

УДК 521.937

## Долгопериодические колебания по гравиметрическим измерениям в Полтаве и Крыму

*В.Г. Голубицкий<sup>1</sup>, В.Г. Баленко<sup>1</sup>, А.А. Корсунь<sup>2</sup>, Г.С. Курбасова<sup>3</sup>, Л.В. Рыклова<sup>4</sup>,  
М.Н. Рыбалова<sup>3</sup>, Г.Н. Шликар<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Полтавская гравиметрическая обсерватория, Украина, Полтава

<sup>2</sup> Главная астрономическая обсерватория, Украина, Киев

<sup>3</sup> Крымская астрофизическая обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

<sup>4</sup> Институт Астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 15 октября 2004 г.

**Аннотация.** Периодические процессы обмена энергией между Землей и Луной модулируют геофизические и геодинамические процессы и, в силу связанности колебаний, могут оказывать существенное влияние на характер этих процессов при определенном соотношении фаз колебаний с близкими периодами. Примером такого взаимодействия является модуляция амплитуды чандлеровского колебания полюса Земли с периодом 4.4 года.

Имея общую основу (гравитационное взаимодействие) геодинамические колебания оказываются связанными и обнаруживаются в виде долгопериодических вариаций в геофизических процессах.

Так как отвод энергии долгопериодическими гравитационными колебаниями мал, а временная длительность последовательностей гравиметрических измерений ограничена, эти колебания отождествлялись с дрейфом гравиметра.

В результате анализа данных о дрейфе гравиметра в Полтаве и Крыму обнаружены колебания с периодом Чандлера и периодом  $\sim 4.4$  года. Приводится математическое описание эти колебаний в виде квазиполиномиальных моделей.

Обсуждаются результаты авторегрессионного двухканального спектрального сравнения данных о дрейфе гравиметра в Полтаве и Крыму с данными о координатах полюса Земли и изменении угловой скорости вращения Земли.

LONG-PERIOD OSCILLATIONS ON MEASUREMENTS OF THE GRAVIMETERS IN POLTAVA AND IN CRIMEA, by V.G. Golubitskiy, V.G. Balenko, A.A. Korsun, G.S. Kurbasova, L.V. Rykhlova, M.N. Rybalova, G.N. Shlikar. Periodic processes of an exchange by energy between the Earth and the Moon modulate geophysical and geodynamical processes and, by virtue of coherence of oscillations, may render essential influence on character of these processes at the certain ratio of phases of fluctuations with the close periods. Example of such interaction is modulation of amplitude of Chandler oscillation of a pole of the Earth with the period  $\sim 4.4$  years.

Having the common basis (gravitational interaction) the geodynamical fluctuations appear connected and are found out as the long-period variations in geophysical processes.

Earlier these fluctuations were identified with drift gravimeters.

As a result of the analysis of the data on drift gravimeter in Poltava and to Crimea are found out fluctuations with Chandler's period and the period  $\sim 4.4$  years. The calculations are performed with the aid the numerical quasipolynomial model with variable parameters.

Periodogram and two-channel autoregression analyses comparisons of the data on drift gravimetr in

Poltava and to Crimea with the data about coordinates of a pole of the Earth and change of angular speed of rotation of the Earth are discussed.

**Ключевые слова:** Квазиполиномиальная модель, система Земля – Луна, дрейф, гравиметр

---

## 1 Введение

Измерение аномалий силы тяжести с помощью современных высокоточных гравиметров, наряду с перспективными методами лазерных измерений расстояний до ИСЗ (ЛСД) и Луны (ЛЛЛ), длиннобазисной интерферометрией (РСДБ) и глобальной системой местоопределения (ГСМ), служат для уточнения связи параметров формулы силы тяжести с динамическими параметрами Земли, линейным масштабным коэффициентом и угловой скоростью вращения Земли.

Гравитационные воздействия Солнца, Луны и планет вызывают сложные деформации поля упругой Земли. При этом влияние Луны и Солнца является основной причиной колебаний оси вращения Земли, вариаций скорости вращения Земли и земных приливов.

Периодические процессы обмена энергией между Землей и Луной модулируют геофизические и геодинамические процессы и, в силу связанности колебаний, могут оказывать существенное влияние на характер этих процессов при определенном соотношении фаз колебаний с близкими периодами. Имея общую основу (гравитационное взаимодействие) глобальные колебания оказываются связанными. Поэтому энергетические обменные процессы между Землей и Луной включают все её подвижные оболочки. Эффект этого воздействия на Землю определяется её составом, структурой, вращением, движением в солнечной системе и пр. Сложность построения общей теории глобальных колебаний заставляет рассматривать каждое из них в отдельности и учитывать в рамках той или иной из узких проблем науки о Земле.

В общем случае отвод энергии долгопериодическими гравитационными колебаниями мал. Поэтому при обработке гравиметрических и наклономерных измерений эти колебания включались в дрейф гравиметра.

Возможность анализа долгопериодических колебаний по наблюдениям дрейфа гравиметра стала реальной с появлением длинных серий измерений, полученных с помощью высокоточных гравиметров и наклономеров.

Сравнительно недавно был обнаружен эффект движения полюса в приливных гравиметрических измерениях (Моритц, 1987) и колебания с периодом Чандлера в изменениях наклонов поверхности Земли (Рыхлова и др., 1991)

В работе (Ханг и др., 2001) приводится аналитическое описание и численные оценки изменения силы тяжести в зависимости от скорости вращения Земли и параметров движения полюса Земли. Эта зависимость должна учитываться при обработке и интерпретации гравиметрических измерений.

Измерения с помощью новых методов (РСДБ, ЛЛС, ЛЛЛ, ГСМ) определяют параметры вращения Земли относительно различных систем координат. Эти системы координат по – разному чувствительны к различным параметрам. Поэтому необходим дополнительный анализ для определения различных эффектов во вращении Земли.

Прямые измерения вариации силы тяжести с помощью высокоточных гравиметров не дублируют, а дополняют современные высокоточные косвенные гравиметрические данные.

В настоящей работе обсуждаются некоторые результаты анализа обнаруженных долгопериодических колебаний в последовательностях гравиметрических измерений, полученных в Полтавской гравиметрической обсерватории.

## 2 Исходные данные и подготовка их к анализу

Для анализа использовались данные о дрейфе гравиметра по гравиметрическим наблюдениям в Полтаве и Крыму. Информацию о наблюдениях можно найти в публикациях за 2002 г. (Аксентьева и др., 2002). Для сравнительного анализа использовались данные о координатах полюса в виде  $\rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$  (Annual report, 1992) и среднегодовые данные об изменении угловой скорости вращения Земли (Сидоренков, 1999). Данные об изменении угловой скорости вращения Земли преобразованы к виду

$v \equiv \frac{\delta\omega}{\Omega} = \frac{\omega - \Omega}{\Omega}$ , где  $\omega = \frac{2\pi}{\Pi_3}$  и  $\Omega = \frac{2\pi}{86400}$  рад/с - угловые скорости, соответствующие земным и стандартным суткам.

## 3 Теория и метод анализа

В работе (Ханг и др., 2001) приведена оценка влияния вращения Земли на вариации силы тяжести в виде:

$$\Delta g = \delta\Omega^2 r [-(m_1 \cos \lambda + m_2 \sin \lambda) \sin 2\varphi + 2m_3 \cos^2 \varphi], \quad (1)$$

где  $\delta$  - гравиметрический параметр;  $\Omega$  - угловая скорость вращения Земли;  $\lambda$  и  $\varphi$  - долгота и широта пункта наблюдения;  $r$  - позиционное направление;  $m_1$  и  $m_2$  - компоненты движения полюса Земли;  $m_3$  - компонента изменения угловой скорости Земли.

Или

$$\Delta g = -\delta\Omega^2 r [-(m_1 \cos \lambda + m_2 \sin \lambda) \sin 2\varphi; \quad (2)$$

$$\Delta g = 2m_3 \delta\Omega^2 r \cos^2 \varphi. \quad (3)$$

Согласно (3) изменение длительности суток на  $1 \text{ ms}$  ( $m_3 \sim 6 * 10^{-8}$ ) соответствует изменению гравитационного поля  $\Delta g$  на  $0.09 \text{ мкГал}$  для средней широты ( $\varphi = 45^\circ$ ). Оценки амплитуд вариаций силы тяжести в Брюсселе ( $\varphi \sim 51^\circ$ ), полученные из (1) - (3) по данным о параметрах ориентации Земли (IERS) SO4 составляют около  $10 \text{ мкГал}$  для колебания Чандлера и с частотой 1 цикл /год.

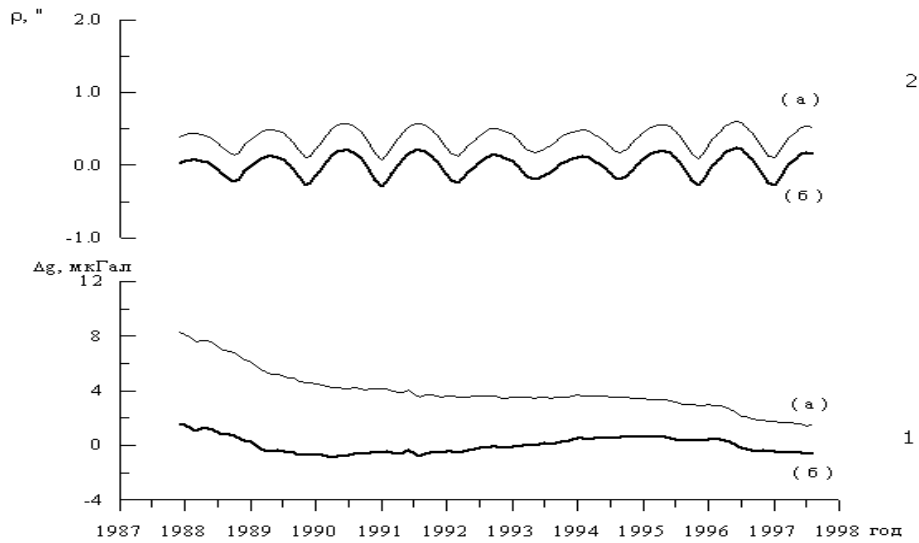
Колебания силы тяжести с амплитудой порядка  $10 \text{ мкГал}$  при точности  $\pm 0.001 \text{ мкГал}$  современных гравиметрических измерений не могут быть отнесены к случайным смещениям. Исходя из этого была поставлена задача обнаружения и оценки амплитуд долгопериодических колебаний по данным о дрейфах гравиметров в пунктах Полтава, Симферополь, Ялта, Бахчисарай. В постановку задачи входит оценка возможной связи долгопериодических колебаний дрейфа гравиметра с соответствующими колебаниями параметров ориентации Земли.

Методика сравнения и математический аппарат описаны в работах (Марпл, 1990; Курбасова и др., 1994).

Основными теоретическими предпосылками для поиска долгопериодических колебаний служит теория связанных колебаний в системе Земля - Луна, согласно которой глобальные энергетические (обменные) процессы модулируют колебания во всех подвижных оболочках Земли. В работе (Курбасова и др., 2002) показано, что обмен энергией между Землей и Луной вызывает периодическое изменение амплитуды чандлеровского колебания в движении полюса Земли с периодом около 4.4 года.

Колебания с периодами  $\sim 4$  года ранее были обнаружены и сопоставлены по данным об изменении некоторых геодинимических, геофизических и атмосферных параметров (Курбасова, Рыхлова, 2003).

Достоверность обнаружения колебаний с периодом более 4-х лет (например,  $\sim 6$  лет и  $\sim 10$  лет) ограничена временной протяженностью анализируемых рядов.



**Рис. 1.** Удаление трендов из данных 1 – о дрейфе гравиметра в Полтаве  $\Delta g$ ; 2 – о координатах полюса Земли  $\rho$

#### 4 Долгопериодические колебания дрейфа гравиметра в Полтаве

а) Колебания с периодом Чандлера.

С помощью двухканального спектрального анализа было проведено сравнение долгопериодических колебаний в среднемесячных последовательностях данных о дрейфе гравиметра в Полтаве  $\Delta g$ , координатах полюса Земли  $\rho$  и изменении угловой скорости вращения Земли  $v \equiv \frac{\delta\omega}{\Omega}$ .

Предварительно из данных были удалены следующие тренды:

$$\Delta g_0(\Delta t) = 6.7 * \exp(-0.000333\Delta t); \tag{4}$$

$$\rho_0(\Delta t) = 0.350152 + 0.000218\Delta t; \tag{5}$$

где  $\Delta t$  – интервал времени в сутках от начала отсчета.

На рис. 1 приведены графики (1 – 2) исходных данных (а) и после удаления соответствующих трендов (б).

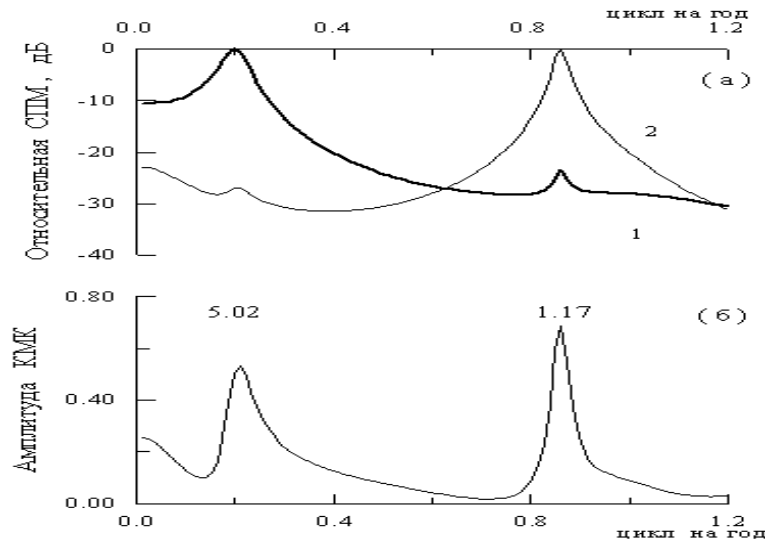
Спектральные авторегрессионные оценки относительной СПМ приведены на графиках рис. 2(а): гр. 1 – автоспектр данных о дрейфе гравиметра в Полтаве  $\Delta g$ , гр. 2 – автоспектр данных о координатах полюса Земли  $\rho$ . График изменения амплитуды квадрата модуля когерентности приведен на рис. 2(б).

График автоспектра данных о дрейфе гравиметра в Полтаве (рис. 2а, гр.1) имеет максимальный пик на частоте соответствующей периоду  $\sim 6$  лет. Квадрат модуля когерентности для колебаний с периодом 1.17 года равен 0.69 при сдвиге фаз между сравниваемыми последовательностями данных 0.35 года. Для более достоверной оценки параметров чандлеровского колебания и величины КМК была построена квазиполиномиальная модель (Василенко и др., 1981) гравиметрических данных. В этой модели колебание с периодом 6 лет имеет вид:

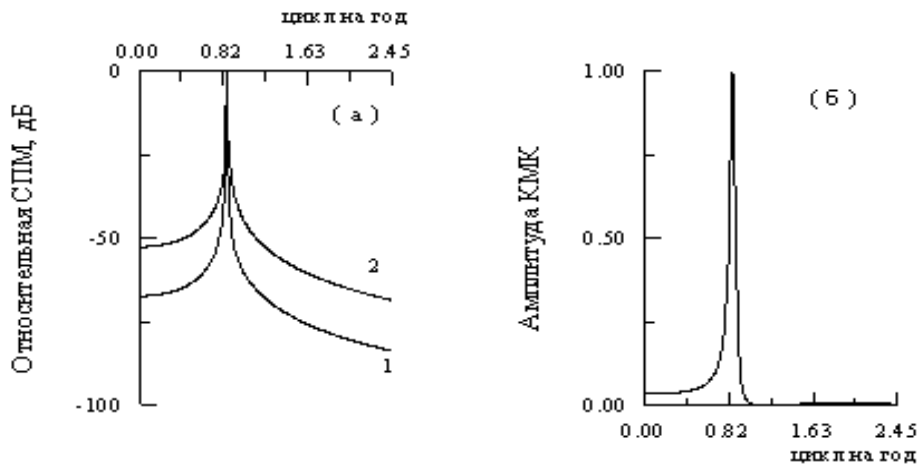
$$\Delta g_6(\Delta t) = 0.695 \sin\left(\frac{2\pi}{6.32}\Delta t + 0.51\right), \tag{6}$$

где  $\Delta t$  – интервал времени в сутках от начала отсчета исходных данных.

Расчеты автоспектров и КМК были выполнены повторно после удаления шестилетнего колебания из исходных данных. На рис. 3 приведены графики автоспектров для соответствующих данных и амплитуды КМК.



**Рис. 2.** Спектральные авторегрессионные оценки относительной СПМ по среднемесячным данным с удаленными трендами: (а) – автоспектр данных о дрейфе гравиметра в Полтаве  $\Delta g$  (гр.1), автоспектр данных о координатах полюса Земли  $\rho$  (гр.2); (б) – амплитуда квадрата модуля когерентности



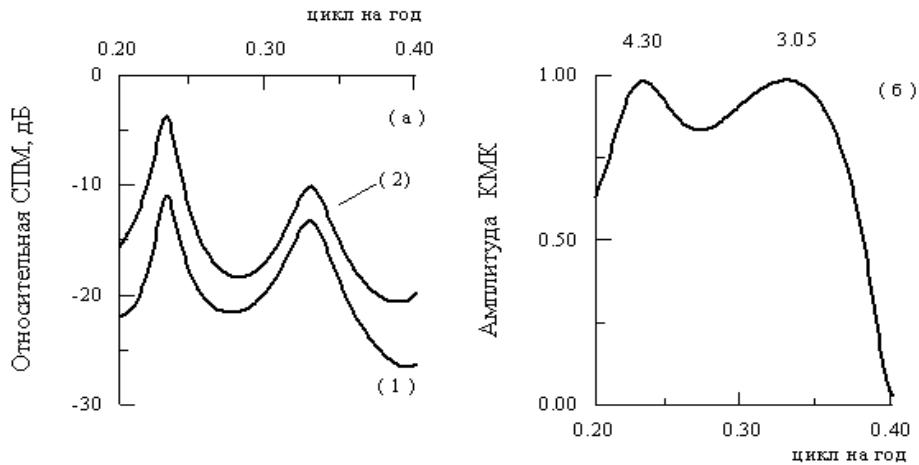
**Рис. 3.** Спектральные авторегрессионные оценки относительных СПМ по среднемесячным данным (оценка чандлеровского колебания после фильтрации): (а) – автоспектр данных о дрейфе гравиметра в Полтаве  $\Delta g$  (гр.1), автоспектр данных о координатах полюса Земли  $\rho$  (гр.2); (б) – амплитуда квадрата модуля когерентности

Как следует из рис. 3, проведенная процедура фильтрации существенно улучшила оценки относительных СПМ автоспектров и амплитуды КМК. На частоте 1.18 амплитуда КМК равна 0.99 при сдвиге фаз 0.34 года. Оценка параметров чандлеровского колебания получена в квазиполиномиальной модели, параметры которой вычислены по данным исходной последовательности гравиметрических измерений. Относительная погрешность приближения составляет 2%.

Аналитическое описание этой составляющей имеет вид:

$$\Delta g_{430.5}(\Delta t) = 0.285 * \exp(0.001\Delta t) \sin\left(\frac{2\pi}{430.5} + 1.679\right) \quad (7)$$

Вид формулы (7) указывает на нестационарный процесс.



**Рис. 4.** Спектральные авторегрессионные оценки относительных СПМ по среднегодовым данным: ( а ) – автоспектр данных о дрейфе гравиметра в Полтаве  $\Delta g$ (гр.1), автоспектр данных об изменениях угловой скорости Земли  $v$ (гр.2); (б) – амплитуда квадрата модуля когерентности

После фильтрации (удалена 6-летняя и следы высокочастотных вариаций) квазиполиномиальное приближение с погрешностью 0.001% имеет вид:

$$\Delta g_{431.6} = 0.0507 \sin\left(\frac{2\pi}{431.6} + 2.087\right). \quad (8)$$

Формула (8) описывает гармонический стационарный процесс. Среднее значение оценок амплитуды чандлеровского колебания по не фильтрованным данным и после фильтрации составляет 0.167 мкГал.

б) Колебания с периодами более двух лет.

Для анализа и сравнения использовались среднегодовые данные о дрейфе гравиметра в Полтаве, об изменении угловой скорости вращения Земли и координат полюса  $\rho$ .

До сравнения из данных были удалены линейные тренды вида:

$$\Delta g_0(\Delta t) = 5.913 - 0.463\Delta t, \quad (9)$$

$$v_0(\Delta t) = -197.6 - 6.4\Delta t, \quad (10)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени в годах от начала отсчета. Результаты сравнения среднегодовых данных о дрейфе гравиметра в Полтаве и об изменениях угловой скорости Земли приведены на рис. 4.

На графиках автоспектров сравниваемых данных (рис. 4) видны максимальные оценки относительных СПМ для колебаний с периодами  $P_1 = 4.30$  год и  $P_2 = 3.05$  год.

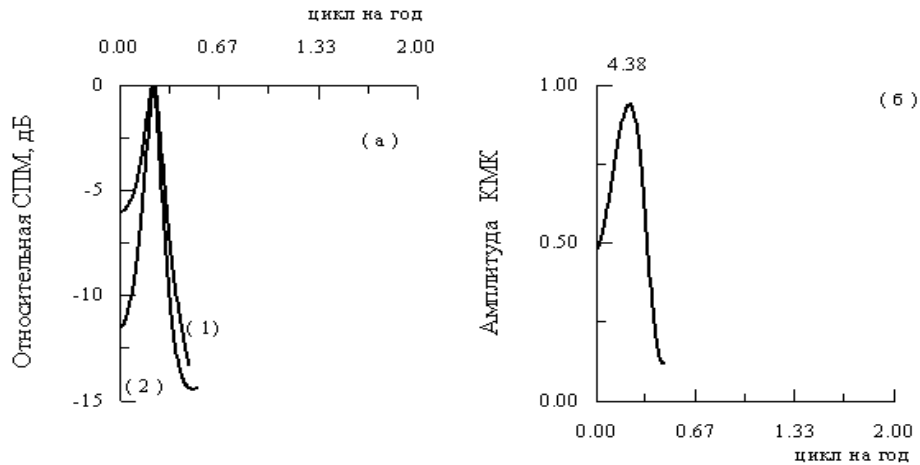
Обнаружение и сравнение колебаний с периодом 4.38 год было проведено для среднегодовых данных о дрейфе гравиметра в Полтаве и  $\rho_i$  (см. рис. 5).

Исходные данные перед сравнением были обработаны цифровым фильтром низкой частоты с частотой отсечки 0.5 циклов на год.

Оценка величины амплитуды в квазиполиномиальной модели  $\Delta g_{4.3} = 0.13$  мкГал.

## 5 Дрейф гравиметра в Крыму

Анализ 3-х серий дрейфов гравиметра (г. Симферополь, г. Ялта и г. Бахчисарай) с целью обнаружения и определения параметров долгопериодических колебаний затруднён из-за ограниченной



**Рис. 5.** Спектральные авторегрессионные оценки относительных СПМ по среднегодовым данным (оценка колебания с периодом 4.38 год): ( а ) – автоспектр данных о дрейфе гравиметра в Полтаве  $\Delta g$  (гр.1), координатах полюса Земли  $\rho$  (гр.2); ( б ) – амплитуда квадрата модуля когерентности

временной протяженности каждой серии. Глобальный характер чандлеровского колебания и колебания с периодом  $\sim 4$  года служит основанием для восстановления долгопериодических колебаний при существующих интервалах разрывов между сериями. Восстановление долгопериодических зависимостей по данным измерений проведено с помощью аппарата квазиполиномиальных сплайнов (Василенко и др., 1981).

Из исходных данных предварительно были удалены следующие тренды:

г. Симферополь

$$\Delta g_0^{(1)} = 1.477 - 4.7 * 10^{-3} \Delta t \quad (11)$$

г. Ялта

$$\Delta g_0^{(2)} = 2.408 - 2.27 * 10^{-3} \Delta t \quad (12)$$

г. Бахчисарай

$$\Delta g_0^{(3)} = 0.513 + 2.08 * 10^{-3} \Delta t, \quad (13)$$

где  $\Delta t$  – в сутках.

Результат восстановления приведен на рис. 6. Пунктирной линией показан график восстановленных колебаний.

Для восстановленной последовательности данных о дрейфе гравиметра получены авторегрессионные спектральные оценки СПМ и выполнен двухканальный спектральный анализ. На рис. 7а приведены автоспектры крымского дрейфа гравиметра (гр.1) и данных об изменении координат полюса Земли (гр.2). В автоспектре (гр.1) обнаруживается чандлеровское колебание. Это колебание коррелирует с аналогичным колебанием в данных о координатах полюса Земли (КМК= 95%). На рис.7б приведен график КМК.

## 6 Выводы

1. Глобальные и региональные смещения станции, обусловленные приливами, могут быть оценены сегодня с точностью до нескольких десятков миллиметров. Локальные эффекты могут быть значительны и непредсказуемы, поэтому наилучший способ – определения их на месте по гравиметрическим и наклономерным наблюдениям. В этом случае большинство приливных эффектов в действительности может и должно быть исключено из наблюдений.

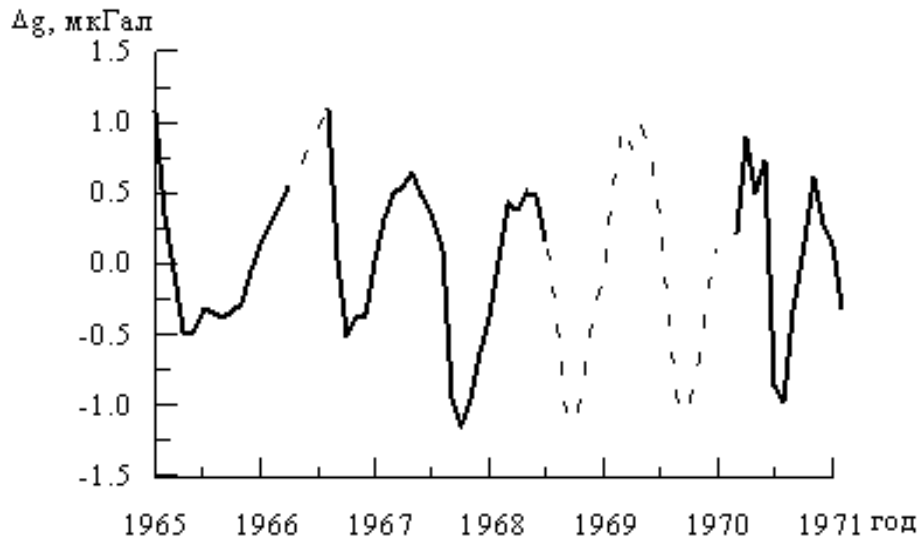


Рис. 6. Восстановление долгопериодических колебаний в данных о дрейфе гравиметра в Крыму

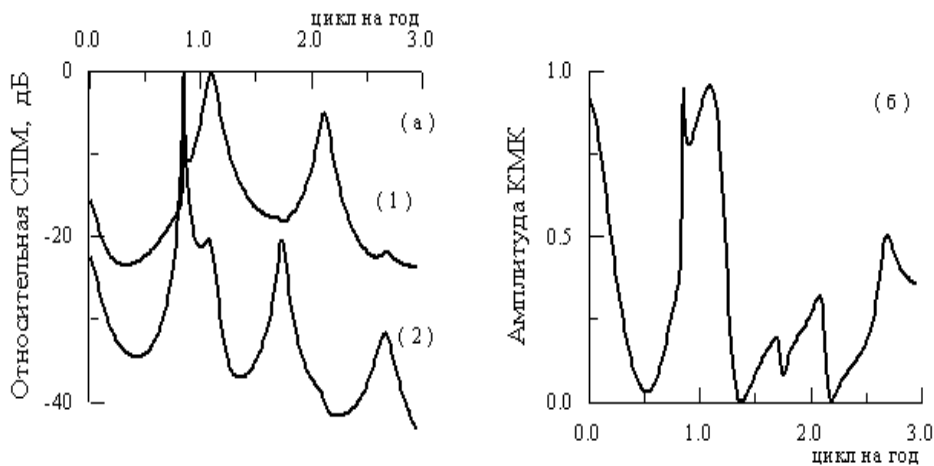


Рис. 7. Спектральные авторегрессионные оценки относительных СПМ по среднемесячным данным (оценка колебания с периодом 426.96 суток): ( а ) – автоспектр данных о дрейфе гравиметра в Крыму  $\Delta g$  (гр.1), автоспектр данных о координатах полюса Земли  $\rho$  (гр.2); ( б ) – амплитуда квадрата модуля когерентности

2. Обнаруженные колебания с чандлеровским и четырехлетним периодами в данных о дрейфе гравиметра в Полтаве и Крыму указывает на то, что для привязки наблюдений силы тяжести в глобальном масштабе необходимо учитывать эффект долгопериодических вариаций силы тяжести.
3. Амплитуда колебания с чандлеровской частотой изменяется в пределах  $0.05 \div 0.28$  мкГал, а колебания с периодом  $\sim 4$  года –  $0.05 \div 0.13$  мкГал.

## Литература

Аксентьева З.М., Баленко В.Г., Булацен В.Г., Голубицкий В.Г., Дичко И.О., Корба П.С., Шляховий В.П., Павлик В.Г., Плис В.П. // Кинематика и физика небесных тел. Т. 18. N. 3. 2002. С. 195.  
Annual report, IERS for 1991. Paris. 1992. P. 27.



- Василенко В.А., Ковальков А.В., Зюзин М.Б. // Препринт N. 270. Новосибирск. 1981.
- Курбасова Г.С., Рыхлова Л.В., Рыбалова М.Н. // Астрон. журн. 1994. Т. 71. N. 6. С. 930.
- Курбасова Г.С., Рыхлова Л.В., Рыбалова М.Н. // Астрон.журн. 2002. Т. 79. N. 6. С. 570.
- Марпл С.Л. – мл. // Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир. 1990.
- Моритц, Мюллер (Moritz H, Mueller J.) // Earth rotation. Theory and observation. N.Y.: Ungar. 1987.
- Курбасова Г.С., Рыхлова Л.В. // Astron. Astrophys. Trans. 2003. V. 22. N. 4–5. P. 543.
- Рыхлова Л.В., Курбасова Г.С., Шликарь Г.Н. // Астрон. журн. 1991. Т. 68. N. 3. С. 639.
- Сидоренков Н.С. // Кинематика и физика небесных тел. Приложение. N. 1. 1999. С. 55.
- Ханг и др. (Huang C., Ducarme V., Jin W.) // Частное сообщение. 2001.