

УДК 551.46

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ПРИЛИВНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА СТАНЦИИ «АКАДЕМИК ВЕРНАДСКИЙ»

Л.М. Белокриницкая¹, С.И. Клок², Г.М. Крученицкий³

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

² Научно-производственное предприятие «Логикон»

³ Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Россия

Реферат. Проведен анализ систематических ежечасных наблюдений приливных колебаний Южного океана, выполненных на украинской антарктической станции «Академик Вернадский» на протяжении 1992–2006 годов. Исследованы результаты измерений уровня океана, обоснованы формы сезонной и суточной изменчивости этой величины, а также форма долговременных колебаний, существование которых предсказывает современная теория приливов. Подробно исследованы и физически обоснованы обнаруженные отличия в спектрах, предсказываемых теорией и наблюдаемых в эксперименте. Особое внимание уделено возмущениям, вносимым в приливные колебания неоднородностями скорости вращения Земли вокруг своей оси. Показано, что отличие предложенной регрессионной модели от данных эксперимента может быть объяснено откликом литосферы на эти неоднородности.

Дослідження спектру приливних коливань за даними вимірювань на станції «Академік Вернадський». Л.М. Білокриницька, С.І. Клок, Г.М. Крученицький

Реферат. Проведено аналіз систематичних щогодинних спостережень приливних коливань Південного океану, виконаних на українській антарктичній станції «Академік Вернадський» упродовж 1992–2006 років. Досліджено результати вимірювань рівня океану, обґрунтовано форми сезонної і добової мінливості цієї величини, а також форму довготривалих коливань, існування яких передбачає сучасна теорія приливів. Детально досліджені й фізично обґрунтовані виявлені в спектрах відмінності, що передбачаються теорією і спостережуваних в експерименті. Особлива увага приділена обуренням, що вносяться до приливних коливань неоднорідностями швидкості обертання Землі навколо своєї осі. Показано, що відмінності запропонованої регресійної моделі від даних експерименту можуть бути пояснені відгуком літосфери на ці неоднорідності.

Research of spectrum of vibrations of wavessoftware to information of measurings at the Akademik Vernadsky station. L.M.Belokrinitzkaya, S.V. Klok, G.M. Kruchenitskiy

Summary. The analysis of systematic hourly supervisions of vibrations of waves of the South ocean is conducted, conducted at the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky Station during 1992–2006. The results of measuring of ocean level are explored the form of seasonal and day's changeability of this size, and also form of long durations vibrations existence of which is predicted by the modern theory of waves, is grounded. In detail explored and the discovered differences are physically grounded in spectrums, predicted a theory and looked after in an experiment. The special attention is spared indignations, insertions in the vibrations of waves of heterogeneities speed of rotation of Earth about the axis. It is shown that differences of the offered regressive model of information of experiment it can be explained the response of litosphere on these to heterogeneities.

Теория океанских приливов восходит к работам И. Ньютона [1] и П.Лапласа [2], но по свидетельству авторитетных современных монографий [3, 4] ещё далека от окончательного завершения. В качестве причин, порождающих трудности построения законченной теории, указывают на сложность учёта реальных очертаний материков, сопоставимость времени оги-

бания приливной волной Земли с периодом её обращения вокруг своей оси, необходимость учёта нелинейных эффектов трения и взаимодействия с твёрдой Землей и пр. При таких обстоятельствах особое значение приобретает тщательный анализ имеющихся массивов экспериментальных данных, полученных как в открытом океане, так и на прибрежных станциях.

1. Постановка задачи и исходные данные

Как известно [5], наблюдения за приливами восходят еще к Аристотелю. Однако несмотря на то обстоятельство, что в настоящее время регулярные наблюдения за уровнем океана ведутся тысячами станций и многие десятки их накопили ряды наблюдений продолжительностью более 50 лет, а также на наличие работ, систематизирующих эти данные [6], монография [4] прямо указывает на недостаточность объёма экспериментальной информации. Эта недостаточность обусловлена тем, что данные очень неравномерно распределены по акватории Мирового океана и не отображают всего многообразия факторов, формирующих режим приливных колебаний.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы детально изучить данные измерений уровня на конкретной станции, проанализировать степень их соответствия существующим теоретическим воззрениям, а также оценить вклад в колебания уровня океана процессов, описание которых выходит за пределы теории приливов. В качестве конкретной станции была выбрана станция «Академик Вернадский», расположенная в Южном океане ($65^{\circ}15'S$, $64^{\circ}16'W$). Наблюдения на ней ведутся с помощью самописцев уровня, т.е. погрешность отсчёта составляет ~ 1 см [4]. Для анализа были привлечены данные ежечасных измерений, выполненных в период 1992–2006 гг. – за 15 лет, или 5479 дней. Количество пропусков в отсчётах по массиву данных в целом составляет 5,0% (пропущено 6607 отсчётов из $131496=5497*24$), а среди отсчётов, соответствующих конкретному времени суток, количество пропусков варьируется от 4,7% до 5,6%. Все отсчёты были представлены в виде матрицы V_{ij} где: i – индекс, соответствующий номеру дня и пробегающий значения от 1 до 5497, j – индекс, соответствующий номеру часа и пробегающий значения от 0 до 23. Динамический диапазон изменчивости уровня для каждого часа суток представлен на рис. 1.



Рис. 1. Пределы изменчивости уровня (м) в различное время суток.

2. Метод исследования и полученные результаты

Наличие пропусков в рядах наблюдений не дало возможности прибегнуть к традиционным методам Фурье-анализа, и поэтому частотный спектр приливных колебаний исследовался на основе регрессионного подхода. Первоначально для каждого часа были выделены гармоники «долгопериодных» колебаний. К ним монография [4] и справочник [7] относят колебания с периодами: $T_1 = 18,613$ г., $T_2 = 182,621$ суток, $T_3 = 27,555$ суток, $T_4 = 13,661$ суток, $T_5 = 13,663$ суток. Монография [3] предлагает более физически прозрачный набор периодов: лунный месяц (27,321 суток) и тропический год (365,242 суток). Ввиду очевидности несинусоидального характера приливных колебаний каждый из указанных выше периодов тестировался со своими гармониками до восьмой включительно на основе регрессионного соотношения:

$$V_{ij} = \sum_{k=0}^8 a_{jk} \cos\left[\frac{2\pi k}{T}(i - \varphi_{jk})\right] + Rsd_j(i) \quad (1),$$

где: T - тестируемый период, $Rsd_j(i)$ - остатки регрессионной модели для часа j , φ_{jk} - день, когда k -ая гармоника имеет максимальное значение для часа j (в соответствии с установившейся традицией не вполне правильно называемый фазой).

Амплитуды a_{jk} полагались отличными от 0 только тогда, когда их статистическая значимость по критерию Стьюдента [8] составляла не менее 95%. Линейная регрессия вида (1) последовательно строилась для периода, соответствующего тропическому году, лунному месяцу и T_1 . Кроме линейной регрессионной модели для определения величин a_{jk} и φ_{jk} с помощью нелинейной регрессии уточнялось значение T по критерию максимизации коэффициента детерминации модели. (Напомним, что коэффициент детерминации, или эффективность модели, показывает, какую часть дисперсии моделируемого процесса объясняет модель.) Практически анализ данных был выполнен с помощью статистических функций рабочего листа и надстроек электронных таблиц Excel. Линейная регрессия строилась с помощью функции рабочего листа LINEST (в русском интерфейсе «ЛИНЕЙН»), а нелинейная – с помощью метода Solver (в русском интерфейсе «Поиск решения») из надстройки «Пакет анализа» [9]. При построении модели с периодом, равным лунному месяцу, в качестве V_{ij} использовались $Rsd_j(i)$ от модели с T , равным тропическому году, а для построения модели с периодом T_1 в качестве V_{ij} использовались $Rsd_j(i)$ от модели с периодом, равным лунному месяцу.

Моделирование «долгопериодной» изменчивости почасовых значений уровня дало следующие результаты. Коэффициенты детерминации для всех типов моделей, а также полной модели «долгопериодной» изменчивости и каждого часа суток, приведены на рис. 2.

Модели сезонного (т.е. с периодом, равным одному тропическому году) хода для всех 24 часов имеют статистически значимые первые и вторые гармоники, внутрисуточное распределение амплитуд и фаз которых иллюстрирует рис. 3. Четвёртая, пятая и седьмая гармоники сезонного хода оказались статистически незначимыми для любого времени суток. Внутрисуточное распределение амплитуд и фаз остальных гармоник для того времени суток, для которого они оказались статистически значимы, иллюстрирует рис. 4. Отметим, что и амплитуды, и фазы высших гармоник по сравнению с первыми двумя обладает более высокой внутрисуточной стабильностью. Уточнение основного периода сезонного колебания результатов не дало – значение, равное продолжительности тропического года, оказалось оптимальным с точки зрения максимизации коэффициента детерминации для всех значений времени суток. Сезонно-суточный разрез колебаний уровня по данным моделей сезонного хода представлен на рис. 5.

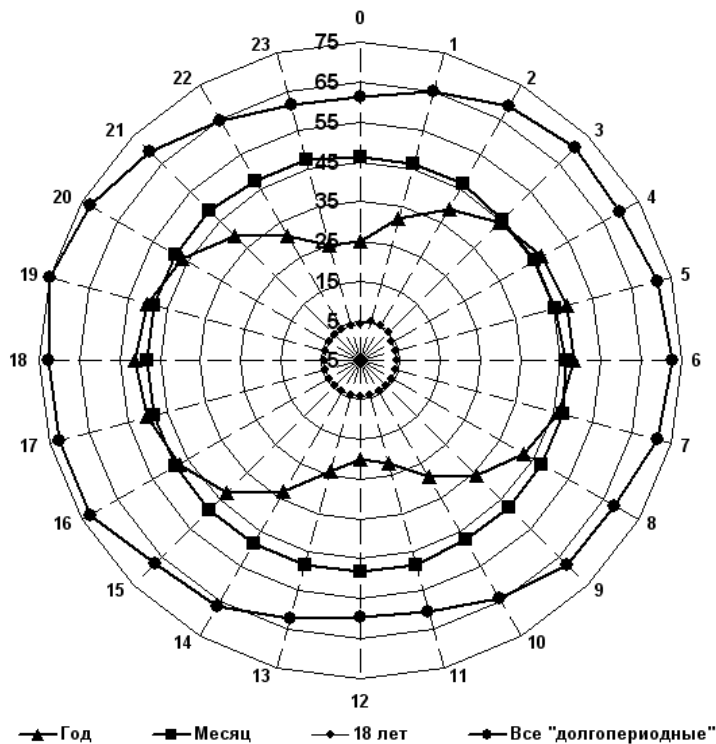


Рис. 2. Вклад колебаний различной периодичности в полный коэффициент детерминации модели долговременной изменчивости уровня для различного времени суток.

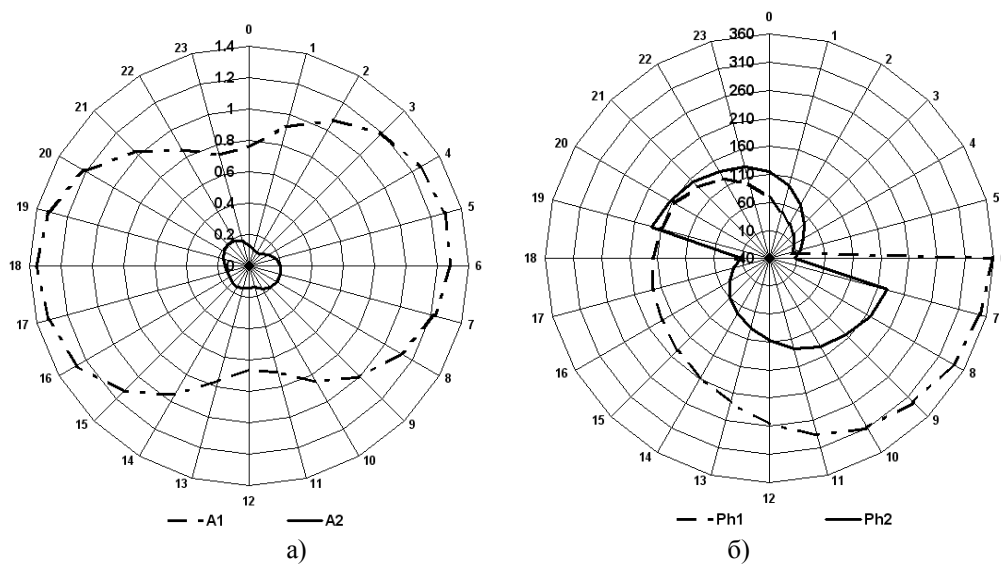


Рис. 3. Распределение амплитуд (а) и фаз (б) первых двух гармоник сезонного хода по времени суток.

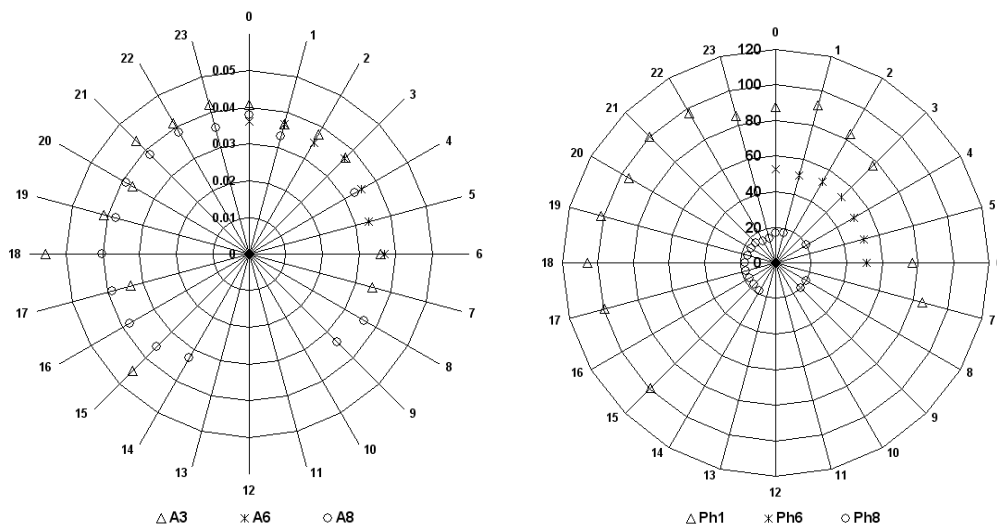


Рис. 4. Распределение амплитуд (а) и фаз (б) третьей, шестой и восьмой гармоник сезонного хода по времени суток.

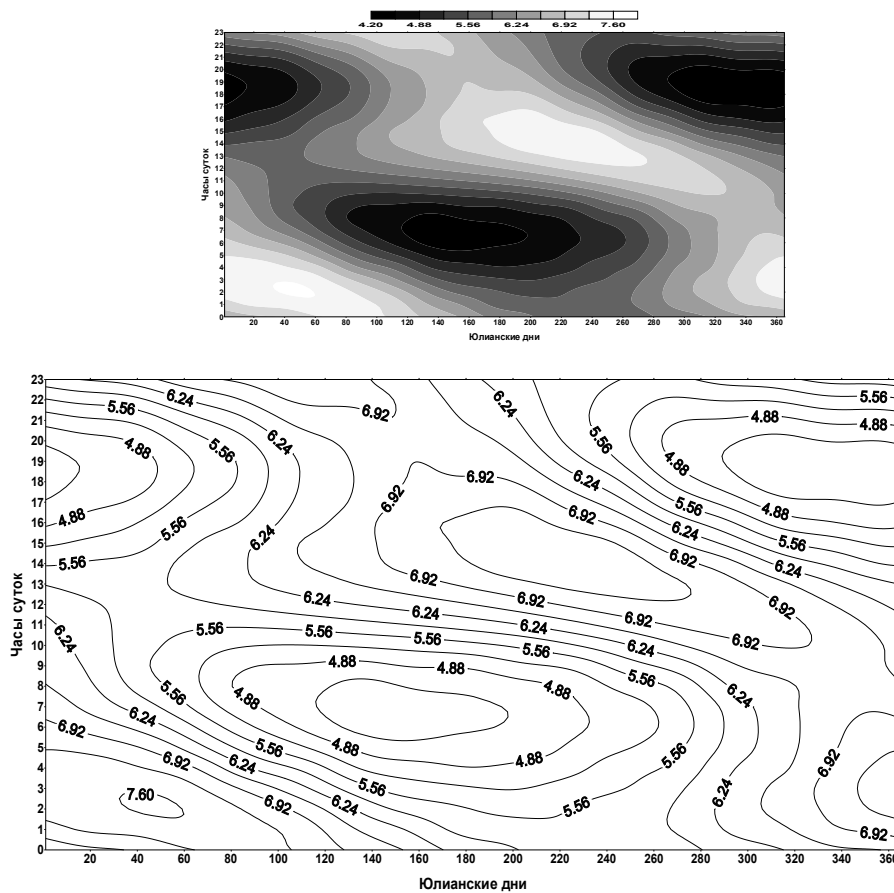


Рис. 5. Суточно-часовое сечение модели сезонной изменчивости уровня (м).

При построении почасовых регрессионных моделей с основным периодом, равным лунному месяцу, получены следующие результаты. Уточненное значение основного периода составило 28,387 суток. Вторая гармоника оказалась статистически значимой для любого времени суток. Её амплитуда слабо зависит от времени суток и составляет в среднем 92 см при стандартном отклонении 2 см. Зависимость фазы от времени суток является практически линейной (рис. 6). Первая гармоника статистически значима только для времени суток 1 час ночи.

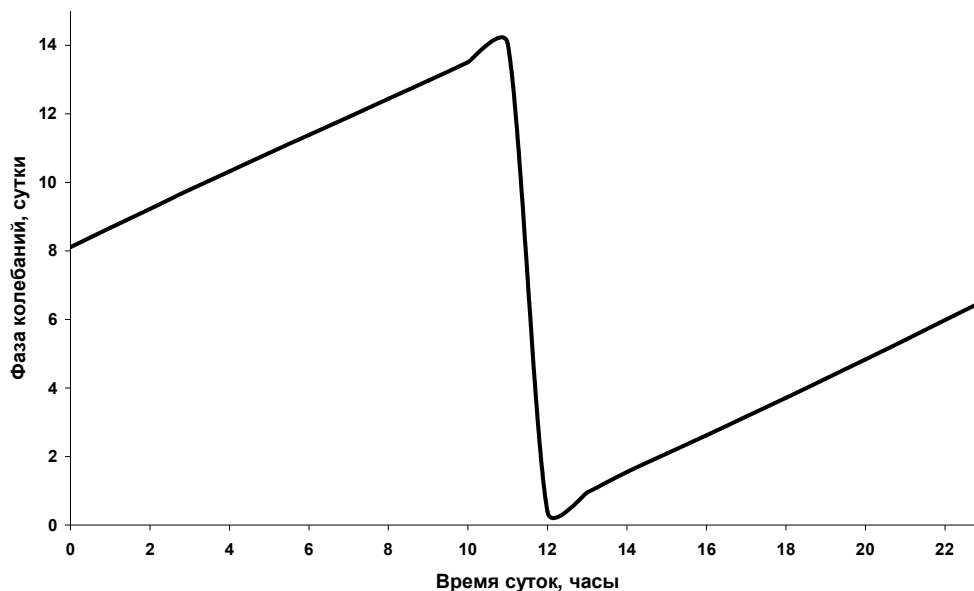


Рис. 6. Зависимость фазы колебания с периодом 14,194 дня от времени суток.

Её амплитуда составляет 2,6 см, а фаза 22,3 суток. Необходимо уточнить, что уровень статистической значимости этого колебания составляет ~96%, т.е. вероятность получить такой результат случайно ~4%. Таким образом, это событие при 24-х (по числу часов в сутках) испытаниях произойдёт с вероятностью $0,96^{24} \sim 37\%$. Следовательно, наличие первой гармоники вполне может оказаться артефактом. При построении почасовых регрессионных моделей с наибольшим основным периодом $T_1=18,613$ г. получены следующие результаты. Для любого времени суток статистически значимыми оказались не менее шести гармоник. Их амплитуды и фазы приведены в таблицах 1 и 2. Формы колебаний, несмотря на значительный разброс в амплитудах и фазах гармоник, довольно сходны между собой, в чём легко убедиться, глядя на рис. 7, где изображены колебания в 0 и 6 часов, а также I эмпирическая ортогональная функция (ЭОФ) всего 24-часового набора. Соответствующее собственное значение составляет 67% от следа ковариационной матрицы. (Определение ЭОФ и другие подробности, относящиеся к их свойствам, приведены в Приложении.)

Полные почасовые модели «долгопериодных» колебаний уровня имеют коэффициенты детерминации от 61% до 75%, распределённые по времени суток в соответствии с рис. 8. Форму полной почасовой модели «долгопериодных» колебаний уровня иллюстрирует рис. 9, где приведена модель для 0 часов с различным временным разрешением. Фазовые соотношения между колебаниями уровня в различное время суток существенно усложняются по мере учёта вклада различных периодов (рис.10).

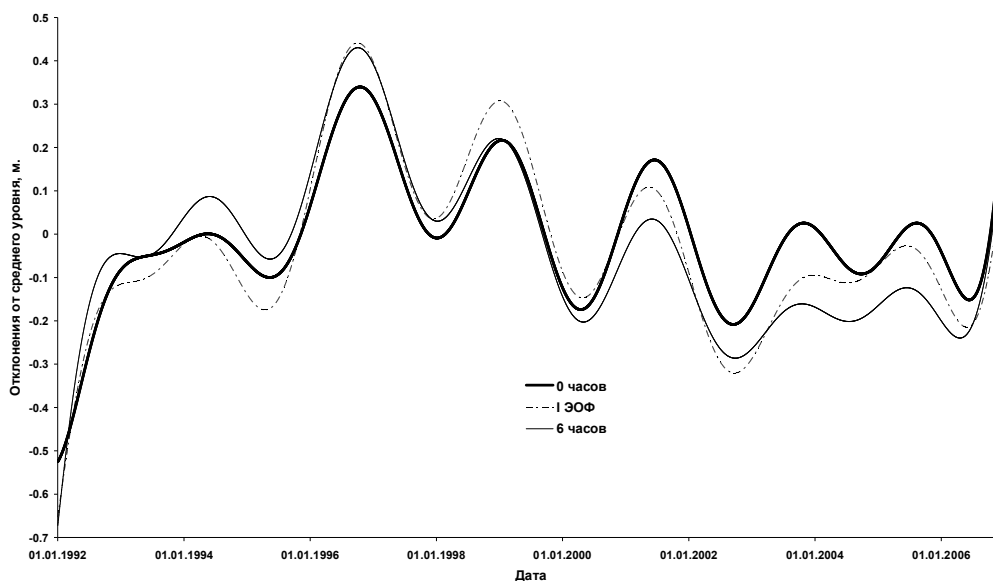


Рис. 7. Форма колебаний с периодом $T_1=18,613$ г.

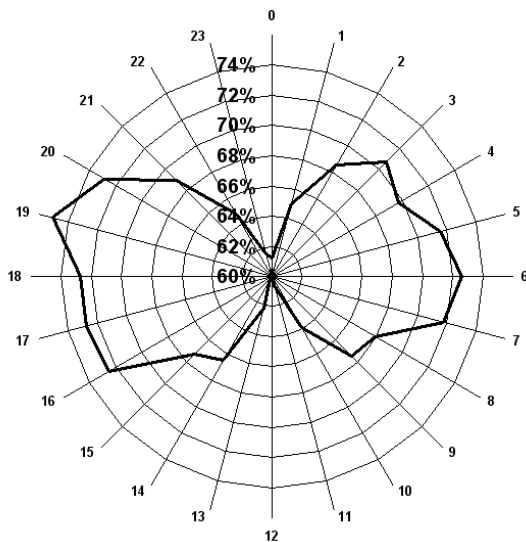
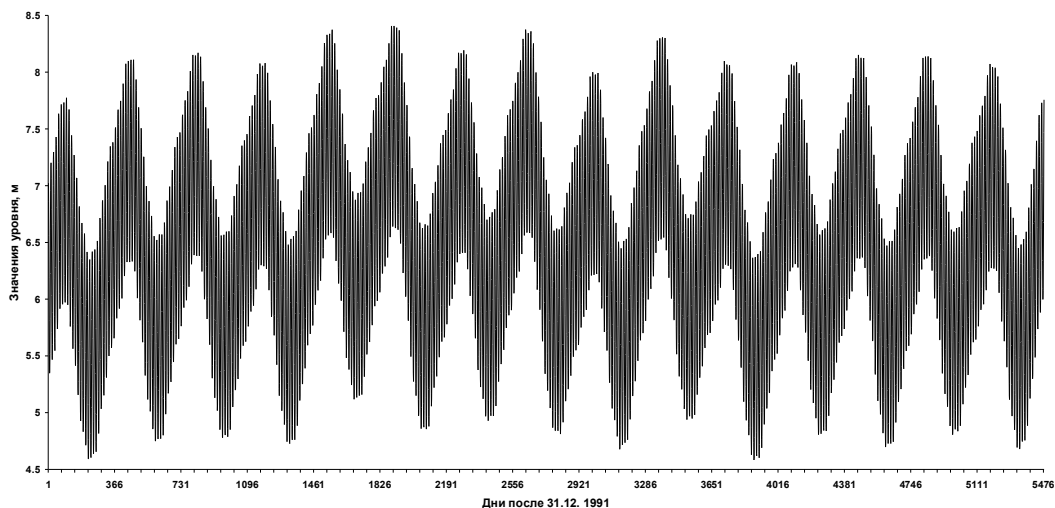
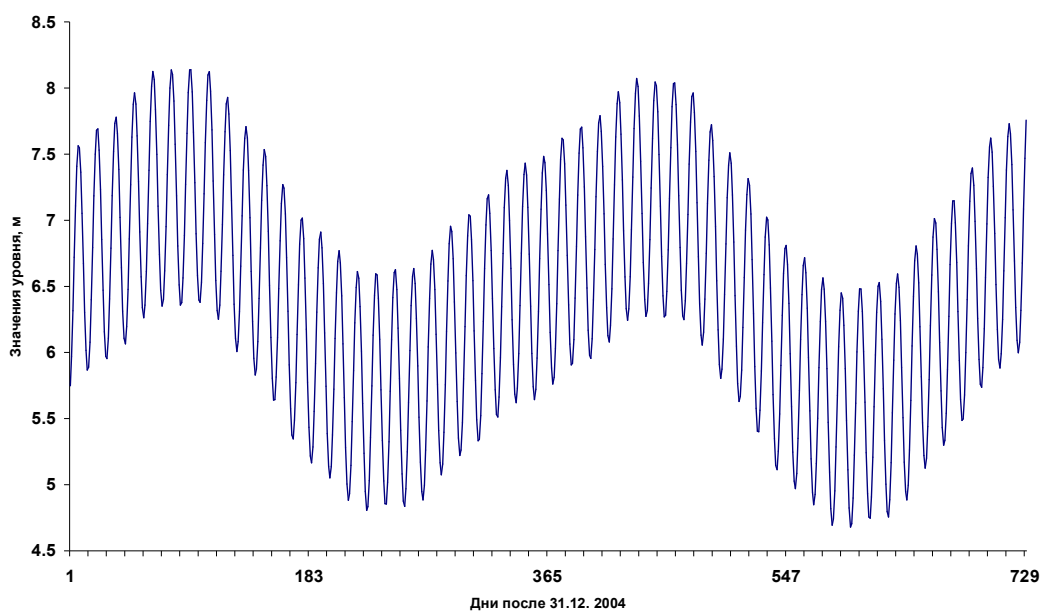


Рис. 8. Коэффициенты детерминации почасовых моделей «долгопериодных» колебаний уровня.

Кроме «долгопериодных» колебаний, монография [4] отмечает существование «быстрых» колебаний, к которым относят: суточные (периоды 26,868 ч., 25,823 ч., 25,819 ч., 24,066 ч., 23,934 ч. и 23,931 ч.) и полусуточные (12,658 ч., 12,421 ч., 12 ч. и 11,967 ч.). Ввиду близости между собой частот многих из указанных колебаний их выделение в рядах наблюдений с дискретом отсчетов 1 час представляется весьма сложным, в особенности с учётом наличия погрешности измерений. Поэтому «быстрые» колебания выделялись нами следующим образом. Для каждого дня наблюдений строилась линейная регрессионная модель для остатков модели «долгопериодных» колебаний $Rsd_{L_{ij}}$:



а)



б)

Рис. 9. Полная модель «долгопериодных» колебаний уровня для 0 часов с низким (а) и высоким (б) временным разрешением.

$$Rsd_{-}L_{ij} = \sum_{k=0}^2 b_{ik} \cos\left[\frac{2\pi k}{T}(j - \varphi_{ik})\right] + Rsd_i(j) \quad (2),$$

где значение T первоначально полагалось равным 24 часам, а затем уточнялось с помощью нелинейной регрессии по критерию максимизации коэффициента детерминации. Спектры «быстрых» колебаний уровня, выявленные в ходе анализа данных наблюдений, оказались существенно богаче описанных в [4]. Гистограммы периодов и коэффициентов детерминации посуточных моделей приведены на рис. 11, а примеры «быстрых» колебаний – на рис. 12.

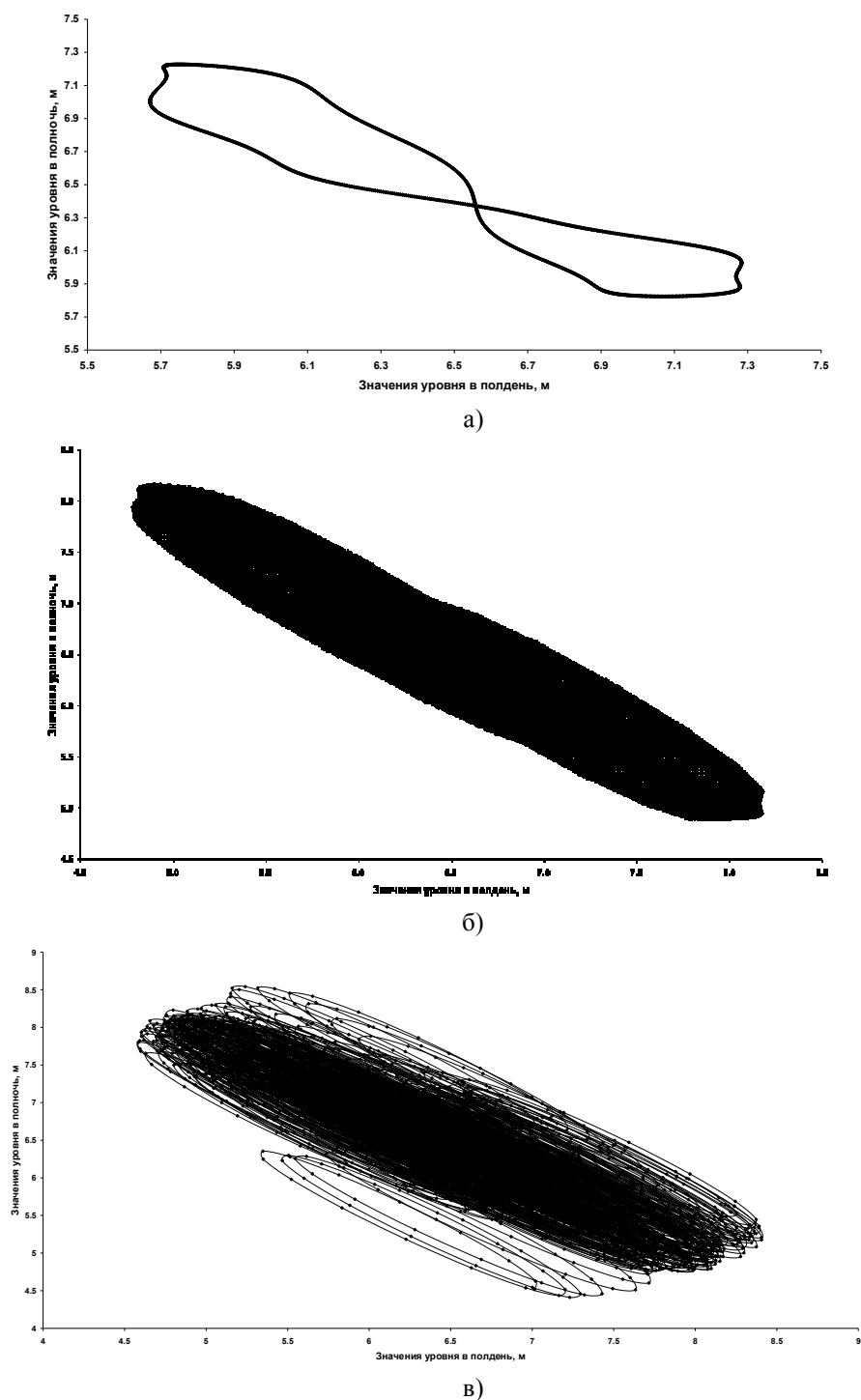
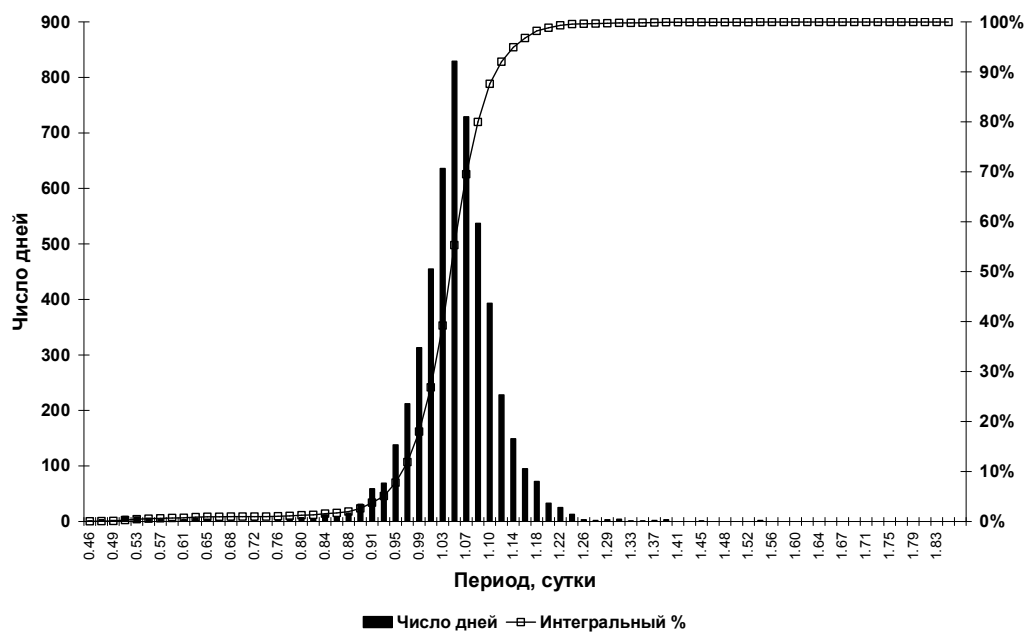
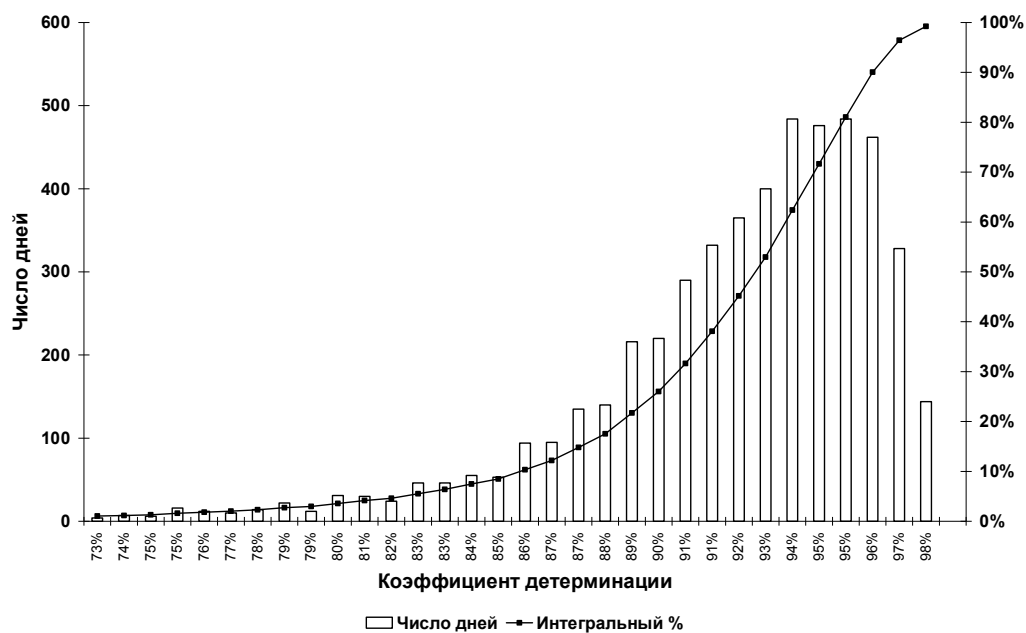


Рис. 10. Фазовые соотношения между колебаниями уровня в полдень и полночь для чисто сезонной модели (а), модели, учитывающей колебания с основными периодами тропический год и лунный месяц (б), и полной модели (в).



а)



б)

Рис. 11. Гистограммы периодов (а) и коэффициентов детерминации посуточных моделей (б).

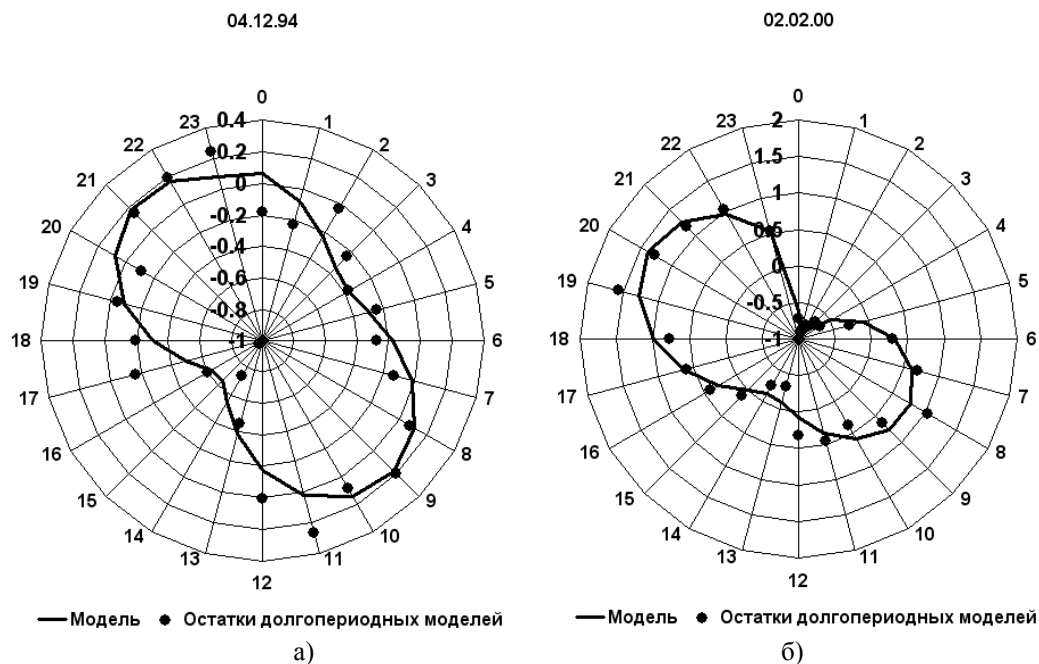


Рис. 12. Сравнение моделей быстрых изменений уровня с данными измерений для коэффициента детерминации 73% (а) и 96% (б).

Полная эффективность почасовых моделей, включающих и «долгопериодные», и «быстрые» колебания уровня, составила для различного времени суток от 96% до 99% (среднее значение 98%, стандартное отклонение – 1%). Сезонно-суточный разрез колебаний уровня по данным почасовых моделей, включающих и «долгопериодные», и «быстрые» колебания уровня, представлен на рис. 13.

3. Обсуждение результатов

Анализ данных измерений на прибрежной антарктической станции «Академик Вернадский» показывает, что спектр надёжно статистически обнаружимых частот в колебаниях уровня существенно богаче, чем это показывают теоретические расчёты [12, 13]. Это подтверждает сделанное в монографии [4] замечание о том, что «возбуждение приливных эффектов в океане обычно протекает на фоне других изменяющихся во времени процессов неприливного происхождения». Это замечание ещё более справедливо для прибрежной зоны, в которой имеют место как диссипативные процессы, так и нелинейные эффекты. Диссипативные процессы, как известно [14], приводят к снижению основных частот (наш анализ показывает это явление начиная с частот, соответствующих лунному месяцу, и более высоких), а диссипативные процессы порождают многочисленные интерферентные (т.е. являющиеся линейными комбинациями основных) частоты (см. рис. 11а). Причём как диссипативные процессы, так и нелинейные эффекты имеют существенно нестационарный характер, т.к. обусловлены в основном формой дна в прибрежной зоне. Именно её быстрые изменения порождают межсуточную изменчивость высокочастотной (с периодом ~ суток и менее) части спектра колебаний уровня. Из сказанного ясно, что для построения замкнутой количественной модели приливных колебаний в прибрежной зоне необходимо привлечение данных регулярных батометрических измерений.

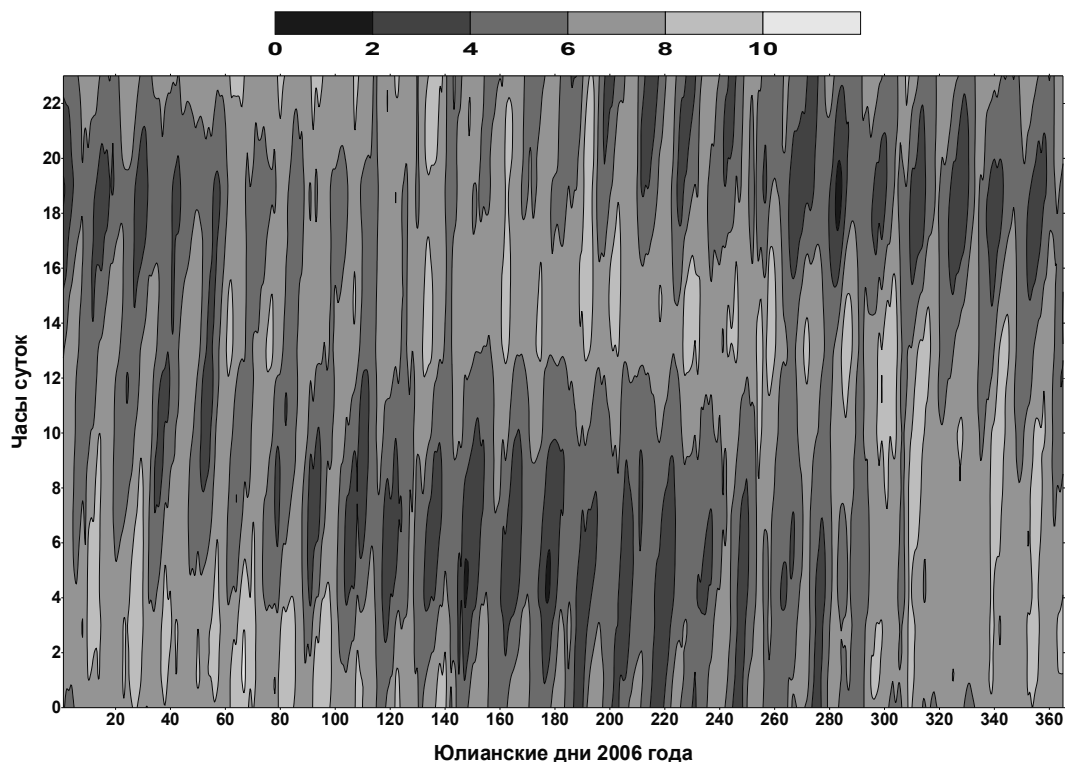


Рис. 13. Суточно-часовое сечение полной модели изменчивости уровня (м).

Вместе с тем вряд ли следует ожидать, что привлечение данных регулярных батометрических измерений для построения замкнутой количественной модели приливных колебаний в прибрежной зоне позволит получить заметно лучшее согласование с результатами измерений уровня, чем оно достигнуто в изложенной в настоящей работе регрессионной модели. Это явствует из следующих простых оценок. Средняя эффективность построенной регрессионной модели составляет 98%, и это при среднесуточном значении среднеквадратичного отклонения (СКО) уровня 1,22 м составляет СКО не объясненной моделью части процесса $1.22 \cdot \sqrt{1 - 0.98^2} \approx 0.17$ м. В то же время известно [15], что стохастические межсуточные вариации периода вращения Земли вокруг своей оси составляют ~ 1 мс, или в относительных величинах 10^{-8} . Из закона сохранения момента количества движения следует, что случайные межсуточные вариации размера Земли (10^9 см) составят величину ~ 10 см, т.е. примерно столько же, сколько не объясняет регрессионная модель.

Литература

1. **Proudman J.** Newton's work in the theory of the tides. In "Isaac Newton 1642-1727", W. Greenstreet ed. Bell // London, 1927, p.p. 87–95.
2. **Laplace P.S.** Recherches sur plusieurs points du systeme du monde. Mem. Acad. R. Sci. Paris, 1775, p.p.75–182.
3. **Gill A.E.** "Atmosphere – Ocean Dynamics". Academic Press // New York London Paris San Diego San Francisco Sao Paulo Sidney Tokyo Toronto, 1982, 798 p.
4. **Марчук Г.И., Каган Б.А.** «Динамика океанских приливов» //Л., Гидрометеиздат, 1982, 359 с.
5. **Deacon M.B.** "Scientists and the Sea: 1650–1900. A Study of Marine Science" // New York, Academic Press, 1971, p. 16.

6. **Cartwright D.E., Zetler B.D., Hamon B.V.** Pelagic tidal constants. – IAPSO Publ. Sci., 1979, N 30, 65 p.
7. **Bartels J.** Gezeitenkrafte. – In: Handbuch der Physik, Bd 48, 1957, S. 734–774.
8. **Худсон Д.** «Статистика для физиков», //М., «Мир», 1967, 242 с.
9. **Уокенбах Д.** «Excel 2003. Библия пользователя». //М. СПб Киев, «Диалектика», 2005, 768 с.
10. **Пугачёв В.С.** «Теория вероятностей и математическая статистика» // М.: «Наука», 1979, с. 109–120.
11. **Рашевский П.К.** «Риманова геометрия и тензорный анализ» // М.: «Наука», 1964, с. 201–203.
12. **Doodson A.T.** The harmonic development of the tide generating potential/ Proc. Roy. Soc., London, 1921, vol. A100, N 704, p. 305–329.
13. **Cartwright D.E., Edden A.C.** Corrected tables of tidal harmonics. Geophys. J. Roy. Astron. Soc., vol. 33, N3, p. 253–264.
14. **Голдстейн Г.** «Классическая механика»// М.: «Наука», 1973, с. 368–374.
15. **Сидоренков Н.С.** «Атмосферные процессы и вращение Земли»// СПб.: Гидрометеоздат, 2002. – 200 с.

Приложение

Таблица 1. Амплитуды (м) колебания с периодом $T_I=18.613$ лет в различное время суток

	A1	A2	A3	A4	A3	A5	A6	A7	A8	A0
0	0.71	0.79	0.72	0.59	0.72	0.53	0.37	0.16	0.19	0.39
1	0.60	0.70	0.64	0.54	0.64	0.50	0.36	0.15	0.19	0.33
2	0.47	0.61	0.56	0.49	0.56	0.46	0.34	0.14	0.19	0.00
3	0.45	0.60	0.56	0.48	0.56	0.46	0.35	0.14	0.19	0.00
4	0.00	0.52	0.49	0.44	0.49	0.43	0.33	0.14	0.19	0.00
5	0.00	0.46	0.43	0.41	0.43	0.41	0.32	0.14	0.19	0.00
6	0.00	0.35	0.33	0.35	0.33	0.35	0.27	0.13	0.17	0.00
7	0.00	0.33	0.31	0.34	0.31	0.33	0.25	0.13	0.17	0.00
8	0.00	0.39	0.36	0.39	0.36	0.36	0.26	0.15	0.17	0.00
9	0.42	0.45	0.39	0.41	0.39	0.34	0.24	0.15	0.16	0.00
10	0.59	0.58	0.49	0.47	0.49	0.37	0.24	0.16	0.16	0.00
11	0.83	0.77	0.64	0.58	0.64	0.43	0.27	0.19	0.16	-0.42
12	0.84	0.76	0.64	0.57	0.64	0.42	0.27	0.19	0.16	-0.42
13	0.66	0.59	0.50	0.45	0.50	0.34	0.22	0.17	0.15	0.00
14	0.49	0.45	0.37	0.35	0.37	0.28	0.20	0.14	0.14	0.00
15	0.00	0.30	0.24	0.00	0.24	0.23	0.16	0.11	0.14	0.00
16	0.00	0.23	0.17	0.00	0.17	0.21	0.16	0.00	0.13	0.00
17	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.25	0.19	0.00	0.13	0.00
18	0.00	0.41	0.00	0.29	0.00	0.28	0.21	0.00	0.14	0.00
19	0.54	0.62	0.53	0.43	0.53	0.39	0.27	0.09	0.15	0.00
20	0.62	0.69	0.60	0.48	0.60	0.42	0.29	0.10	0.16	0.34
21	0.68	0.74	0.65	0.53	0.65	0.46	0.31	0.13	0.16	0.37
22	0.69	0.76	0.67	0.54	0.67	0.48	0.33	0.14	0.17	0.38
23	0.76	0.82	0.74	0.59	0.74	0.52	0.36	0.16	0.18	0.41

Таблица 2. Фазы (сутки) колебания с периодом $T_f=18.613$ лет в различное время суток

	Ph1	Ph2	Ph3	Ph4	Ph5	Ph6	Ph7	Ph8
0	5628	2157	1086	519	193	1110	812	527
1	5580	2117	1060	496	174	1093	791	524
2	5507	2059	1025	463	153	1076	762	519
3	5486	2047	1016	457	146	1070	754	519
4		1980	970	418	119	1047	715	505
5		1892	909	371	89	1025	690	494
6		1674	782	280	39	990	646	478
7		1481	656	205	1353	957	613	459
8		1237	506	124	1298	914	586	442
9	2572	1081	397	56	1249	875	554	429
10	2483	958	306	1697	1199	828	524	414
11	2434	865	235	1645	1151	785	497	397
12	2416	857	226	1638	1147	785	491	398
13	2439	912	247	1658	1173	819	501	407
14	2453	996	312	7	1222	862	521	425
15		1143	392		1277	910	519	433
16		1633	769		44	996		462
17		1973			126	1053		474
18		2057		472	155	1075		484
19	5690	2154	1101	522	188	1102	771	502
20	5698	2187	1119	543	207	1121	814	511
21	5688	2189	1117	545	209	1123	826	520
22	5672	2181	1109	536	205	1119	824	521
23	5657	2182	1104	535	203	1119	821	523