

ОБНАРУЖЕНИЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ В ДИАПАЗОНЕ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Описана методика выделения квазипериодических колебаний (цугов волн) из временных рядов значений доплеровского смещения частоты радиосигналов доплеровского высокочастотного радара вертикального зондирования. Для выделения колебаний из смеси сигнала и шума использовалась полосно-пропускающая фильтрация совместно со спектральным анализом. Показана эффективность выделения колебаний, соответствующих как акустическим, так и внутренним гравитационным волнам. Методика применена для выделения колебаний, генерируемых утренним солнечным терминатором. Продемонстрировано, что движение терминатора сопровождалось колебаниями с периодами 6 ± 7 и 20 мин и относительными амплитудами возмущений концентрации электронов около 0.2 и 2 % соответственно.

Ключевые слова: ионосфера, колебания, полосно-пропускающая фильтрация, спектральный анализ, солнечный терминатор, акустические волны, внутренние гравитационные волны

1. Введение

Волновые процессы в атмосфере играют значительную роль в глобальном балансе количества движения (импульса силы) и энергии. Волны возникают под действием приливов, солнечного терминатора, термических процессов, при обтекании воздушными течениями препятствий и т. п. Волны в атмосфере генерируются при геокосмических бурях, падениях метеоритов, землетрясениях, извержениях вулканов, мощных метеопроцессах, грозах и т. д. Целый ряд антропогенных источников энерговыделения способен генерировать волны в широком диапазоне периодов (от ультразвука до внутренних гравитационных волн – ВГВ). К таким источникам относятся сильные взрывы, старты и полеты крупных космических аппаратов, мощное радиоизлучение и др.

Исследованию волн в атмосфере и ионосфере посвящен ряд монографий (см., например, [1–4]), обзоров (см., например, [5–13]) и большое количество оригинальных статей. Несмотря на впечатляющие достижения в изучении генерации и распространения волн в околоземной среде, актуальными остаются задачи разработки высокочувствительных методов выявления волновых (квазипериодических) процессов в ионосфере, селекции заданного источника волн, определения параметров источника, использования волн для диагностики атмосферы и геокосмоса.

Как показано в работе [11], большинство радиофизических методов позволяет обнаруживать

волновые возмущения (ВВ) концентрации электронов N в ионосфере с относительной амплитудой $\delta_N \geq 1 \div 10 \%$ и периодом $T \geq 10$ мин (диапазон ВГВ). Несомненный интерес представляет также выявление ВВ с $\delta_N \sim 0.1 \div 1 \%$ и периодом $T < 5 \div 10$ мин (диапазон акустических волн или инфразвука). Как показано ниже, для этого может применяться метод вертикального доплеровского зондирования, сочетающий в себе высокую чувствительность к малым вариациям N и высокое временное разрешение.

Для оценки периодов и амплитуд ВВ традиционно применяется спектральный анализ (см., например, [14]), а в последнее время модификации преобразования Фурье [15], вейвлет-анализ (см., например, [15, 16]), системный спектральный анализ [17]. Задача восстановления параметров ВВ решается в статистической и динамической постановках [18].

Целью настоящей работы является описание методов выделения достаточно слабых ($\delta_N \sim 0.1 \div 1 \%$) квазипериодических колебаний (цугов волн) из временных вариаций доплеровского смещения частоты (ДСЧ) радиосигналов доплеровского радара вертикального зондирования.

2. Средства наблюдения и методики обработки

Доплеровский радар предназначен для вертикального зондирования ионосферы. В настоящей работе он использовался для регистрации ВВ в ионосфере, вызванных движением солнечного терминатора. Радар расположен вблизи г. Харькова

(Украина) на территории Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, ее координаты: $49^{\circ}38'$ с. ш., $36^{\circ}20'$ в. д. Основные параметры радара: диапазон частот $f = 1 \div 24$ МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства – 1 кВт, длительность зондирующего импульса $\tau \approx 500$ мкс, частота повторения импульсов – 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства – 10 Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с коэффициентом усиления $G \approx 1 \div 10$ в зависимости от частоты зондирующей волны. При таком потенциале радара отношение сигнал/помеха q_s в ночное время достигает $10^5 \div 10^6$. В дневное время q_s обычно на $1 \div 2$ порядка меньше. Радар вместе с персональным компьютером образует программно-аппаратный комплекс, проводящий измерения и предварительную обработку отраженного от ионосферы сигнала в реальном масштабе времени. Измерения выполнены на частотах зондирования 3.2 и 4.2 МГц.

Высотная протяженность отраженного сигнала существенно превышала величину $c\tau/2 \approx 75$ км (c – скорость света в вакууме). Поэтому использовалось стробирование по высоте с дискретностью $\Delta z = 75$ км в диапазоне действующих высот около $z' = 75 \div 450$ км (им соответствовали истинные высоты $75 \div 300$ км). В основном канале амплитуда сигнала принимала максимальные значения, в других каналах она была заметно меньше. Обработке подлежал сигнал в основном канале.

Для общего контроля состояния ионосферы использовался цифровой ионозонд, расположенный рядом с доплеровским радаром.

Комплексная амплитуда биений колебаний опорного генератора доплеровского радара и отраженного сигнала в цифровом виде (частота опроса 10 Гц) записывалась на носитель информации, а затем при помощи преобразования Фурье вычислялись доплеровские спектры в диапазоне возможных доплеровских сдвигов от -2.5 до $+2.5$ Гц на интервале времени 60 с (разрешение по частоте ~ 17 мГц). Потенциальная погрешность оценки ДСЧ, например при $q_s = 10^3 \div 10^2$, составляла $1.8 \div 5.8$ мГц. При больших значениях q_s она была еще меньше. Реальная погрешность не превышала 8 мГц.

Далее осуществлялась фильтрация и спектральный анализ временной зависимости ДСЧ в задан-

ном диапазоне периодов. Обнаружению подлежали колебания с периодом от единиц до 60 мин.

3. Результаты моделирования

3.1. Модель вариаций ДСЧ высокочастотного сигнала

Для основной моды отраженного сигнала в случае отсутствия внутренней многолучевости представим вариации ДСЧ $f_d(t)$ на интервале наблюдения в виде суперпозиции волновых пакетов (цугов):

$$f_d(t) = \sum_{i=1}^n E_i(t) \cos(\Omega_i t + \Psi_{0i}),$$

где $E_i(t) = E(t; \{\alpha_j\}_i)$, $E(t; \{\alpha_j\})$ – многопараметрическая модель огибающей цуга, i – номер цуга, $\{\alpha_j\}$ – вектор параметров огибающей; $\Omega_i = 2\pi/T_i$ – частота заполнения цуга, T_i – период; Ψ_{0i} – начальная фаза.

В качестве модели огибающей выберем следующую 4-параметрическую функцию:

$$E(t; a, m, t_c, \tau) = \frac{a}{1 + \left[\frac{2}{\tau_0} (t - t_c) \right]^{2m}},$$

где a – амплитуда; m – параметр, контролирующий контрастность края возмущения; $t_c = t_{0i} + \tau/2$, t_{0i} – начало цуга; τ_0 – длительность цуга. При $t - t_c = \tau/2$ значение функции $E(t)$ уменьшается в два раза относительно значения в точке t_c .

Из наблюдений перемещающихся ионосферных возмущений известно (см., например, [19]), что длительность возмущений τ_0 при небольших T составляет несколько периодов, а при $T \approx 1$ ч и более T и τ_0 одинаковы по порядку величины. В качестве тестовой реализации вариации ДСЧ рассмотрим модельную функцию $f_d(t)$ с параметрами:

$$\{a_i\} = (0.3; 0.2; 0.1; 0.05; 0.04; 0.02), \text{ Гц};$$

$$\{t_{0i}\} = (0; 320; 0; 250; 100; 300), \text{ мин};$$

$$\{m_i\} = (4; 4; 4; 4; 4; 4);$$

$$\{T_i\} = (120; 60; 30; 15; 10; 6), \text{ мин};$$

$$\{\Psi_{0i}\} = (0; 0; 0; 0; 0; 0);$$

$$\{k_i\} = (2; 3; 4; 5; 7; 10); \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad n = 6;$$

где $\tau_i = k_i T_i$. Интервал наблюдения равен 7 ч. На рис. 1, *a* приведена модельная реализация $f_a(t)$.

В настоящей работе решаются две задачи: обнаружение волновых (квазипериодических) процессов (цуга с заданной частотой заполнения) и оценка их параметров. От поставленной задачи зависит выбор метода решения и его ха-

рактеристик. Если априори неизвестны спектральный состав ДСЧ и его динамика, то на первом этапе рассчитывается временная последовательность спектров (динамические спектры). Далее выделяется исследуемая гармоника. Для определения параметров соответствующего цуга проводится полосно-пропускающая фильтрация вариаций ДСЧ. Спектральный анализ

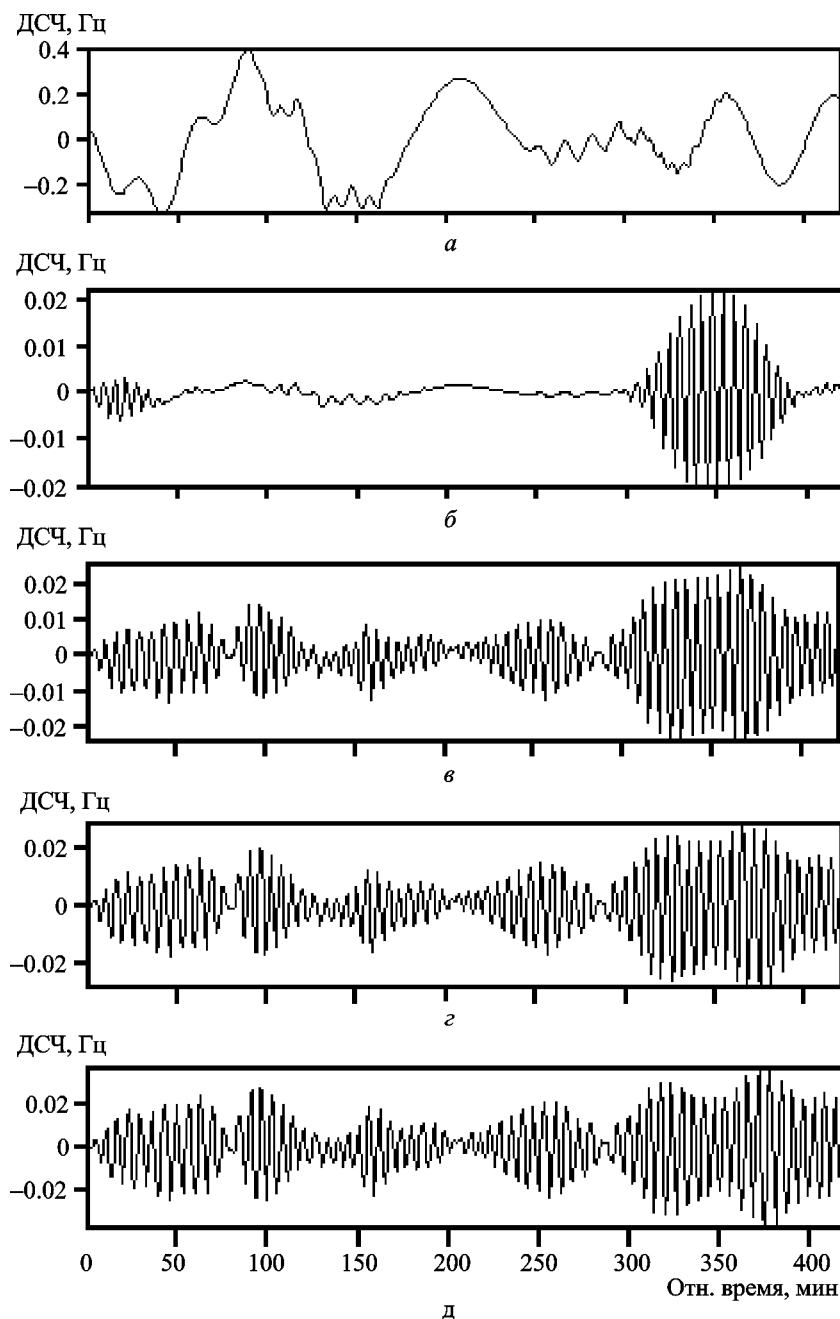


Рис. 1. Модельные вариации ДСЧ: без фильтрации и в отсутствие шума (*a*); после полосно-пропускающей фильтрации и в отсутствие шума (*b*); после полосно-пропускающей фильтрации при наличии аддитивной помехи в виде нормального белого шума с отношением сигнал/шум $q = 2$ (*в*); $q = 1$ (*г*) и $q = 0.5$ (*д*). Параметры фильтра: центральная частота – 10 ч^{-1} , полоса – 2 ч^{-1}

и полосно-пропускающая фильтрация в данном случае не являются альтернативными методами обработки, а дополняют друг друга. Можно говорить о системном подходе к решению задачи. Рассмотрим это подробнее.

3.2. Полосовая фильтрация сигнала

При обработке сигнала будем использовать цифровые базисные фильтры Баттеруорта [20]. Если априори известна частота заполнения искомого волнового пакета, то для его обнаружения можно использовать прямую полосно-пропускающую фильтрацию.

Пусть, например, частота заполнения искомого цуга равна 10 ч^{-1} . На рис. 1, б приведены модельные вариации ДСЧ после полосно-пропускающей фильтрации 6-полюсным синусным фильтром Баттеруорта. Параметры фильтра следующие: центральная частота равна 10 ч^{-1} , ширина полосы – 2 ч^{-1} . На рисунке четко виден цуг с началом в момент времени $t \approx 300$ мин, что соответствует цугу с частотой заполнения, равной 10 ч^{-1} и амплитудой около 20 мГц. Кроме того, при $t \approx 0$ появляется шум с амплитудой около 4 мГц. При этом отношение сигнал/шум q (по мощности) составляет около 25, что свидетельствует об уверенном выделении искомого колебания.

3.3. Спектральный анализ сигнала

Если отсутствуют априорные сведения о спектре сигнала, то предварительно проведем удаление низкочастотного тренда вариаций ДСЧ в исследуемой полосе частот. Для этого пропустим $f_d(t)$ через высокочастотный фильтр и выделим диапазон частот, соответствующий акустическим волнам с частотой $F > 6 \text{ ч}^{-1}$ (период $T < 10$ мин). Положим частоту отсечки фильтра равной 6 ч^{-1} . Полученные вариации ДСЧ подвергнем спектральному анализу. Интервалы анализа динамических спектров без перекрытия равны 30 мин.

На рис. 2, а приведены нормированные на максимальное значение S_{\max} динамические спектры мощности S вариаций ДСЧ. На рис. 2, б приведена зависимость максимумов амплитудных ДС вариаций ДСЧ от времени.

В динамическом спектре с помером $N_s = 3$ появляется максимум на частоте 6 ч^{-1} ($T = 10$ мин). Этот максимум наблюдается и на двух последую-

щих спектрах. В спектре с $N_s = 8$ обнаруживается максимум на частоте 4 ч^{-1} ($T = 15$ мин). Максимум на этой частоте наблюдается и на следующем спектре. В спектре с $N_s = 10$ появляется максимум на частоте 10 ч^{-1} ($T = 6$ мин). Сравнивая динамические спектры с параметрами цугов, можно сделать вывод, что в рассматриваемом диапазоне волн путем комбинирования процессов фильтрации и спектрального анализа обнаружены все смоделированные волновые пакеты.

3.4. Влияние случайных вариаций ДСЧ

Экспериментально полученные временные вариации ДСЧ представляют собой наложение квазипериодических и случайных вариаций ДСЧ. Возможность выделения первых и оценки их параметров зависит от отношения сигнал/шум q . При $q \gg 1$ случайные вариации (шумы), естественно, слабо влияют на эффективность обнаружения и оценку параметров ВВ. Наибольший интерес представляет ситуация когда $q \leq 1$. Для оценки влияния шумов ДСЧ мы провели модельные исследования.

На рис. 1, в–д приведены вариации ДСЧ на фоне аддитивной помехи в виде нормального белого шума со следующими параметрами: среднее значение равно 0 Гц и стандартное отклонение $\sigma = 0.01, 2^{1/2} \cdot 10^{-2}, 0.02$ Гц (панели в, г и д соответственно). При этом отношение сигнал/шум $q = A^2/2\sigma^2$, где A – амплитуда гармонического сигнала, имеет значения 2, 1, 0.5 соответственно.

Из рис. 1, в–д видно, что даже при наличии шумов полезное колебание выделяется достаточно уверенно, если $q \geq 0.5$.

4. Результаты наблюдений

4.1. Акустические волны в атмосфере

На рис. 3, а, б показано распределение сигнала с частотой 4.2 МГц по каналам во время наблюдений 23 и 24 марта 2010 г. Верхняя дорожка соответствует первому каналу (действующие высоты 75 ÷ 150 км), следующая – второму и т. д.

На рис. 4, а, б приведены вариации ДСЧ и амплитуды (пунктир) основной моды сигнала с частотой 4.2 МГц, принятого с действующих высот 300 ÷ 375 км (истинные высоты около 200 ÷ 240 км), в период времени, включающий

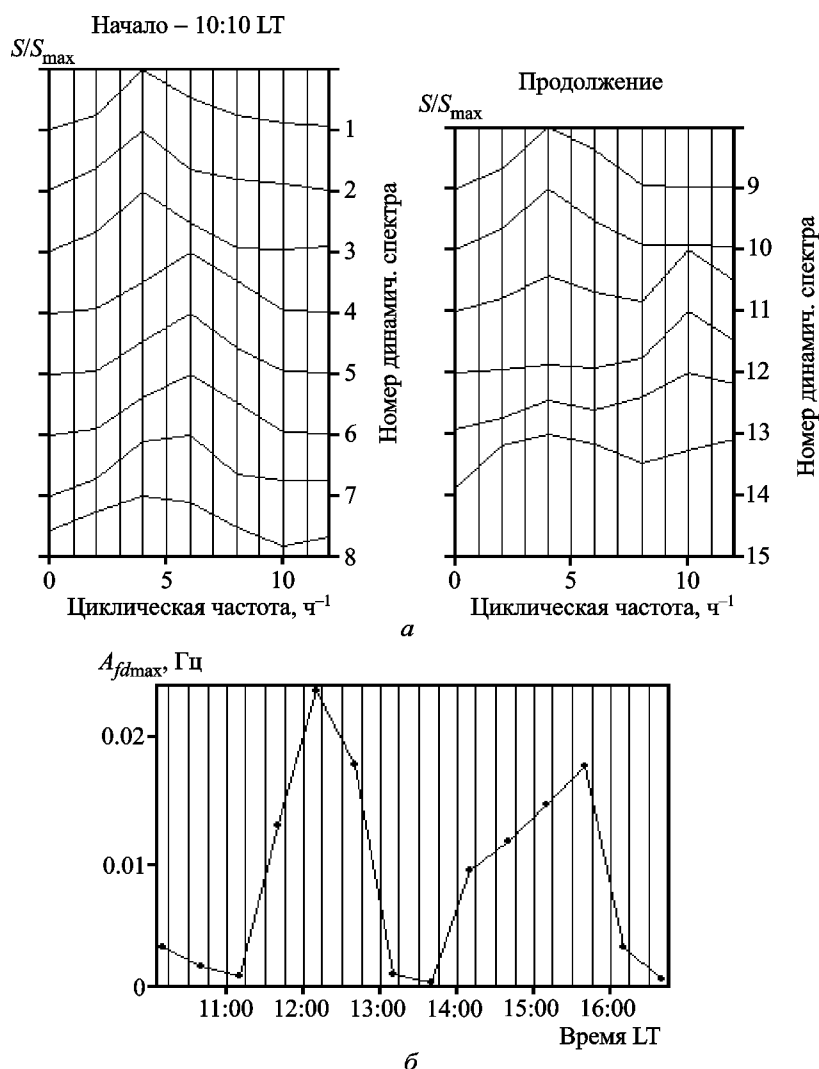


Рис. 2. Нормированные динамические спектры модельных вариаций ДСЧ (а) и вариации их амплитуд (б). Интервал анализа спектров – 30 мин, без перекрытия. LT – местное время, $A_{fd_{max}}$ – амплитуда основной спектральной составляющей

прохождение солнечного утреннего терминатора 23 и 24 марта 2010 г. Интервал оценки доплеровского спектра биений равен 60 с.

На рис. 5, а приведены нормированные динамические спектры для 23 марта 2010 г, полученные по методике, изложенной выше. Предварительная полосно-пропускающая фильтрация проведена в полосе $6 \div 12 \text{ ч}^{-1}$. Отфильтрованный временной ряд подвергся спектральному анализу с предварительным удалением остаточного низкочастотного тренда. Интервалы анализа без перекрытия равны 30 мин. На рис. 5, б показаны максимумы соответствующих спектров. Анализ спектров будем проводить в зависимости от их максимального значения. Начиная с 15-го спектра (по времени с 7:00 LT, LT – местное вре-

мя), в спектрах появляются гармоники с частотами 8 и 10 ч^{-1} , что соответствует периодам 7.5 и 6 мин. Колебания с такими периодами могут быть вызваны прохождением в атмосфере акустических волн. Источником их генерации может быть солнечный терминатор. Восход Солнца в этот день имел место примерно в 05:30, 04:30, 04:10 и 03:40 LT на высотах 0, 100, 200 и 300 км соответственно.

Из рис. 5, а и б следует, что в спектре с $N_s = 15$ должен наблюдаться пик с частотой заполнения, равной 10 ч^{-1} , и амплитудой около 33 мГц. Пропустим отфильтрованный временной ряд через полосно-пропускающий фильтр с центральной частотой 10 ч^{-1} и полосой 2 ч^{-1} . На рис. 6 приведены полученные вариации ДСЧ.

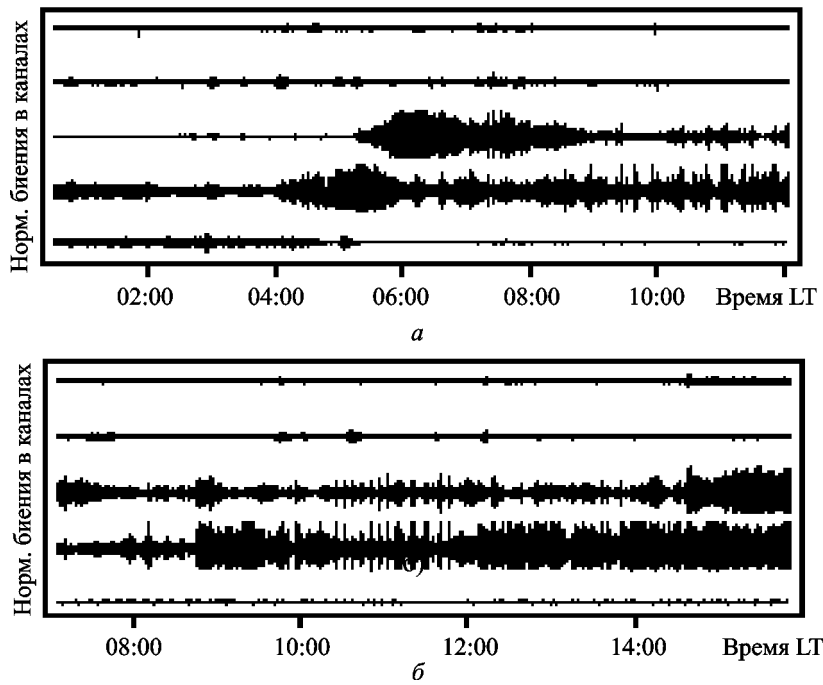


Рис. 3. Распределение сигнала высокочастотного зондирования по каналам: а – 23 марта 2010 г., б – 24 марта 2010 г. Верхняя дорожка соответствует первому каналу (действующие высоты $75 \div 150$ км), частота зондирования – 4.2 МГц

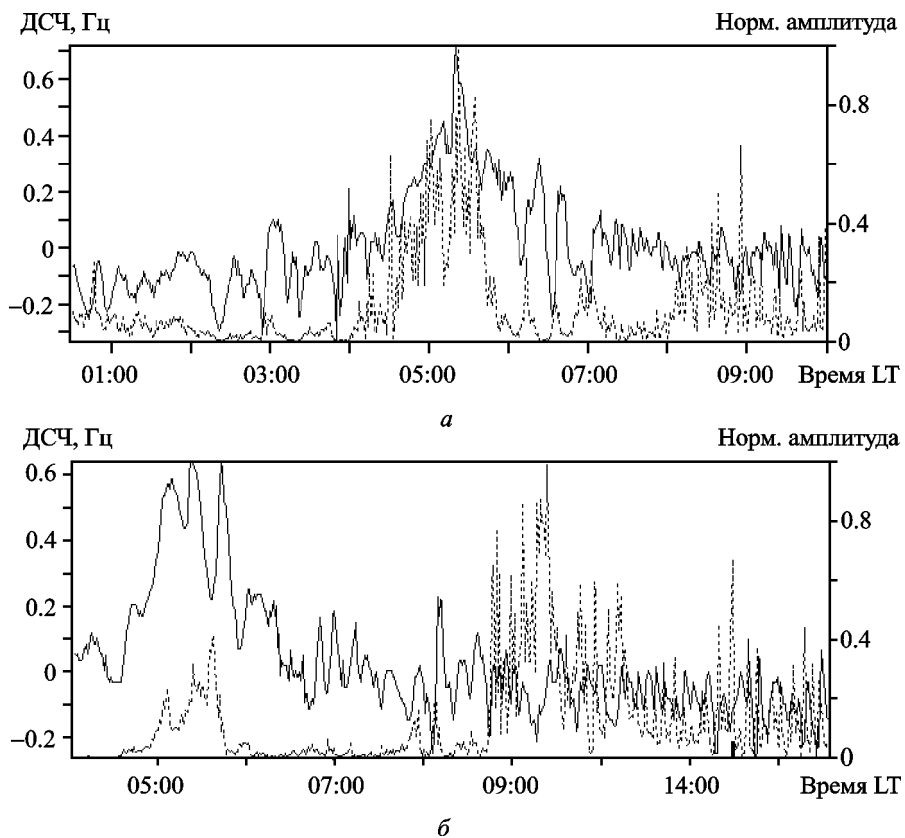


Рис. 4. Вариации ДСЧ и амплитуды (пунктир) основной моды (4-й канал) высокочастотного сигнала: а – 23 марта 2010 г., б – 24 марта 2010 г. Частота зондирования – 4.2 МГц

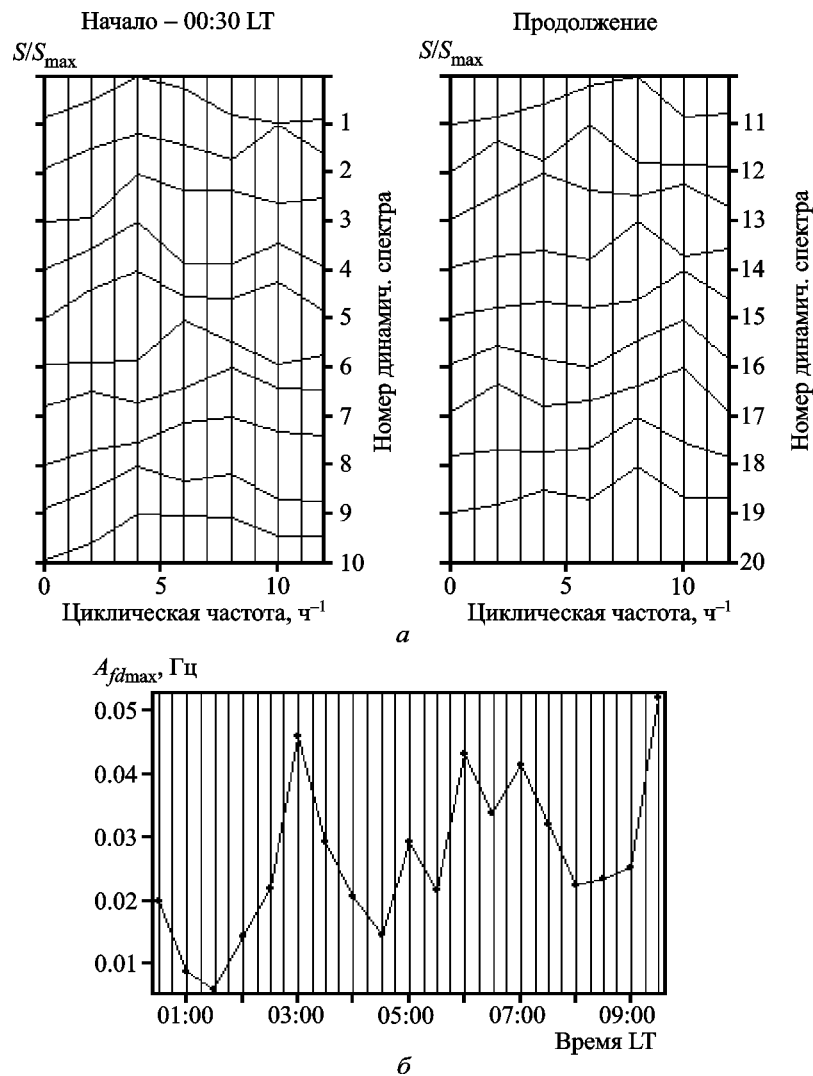


Рис. 5. Нормированные динамические спектры вариаций ДСЧ (а) и вариации их амплитуд (б) для 23 марта 2010 г. Интервал анализа спектров – 30 мин, без перекрытия

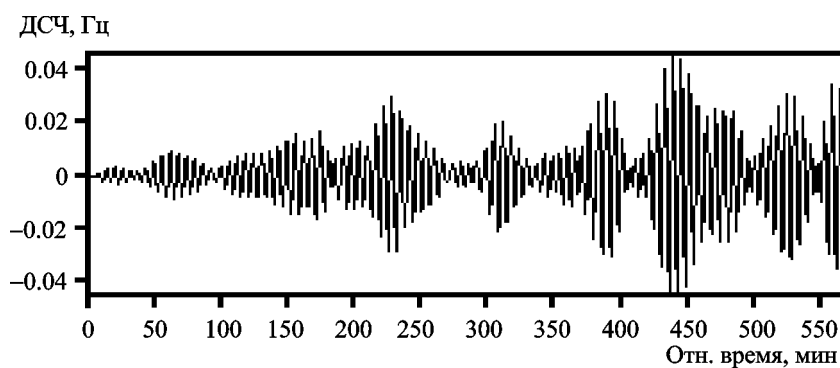


Рис. 6. Вариации ДСЧ после полосно-пропускающей фильтрации (параметры фильтра: центральная частота – 10 ч^{-1} , полоса – 2 ч^{-1}) для 23 марта 2010 г.

Из рис. 6 видно, что в данной полосе наблюдается максимум ДСЧ с амплитудой около 40 мГц при $t \approx 440$ мин. Полученные оценки показы-

вают удовлетворительное соответствие результатов применения спектрального анализа и полосно-пропускающей фильтрации.

4.2. ВГВ в атмосфере

Методику, изложенную в разделе 3, будем использовать для обнаружения низкочастотных атмосферных волн, называемых ВГВ, с периодами более 10 мин. Для устранения высокочастотного шума вначале применим низкочастотный фильтр к исходному временному ряду. Частота отсечки фильтра равна 6 ч^{-1} . Далее подвергнем временной ряд спектральному анализу. Интервал анализа равен 60 мин, сдвигка динамических спектров – 30 мин. Удалим остаточный полиномиальный тренд 2-й степени. На рис. 7, а и б приведены нормированные динамические спектры и соответствующие им максимумы для 23 марта 2010 г. Максимальное значение динамического спектра, равное 0.2 Гц , наблюдается

в 6:00 LT и соответствует колебаниям с периодом в 20 мин.

На рис. 8, а приведены вариации ДСЧ, пропущенные через полосно-пропускающий фильтр, параметры которого следующие: центральная частота равна 3 ч^{-1} , полоса – 1 ч^{-1} .

Аналогичные данные, связанные с прохождением утреннего терминатора, получены для 24 марта 2010 г. На рис. 3, б показано распределение сигнала по каналам. На рис. 4, б приведены вариации ДСЧ и амплитуды главного максимума динамических спектров биений. На рис. 8, б показаны вариации ДСЧ, пропущенные через полосовой фильтр с приведенными выше параметрами. Полученные данные подтверждают появление ВГВ с периодом 20 мин во время прохождения терминатора.

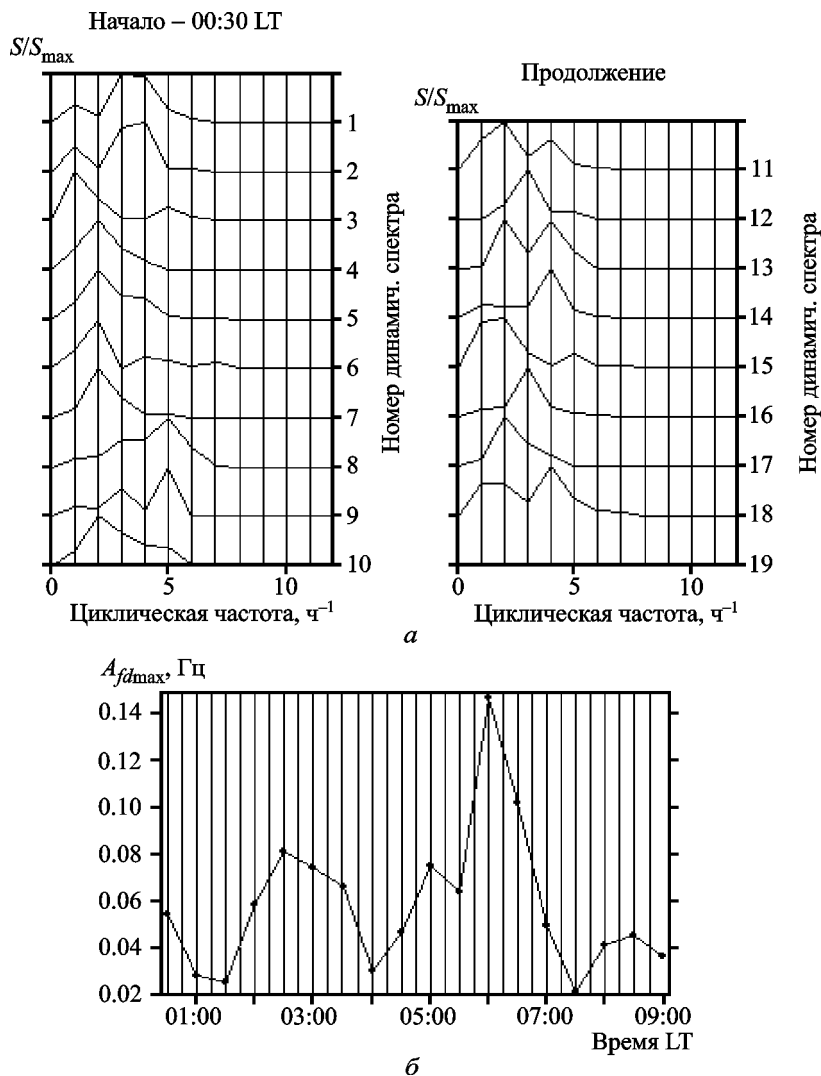


Рис. 7. Нормированные динамические спектры вариаций ДСЧ (а) и вариации их амплитуд (б) для 23 марта 2010 г. Интервал анализа спектров – 60 мин, с перекрытием 30 мин

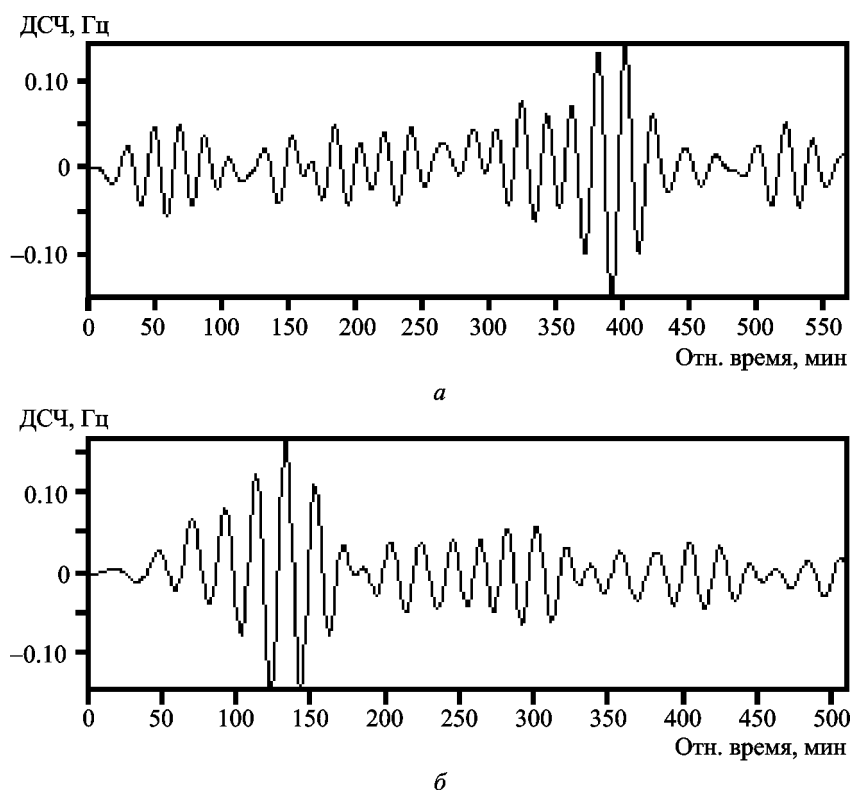


Рис. 8. Вариации ДСЧ после полосно-пропускающей фильтрации (параметры фильтра: центральная частота – 3 ч^{-1} , полосу – 1 ч^{-1}) а – 23 марта 2010 г., б – 24 марта 2010 г.

5. Обсуждение

Для оценки эффективности фильтрации используется модель вариаций ДСЧ в виде суперпозиции квазигармонических цугов с различными периодами, амплитудами, временами появления и длительностями. Зависимость амплитуды и длительности от периода берется из экспериментальных данных. На рис. 1, а приведены исходные вариации ДСЧ. В предположении, что частота заполнения искомого цуга в диапазоне акустических волн на высотах ионосферы ($6 \div 12 \text{ ч}^{-1}$) известна априори и равна 10 ч^{-1} , проводится полосно-пропускающая фильтрация. На рис. 1, б приведены вариации ДСЧ после фильтрации. Шумы при $t = 0 \div 30$ с связаны с краевым эффектом и конечностью времени установления фильтра. Из рис. 1, б определяется время появления, длительность и амплитуда искомого цуга. Амплитуда цуга находится из оценки спектральной плотности S мощности по формуле

$$A = \frac{2}{M} \sqrt{S},$$

где M – число независимых отсчетов.

Полученные результаты соответствуют модельным данным. Рис. 1, в–д демонстрируют влияние аддитивного белого шума (случайных вариаций ДСЧ) на обнаружение искомого цуга. Из рисунков следует, что при отношении сигнал/шум (по мощности) $q > 0.5$ цуг обнаруживается с помощью полосно-пропускающей фильтрации.

При отсутствии априорных сведений о спектре вариаций ДСЧ предварительно проводится спектральный анализ в исследуемом диапазоне частот, например для акустических волн. Интервал анализа спектра для этого диапазона выбирается равным 30 мин. Низкочастотный тренд удаляется. Спектральный анализ модельных вариаций ДСЧ позволил обнаружить все цуги в заданном диапазоне.

Заметим, что при наличии широкополосных помех (резких скачков ДСЧ) полосно-пропускающая фильтрация может приводить к заблуждениям при поиске гармоник с заданным периодом. Для исключения таких ситуаций производилась полосно-пропускающая фильтрация в соседних спектральных окнах. При широкополосной помехе амплитуды сигнала в соседних спектральных окнах оказываются

соизмеримыми. Это и служит критерием отбраковки искомого волнового цуга.

Соответствие результатов модельных расчетов и эксперимента проверено в ходе измерений вариаций ДСЧ сигнала доплеровского высокочастотного радара во время прохождения солнечного терминатора. Описанная методика позволяет найти период и амплитуду квазипериодического процесса в ионосфере.

Оценим относительную амплитуду возмущений концентрации электронов δ_N в поле АГВ. Для этого воспользуемся соотношением из работы [16]:

$$\delta_N = \frac{cT}{4\pi L} \frac{f_{da}}{f},$$

где c – скорость света в вакууме, T – период АГВ, f_{da} – амплитуда ДСЧ на частоте f , L – характерный высотный масштаб изменения δ_N .

При $T = 6$ мин, $f_{da} = 30 \div 40$ мГц, $f = 4.2$ МГц и $L = 50$ км имеем $\delta_N \approx 0.14 \div 0.18$ %.

Для ВГВ с $T = 20$ мин амплитуда ДСЧ $f_{da} = 0.15$ Гц. Тогда $\delta_N \approx 2$ %. Видно, что значение δ_N для ВГВ на порядок больше, чем для акустической (инфразвуковой) волны. Такие периоды и относительные амплитуды возмущений концентрации электронов соответствуют результатам других исследований (см., например, [10–13]).

6. Выводы

1. Продемонстрировано, что совместное применение спектрального анализа и полосно-пропускающей фильтрации является эффективным инструментом для выявления достаточно слабых ВВ в ионосфере, вызванных распространением акустико-гравитационных волн.

2. Методика позволяет выявить ВВ, которым соответствует амплитуда ДСЧ не менее ~ 10 мГц, а амплитуда $\delta_N \geq 0.1$ %.

3. Показано, что движение солнечного терминатора сопровождается колебаниями, которые соответствуют как акустическим волнам (период $6 \div 7$ мин), так и ВГВ (период около 20 мин).

4. Относительная амплитуда колебаний концентрации электронов в поле акустической волны и ВГВ была около 0.2 и 2 % соответственно.

Авторы благодарны рецензенту и заместителю главного редактора журнала академику НАН Украины А. А. Коноваленко за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yen K. S. and Liu C. H. Theory of ionospheric waves. – N.Y., London: Academic Press, 1972. – 464 p.
2. Beer T. Atmospheric waves. – N. Y., Toronto, 1974. – 315 p.
3. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
4. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. – М.: Энергоиздат, 1982. – 136 с.
5. Chimonas G. Observations of Waves in the Ionosphere // Planet Space Sci. – 1970. – Vol. 18, No. 4. – P. 591–605.
6. Yen K. C. and Liu C. H. Acoustic gravity waves in the upper atmosphere // Rev. Geophys. Space Phys. – 1974. – Vol. 12. – P. 193–216.
7. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review // J. Atmos. Terr. Phys. – 1975. – Vol. 37, No. 6-7. – P. 1011–1054.
8. Пономарев Е. А., Ерущенков А. И. Инфразвуковые волны в атмосфере Земли (Обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. – 1977. – Т. 20, № 12. – С. 1773–1789.
9. Williams P. J. S. Tides, atmospheric gravity waves and travelling disturbances in the ionosphere. In: Modern ionospheric science. A collection of articles published on the occasion of the anniversary: “50 years of ionospheric research in Lindau”. – Katlenburg – Lindau: EGS, 1996. – P. 136–180.
10. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, № 1. – С. 3–25.
11. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 4–35.
12. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия. – 2006. – Т. 46, № 2. – С. 193–208.
13. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование // Геомагнетизм и аэрномия. – 2006. – Т. 46, № 2. – С. 209–218.
14. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Гровс К., Молдвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, № 2. – С. 130–151.
15. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрномия. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681–702.
16. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. – 386 с.
17. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. – 576 с.

18. Галушко В. Г., Кащеев А. С. Импульсное частотно-угловое зондирование перемещающихся ионосферных возмущений // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, № 2. – С. 160–171.
19. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. – М.: Наука, 1974. – 256 с.
20. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. – М.: Мир, 1982. – 428 с.

В. Ф. Пушин, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ВИЯВЛЕННЯ КВАЗІПЕРІОДИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ІОНОСФЕРІ У ДІАПАЗОНІ АКУСТИЧНО-ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ

Описано методику виділення квазіперіодичних коливань (цугів хвиль) з часових рядів значень доплерівського зсуву частоти радіосигналів доплерівського високочастотного радара вертикального зондування. Для виділення коливань із суміші сигналу та шуму використовувалась смуго-пропускаюча фільтрація разом зі спектральним аналізом. Показано ефективність виділення коливань, що відповідають як акустичним, так і внутрішнім гравітаційним хвилям. Методика застосована для виділення коливань, генерованих

ранковим сонячним термінатором. Продемонстровано, що рух термінатора супроводжувався коливаннями з періодами $6 \div 7$ і 20 хв та відносними амплітудами збурень концентрації електронів близько 0.2 та 2% відповідно.

V. F. Pushin and L. F. Chernogor

V. Kazarin National University of Kharkiv,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

DETECTING OF QUASI-PERIODIC OSCILLATIONS IN THE IONOSPHERE WITHIN THE ACOUSTIC-GRAVITY WAVES RANGE

A technique for estimating parameters of quasi-periodic oscillations (wave trains) in time series of Doppler shifts acquired by HF Doppler radar at vertical incidence is presented. The oscillations were extracted from the mixed signal and background noise by employing a bandpass filter together with spectral analysis. The efficiency of extracting oscillations has been shown for both acoustic and internal gravity waves. The technique has been used for extracting oscillations generated by the dawn terminator. The terminator has been demonstrated to be associated with oscillations of electron density with $6 \div 7$ and 20 -min periods and amplitudes of 0.2 and 2% , respectively.

Статья поступила в редакцию 21.06.2012