

УДК 681.3.06

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОНИТОРИНГА 2005–2006 гг.
НА ДОПЛЕРОВСКОМ ФАЗОУГЛОМЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ «СПЕКТР»**

В.Ю. Теплов, В.В. Бочкарев, Р.Р. Латыпов, И.Р. Петрова, Е.Ю. Зыков

WAVE PROCESSES RESEARCH ON KSU DOPPLER GONIOMETRIC COMPLEX SPECTR

V.Yu. Teplov, V.V. Bochkarev, I.R. Petrova, R.R. Latipov, E.Yu. Zыkov

В докладе представлены результаты измерений, которые проводились в КГУ на доплеровском фазоугломерном комплексе «Спектр» в режиме мониторинга в 2005–2006 гг. Измерения проводились на КВ-радиотрассах различной ориентации (в том числе и во время солнечного затмения 2006 г.). В качестве характерных примеров рассматриваются волновые процессы в различные сезоны на трассах Москва–Казань (частоты 4996, 9996 кГц), Архангельск–Казань (частота 6160 кГц), а также Израиль–Казань во время затмения (частота 5915 кГц). Для получения статистически достоверных результатов о волновых процессах в ионосфере, а также информации о редких, быстротечных событиях, измерения на ионосферных комплексах должны проводиться в режиме долгосрочного непрерывного мониторинга. В докладе также представлены результаты проведенных работ по модернизации аппаратного и программного обеспечения комплекса.

Ionospheric complexes must work in continuous and long-term mode of operation to get statical reliable results. In this report measurement results of KSU doppler goniometric complex Spectr for period of 2005–2006 years are shown. Measurements were held on different radio lines, in time of solar eclipse too. Also in report result of hardware and software modernization are displayed. Remote control and telemetry system based on GPRS network is build.

Методика измерений и обработки данных

Измерительный комплекс представляет собой систему частотно-пространственно разнесенного приема с малой базой (ЧППП). В состав антенно-фидерной системы комплекса входят 4 вертикальных антенны с вертикальной поляризацией и круговой диаграммой направленности в горизонтальной плоскости («вертикальный вибратор») и 4 наклонных вибратора, позволяющие осуществлять спектрально-поляризационный метод измерений [1, 2]. В качестве приемников в комплексе используются связанные КВ-приемники Р339 (диапазон 1–30 МГц). Используется метод цифрового приема с аналоговым квадратурным разложением сигнала на низкой частоте (полоса приема 50 Гц), позволяющий определять фазовые и амплитудные характеристики при цифровой спектральной обработке в динамическом диапазоне до 70 дБ. Стабильность частотных параметров определяется стандартом частот Ч1-50 и составляет 10^{-11} (<0.001 Гц на частоте 10 МГц). Комплекс позволяет проводить измерения в режиме угломера (4 приемника настроены на одну частоту) или спектроанализатора (до 4 различных частот параллельно) [3]. Измерения проводятся с использованием сигналов радиовещательных станций КВ-диапазона. Это позволяет исследовать различные по пространственной ориентации и длине трассы без затрат на организацию специальных пунктов радиоизлучения. Использование сигналов вещательных КВ-станций позволяет реализовать режим непрерывных длительных измерений для исследования суточных ходов и иных долгопериодных вариаций ионосферных параметров на трассах различной направленности [4].

Модернизация измерительной системы

Удаленное расположение экспериментального комплекса «Спектр» требует организации системы дистанционного оперативного контроля. Разработанная система телеметрии основана на использовании средств GPRS доступа к ресурсам Интернета на

основе модемов Siemens MC-35i. Модем поддерживает восьмой класс GPRS, что обеспечивает максимальные скорости на передачу 21.4 кбит/с и на прием 85.6 кбит/с. Реальная скорость передачи 19200 бит/с. В качестве протокола передачи файлов используется протокол FTP. Обмен происходит по технологии «клиент–сервер». При подключении к серверу протокол FTP производит авторизацию пользователя для исключения несанкционированного доступа. FTP поддерживает докачку файлов в случае разрыва соединения. Автоматически проводятся циклы обмена файлами между локальной машиной и сервером по протоколу FTP. В качестве сервера используется сервер Казанского государственного университета. Каждые 30 мин передается телеметрическая информация о состоянии аппаратуры комплекса и основные параметры принимаемого сигнала. Также обеспечивается возможность передачи файлов с сервера КГУ. Поток передаваемой информации около 10 кбайт в час.

Использованные данные

Представляемые данные были получены методом многоканальных доплеровских измерений. Измерения проводились на КВ-радиотрассах различной ориентации при различных условиях распространения (в том числе и во время солнечного затмения 2006 г.). В качестве характерных примеров рассматриваются трассы Москва–Казань (частоты 4996, 9996 кГц), Архангельск–Казань (частота 6160 кГц), а также Израиль–Казань во время затмения (частота 5915 кГц). Полученные данные обрабатывались с помощью оконного преобразования Фурье. Интервал спектрального анализа выбирался в соответствии с интервалом когерентности сигнала наклонного зондирования. Типичные значения интервала когерентности составляют порядка 20–40 с, отсюда время корреляции для получаемых оценок $df(t)$ составляет 4–8 с в зависимости от условий распространения [5].

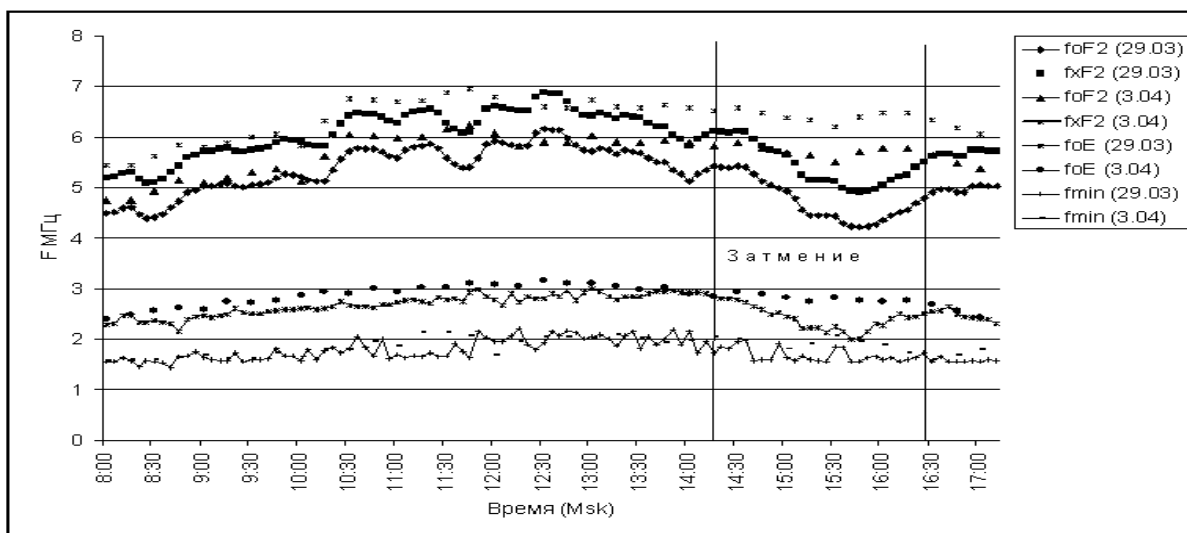


Рис. 1. Результаты измерения ионосферной станции «Циклон» (Казань) 29.03.2006 г. и 03.04.2006 г.

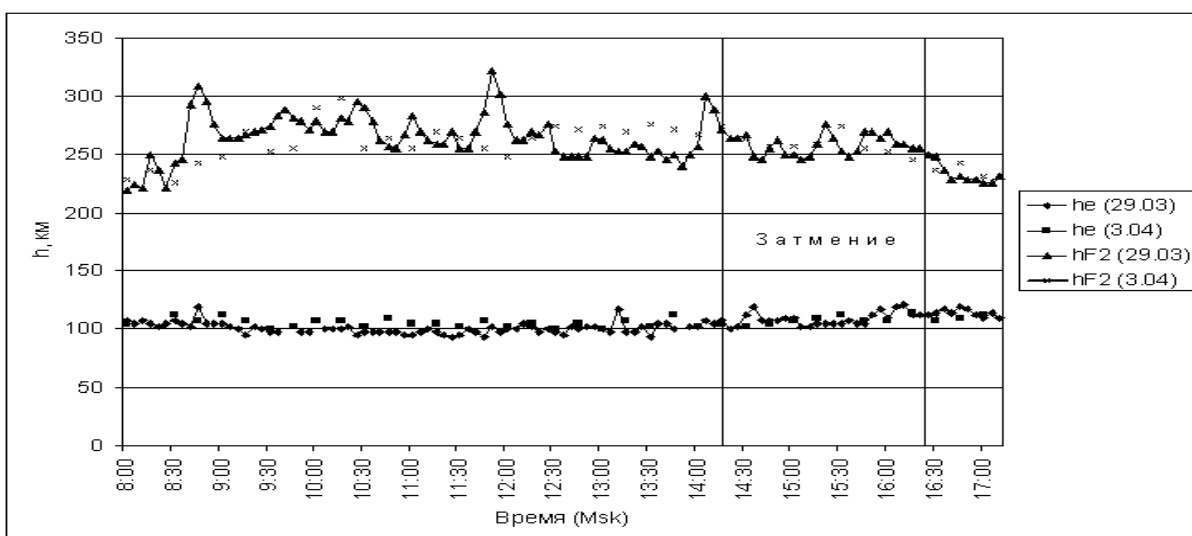


Рис. 2. Высоты ионосферных слоев (результат измерений ионосферной станцией «Циклон») 29.03.2006 г. и 03.04.2006 г.

Средний доплеровский сдвиг частоты ионосферного сигнала вычислялся как сдвиг центра тяжести спектра мощности в заданном частотном окне.

$$df = \frac{\sum_i |A(f_i)|^2 f_i}{\sum_i |A(f_i)|^2}, \quad (3)$$

где $A(f_i)$ – амплитуда, f_i – частота i -й гармоники.

Влияние геомагнитной активности на ионосферные процессы

Был проведен анализ влияния геомагнитной активности на доплеровский сдвиг частоты (ДСЧ) ионосферного сигнала [6, 7]. В качестве показателей геомагнитной активности использовались планетарные индексы K_p и D_{st} , а также составляющие магнитного поля X , Y , Z . Анализ зависимости состоял в вычислении коэффициентов корреляции между этими величинами. Для проведения анализа были отобраны данные, удовлетворяющие следующим критериям: непрерывный ряд данных в течение суток; наличие явно выделяемого сигнала на фоне шу-

мов; отсутствие мощных помех, вносящих искажения в сигнал. В результате были привлечены данные 6 дней с повышенным уровнем геомагнитной активности, 14 дней с низким уровнем геомагнитной активности, 14 дней с переменным уровнем геомагнитной активности. После проведения корреляционного анализа были выявлены ряд особенностей. Для спокойных дней корреляции между ДСЧ и индексами геомагнитной активности не обнаружено. Это можно объяснить тем, что в спокойные дни влияние со стороны геомагнитного поля на ионосферу слабое и на ионосферу оказывают действие факторы другого происхождения. В те дни, когда геомагнитная активность повышена, наблюдается хорошая корреляция вариаций ДСЧ с K_p -индексом ($r = 0.55$), с индексом D_{st} лучше коррелирует среднее значение ДСЧ ($r = 0.34$). Корреляционная зависимость между вариациями ДСЧ и K_p -индексом имеет экспоненциальный вид. Для выборки, содержащей как спокойные, так и возмущенные дни, K_p лучше коррелирует со средним значением ДСЧ, а с вариациями ДСЧ корреляции нет. D_{st} -индекс также коррелирует со средним значением ДСЧ. В ряде случаев наблюдается корреля-

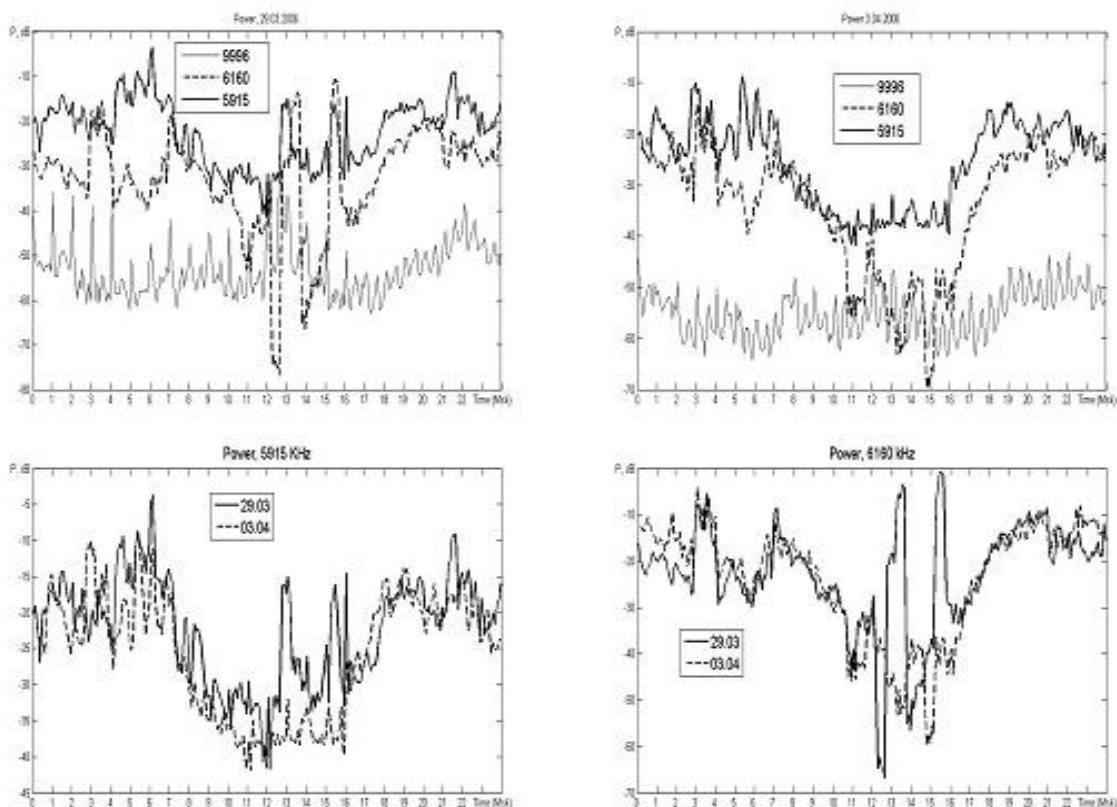


Рис. 3. Сравнительные результаты измерения амплитуды сигнала во время солнечного затмения и тестовых дней на трех трассах.

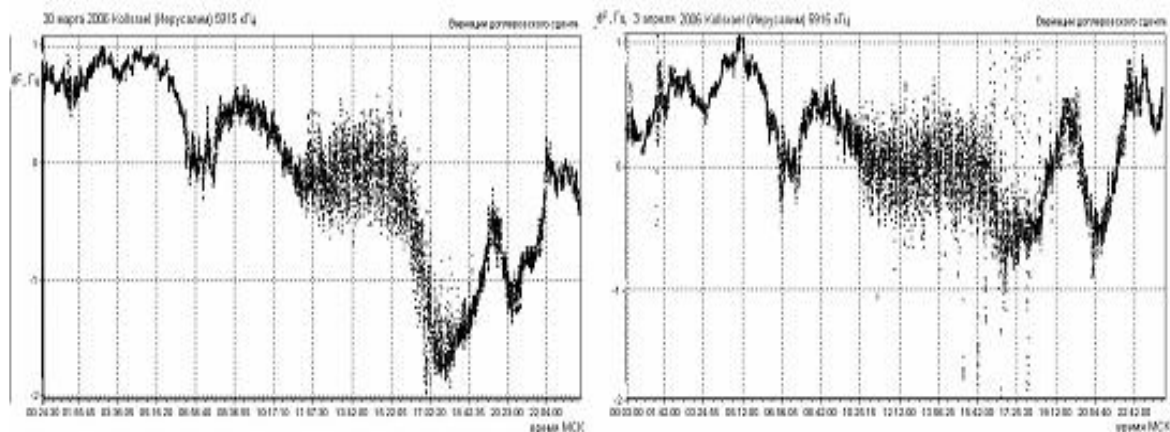


Рис. 4. Поведение ДСЧ в обычные дни весеннего периода на трассе Израиль–Казань (5915 кГц). В качестве примера представлены измерения, проведенные в контрольные дни 30.03.06 г. и 03.04.06 г.

ция ДСЧ с одной или несколькими составляющими магнитного поля. В дни с повышенным уровнем геомагнитной активности коэффициенты корреляции имеют отрицательный знак. Наибольшая связь установлена между ДСЧ и X-составляющей геомагнитного поля ($r = -0.65$). Коэффициенты корреляции между вариациями ДСЧ и K_p -индексом при сдвиге временных рядов друг относительно друга достигают наибольшего значения при сдвиге от 1 до 3 ч.

Эффекты солнечного затмения

Исследования, направленные на изучение ионосферных процессов во время солнечных затмений, довольно малочисленны и зачастую противоречивы, что вызвано редкостью этих событий и сложностью интерпретации результатов. Так, в измерениях 1945 г.

отмечалась задержка в уменьшении плотности ионизации на 40–50 мин относительно максимальной фазы затмения [8]. В измерениях же 1981 г. отмечена синхронность понижения f_oF2 с фазой затмения [9]. Также различна информация и о поведении высот слоя. Как правило, измерения проводились средствами вертикального зондирования (ионосферные станции) и на трассах наклонного зондирования (измерение уровня сигнала).

Во время прохождения солнечного затмения 29 марта 2006 г. в Казани эксперимент проводился средствами доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр» и ионосферной станции «Циклон». Ионосферная станция работала в режиме излучения с периодом повторения 5 мин.

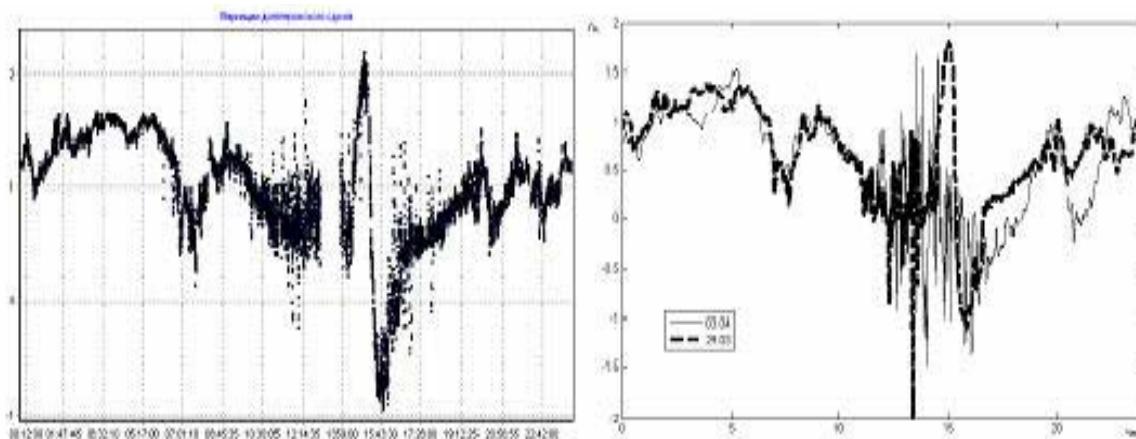


Рис. 5. Поведение ДСЧ 29.03.06 г. на трассе Израиль–Казань (5915 кГц) и сравнение с 03.04.06 г.

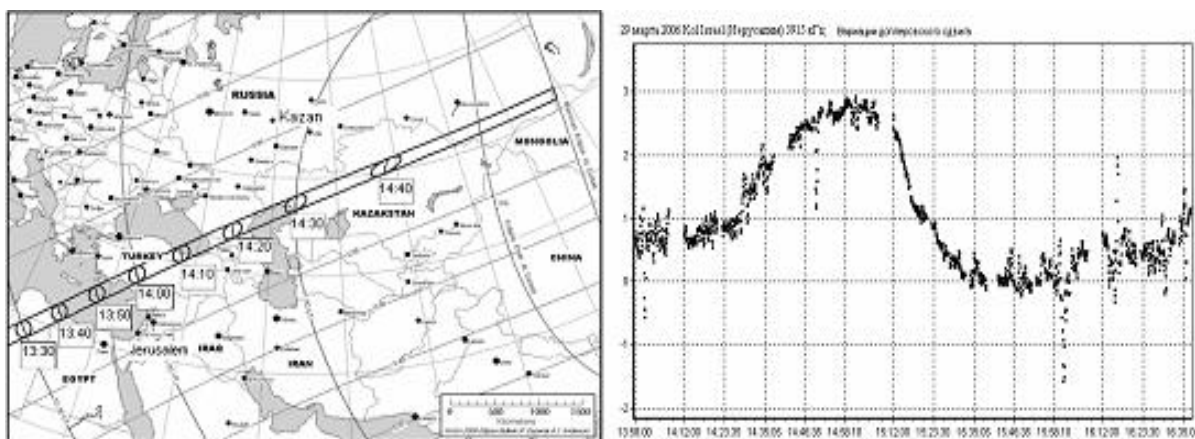


Рис. 6. Трек затмения и поведение ДСЧ на трассе Израиль–Казань на отрезке времени от 14:00 до 16:30 мск (частота 5915 кГц).

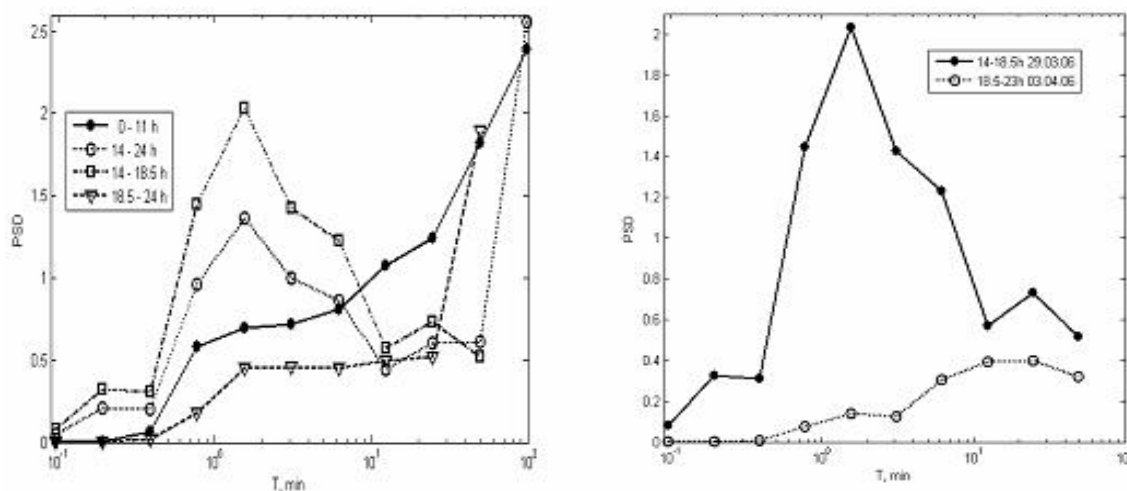


Рис. 7. Распределение периодов квазигармонических процессов для различных дней и времен суток.

На рис. 1, 2 достаточно хорошо видно проявление эффектов затмения для частотных параметрах слоев (понижение электронной концентрации на 20–30 % относительно тестовых дней) и слабая зависимость для высотных параметров (для слоя E отсутствует).

Для проведения наклонного зондирования были выбраны три трассы различной ориентации. Наиболее явно проявление затмения выявилось на трассе Израиль–Казань. На рис. 3 представлены графики

амплитуды принимаемого сигнала для обычного и возмущенного дней.

На рис. 4 представлено характерное для обычных дней весеннего периода поведение ДСЧ на трассе Израиль–Казань. Хорошо выделяются волновые процессы, связанные с прохождением терминатора в восходно-заходный период, явно выраженное наличие рассеянного сигнала с расширенным спектром и случайными колебаниями ДСЧ в дневной период при-

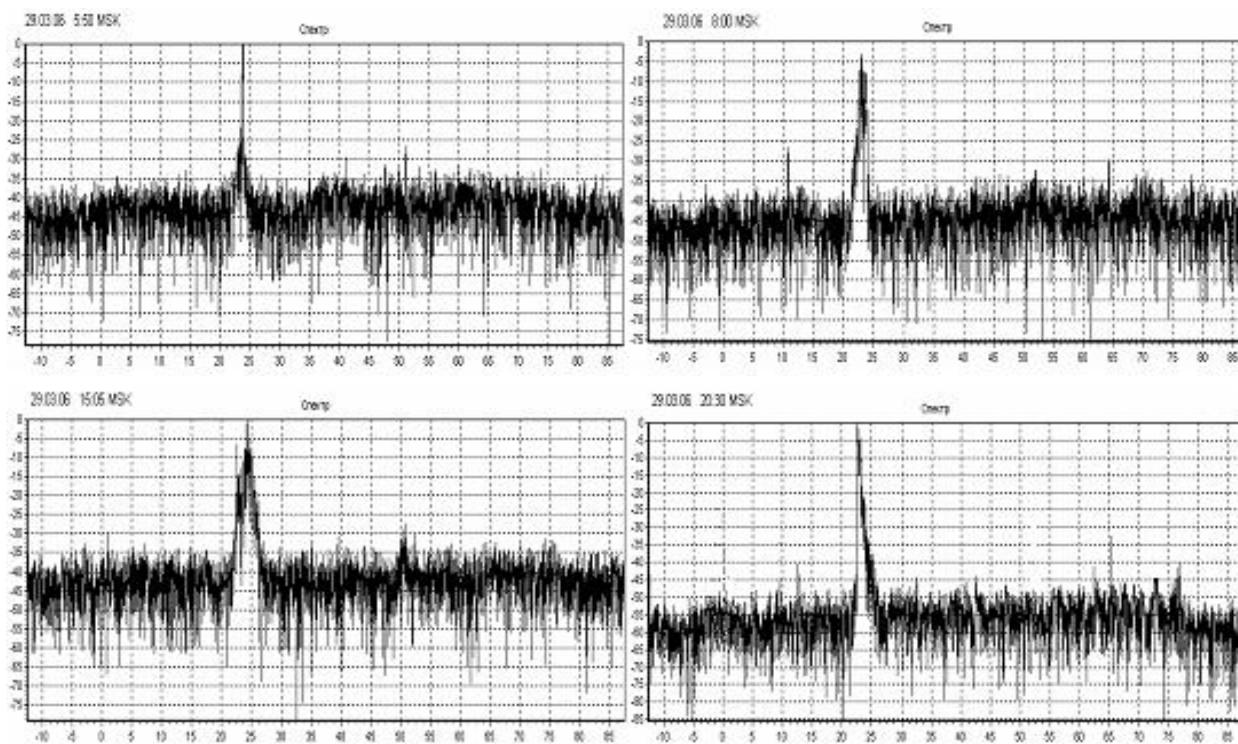


Рис. 8. Характерный вид спектров для разных времени суток, 15:05 мск соответствует времени затмения.

близительно с 10:30 до 17:30 московского времени. Размах колебаний ДСЧ не превышает 1–2 Гц.

Поведение ДСЧ меняется в день солнечного затмения 29 марта 2006 г. (рис. 5). В дневное время, характеризующееся обычно рассеянным сигналом, появляется колебание ДСЧ с размахом, существенно превышающим среднесуточное значение. При этом характерное поведение ДСЧ на восходно-заходных участках сохраняется. Также присутствует и рассеянный сигнал в полуденное время. Показанное на рис. 2 наложение двух соседних дней позволяет выделить характерные черты и особенности. При визуальном сравнении двух участков ДСЧ с 14:00 до 16:00 (эффект затмения) и с 19:00 до 21:00 (восходно-заходный участок) видно, что при некотором внешнем сходстве поведения проявляются и существенные отличия. Более резкие фронты, больший размах ДСЧ во время затмения говорит о больших скоростях изменения фазового пути радиоволны.

В таблице представлены времена прохождения трека затмения по поверхности Земли вдоль исследуемой трассы (время московское летнее). На рис. 6

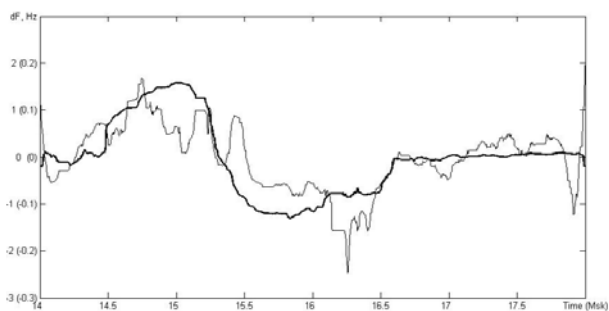


Рис. 9. ДСЧ на трассах Архангельск–Казань (тонкая линия) и Иерусалим–Казань (толстая линия) 29.04.06 г.

показан наиболее интересный участок суточного хода ДСЧ, соответствующий времени прохождения затмения для трассы Израиль–Казань. Хорошо видно, что сдвиг частоты коррелирует с прохождением трека солнечного затмения по поверхности Земли в районе точки отражения. В обычные дни на данной трассе в это время не наблюдаются доплеровские вариации подобного вида и с подобным размахом (до 3 Гц).

Прохождение затмения в основных точках использованных трасс.

Город	Время начала	Наибольшая фаза	Время конца	Величина фазы
Тель-Авив	13:37	14:56	16:12	0.85
Тбилиси	14:04	15:19	16:30	0.95
Астрахань	14:12	15:24	16:32	1.00
Ростов	14:03	15:15	16:25	0.89
Казань	14:19	15:25	16:28	0.75
Москва	14:10	15:15	16:18	0.65
Архангельск	14:21	15:16	16:10	0.48
Н. Новгород	14:15	15:20	16:23	0.70
Вологда	14:15	15:17	16:17	0.59

По нашим оценкам, для трассы Израиль–Казань, при условии нахождения точки отражения на высотах от 100 до 400 км скорость перемещения находится в пределах 45–25 м/с. Спектральное оценивание квазипериодических составляющих в колебаниях ДСЧ показывает появление спектральных составляющих с характерными периодами 30 с 10 мин на хвосте затмения, не наблюдаемых или сильно ослабленных в иное время и в период восходно-заходных эффектов. Результат спектрального оценивания представлен на рис. 7.

На рисунке 8 показан вид характерных спектров сигналов на трассе Израиль–Казань для разных моментов времени.

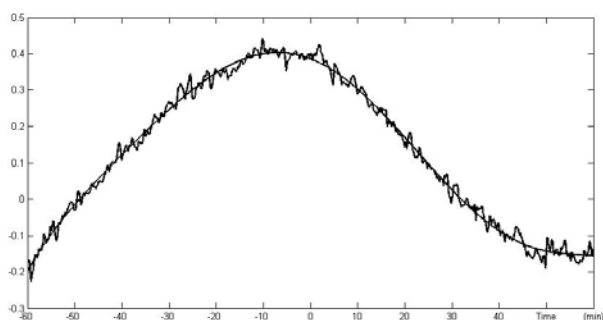


Рис. 10. Кросскорреляционная функция ДСЧ на трассах Иерусалим–Казань и Архангельск–Казань 29.04.06 г.

Также анализ проводился для сигнала НЗ на трассах Архангельск–Казань («Радио России», частота 6160 кГц.) и Москва–Казань (РВМ, частота 9996 кГц.). На этих трассах изменения в поведении ДСЧ менее выражены, но тоже присутствуют. Из рисунка 9, 10 видно, что колебания ДСЧ на трассе Архангельск–Казань тоже присутствуют и хорошо коррелируют с колебаниями на трассе Иерусалим–Казань (из графика корреляционной функции хорошо видно запаздывание на 8–9 мин). Размах колебаний существенно меньше (для удобства сопоставления ДСЧ для трассы Архангельск–Казань зависимость представлена с десятикратным увеличением).

Передаваемая информация используется сервером «Геофизической информационной системы» КГУ (<http://geobase.ksu.ru>). Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №05-05-64651, №06-05-65150.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афраимович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М.: Наука, 1982. 198 с.
2. Бочкарев В.В., Латыпов Р.Р., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Применение ЛЧМ-сигнала в многоканальных фазо-

вых измерениях КВ-диапазона. Численное моделирование // Распространение радиоволн: Сборник докладов XXI всерос. конф. Йошкар-Ола, Россия, 25–27 мая 2005 г. Йошкар-Ола, 2005. С. 45–50.

3. Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий И.А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении декаметровых радиоволн (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 4. С. 473–500.

4. Теплов В.Ю. Развитие интерференционных методов радиозондирования ионосферы: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.03: защищена 03.03.05; утв. 08.06.05. Казань, 2005. 160 с.

5. Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Экспериментальное исследование нестационарности сигнала наклонного зондирования ионосферы на среднеширотной коротковолновой радиотрассе // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. XLVII, № 8. С. 619–629.

6. 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. Таганрог, 2005. С. 425–427.

7. Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Эффекты магнитной бури 29–31 октября 2003 г. на среднеширотной КВ-радиотрассе (по данным доплеровских измерений) // Космические исследования. 2004. Т. 42, № 6. С. 640–644.

8. Папалекси Н.Д. Радионаблюдения во время полного солнечного затмения 9 июля 1945 г. // Известия АН СССР. 1946. Т. 10, № 3. С. 237–242. (Серия физическая).

9. Елизарьев Ю.Н. Состояние ионосферы над Томском во время солнечного затмения 31 июля 1981 г. // Электродинамика и распространение волн. Томск: Изд-во ТГУ, 1984. Вып. 4. С. 116–120.

Казанский государственный университет, Vadim.Teplov@ksu.ru