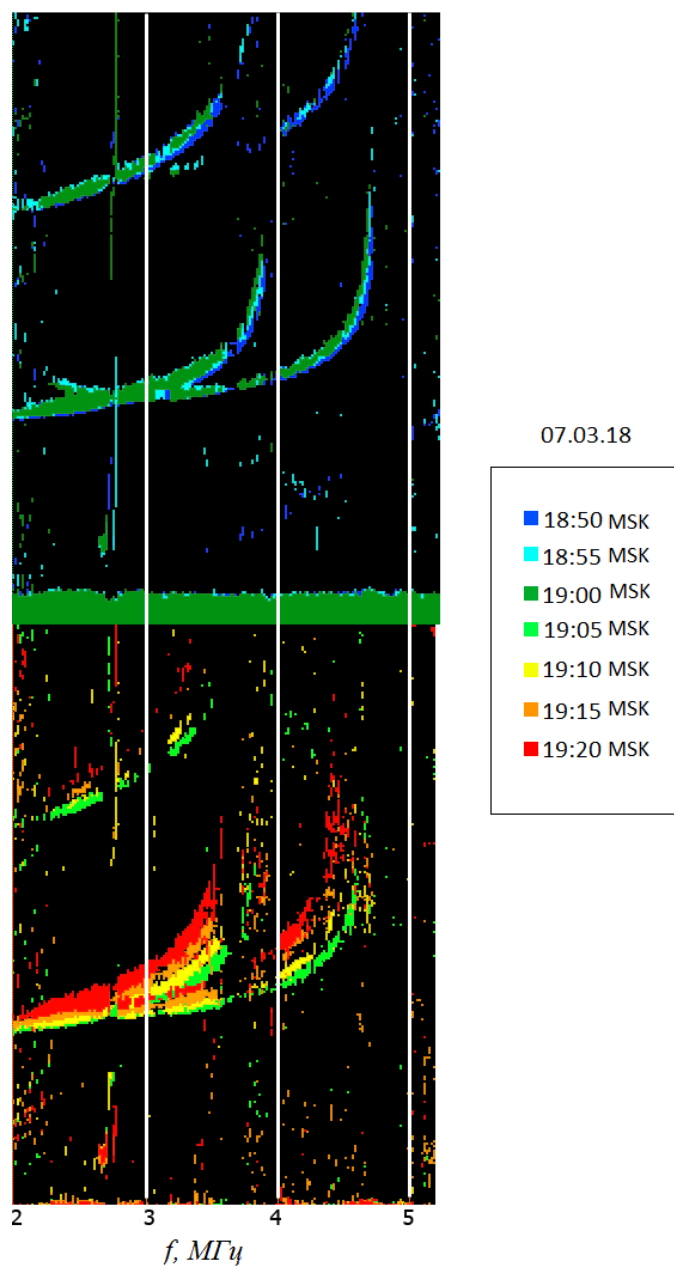


Рис. 5. Наложение тех же ионограмм, что на рис. 4, демонстрирующее уменьшение критической частоты слоя F2

Для упомянутых выше данных следовало учесть, что скорость пролета спутника составляла около 7.5 км/с и время прохождения спутником области пространства над ионозондом составляло порядка 40 с. По этой причине рассматривать картину «истинно» совместных измерений, относящихся к одному участку пространства не представлялось возможным из-за минутного режима снятия ионограмм. Предполагалось, что ПИВ с горизонтальной длиной волны более 100 км движется на юго-восток со скоростями 100–200 м/с, не теряя своей формы [9, 10]. С учетом

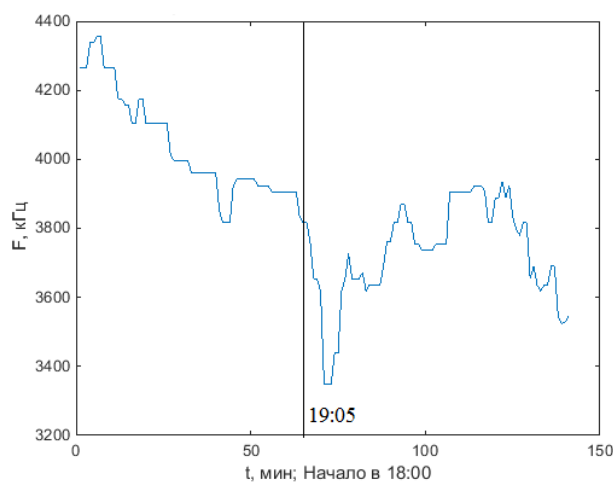


Рис. 6. График вариаций критической частоты слоя F2

этих допущений сравнивались «моментальные» картины электронной концентрации, полученные со спутника, и временные вариации значений критической частоты, снятые с ионограмм до и после времени пролета. При этом для приведения этих параметров к одной шкале измерения, временная последовательность масштабировалась на пространственную шкалу, исходя из указанных предполагаемых скоростей неоднородностей. Обработка оставшихся случаев также проводилась по этой схеме.

Для найденных семи случаев попадания вариаций электронной концентрации в указанные выше критерии были построены взаимные корреляционные функции последовательностей значений двух рядов критической частоты и электронной концентрации. Корреляция проводилась для нескольких вариантов предполагаемой скорости перемещения с шагом 20 м/с в диапазоне 100–200 м/с для поиска области, в которой пики корреляции будут совпадать в большинстве случаев. В результате, как показано на рис. 7, между электронной концентрацией ниже и выше пика слоя F имеет место скорее противофазная корреляция (пик корреляции имеет отрицательное значение). Данные показали наиболее плотную концентрацию отрицательных пиков при скоростях 100–120 м/с, при этом ширина разброса пика отрицательного значения корреляционной функции составила не более 150 км.

### 3. Обсуждение и заключение

Таким образом, проведенный анализ совместных наземных и спутниковых измерений указывает на безусловную связанность вариаций электронной концентрации выше и ниже максимума слоя F в средних широтах. При этом в целом отмечается противофазность вариаций электронных концентраций на уровне максимума слоя F ( $\sim 250$  км) и на высоте спутников низкоорбитальной эскадры Swarm ( $\sim 500$  км). Точную фазировку между вариациями электронной плотности выше и ниже пика слоя F (имеет ли место строгая противофазность или нестрогая) установить пока невозможно, так как КВ-луч ионозонда в области, где его частота приближается к местной критической частоте, испытывает сильную рефракцию и в значительной степени незаметно для оборудования ионозонда искривляется в сторону примерно вертикальных каналов с более низкой (по отношению к фону) плазменной частотой [11, 12]. Такая противофазность означает, что над местом с пониженной концентрацией электронов (по отношению к фону) в высотной структуре среднеширотных



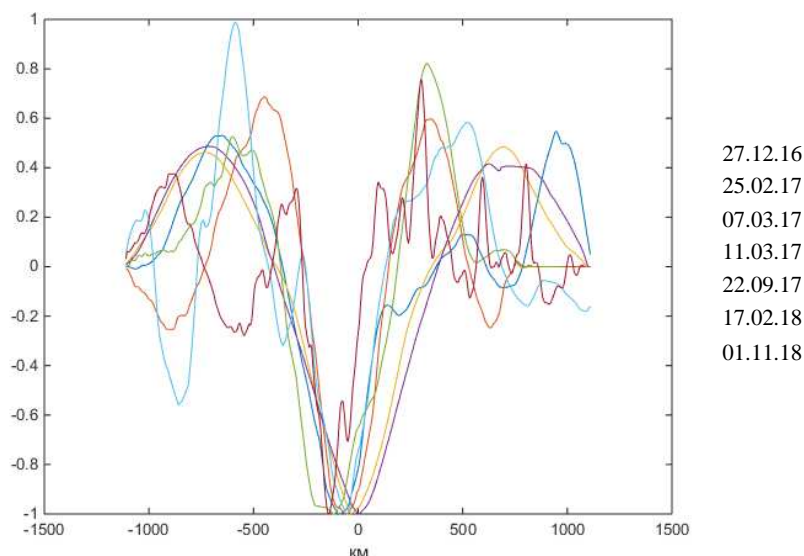


Рис. 7. Взаимная корреляционная функция для электронной концентрации и критической частоты. Справа указаны даты использованных пролетов

СМ ПИВ (см., например, рис. 4–6 в [13]) располагается область с повышенной концентрацией электронов. Формально данный факт никак не противоречит версии о происхождении СМ ПИВ из ВГВ такого же масштаба: так, например, восходящие нейтральные потоки внутри ВГВ, перемещая с собой ионизированную компоненту как пассивную примесь, будут приводить к понижению электронной концентрации на высотах ниже максимума слоя F и к повышению концентрации выше максимума слоя F. Однако и тут имеется некоторое расхождение с теорией, согласно которой среднемасштабные ВГВ затухают на высотах 450–500 км (см. [14] и приведенную там библиографию). Другим возможным источником (единоличным или совместно с ВГВ) существования СМ ПИВ могли быть плазмосферные электрические поля. Для проверки этого утверждения необходимы целенаправленные пространственно более обширные измерения и с Земли, и в плазмосфере. В качестве одного из шагов в таком направлении планируется привлечение одновременных двумерных карт возмущения полного электронного содержания [11, 12]. Однако при этом все равно сохраниться основной недостаток сопряжения «неподвижных» измерений с земли и быстро «проносящихся» измеряющих спутниковых инструментов – малочисленная статистика. Практически всегда она исчисляется одним десятком, даже когда на спутнике установлен инструмент дистанционного зондирования – ионозонд (см. [14] и приведенную там библиографию).

Установленный в настоящей работе факт противофазности вариаций электронной концентрации ниже и выше пика слоя F никак не противоречит ранее проведенным экспериментам. Так при одновременном ионозондовом зондировании с Земли и из космоса над примерно одной среднеширотной точкой часто наблюдались и частотные и высотные перехлесты (см. [14] и приведенную там библиографию), что вполне могут быть объяснены противофазной структурой СМ ПИВ и такие исследования необходимо продолжить.

**Благодарности.** Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального

университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-35-00593).

#### Литература

1. *Francis S.H.* A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* – 1979. – V. 79, No 34. – P. 5245–5260. – doi: 10.1029/JA079i034p05245.
2. *Makela J.J., Otsuka Y.* Overview of nighttime ionospheric instabilities at low- and mid-latitudes: Coupling aspects resulting in structuring at the mesoscale // *Space Sci. Rev.* – 2012. – V. 168, No 1–4. – P. 419–440. – doi: 10.1007/s11214-011-9816-6.
3. *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.
4. *Knudsen D.J., Burchill J.K., Buchert S.C., Eriksson A.I., Gill R., Wahlund J.-E., Moffat B.* Thermal ion imagers and Langmuir probes in the Swarm electric field instruments // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* – 2017. – V. 122, No 2. – P. 2655–2673. – doi: 10.1002/2016JA022571.
5. *Lomidze L., Knudsen D.J., Burchill J., Kouznetsov A., Buchert S.C.* Calibration and validation of Swarm plasma densities and electron temperatures using ground-based radars and satellite radio occultation measurements // *Radio Sci.* – 2018. – V. 53, No 1. – P. 15–36. – doi: 10.1002/2017RS006415.
6. *Hunsucker R.D.* Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review // *Rev. Geophys.* – 1982. – V. 20, No 2. – P. 283–315. – doi: 10.1029/RG020i002p00293.
7. *Akchurin A., Smirnov G.* MSTID extraction from more frequent ionograms // *Proc. 32nd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*. – IEEE, 2017. – P. 1–4. – doi: 10.23919/URSIGASS.2017.8105046.
8. *Акчури́н А.Д., Юсупов К.М., Шерстюков О.Н., Ильдиряков В.Р.* Выделение быстро текущих и мелкомасштабных неоднородностей на одноминутных ионограммах ионозонда «Циклон» // *Гелиогеофиз. исслед.* – 2013. – № 4. – С. 101–110.
9. *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances // *Ann. Geophys.* – 1996. – V. 14, No 9. – P. 917–940. – doi: 10.1007/s00585-996-0917-6.
10. *Francis S.H.* Global propagation of atmospheric gravity waves: A review // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1975. – V. 37, No 6–7. – P. 1011–1030. – doi: 10.1016/0021-9169(75)90012-4.
11. *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.
12. *Шерстюков Р.О., Акчури́н 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.
13. *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.

14. Карпачев А.Т. Радиозондирование ионосферы с искусственных спутников Земли // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б: Справочные приложения, базы и банки данных. Ионосферная плазма. Т. 1–3. Часть 2 / Отв. ред. В.Д. Кузнецов, Ю.Я. Ружин. – М.: Янус-К, 2009. – С. 45–90.

Поступила в редакцию  
05.03.19

---

**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*

**Смирнов Григорий Сергеевич**, младший научный сотрудник кафедры радиоастрономии

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: *gssmirnov@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)

2019, vol. 161, no. 3, pp. 468–480

---

---

doi: 10.26907/2541-7746.2019.3.468-480

**Interrelation of Traveling Ionospheric Disturbances  
Above and Below the F-Layer Peak according  
to the Ionosonde and the SWARM Constellation Data**

*A.D. Akchurin\**, *G.S. Smirnov\*\**

*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*  
E-mail: \**Adel.Akchurin@kpfu.ru*, \*\**gssmirnov@kpfu.ru*

Received March 5, 2019

**Abstract**

One approach to determining the height structure of the mid-latitude medium-scale travelling ionospheric disturbances (MSTIDs) above the F layer peak is to involve simultaneous satellite measurements in the ground-based ionosonde measurements near Kazan. The electron concentration data obtained from the Swarm satellite constellation were the most suitable for our purposes. For accurate spatial attachment to satellite data, a strict selection of daytime satellite flythroughs data was used: their trajectory should not be located in latitude further than 100 km from the Kazan's longitude, and the spatial extent of irregularities in electron plasma density measurements should be at least more 100 km without smaller (high-frequency) irregularities. Of all the satellites in the passes over  $\sim 2$  years (2016–2018), we managed to select only seven such cases. For the cases found, mutual correlation functions of sequences of values of two series of the critical frequency and electron concentration were constructed.

The correlation function has a bright negative peak, with a spread within 100 km, which, taking into account the typical horizontal wavelength of the MSTIDs ( $\sim 200$  km), means the antiphase behavior of electronic concentrations within the MSTID below and above the peak of the F layer of the daytime mid-latitude ionosphere.

**Keywords:** ionosphere, MSTID, perturbations of ionospheric plasma, F region, topside ionosphere, ionosonde, space-based measurements

**Acknowledgments.** The work is performed according to the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University and supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-35-00593).

### Figure Captions

Fig. 1. Sampling site shown as a rectangle and satellite trajectories above it.

Fig. 2. Layout of the tools used and the study area. The circle is an approximate zone of sounding by an ionosonde at the height of layer F. The solid gray line indicates the movement of the sub-ionospheric point relative to the zone of ionosonde sounding (indicated by the circle). The bulge/trough on the left at the height of layer F2 schematically represents one MSTIDs oscillation with the expected southward movement shown by vector  $k$ .

Fig. 3. Initial data on electron concentration from Swarm satellites. The vertical line shows  $55^\circ$  latitude in the center of the inhomogeneity and close to the location of the ionosonde.

Fig. 4. A series of ionograms recorded during 10 min before and after the Swarm satellite passage over the ionosonde on March 7, 2018.

Fig. 5. Overlay of the ionograms from Fig. 4 showing a decrease in the critical F2 frequency.

Fig. 6. Diagram of variations in the critical F2 frequency.

Fig. 7. Cross-correlation function for electron concentration and critical frequency. The dates of satellite passage are given on the right.

### References

1. Francis S.H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.*, 1979, vol. 79, no. 34, pp. 5245–5260. doi: 10.1029/JA079i034p05245.
2. Makela J.J., Otsuka Y. Overview of nighttime ionospheric instabilities at low- and mid-latitudes: coupling aspects resulting in structuring at the mesoscale. *Space Sci. Rev.*, 2012, vol. 168, nos. 1–4, pp. 419–440. doi: 10.1007/s11214-011-9816-6.
3. 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.
4. Knudsen D.J., Burchill J.K., Buchert S. C., Eriksson A. I., Gill R., Wahlund J.-E., Moffat B. Thermal ion imagers and Langmuir probes in the Swarm electric field instruments. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2017, vol. 122, no. 2, pp. 2655–2673. doi: 10.1002/2016JA022571.
5. Lomidze L., Knudsen D.J., Burchill J., Kouznetsov A., Buchert S.C. Calibration and validation of Swarm plasma densities and electron temperatures using ground-based radars and satellite radio occultation measurements. *Radio Sci.*, 2018, vol. 53, no. 1, pp. 15–36. doi: 10.1002/2017RS006415.
6. Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review. *Rev. Geophys.*, 1982, vol. 20, no. 2, pp. 283–315. doi: 10.1029/RG020i002p00293.
7. Akchurin A., Smirnov G. MSTID extraction from more frequent ionograms. *Proc. 32nd Gen. Assem. Sci. Symp. of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, 2017, pp. 1–4. doi: 10.23919/URSIGASS.2017.8105046.

8. Akchurin A.D., Yusupov K.M., Sherstyukov O.N., Ildiryakov V.R. Disclosure of transient and small-scale irregularities in the one-minute ionograms of “Cyclon” ionosonde. *Geliogeofiz. Issled.*, 2013, no. 4, pp. 101–110. (In Russian)
9. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances. *Ann. Geophys.*, 1996, vol. 14, no. 9, pp. 917–940. doi: 10.1007/s00585-996-0917-6.
10. Francis S.H. Global propagation of atmospheric gravity waves: A review. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1975, vol. 37, nos. 6–7, pp. 1011–1030. doi: 10.1016/0021-9169(75)90012-4.
11. 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.
12. 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)
13. 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.
14. Karpachev A.T. Radio sounding of the ionosphere from artificial satellites of the Earth. In: Kuznetsov V.D., Ruzhin Yu.Ya. (Eds.) *Entsiklopediya nizkotemperaturnoi plazmy. Seriya B: Spravochnye prilozheniya, bazy i banki dannykh. Ionosferная plazma* [Encyclopedia of Low-Temperature Plasma. Series B. Reference Applications, Databases, and Data Banks. Ionospheric Plasma]. Vols. 1–3. Pt. 2. Moscow, Yaanus-K, 2009, pp. 45–90. (In Russian)

---

*Для цитирования:* Акчурин А.Д., Смирнов Г.С. Взаимосвязь перемещающихся ионосферных возмущений выше и ниже максимума слоя F по данным ионозонда и спутников SWARM // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2019. – Т. 161, кн. 3. – С. 468–480. – doi: 10.26907/2541-7746.2019.3.468-480.

*For citation:* Akchurin A.D., Smirnov G.S. Interrelation of traveling ionospheric disturbances above and below the F-layer peak according to the ionosonde and the SWARM constellation data. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2019, vol. 161, no. 3, pp. 468–480. doi: 10.26907/2541-7746.2019.3.468-480. (In Russian)