

УДК 550.388.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ ЭФФЕКТАМИ, ПО ДАННЫМ ДОПЛЕРОВСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Б.А. Загидуллин, В.В. Бочкарев, И.Р. Петрова

### INVESTIGATION OF IONOSPHERIC DISTURBANCES OBTAINED BY THE DOPPLER PROBE DUE METEOROLOGICAL EFFECTS

B.A. Zagidullin, V.V. Bochkaev, I.R. Petrova

По данным доплеровского зондирования ионосферы фазоугломерным комплексом «Спектр» и картам метеорологических параметров реанализа NCEP/NCAR Reanalysis была выявлена статистическая связь между вариациями давления и доплеровского смещения частоты. Обнаружены согласованные колебания с периодом 29–32 сут и с периодом 4 сут.

The ionosphere variations data set obtained at the Doppler ionosphere complex “Spectr” and reanalysis maps of meteorological parameters obtained from the NCEP / NCAR was found statistical correlation between the variations of pressure and Doppler frequency shift. Detected consistent oscillation with a period of 29–32 days and with a period of 4 days.

#### Введение

Проблема взаимодействия тропосфера–стратомезосфера–ионосфера является актуальной. Исследование процессов, происходящих в ионосфере, методом доплеровского зондирования в Казанском (Приволжском) федеральном университете проводятся давно. Одно из направлений работ, проводимых на доплеровском фазоугломерном комплексе, это исследование волновых процессов в ионосфере посредством анализа периодических вариаций параметров сигнала [Теплов, 2003]. Метод позволяет изучать широкий класс изменений в ионосфере, обусловленных как причинами внеземного происхождения, так и процессами, происходящими вблизи поверхности Земли [Намазов, 1975]. Анализ проводится по данным доплеровского зондирования ионосферы на трассах Москва–Казань (частоты 4996, 9996 КГц), Архангельск–Казань (частота 6160 КГц) и картам метеорологических параметров, полученных из архива NCEP/NCAR Reanalysis. В работе описывается статистическая обработка данных реанализа и доплеровского смещения частоты (ДСЧ) с целью поиска корреляции между данными рядами и для выявления характерных ионосферных вариаций, зависящих от изменения метеорологических параметров нижележащей атмосферы.

#### Кросскорреляционный анализ данных

В работе анализировались данные доплеровского смещения частоты за период с апреля 2009 по март 2010 г. Поскольку данные карт реанализа представлены с дискретизацией 6 ч, для рядов доплеровского смещения частоты было найдено стандартное отклонение и интерквартильный размах выборки вариаций за сутки. В работе [Данилов, 1987] указывается на множество работ, связанных с вычислением корреляций между изменением ионизации в различных слоях ионосферы и изменением приземного давления. Поэтому в качестве данных реанализа были взяты данные давления поверхностного слоя атмосферы, тропопаузы и данные геопотенциальной высоты для различных изобарических поверхностей от 1000 гПа до 10 гПа. По картам были вычислены средние значения давления над областью радиотрасс Казань–Москва, Казань–Архангельск. Данные карты показывают характерные интервалы

циклонов и антициклонов над исследуемой областью. Однако с повышением высоты в данных реанализа начинает сильно проявляться среднегодовой тренд, для его исключения была применена медианная фильтрация с окном 30 сут.

Из рис. 1 (выделенные участки) следует, что вариации ДСЧ уменьшаются при повышении среднего значения давления и увеличиваются в обратном случае. Результаты имеют аналогичный характер и для других исследуемых частот. Можно сказать, что изменение давления является недостаточным условием появления ионосферных возмущений. По рис. 1 можно проследить также запаздывание изменения вариации ДСЧ относительно изменения давления. Далее, для выявления времени задержки и общих волновых процессов, происходящих в нижней атмосфере и ионосфере, с выборками данных давления и ДСЧ был проведен кросскорреляционный анализ, который позволил оценить взаимную корреляционную функцию двух процессов.

По результатам кросскорреляционного анализа сделан вывод, что в зимний сезон сигналы имеют больший максимум корреляции, чем в летний. Многими исследователями было показано, что взаимодействие метеорологических и ионосферных полей наиболее ярко проявляется во внетропической зимней атмосфере [Данилов, 1987]. На рис. 2 можно увидеть повторяющиеся максимумы кросскорреляционной функции с периодом 29–32 сут. Видно также, что более высокая корреляционная связь наблюдается с нижними слоями атмосферы.

#### Оценка квадрата взаимной когерентности

По взаимной корреляции двух сигналов сложно оценить присутствие тех или иных гармоник колебательных процессов, поэтому для оценки параметра когерентности двух сигналов был подсчитан квадрат модуля функции взаимной когерентности вариаций давления и ДСЧ.

Коэффициент взаимной когерентности для волны с месячным периодом 29–32 сут наиболее высокий. Это говорит о присутствии периодических колебаний с данным периодом, что хорошо видно на рис. 3. Также можно увидеть увеличение показателя когерентности с повышением высоты для колебаний с периодом четверо суток. Они не прослеживались на кросскорре-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере // Л.: Гидрометеоиздат, 1987. С. 139.

Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий И.А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении декаметровых радиоволн // Известия вузов. Радиофизика. 1975. Т. XVIII, № 4. С. 473–500.

Перевалова Н.П., Полякова А.С., Ишин А.Б., Воейков С.В. Исследование волновых возмущений ионосферы плазмы по данным дистанционного зондирования во время урагана Katrina // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 1. С. 190–200.

Теплов В.Ю., Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Шорников В.О. Многоканальный измерительный фазоугло-мерный комплекс КВ-диапазона // Прием и обработка сигналов в сложных информационных системах. Казань: Изд-во КГУ, 2003. № 21. С. 113–121.

Чепмен С., Линдзен Р. Атмосферные приливы термические и гравитационные. М.: Мир, 1972. С. 111–174.  
<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/reanalysis/>.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

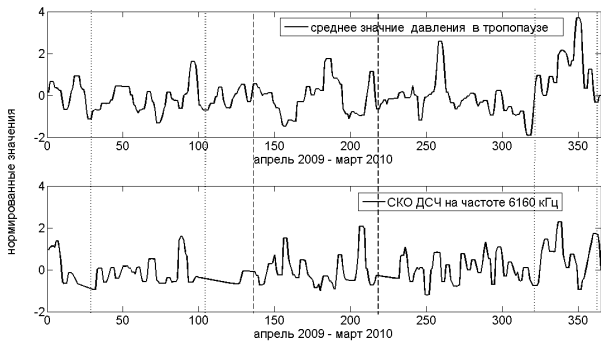


Рис. 1. Сравнение среднего значения давления в тропопause и СКО значений данных ДСЧ на частоте 6160 кГц за апрель 2009 – март 2010 г.

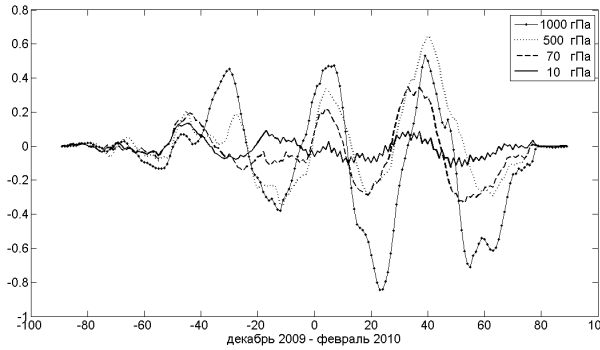


Рис. 2. Кросскорреляционная функция среднего давления на высотах 1000, 500, 70, 10 гПа и данных ДСЧ на частоте 9996 кГц в зимний период: декабрь 2009 – февраль 2010 г.

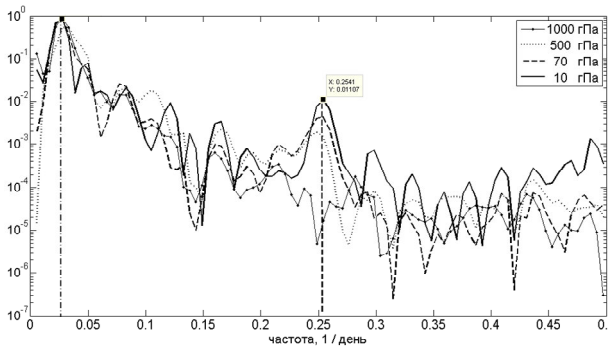


Рис. 3. Оценка квадрата модуля функции взаимной когерентности среднего значения давления на высотах 1000, 500, 70, 10 гПа и данных ДСЧ на частоте 6160 кГц.

ляционном спектре. Период этих колебаний соответствует 2–4-суточной задержке распространения волн из нижележащей атмосферы в области D и E, о которой говорится в [Данилов, 1987].

**Заключение**

В ходе работы с данными доплеровского смещения частоты и картами реанализа была выявлена статистическая связь между вариациями давления и доплеровского смещения частоты. Обнаружены согласованные колебания с периодом 29–32 сут и с периодом 4 сут. Полученные результаты согласуются с результатами ранних работ в [Данилов, 1987].