

УДК 551.465:551.466

## АНОМАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИНЕРЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОКЕАНСКИХ ВОД НА ГАВАЙСКОМ ШЕЛЬФЕ

© 2013 г. Академик В. Г. Бондур, К. Д. Сабинин, Ю. В. Гребенюк

Поступило 12.12.2012 г.

DOI: 10.7868/S0869565213130173

### ВВЕДЕНИЕ

Инерционные колебания, играющие важную роль в переносе энергии и перемешивании морских вод, представляют собой круговое вращение воды “по Солнцу” с периодом, который меняется с широтой  $\varphi$  как  $12/\sin\varphi$ , ч. Вблизи крутых склонов и под влиянием сильных и неоднородных в пространстве течений как форма, так и период этих колебаний могут испытывать значительные изменения. Все это очень ярко проявляется в заливе Мамала (о. Оаху, Гавайи), где крутой шельф переходит в почти отвесный материковый склон и наблюдаются сильные изменчивые течения. В этом районе в течение ряда лет проводились комплексные исследования антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий [1–6]. Данные, полученные при этом с помощью донных акустических доплеровских профилометров течений ADP [7] для разных лет, сильно различающихся по ветровым условиям и плотностной стратификации вод, были использованы нами для анализа особенностей и изменчивости инерционных колебаний в этом регионе. Используемые в этих экспериментах ADP были установлены вдоль края шельфа на глубине около 80 м в трех различных точках, отстоящих одна от другой приблизительно на 3 км [1–7]. Зональную ( $U$ ), меридиональную ( $V$ ) и вертикальную ( $W$ ) компоненты скоростей течений измеряли в августе–сентябре (на протяжении 512 ч в 2003 г. и 385 ч в 2004 г.) ежеминутно на горизонтах от 4 до 76 м через каждые 2 м. В 2003 г. в верхнем 12-метровом слое наблюдался сильный (до 1 м/с) перенос на запад, вызванный прошедшим вблизи тайфуном, тогда как в 2004 г. заметный, но гораздо более слабый поток юго-западного направления не проник глубже 4 м [1, 2]. Положение и форма слоя скачка плотности сильно менялись под воздействием внутренних приливов. Во время измере-

ний 2003 г. пикноклин в среднем начинался у дна, тогда как в 2004 г. его ядро с максимумом частоты плавучести около 15 цикл/ч было значительно выше – на 50 м [2, 4, 6].

### ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

При спектральном анализе полученных экспериментальных данных применение обычно используемого осреднения периодограмм по частотам не имело смысла, поскольку планетарная инерционная частота в исследуемом районе, равная 0.03 цикл/ч, ниже хорошо выраженных здесь суточных внутренних приливов всего на 0.01 цикл/ч. Поэтому для увеличения достоверности спектральных оценок мы усредняли периодограммы по компонентам скорости в двух точках измерений, отстоящих одна от другой приблизительно на 3 км [1–7]. Были проанализированы изменения с глубиной вычисленных по этим оценкам спектров среднеквадратических амплитуд течений (см. рис. 1), а также их средние значения и отношения спектров правого и левого вращений вектора течений в верхнем 10-метровом слое, где наблюдались наиболее интенсивные колебания, как это обычно бывает при ветровой генерации инерционных волн [8].

Даже при рассмотрении спектров на временных интервалах по 512 ч, позволяющих различать инерционные и суточные колебания, последние проявляются гораздо сильнее инерционных (рис. 1). Только преобладание правого над левым вращением течений вблизи инерционной частоты позволяет рассматривать инерционные колебания отдельно от суточных. В связи с этим для дальнейшего анализа экспериментальные данные были обработаны с помощью полосового фильтра Баттерворда 3-го порядка, подавляющего более чем в 2 раза колебания на частотах ниже 0.025 и выше 0.035 цикл/ч и пропускающего без искажений колебания с частотой вблизи локального инерционного периода 0.03 цикл/ч [1, 2].

Представление об изменчивости интенсивности инерционных колебаний могут дать изменения среднеквадратической амплитуды враща-

Научно-исследовательский институт  
аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”,  
Москва

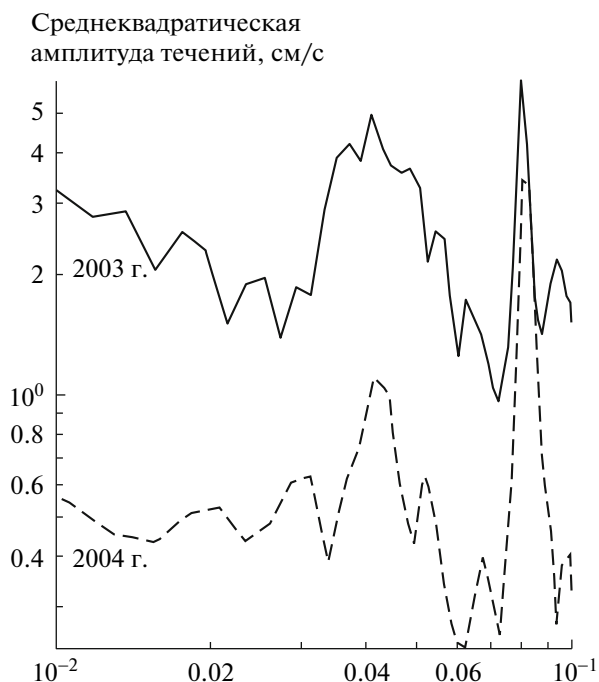


Рис. 1. Средние спектры среднеквадратических амплитуд в верхнем слое океана в 2003 и 2004 гг.

тельной составляющей полей течений в инерционном диапазоне частот, поскольку именно вращательное движение характерно для инерционных волн [9].

Для расчета среднеквадратической амплитуды использовалась дисперсия вращательной состав-

ляющей в полосе спектрального анализа, шириной  $\frac{1}{2n}$ , которая равна  $D_{rot} = \frac{|D|}{2n}$ , где  $D$  – спектральный вращательный инвариант [10], а  $n$  – длина анализируемого ряда.

Отсюда амплитуда, учитывающая знак вращения ( $sign D$ ), равна  $A_{rot} = \sqrt{D_{rot}} \cdot sign D$ . Рассчитав текущий спектр амплитуды и отношения осей эллипса инерционных волн для всех горизонтов измерений по 64-часовым отрезкам со сдвигом в 1 ч, мы получили 34000 оценок параметров эллипсов в 2003 г. и 26418 оценок в 2004 г. При этом было выявлено сильное ослабление инерционных течений в 2004 г. и неожиданно большая распространенность левостороннего (циклонического) вращения, что довольно необычно для инерционных колебаний. Самые интенсивные антициклонические течения были сосредоточены в верхнем слое в 2003 г. и несколько глубже в 2004 г.

Хорошее представление о повторяемости и интенсивности эллипсов с разным направлением вращения течений и резким эксцентриситетом дают двумерные гистограммы, характеризующие число случаев в плоскости “отношение осей/вращательная амплитуда”. Такие гистограммы были рассчитаны для всех полученных данных. На рис. 2 в качестве примера представлена двумерная гистограмма для данных, полученных в 2003 г. Видно, что эллипсы антициклонического вращения преобладают, хотя и незначительно, и чем они сильнее, тем полнее. Эта тенденция ускоряется к

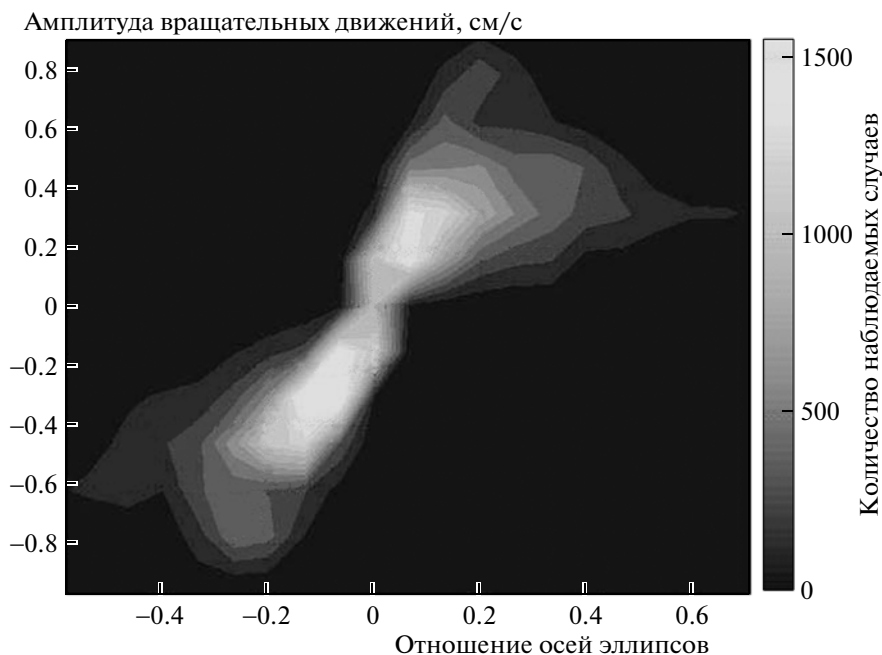
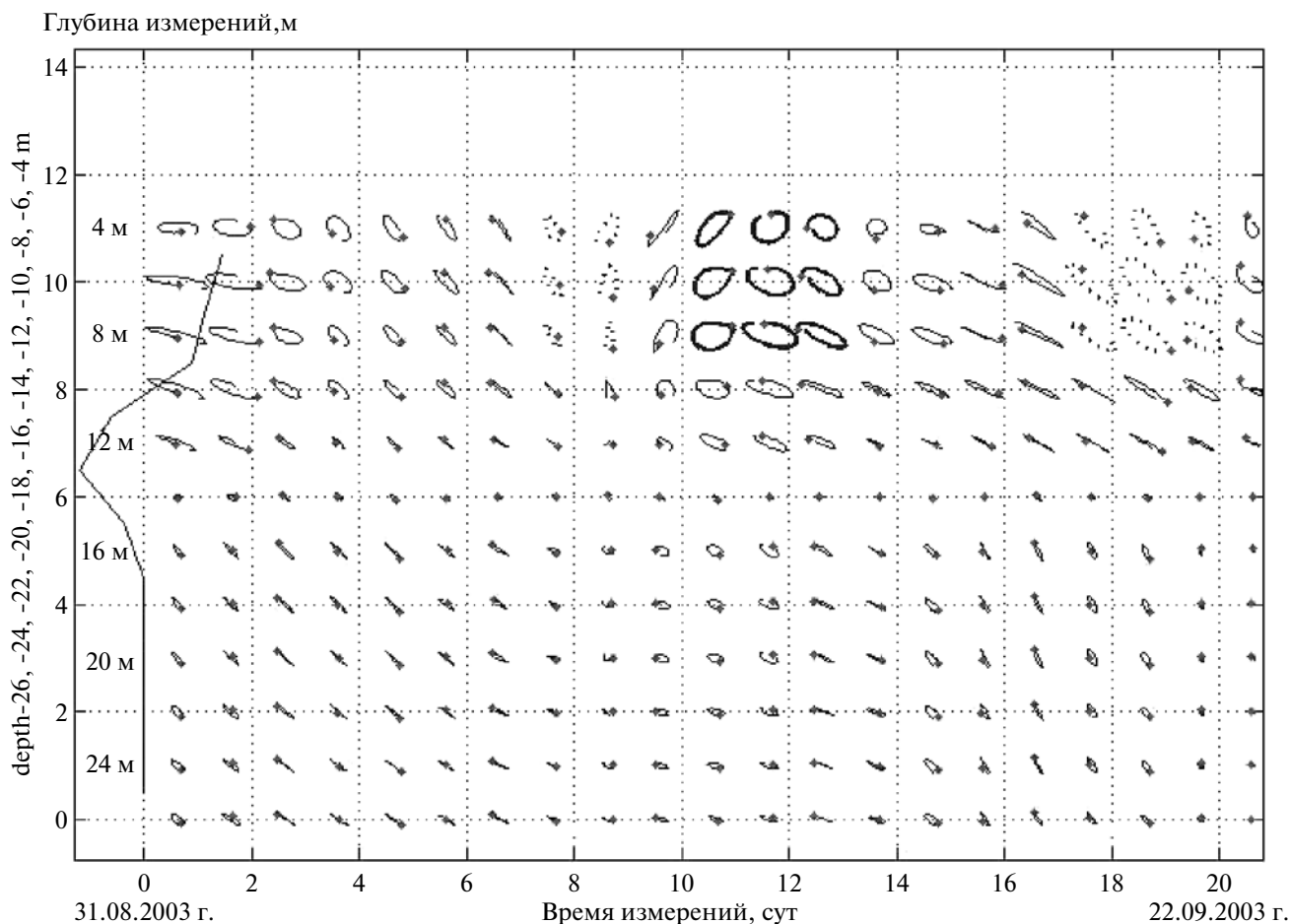


Рис. 2. Двумерная гистограмма инерционных колебаний (число случаев в плоскости “отношение осей/вращательная амплитуда”).



**Рис. 3.** Ежесуточные 30-часовые годографы инерционных течений (в условном масштабе) в 2003 г. в плоскости: время (сут) – глубина (м). Точками обозначены начальные положения вектора скорости. На графике слева тонкой линией показан средний профиль конвергенции горизонтальных течений (в единицах 50/с).

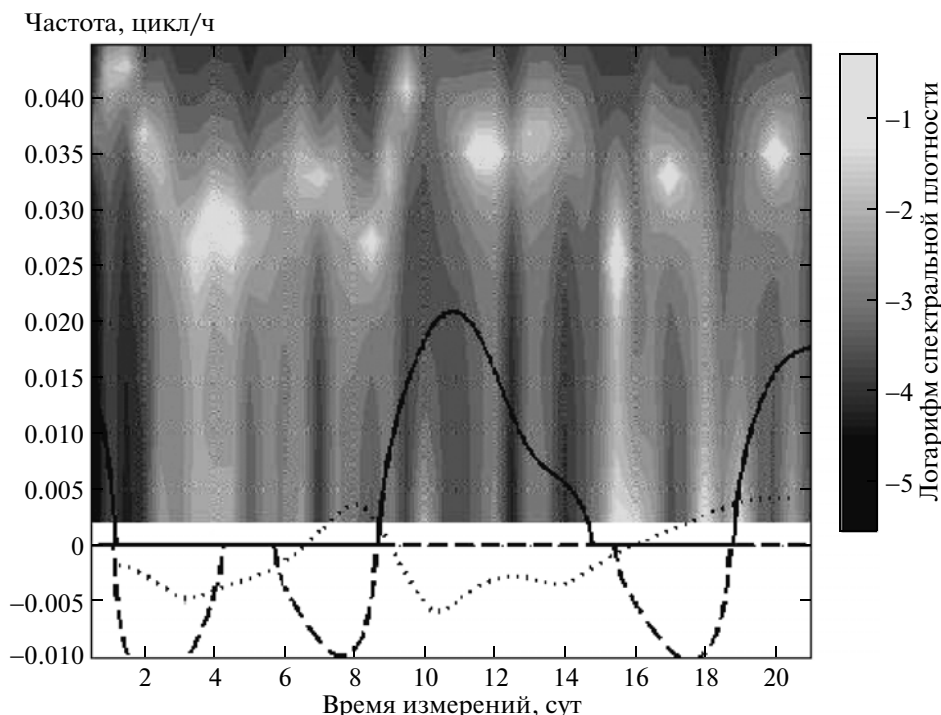
амплитуде 0.6 см/с, где встречаются достаточно полные эллипсы (до половины из 128 случаев). Но наиболее распространены сплюснутые эллипсы слабой (0.2–0.3 см/с) вращательной амплитуды. В пике повторяемости (5% оценок) среднеквадратическая амплитуда равна 0.3 см/с, отношение осей равно  $-0.13$ . В пике повторяемости циклонических эллипсов (4% оценок) среднеквадратическая амплитуда равна 0.16 см/с, отношение осей равно  $+0.07$ .

Гистограмма, построенная по данным, полученным в 2004 г., отличается существенно меньшими амплитудами и практически одинаковой повторяемостью циклонического и антициклонического вращений.

Наглядное представление об изменении эллипсов во времени и по глубине дают годографы скоростей инерционных течений, пример которых для данных, полученных в 2003 г., приведен на рис. 3. Годографы (условимся называть их орбитами) имеют вид эллипсов различной амплитуды, характеризующихся знаком вращения, эксцен-

триситетом и ориентацией. Из рис. 3 видно, что в начале периода измерений течения в рассматриваемом диапазоне частот слабые и только к 9-мудню в верхнем слое они усиливаются, формируя “пухлые” и большие антициклонические орбиты, наиболее значительные из которых выделены на рисунке жирными линиями.

В конце периода измерений вращение становится циклоническим (наибольшие орбиты выделены пунктиром), причем орбиты течений не замкнуты, что указывает на более чем 30-часовой период соответствующих колебаний. На той же станции в 2004 г. орбиты инерционных течений были значительно слабее (в 4–5 раз) и менее устойчивыми, часто становясь очень узкими. Общая картина изменчивости орбит в 2003 г. на двух станциях, разнесенных примерно на 3 км, близка, за исключением отсутствия заметных инерционных течений в начале измерений. Заслуживает внимания сильное ослабление колебаний в слое вокруг горизонта 14 м, где наблюдается расхождение фоновых горизонтальных течений. Учитывая



**Рис. 4.** Логарифм текущего спектра инерционных колебаний зональной скорости  $U$  на горизонте 8 м в 2003 г. (градации уровня серого). Спектральные оценки вычислены по суткам со сдвигом на половину высокоразрешающим методом MUSIC [12]. Показана эффективная инерционная частота  $F_{ef}$  (жирная сплошная линия) и ее мнимые значения (жирная штриховая линия). Учитывающее знак вращения отношение малой и большой осей инерционных эллипсов показано пунктиром (отношение осей уменьшено в 100 раз).

то, что конвергенцию горизонтальных течений ( $Conv$ ) можно оценить по вертикальному градиенту вертикальной скорости ( $Conv = -U_x - V_y = W_z$ , где  $U_x, V_y, W_z$  – частные производные компонент скорости по осям  $x, y$  и  $z$ ), был рассчитан профиль среднего значения конвергенции, показанный на рис. 3 в единицах  $1/c$ , умноженных на 50 (для согласования с масштабом рисунка). Профиль обнаруживает большие отрицательные значения (расхождения течений) в слое 9–15 м, т.е. на тех глубинах, где поглощаются инерционные колебания.

В 2004 г. орбиты, хотя и в несколько раз более слабые, чем в 2003 г., отличались устойчивой ориентацией, вытягиваясь вдоль изобат. Особенным постоянством отличались орбиты в середине периода наблюдений, охватывая всю верхнюю половину водного слоя. Почти везде, за исключением начального периода измерений, течения вращались по часовой стрелке.

До сих пор инерционно-гравитационные волны рассматривались в узком частотном диапазоне вокруг планетарной инерционной частоты на широте региона ( $0.03 \pm 0.005$  цикл/ч). Учитывая неизбежность сильного влияния доплеровских искажений и завихренности поля фоновых течений, мы сочли целесообразным несколько расширить полосу анализа, применив фильтр Бат-

терворда для полосы частот от 0.025 до 0.04 цикл/ч, в которой, по нашим оценкам, преобладало правое вращение (по Солнцу), свойственное инерционным волнам. Учет влияния завихренности на частоту инерционных колебаний может быть сделан путем оценивания эффективной инерционной частоты  $F_{ef}$ , наиболее полное выражение которой приведено в [11]:

$$F_{ef} = (f^2 + fV_{ort} - V_xU_y + U_xV_y)^{0.5}, \quad (1)$$

где  $f$  – круговая планетарная частота (в нашем случае  $f = 6.28 \cdot 0.03$  рад/ч);  $V_{ort} = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}$  – завихренность;  $\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial V}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial V}{\partial x}$  – производные компонент фоновых течений  $U$  и  $V$  по осям координат  $Ox$  и  $Oy$ .

Измерения, проведенные в 2004 г. на станциях, находящихся на одной параллели, позволяют вычислить производные  $\frac{\partial U}{\partial x}$  и  $\frac{\partial V}{\partial x}$ . Однако оценка производных вдоль меридиональной оси может быть сделана только при некоторых предположениях об изменении поля течений в этом направлении. Предположив линейность убывания фоновых компонент скоростей  $U$  и  $V$  к берегу, мы обнаружили сильную временную изменчивость эффективной

частоты колебаний в пределах от 0.021 цикл/ч до мнимых значений 0.013 цикл/ч (рис. 4).

Такие сильные вариации эффективной частоты инерционных колебаний обусловлены резкой пространственно-временной изменчивостью фоновых течений, приводящей временами к понижению  $F_{ef}$  до мнимых величин, которые можно воспринимать как отрицательные значения эффективной частоты с соответствующим изменением знака вращения. Резкое падение оценок  $F_{ef}$  имело место в период 1–4, 6–9 и 15–19 дней измерений. В середине записи, когда инерционные орбиты были наиболее “правильными” (см. рис. 3 и кривую отношения осей эллипса на рис. 4),  $F_{ef}$  достигает максимальных величин, снижаясь к концу записи, когда появляются орбиты аномального вращения.

Несмотря на определенную условность полученных оценок эффективной частоты колебаний из-за принятых допущений они удовлетворительно отражают тенденции в изменении  $F_{ef}$ , о чем говорит очевидное, хотя и неполное соответствие изменений оценок  $F_{ef}F_{ef}$  и измеренной частоты пиков текущего спектра (рис. 4). Колеблясь вокруг среднего значения 0.03 цикл/ч, частота пиков испытывает значительные изменения, которые в общих чертах согласуются с изменениями эффективной частоты, но заметно превышает ее. При понижениях эффективной частоты возрастает спектральная плотность на низких частотах, что естественно трактовать как свидетельство соответствующего увеличения периода инерционных колебаний. Это следует и из хорошо заметной на рис. 3 незамкнутости 30-часовых орбит около 4-, 8- и 18-го дня измерений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного детального анализа колебаний полей течений на Гавайском шельфе выявлены значительные искажения формы скоростей течений, необычно частые случаи аномального вращения, связанные с сильными

понижениями эффективной инерционной частоты колебаний, а также резкое ослабление инерционных волн в слое расхождения фоновых горизонтальных течений. Такие аномальные явления в инерционных колебаниях океанских вод, по видимому, достаточно типичны и для других крутых шельфов, где господствуют сильные изменчивые течения.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0457.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
2. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. // Океанология. 2009. Т. 49. № 3. С. 325–336.
3. Bondur V. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas XXXI Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment ISRSE. Saint Petersburg, 2006. 7 p.
4. Bondur V.G / In: Waste Water – Evaluation and Management. Croatia: InTech, 2011. P. 155–180.
5. Bondur V., Tsidilina M. Features of Formation of Remote Sensing and Sea Truth Databases for the Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas. XXXI Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment. ISRSE. Saint Petersburg, 2006. P. 192–195.
6. Keeler R., Bondur V., Gibson C. // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L12610.
7. Keeler R., Bondur V., Vithanage D. // Sea Technol. 2004. P. 53–58.
8. Kundu P.K., Thompson R.E. // J. Phys. Oceanogr. 1985. V. 15. № 8. P. 1076–1084.
9. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. СПб.: ГИМИЗ, 1992. 272 с.
10. Рожков В.А. Методы вероятностного анализа океанологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 280 с.
11. Elipot S., Lumpkin R., Prieto G. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. C09010.
12. Stoica P., Moses R.L. Introduction to Spectral Analysis. Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall, 1997.