

УДК 551.510.535

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВО ВРЕМЯ СУББУРЬ В СЛОЕ F2

© 2022 г. Н. П. Сергеенко\*

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

\*e-mail: serg@izmiran.ru

Поступила в редакцию 05.07.2021 г.

После доработки 11.08.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Приведены результаты наблюдений спектральной плотности доплеровского смещения частоты  $\Delta fd$  в периоды бухтообразных возмущений в слое F2 ионосферы. Показано, что в периоды суббурь наблюдаются волновые возмущения с периодами 1–2 ч, причем их интенсивность достигает максимума спустя 1–2 ч после начала суббури, после чего снижается. Проанализированы статистические свойства вариаций доплеровского смещения частоты. Показано, что в качестве вероятностной модели временных рядов  $\Delta fd(t)$  как случайного процесса в спокойные периоды может быть использован нормальный закон, а во время суббурь – нормальный закон с уточненной асимметрией и эксцессом функцией плотности вероятности (ряд Эджворта).

DOI: 10.31857/S0016794022010175

### 1. ВВЕДЕНИЕ

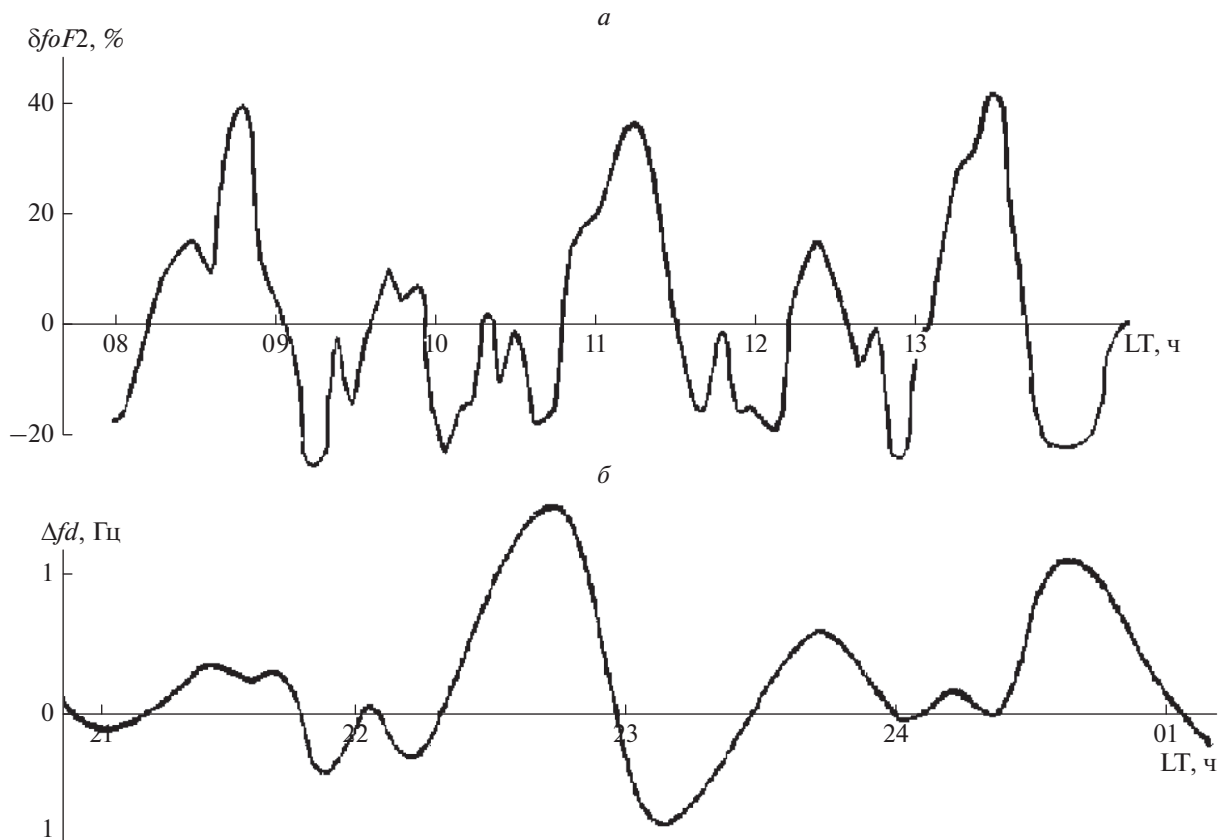
Как показывают оценки, во время генерации интенсивных магнитосферных суббурь передача энергии в ионосферу в виде джоулева тепла и энергии авроральных частиц происходит непрерывно на уровне 3 эрг/см<sup>2</sup> с, а в отдельные периоды возрастает до 30 эрг/см<sup>2</sup> с [Акасофу и Чепмен, 1974]. Ионосферные эффекты магнитосферных суббурь, связанные с появлением на высотах ионосферы зональных электрических полей, проявляются в начальной фазе развития суббури. Последующие изменения в распределении электронной концентрации связаны с генерацией и распространением акустико-гравитационных волн за счет резкого нарастания энерговыделения во время суббурь [Chimonas and Hines, 1970; Davis, 1971; Куликов и др., 1980]. Как показал анализ, в слое F2 наблюдаются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ).

На рис. 1а приведены вариации  $\delta f_o F2(t)$  по ст. Москва, определяемые по пятиминутным ионограммам наземного вертикального зондирования во время комплексного эксперимента в период геомагнитного возмущения 24–26.11.1976 г. На рис. 1б приведена запись доплеровского смещения частоты  $\Delta fd(t)$  во время этого длиннопериодного волнообразного возмущения. Видно, что на обеих записях наблюдаются квазипериодические колебания с периодами, близкими к 1 ч.

С достаточной надежностью непосредственно по записям определить квазипериод вариаций измеренных ионосферных параметров бывает трудно [Гайворонская и др., 1981]. Поэтому основным методом обработки данных по изучению волнообразных движений в атмосфере стал метод спектрального анализа временных рядов измерений, изложенный в работе [Дженкинс и Ваттс, 1972]. Метод широко используется для анализа волновых ионосферных и атмосферных процессов. Например, в работе [Борчевкина и др., 2016] на основе спектрального анализа показано, что в период солнечного терминатора в атмосфере Земли генерируются волновые структуры с периодами акустико-гравитационных волн (АГВ) и высокочастотных внутренних гравитационных волн (ВГВ), которые распространяются до высот ионосферы.

В работе [Карпов и др., 2011] рассмотрены возможности физической интерпретации глобальных возмущений ионосферы в периоды геомагнитных бурь и после их окончания на основе волн Пуанкаре, возбуждаемых в атмосфере в этих условиях. Для анализа определены спектры вариаций возмущений суточных вариаций полного электронного содержания ТЕС. Показано, что в спектрах вариаций присутствуют гармоники с периодами, соответствующими стоячим планетарным волнам Пуанкаре.

Обычно для изучения ПИВ применяются такие инструменты как, например, ионозонды, до-



**Рис. 1.** (а) — вариации  $\delta foF2$  по данным учтенных наблюдений вертикального зондирования ст. Москва 12.11.1976 г.; (б) — пример записи доплеровского смещения частоты во время длиннопериодного волнообразного возмущения 12–13.11.1976 г.

плеровские зонды, радары когерентного и некогерентного рассеяния трансionoсферное зондирование с помощью сигналов навигационных спутников. Радары когерентного рассеяния (и в частности сеть радаров SuperDARN), работающие в декаметровом диапазоне радиоволн, являются одними из наиболее удобных средств диагностики ПИВ, так как обеспечивают возможность непрерывного мониторинга больших пространственных областей, как отмечается, например, в работе [Karhunen et al., 2006]. Проявление ПИВ в данных радаров когерентного рассеяния заключается в квазипериодических вариациях мощности, доплеровской скорости, угла прихода и сигнала возвратно-наклонного зондирования ионосферы (<http://superdarn.jhuapl.edu/>).

Информацию для изучения ПИВ также получают из данных трансionoсферного зондирования с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В настоящее время в мире функционируют две ГНСС: GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия). На различных этапах развертывания находятся еще две системы глобального позиционирования — европейская Galileo и китайская BeiDou (европейское название Com-

pass), а также две региональных системы спутниковой навигации — Индийская IRNSS и Японская QZSS. Полностью введена в строй GPS, на орбите работают 32 спутника GPS. ГЛОНАСС по состоянию на 26.07.2021г. насчитывает 26 спутников ([www.glonass-ianc.rsa.ru](http://www.glonass-ianc.rsa.ru)).

Основной объем информации о состоянии ионосферы Земли поступает от ионосферных станций, использующих традиционный метод вертикального зондирования. Данные вертикального зондирования хорошо отражают регулярную динамику ионосферы. В последние десятилетия с развитием вычислительной техники и применением промышленных модулей в России были разработаны такие цифровые комплексы, как “Авгур” (ФГБУ “ИПГ”), “Парус” (“ИЗМИРАН”), “Циклон” (Казанский государственный университет), “Бизон” (ААНИИ), ТОМИОН (Томский государственный университет). Некоторые из них имеют опцию определения доплеровского смещения частоты.

За рубежом к наиболее простым цифровым ионозондам можно отнести польские комплексы KOS, канадские CADI и новозеландские IPS. Наибольшее распространение получил амери-

канский исследовательский комплекс Digizonde-256, позволяющий производить поляризационные измерения, регистрировать углы прихода и доплеровские сдвиги частоты отраженного сигнала. В настоящее время в среднеширотной области преимущественно над американским континентом создана глобальная ионосферная сеть DISS (Цифровые Ионосферные Зондирующие Системы), работающая в режиме реального времени. Аналогичная сеть функционирует в Японии и включает в себя ионозонды типа 9В.

В России ионосферные обсерватории ИСЗФ СО РАН (Иркутск, Норильск) и ИКФИА СО РАН (Якутск, Жиганск) оснащены новейшими цифровыми ионозондами DPS-4, выпускаемыми Центром атмосферных исследований Лоуэллского университета США (<http://gr.iszf.irk.ru/esceir/dps/DPSckp.htm>). Портативный ионозонд DPS-4 является одним из наиболее современных и распространенных средств радиозондирования ионосферы [Reinisch et al., 2009].

Основные принципы создания современных наземных цифровых ионозондов перенесены на конструирование бортовых устройств. Так, дигизонд 128PS был переработан Университетом в Лоуэлле в блок небольшой мощности, пригодный для использования в космосе. Ионозонд 128S позволяет одновременно измерять амплитуду, фазу, доплеровский эффект, дальность отражения и поляризацию волны.

Метод доплеровского радиозондирования является одним из широко известных методов исследования ионосферы. Преимуществами этого метода являются сравнительная простота и дешевизна аппаратных решений, возможность организации непрерывных наблюдений, высокая чувствительность к малым изменениям частоты и, как следствие этого, высокое временное разрешение.

Первые работы по доплеровским эффектам в ионосфере относятся к 60–70-м гг. XX в. [Намазов и Новиков, 1980; Davies and Baker, 1966; Намазов и др., 1975; Bennet, 1976], где изучалась связь доплеровского сдвига частоты радиосигнала, распространяющегося в ионосфере, с параметрами среды распространения.

В середине 80-х гг. в ИЗМИРАН разрабатывались методики многочастотной доплеровской диагностики возмущенной ионосферы [Ким и Панченко, 1990; Ким и др., 2002; Ким, 1989], в которых была проведена разработка метода многочастотного импульсного доплеровского зондирования искусственных возмущений электронной концентрации. Были созданы и использованы на практике аппаратно-программные комплексы для измерения характеристик мелкомасштабной ионосферной турбулентности. Эти разработки применялись на практике для изучения процес-

сов в ионосфере при нагревании мощным радиоизлучением. В настоящее время доплеровский метод зондирования применяется в ИЗМИРАН для исследования распространения коротких радиоволн [Ким и др., 2002].

Большой вклад в развитие доплеровских методов был сделан Э.Л. Афраймовичем [Афраймович и др., 1972, 1977], в частности, им были разработаны методы доплеровских измерений и проработан целый ряд методических вопросов. Впоследствии в Институте солнечно-земной физики в Иркутске был создан специализированный комплекс доплеровских измерений.

Экспериментальные доплеровские измерения проводились в Сибирском физико-техническом институте в Томске под руководством П.М. Нагорского [Нагорский, 1999]. Исследовались нестационарные процессы и акустические ударные волны в ионосфере, которые являлись следствием запуска космических ракет.

В Нижнем Новгороде совместно с ИЗМИРАН на стенде “Сура” доплеровским методом исследуется влияние мощных радиоволн на ионосферу [Шиндин и др., 2010]. Следует отметить большие усилия, прилагаемые для совершенствования методов зондирования при проведении активных экспериментов на стенде “Сура”.

В Харьковском национальном университете для исследования ионосферы также применяется доплеровское зондирование [Бурмака и др., 2004]. Исследуется поведение доплеровского сдвига при прохождении области солнечного терминатора на закате и восходе, а также во время солнечных затмений.

В Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте в настоящее время проводятся доплеровские исследования высокоширотной ионосферы, а также обрабатываются экспериментальные данные доплеровского зондирования прошлых лет [Благовещенская и др., 1992].

В Казанском (Приволжском) федеральном университете действует доплеровский фазоугломерный комплекс “Спектр” [Бочкарев и др., 2002, 2004, 2005]. Основное направление работы комплекса – исследование ионосферы методом наклонного зондирования и изучение периодических ионосферных процессов. Особенное внимание уделяется процессам с периодом от 1 мин до 60 сут. В Казани проводится значительная работа по автоматизации доплеровских измерений и информационного доступа к ним.

В других странах также многие годы ведутся доплеровские ионосферные исследования различными группами ученых. В Чехии Институтом физики атмосферы АН ЧР развернута мощная система доплеровской диагностики ионосферы [Chum et al., 2009; Krasnov et al., 2011; Sinderelova

et al., 2009]. Комплекс позволяет проводить многочастотную доплеровскую диагностику значительной области ионосферы. Отметим интересные результаты, полученные этим инструментом, касающиеся возмущений в ионосфере во время землетрясения в марте 2011 г. [Krasnov et al., 2011].

В КНР действует доплеровский радар около города Ухань (Wuhan) [Su et al., 2009; Hao et al., 2012; Chen et al., 2007; Hua et al., 2009]. На этом комплексе изучаются ионосферные возмущения, а также ионосферные отклики сейсмических процессов.

Следует отметить японские работы по доплеровским измерениям, посвященным ионосферным возмущениям, связанным с тектонической активностью [Enomoto, 2012]. Такие работы ведутся уже несколько десятков лет.

Традиционно доплеровское зондирование ионосферы развивается в США. Изучаются и анализируются доплеровскими методами эффекты природного и антропогенного характера. Проводятся комплексные эксперименты. Исследуются процессы в ионосфере во время естественных магнитосферных возмущений, ВИБ, ПИВ, SFD (импульсное усиление ультрафиолетового и рентгеновского излучения в моменты солнечных вспышек), в периоды природных явлений, таких как землетрясения, цунами, извержения вулканов и эффекты техногенного характера – запуски ракет, активные эксперименты и др. Работ очень много за разные годы, начиная с 70-х. Приведем несколько работ за последние десятилетия: [Agu et al., 2012; Sutcliffe and Poole, 1989; Lynn et al., 2006, 2008; Azeem, 2021; Collins et al., 2021; Jones et al., 2004; Kazdan et al., 2019].

Таким образом, с 70-х гг. прошлого столетия доплеровский метод является одним из наиболее распространенных методов детектирования возмущений в ионосфере различной природы (фоновые ПИВ, возмущения, генерируемые землетрясениями, грозами, торнадо и другими метеорологическими явлениями, солнечными затмениями, запусками космических аппаратов, взрывами и т.д.). Основу доплеровского метода составляют наблюдения за изменениями частоты радиоволн, излучаемых высокостабильными передатчиками, при отражении их от изменяющейся во времени ионосферы. Метод обладает высокой чувствительностью к малым изменениям частоты ( $\Delta f/f \sim 10^{-9}$ ) и позволяет регистрировать быстро протекающие процессы.

Временные масштабы волновых процессов в ионосфере очень широки: от нескольких минут до нескольких дней и даже месяцев. Для исследования возмущений всех временных масштабов необходимы ряды данных, отвечающие определенным требованиям, необходимо высокое временное разрешение для вычисления спектра ва-

риаций с периодами внутренних гравитационных волн. Именно результаты, полученные доплеровским методом, отвечают этим требованиям, так как метод имеет наилучшую чувствительность для быстрых вариаций сигнала, отраженного от ионосферы и позволяет проводить непрерывные измерения для получения длинных рядов экспериментальных данных [Тарашук и др., 1985]. Выявленные особенности изменения интенсивности и спектрального состава волновых процессов во время геомагнитных бурь и обнаруженные зависимости между анализируемыми параметрами и показателями геомагнитной активности представляются важными для понимания процессов, происходящих в системе “Солнце–магнитосфера–ионосфера”.

Обнаруженные особенности спектрального состава волновых процессов различных временных масштабов представляют особый интерес для развития моделей преобразования энергии в атмосфере Земли.

В данной работе приводятся результаты анализа вариаций доплеровского смещения частоты во время магнитосферных суббурь. Измерения проводились на аппаратном комплексе ИЗМИРАН, позволяющем регистрировать смещения частоты на трассе квазивертикального зондирования [Лобачевский и др., 1980]. Длина трассы 70 км, зондирующие частоты 3240 и 5455 кГц. При таких частотах высота отражения изменяется в диапазоне 250–300 км и, следовательно, угол падения волны на ионосферу составляет  $82^\circ$ – $84^\circ$ .

## 2. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Просмотр материалов наблюдений показал, что изменения  $\Delta f_d$ , как правило, сопровождаются магнитными возмущениями в обл. Москва. Ниже рассмотрены записи  $\Delta f_d$  в вечерние и ночные часы в период возмущений геомагнитного поля, определяемых по магнитограммам, 10, 12, 14, 15, 25, 26.11.1976 г. На рис. 2 представлены вариации доплеровского смещения частоты  $\Delta f_d$  и отклонения  $H$ -компоненты геомагнитного поля от спокойного уровня. Вариации  $H$ -компоненты иллюстрируют бухтообразные возмущения – суббури как одиночные, так и следующие друг за другом серии суббурь. В доплеровских записях в это время наблюдаются квазиволновые колебания, причем во всех приведенных сеансах наблюдений они идентичны.

Также во время многих суббурь в вечернем и ночном секторе наблюдаются кратковременные, до 10–15 мин, отрицательные доплеровские смещения до  $-1$  Гц, что соответствует дрейфу электронной концентрации вверх, который обуслов-

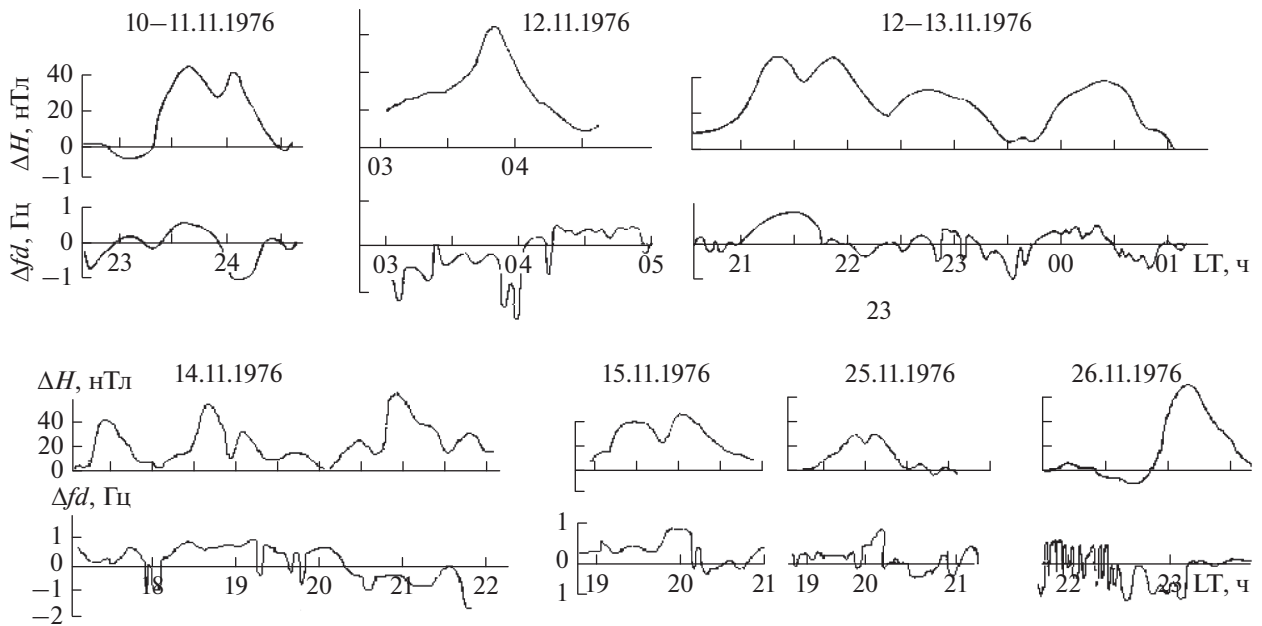


Рис. 2. Вариации доплеровского смещения частоты  $\Delta fd$  и отклонения  $H$ -компоненты геомагнитного поля от спокойного уровня, ст. Москва.

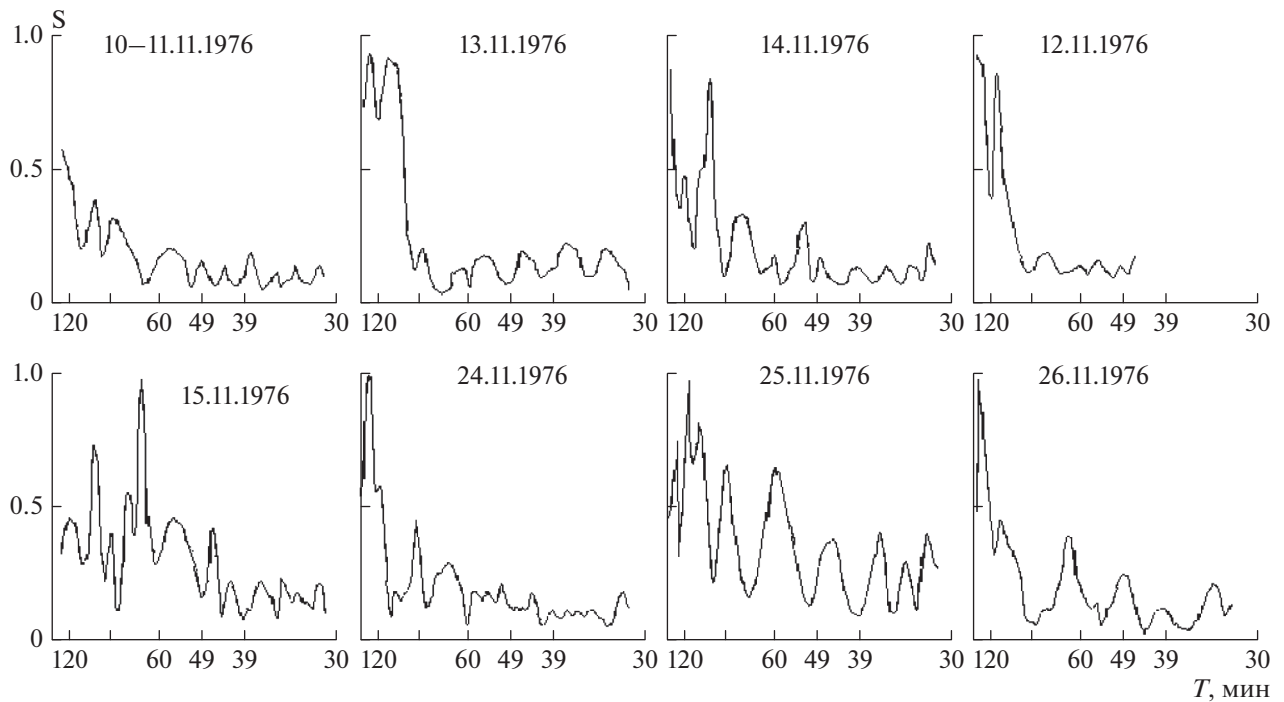


Рис. 3. Амплитудные спектры  $S$ -процесса  $\Delta fd(t)$ .

лен появлением на высотах ионосферы зонального электрического поля восточного направления, усиливающегося в периоды суббури [Park, 1976; Лобачевский и др., 1978; Sergeenko, 2019].

Был проведен спектральный анализ вариаций доплеровского смещения частоты для семи воз-

мущенных периодов и одного магнитоспокойного периода. Для сравнения также приведем примеры результатов спектрального анализа вариаций критической частоты слоя  $F2$   $\delta foF2(t)$ . Расчет спектров проводился с использованием быстрого преобразования Фурье по программе, реализую-

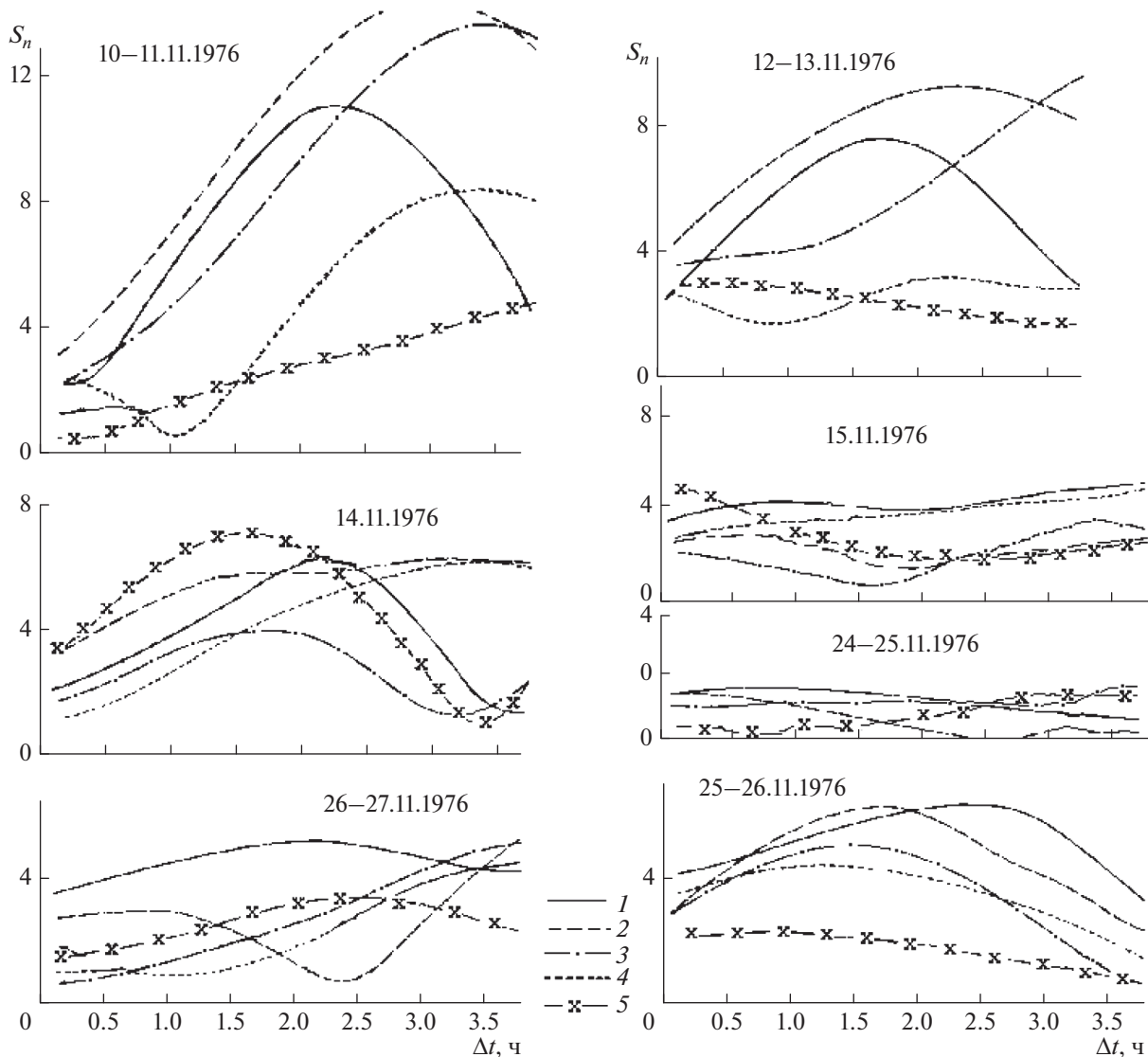


Рис. 4. Изменения в зависимости от сдвига времени от начала суббури  $\Delta t$  коэффициентов Фурье с периодами колебаний 1 – 128 мин, 2 – 96 мин, 3 – 77 мин, 4 – 60 мин, 5 – 45 мин.

шей алгоритм Кули–Тьюки [Курьянов и Медведева, 1970; Дженкинс и Ваттс, 1971]. Длина исследуемых реализаций составляла 384 мин, т.е. 6.5 ч. При этом значения  $\Delta fd$  усреднялись за период дискретизации 3 мин и длина массивов для расчета спектров составляла из 128 дискретных значений функции  $\Delta fd(t)$ . Спектры приведены на рис. 3. Из рисунка следует, что для ионосферы средних широт в периоды суббурь характерны четко выраженные максимумы спектральной плотности флуктуаций электронной концентрации, соответствующие волновым возмущениям с периодами 120–60 мин, амплитуды спектральной плотности гармоник с такими периодами примерно втрое выше остальных гармоник с меньшими периодами. Спектры в условиях возмущений подобны для всех сеансов наблюдения.

Для того чтобы проследить динамику процесса  $\Delta fd(t)$ , вычислены спектры по реализациям той же длины (384 мин) со сдвигами времени в 15 мин. Таким образом, для каждого процесса вычислено 12–14 спектров, что позволило проследить изменения амплитуды коэффициентов Фурье в спектрах спустя 1–2 ч после начала суббури и в течение 3–3.5 ч. Для анализа взяты коэффициенты Фурье, соответствующие периодам колебаний 128 мин, 96 мин, 77 мин, 60 мин, 45 мин. Постоянная составляющая, а также первый и второй коэффициенты Фурье не рассматривались, так как их периоды соизмеримы с длиной выборки.

Из рисунка 4 видно, что амплитуда коэффициентов Фурье увеличивается спустя  $\Delta t \sim 1$ –2 ч после начала суббури. Амплитуды рассматриваемых

коэффициентов для спокойного периода 24–25.11.1976 г. практически не изменяются со временем. Значения коэффициентов для всех рассматриваемых возмущенных условий значительно выше, чем для спокойных.

Таким образом, спектральный анализ вариаций доплеровского смещения частоты подтверждает факт наблюдения на средних широтах волновых возмущений, которые по теории [Chimonas and Hines, 1970; Davis, 1971; Куликов и др., 1980] генерируются в авроральной зоне и затем распространяются к более низким широтам. Их интенсивность достигает максимума спустя 1–2 ч после начала суббури, а затем уменьшается.

Для сравнения приведем примеры спектрального анализа вариаций критической частоты слоя  $F_2$   $\delta f_o F_2(t)$  для суббури 12–13.11.1976 г.

Как и следовало ожидать, характер спектра остается более или менее неизменным, когда суббуря входит в рассматриваемый временной интервал, и начинает меняться, когда вычисления ведут по временному интервалу, уже не включающему существенную часть возмущения. На рис. 5 построены спектры  $\delta f_o F_2$  по ст. Москва для трех интервалов времени, включающих суббурю, первый из которых выбран с 11 до 17 ч местного времени; второй и третий интервалы получаются за счет временных сдвигов относительно первого на 1 и 2 ч соответственно. Для процесса  $\delta f_o F_2(t)$  максимальная спектральная плотность наблюдалась на периоде  $T \sim 80$  мин.

Вверху на рис. 5 представлена сглаженная выборочная оценка спектра  $AE$  для этого периода. Стрелками отмечены максимумы спектральной плотности, соответствующие квазипериодам исследуемых параметров. В интересующем нас интервале имеют место наиболее заметные максимумы при  $T \sim 39$  мин и при  $T \sim 60$  мин.

Отметим, что в работах [Потапова и Фрейзон, 1978; Куликов и др., 1980] показано, что на средних широтах эффекты гравитационных волн наблюдаются через некоторое время после начала суббури ( $\sim 1$  ч) в форме перемещающихся ионосферных возмущений и квазипериодических изменений высоты максимума ионизации и электронной концентрации в максимуме области  $F$ .

### 3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИИ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВО ВРЕМЯ СУББУРЬ

Решение обратной задачи доплеровского метода, т.е. получение параметров среды, формирующей сигнал, определение границ зоны формирования отраженного сигнала, выяснение природы различных явлений, вызывающих смещения частоты, является трудной, порой неразрешимой проблемой. В связи с этим полезно провести ста-

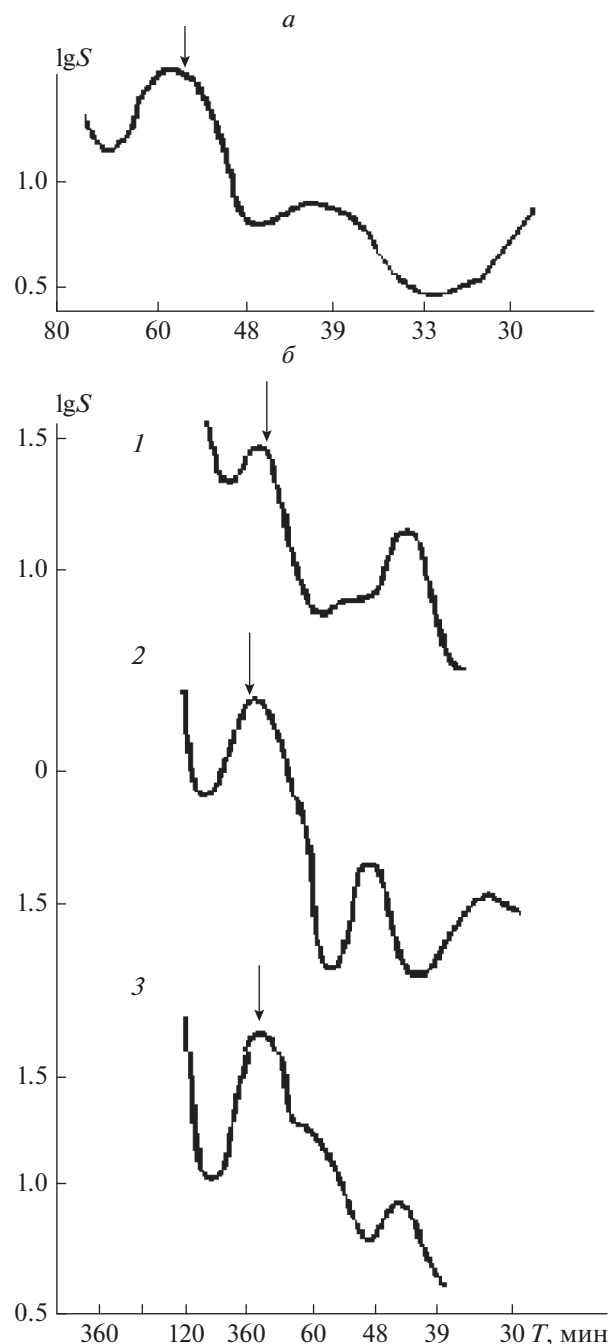


Рис. 5. (а) — спектральные плотности вариаций  $AE(t)$ ; (б) — спектральные плотности вариаций  $\delta f_o F_2(t)$  — по ст. Москва для интервала времени 11–17 (1), 12–18 (2) и 13–19 (3) в зависимости от периодов Фурье-разложения  $T = f^{-1}$ . Максимум спектральной плотности, соответствующий квазипериоду ВГВ, отмечен стрелкой.

статическую обработку принятого доплеровского сигнала для выяснения природы процесса вариаций доплеровского смещения частоты как случайного процесса. Такая обработка рассматривается как шаг в решении обратной задачи, связанной с

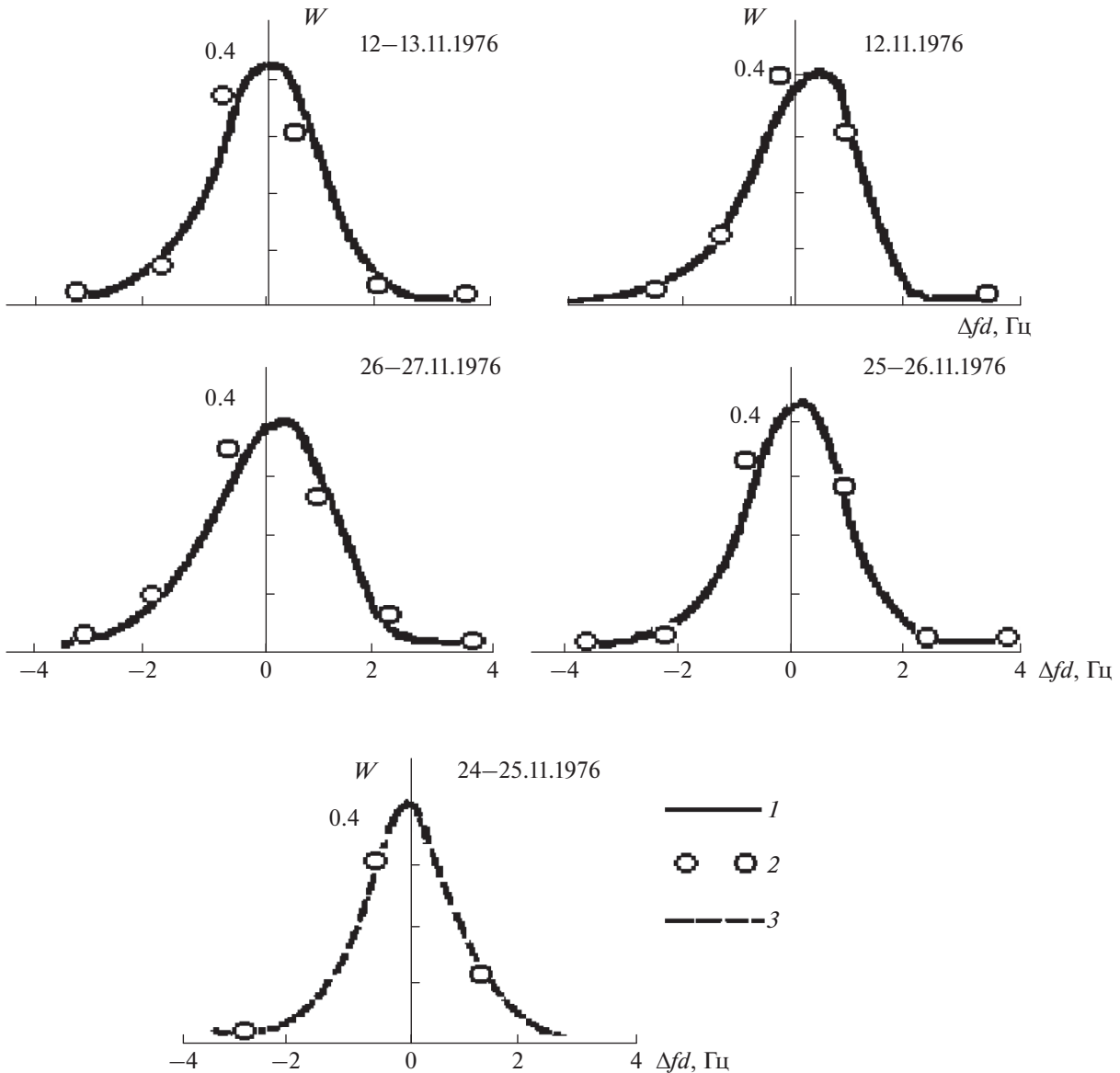


Рис. 6. Функции плотности вероятности: 1 – рассчитанные; 2 – экспериментальные точки; 3 – нормальный закон.

малыми вариациями смещения частоты, не зависящими от крупных возмущений [Хеннан, 1964].

Для анализа использовались те же записи доплеровского смещения частоты, что и при спектральном анализе доплеровского зондирования за ноябрь 1976 г. в вечерние и ночные часы.

Первоначально все выборки по методике, описанной в работе [Всехсвятская и др., 1975], были проверены на стационарность. Все рассмотренные сеансы наблюдений смещений частоты можно считать квазистационарными.

Следующий этап для уточнения выбора модели – проверка данных на импульсность, т.е. возможность описания статистического распределения моделью, построенной на базе пуассоновского случайного процесса, предложенной в работе

[Всехсвятская и др., 1974]. Результат получен отрицательный для всех выборок.

Все это позволяет предложить в качестве статистической модели сигнала, представляющего собой вариации доплеровского смещения частоты, нормальный закон распределения, уточненный незначительной по величине асимметрией и эксцессом функции плотности вероятности, т.е. ряд Эджворта [Мидлтон, 1961] для одномерного нормального закона при  $\Delta fd \neq 0$ .

$$W(x) = \left[ 1 - \frac{\lambda_3}{3!} \frac{d^3}{dx^3} + \left( \frac{\lambda_4}{4!} + \frac{\lambda_3^2}{3 \cdot 4!} \frac{d^6}{dx^6} \right) \right] \times \frac{\exp\left[-(x - \bar{x})^2 / 2\sigma^2\right]}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}.$$



**Таблица 1.** Параметры экспериментальных распределений

Дата	$\bar{x}$	$\sigma$	$A$	$E$	$K$
12–13.11.1976	0.20	0.38	-0.50	0.87	0.97532
12–11.1976	0.04	0.43	-1.01	1.37	0.99998
24–25.11.1976	0.17	0.16	0.18	0.24	0.99999
25–26.11.1976	0.20	0.33	-0.19	0.22	0.99949
26–27.11.1976	0.12	0.36	-0.77	1.00	0.94147

После соответствующих преобразований, имея в виду, что  $\Delta fd = x$ ,  $\sigma^2 = \overline{x^2} - \bar{x}^2$ ;  $\lambda_3 = \overline{(x - \bar{x})^3}$ ;  $\lambda_4 = \overline{(x - \bar{x})^4} - 3\{\overline{(x - \bar{x})^2}\}^2$ , коэффициент асимметрии  $A = \overline{(x - \bar{x})^3} / \sigma^3$ , коэффициент эксцесса  $E = \overline{(x - \bar{x})^4} / \sigma^4 - 3$ , получим

$$W(x) = \frac{\exp\left[-(x - \bar{x})^2 / 2\sigma^2\right]}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \times \left[ 1 - A \left\{ \frac{x - \bar{x}}{2\sigma} - \frac{(x - \bar{x})^3}{6\sigma^3} \right\} + \frac{E}{4!} \left\{ 3 - \frac{6(x - \bar{x})^2}{\sigma^2} + \frac{(x - \bar{x})^4}{\sigma^4} \right\} + \frac{A^2}{4!} \left\{ \frac{15(x - \bar{x})^2}{\sigma^2} - \frac{5(x - \bar{x})^4}{\sigma^4} + \frac{(x - \bar{x})^6}{3\sigma^6} - 5 \right\} + \dots \right].$$

На рисунке 6 приведено сравнение распределений плотности вероятности  $W$ , рассчитанных по модели, с распределениями, определенными по экспериментальным записям  $\Delta fd(t)$ . Параметры экспериментальных распределений приведены в табл. 1, там же приведен коэффициент  $K$ , определяющий степень согласия (по Колмогорову) модельных и экспериментальных распределений. Видно, что согласие с моделью высокое и составляет  $K \geq 95\%$ . Подобное согласие наблюдается в среднем в 65% случаев. Большая асимметрия с  $A \sim 2$  уменьшает согласие до  $K \sim 60\%$ , однако таких случаев меньше 35%. Плотности вероятности  $W$  для выборки  $\Delta fd(t)$  в магнитоспокойный период хорошо согласуются с нормальным законом ( $K \sim 99\%$ ).

Проведенный анализ показывает, что экспериментальные данные хорошо описываются рядом Эджворта и он может быть использован для дальнейшей обработки и интерпретации результатов измерений вариаций доплеровского смещения частоты в периоды несильных ионосферных возмущений, а в спокойные периоды с успехом может быть использован нормальный закон.

#### 4. ВЫВОДЫ

Проведенное спектральное исследование квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты  $\Delta fd(t)$  показало, что  $\Delta fd(t)$  имеет единую волновую структуру с вариациями критической частоты слоя  $F2 \delta foF2(t)$ . В вариациях всех рассмотренных параметров присутствуют частотные составляющие с периодами  $T_1 \sim 60-120$  мин,  $T_2 \sim 20-30$  мин, причем основная мощность сосредоточена на периоде  $T_1$ .

Из рассмотрения динамики спектров видно, что происходит изменение периода  $T$  и спектральной мощности и амплитуды со сдвигом по времени относительно начала суббури. Таким образом, спектрально-временной метод обработки ионосферных данных позволяет установить, что продолжительность, или квазипериод, эффекта при суббуре меняется приблизительно от 1 до 2 ч на средних широтах.

Статистический анализ привел к выводу, что в качестве вероятностной модели при проектировании задач может быть использован нормальный закон, уточненный асимметрией и эксцессом (ряд Эджворта).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М.: Мир. 509 с. 1975.
- Афраймович Э.Л., Калихман А.Д., Королев В.А. Метод динамического спектрального анализа в исследовании неоднородной структуры ионосферы // Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Вып. 21. С. 77–88. 1972.
- Афраймович Э.Л., Вугмейстер Б.О., Захаров В.Н., Королев В.А. Автоматизированный комплекс для измерения доплеровских частот и углов прихода радиосигнала, отраженного от ионосферы // Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Вып. 41. С. 131–138. 1977.
- Благовещенская Н.Ф., Бородкин В.Н., Колосов О.В., Шумилов И.А. Эффекты химической модификации ионосферы по данным КВ доплеровских измерений на наклонных радиотрассах // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 32. № 6. С. 122–127. 1992.
- Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Сонгатова А.А., Теплов В.Ю. Применение современных информационных технологий при создании автоматизированной системы мониторинга ионосферы в КВ-диапазоне // LVII Научная сессия, посвященная дню радио: труды конференции. Москва. Т. 1. С. 247–250. 2002.
- Бочкарев В.В., Латыпов Р.Р., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Влияние геомагнитной активности на вариации доплеровского сдвига частоты ионосферного сигнала / Излучение и рассеяние ЭМВ: Труды международной конференции. Таганрог. С. 425–427. 2005.
- Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Эффекты магнитной бури 29–31 октября 2003 г. на среднеширотной КВ радиотрассе (по данным доплеровских из-

- мерений) // Космич. исслед. Т. 42. № 6. С. 640–644. 2004.
- Борчевкина О.П., Карпов И.В., Карпов А.И., Ильминская А.В. Акустико гравитационные волны в наблюдениях тропосферных и ионосферных параметров над Калининградом // Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXXIX Annual Seminar, Apatity, Polar Geophysical Institute. P. 108–111. 2016.
- Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 44. № 4. С. 518–534. 2004.
- Всехсвятская И.С., Сергеев Н.П., Юдович Л.А. О возможности статистического представления ионосферной возмущенности // Исследования области F и внешней ионосферы. М.: ИЗМИРАН. С. 261–274. 1974.
- Всехсвятская И.С., Сергеев Н.П., Юдович Л.А. О стационарности флуктуаций электронной концентрации в максимуме слоя F2 // Ионосферные исслед. М.: Наука. № 23. С. 52–54. 1975.
- Гайворонская Т.В., Шашункина В.М., Юдович Л.А. Спектральный анализ ионосферного эффекта суббури // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 21. № 6. С. 1126–1128. 1981.
- Левис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир. 501 с. 1973.
- Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир. Вып. 1. 316 с. 1971; Вып. 2. 287 с. 1972.
- Карпов И.В., Сулова О.П., Василевска Д.П. Спектральные характеристики атмосферных возмущений на средних широтах в периоды геомагнитных бурь // Вестн. Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. № 4. С. 54–59. 2011.
- Ким В.Ю., Горохов Ю.В., Панченко В.А., Полиматиди В.П. Мониторинг кратковременных ионосферных возмущений методом многочастотного доплеровского радиозондирования // Тр. XX Всероссийской науч. конф. “Распространение радиоволн”. Нижний Новгород. С. 82. 2002.
- Ким В.Ю. Численное решение обратной задачи многочастотного доплеровского зондирования искусственного возмущения электронной концентрации в ионосфере // Взаимодействие высокочастотных радиоволн с ионосферой. М.: ИЗМИРАН. С. 55–65. 1989.
- Ким В.Ю., Панченко В.А. Решение обратной задачи многочастотного доплеровского зондирования искусственных возмущений ионосферы с помощью инверсии Абеля и сглаживающих сплайнов // Взаимодействие радиоволн с ионосферой. М.: Наука. С. 71–83. 1990.
- Куликов В.В., Шашункина В.М., Юдович Л.А. Генерация внутренних гравитационных волн в период магнитной бури // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 23. № 9. С. 1015–1019. 1980.
- Курьянов Б.Ф., Медведева Л.Е. Гармонический анализ стационарных случайных процессов: (С использованием быстрого преобразования Фурье). М.: МГУ, 63 с. 1970.
- Лобачевский Л.А., Сергеев Н.П., Сергеев О.С., Харьков И.П., Юдович Л.А. Вариации спектральной плотности волновых возмущений в ионосфере в периоды магнитосферных суббурь / Вариации ионосферы во время магнитосферных возмущений. М.: Наука. С. 55–61. 1980.
- Мидлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. М.: Сов. Радио. Т. 2. 782 с. 1961.
- Нагорский П.М. Анализ отклика КВ-радиосигнала на возмущения ионосферной плазмы, вызванные ударно-акустическими волнами // Изв. вузов. Радиофизика. Т. XLII. № 1. С. 36–44. 1999.
- Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий И.А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении радиоволн (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 18. № 4. С. 473–500. 1975.
- Намазов С.А., Новиков В.Д. Наземные радиофизические методы исследования неоднородностей ионосферы // Ионосферные исслед. № 30. С. 87–94. 1980.
- Потапова Н.И., Фрейзон И.А. О квазипериодических вариациях параметров области F ионосферы в летних условиях // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 18. С. 1103–1105. 1978.
- Таращук Ю.Е., Борисов Б.Б., Цыбиков Б.Б. Экспериментальные исследования доплеровского смещения частоты в переходное время суток // Ионосфера и солнечно-земные связи. Алма-Ата: Наука Каз. ССР. С. 23–28. 1985.
- Хеннан Э. Анализ временных рядов. М.: Наука. 215 с. 1964.
- Шиндин А.В., Сергеев Е.Н., Грач С.М. Фазовый метод зондирования возмущенной области ионосферы с помощью широкополосных радиосигналов // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. Радиофизика. № 6. С. 48–55. 2010.
- Agy Y., Baker D.M., Jones R.M. Studies of solar flare effects and other ionospheric disturbances by a high frequency Doppler Technique // Technical Note. № 306. 164 p. 2012.
- Azeem I. Spectral asymmetry of near-concentric traveling ionospheric disturbances due to Doppler-shifted atmospheric gravity waves // Astron. Space Sci., 22 July 2021. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.690480>
- Bennet J.A. Doppler shift formulas for waves in the ionosphere // Radio Sci. V. 11. № 7. P. 621–627. 1976.
- Chen G., Zhao Z., Zhang Y. Ionospheric Doppler and echo phase measured by the Wuhan Ionospheric Oblique Backscattering Sounding System // Radio Sci. V. 42. RS4007. 2007. <https://doi.org/10.1029/2006RS003565>
- Chimonas G., Hines C.O. Atmosphere gravity waves launched by auroral currents // Planet. Space Sci. V. 18. № 4. P. 565–582. 1970.
- Chum J., Hruška F., Buresova D., Šindelářová T., Heida P., Bochniček Josef. Ionospheric oscillations caused by geomagnetic Pi2 pulsations and their observations by multi-point continuous Doppler sounding; first results // Adv. Space Res. V. 44. P. 667–676. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.04.030>

- Collins K., Montare A., Nathaniel Frissell N., Kazdan D. Citizen Scientists Conduct Distributed Doppler Measurement for Ionospheric Remote Sensing // IEEE Geoscience and remote sensing letters. (This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented). [https://www.nist.gov/system/files/documents/2021/07/20/Citizen\\_Science\\_IEEE\\_Geoscience\\_2021.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/2021/07/20/Citizen_Science_IEEE_Geoscience_2021.pdf).
- Davis M.J. On polar substorms as source of large-scale travelling ionospheric disturbances // J. Geophys. Res. V. 76. № 19. P. 4525–4533. 1971.
- Davies K., Baker D.M. On frequency variations of ionospherically propagated HF radio signals // Radio Sci. V. 1. № 5. P. 545–556. 1966.
- Enomoto Y. Coupled interaction of earthquake nucleation with deep Earth gases: a possible mechanism for seismo-electromagnetic phenomena // Geophys. J. Int. V. 191. P. 1210–1214. 2012.
- Jones T.B., Wright D.M., Milner J., Yeoman T.K., Reid T., Chapman P.J., Senior A. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse of 11 August 1999 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 66. P. 363–374. 2004.
- Hao Y., Xiao Z., Zhang D. Multi-instrument observation on co-seismic ionospheric effects after great Tohoku earthquake // J. Geophys. Res. V. 117. A02305. 2012. <https://doi.org/10.1029/2011JA017036>
- Hua J., Meng L., Zhao X., Li G., Wang D., You X. A Doppler shift estimator in radio propagations // Radio Sci. V. 44. RS4005. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009RS004159>
- Kazdan D., Collins K., Gibbons J., Montare A., Dannhoff S., Erickson P.J., Frissell N.A. A low-cost HamSCI citizen science HF Doppler receiver for measuring ionospheric variability // Proc. AGU Fall Meeting. P. SA43C–3213. 2019.
- Karhunen T.J.T., Robinson T.R., Arnold N.F., Lester M. Determination of the parameters of travelling ionospheric disturbances in the high-latitude ionosphere using CUTLASS coherent scatter radars // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. P. 558–567. 2006.
- Krasnov V., Drobzheva Ya.V., Chum J. Infrasonic waves in the ionosphere generated by a weak earthquake // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 73. P. 1930–1939. 2011.
- Lynn K.J.W., Harris T.J., Sjarifudin M. Relationship between electron density, height and sub-peak ionospheric thickness in the night equatorial ionosphere // Ann. Geophys. V. 24. P. 1343–1353. 2006.
- Lynn K.J.W., Gardiner-Garden R., Sjarifudin M., Terkildsen J., Shi T.J. Large-scale traveling atmospheric disturbances in the night ionosphere during the solar – terrestrial event of 23 May 2002 // J. Atmos. Solar – Terr. Phys. № 70. P. 2184–2195. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.05.016>
- Reinisch B.W., Galkin I.A., Khmyrov G.M., Kozlov A.V., Bible K.B., Lisysyan I.A., Cheney G.P., Huang X., Kitroser D.F., Paznukov V.V., Luo Y., Jon's W., Stelmash S., Hamel R., Grochmal J. The new digisonde for research and monitoring applications // Radio Sci. V. 44. Rs SOA24. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008RS004115>
- Sergeenko N. Effects of Electric Fields in the F2 Layer under Disturbance Conditions Using the Ground Sounding Data. 2019 // Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP): Proceedings. Russian Federation. Kazan. July 1–6, 2019. <https://doi.org/10.1109/RWP.2019.8810360>
- Sinderelova T., Buresova D., Chum J. Observations of acoustic-gravity waves in the ionosphere generated by severe tropospheric weather // Stud. Geophys. Geod. V. 53. P. 403–418. 2009.
- Su H., Liu H., Shui P., Bao Z. Estimation of the Doppler frequency and direction of arrival of the ionospherically propagated HF signals // Radio Sci. V. 44. RS4002. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008RS003990>
- Sutcliffe P.R., Poole A.W.V. Ionospheric Doppler and electron velocities in the presence of ULF waves // J. Geophys. Res. V. 94. № A10. P. 13505–13514. 1989.