

## Возможность исследований геофизических колебательных процессов и возмущений по показаниям астрономических часов Федченко

© А. П. Сливинский<sup>1,2</sup>, Н. А. Калюжный<sup>1,2</sup>, Ф. И. Бушуев<sup>1</sup>, 2011

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт  
"Николаевская Астрономическая Обсерватория", Николаев, Украина

<sup>2</sup> Украинский радиотехнический институт, Николаев, Украина

Поступила 2 ноября 2009 г.

*Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом*

На аппаратному комплексу НДИ МАО за аналізу часових і спектральних послідовностей, побудованих на основі показів відхилень ходу астрономічного маятникового годинника Федченка (АГФ), підтверджено довгоперіодичні коливання, що визначаються особливостями динаміки ядра Землі і припливними силами. Розроблено метод обробки показів АГФ. Запропоновано модель відхилень ходу АГФ для імітації фізичних процесів, що визначають динаміку збурень. Після сильного землетрусу в провінції Сичуань 12.05.2008 р. виділено короткоперіодичні коливання, які пов'язують з вільними сферичними і тороїдальними коливаннями Землі. За аномально великим раптовим відхиленням ходу АГФ виділено сейсмічні хвилі від землетрусів. Для деяких землетрусів за декілька хвилин перед приходом сейсмічних хвиль додатково підтверджено аномалії, що виявляються у зменшенні дисперсії фонових показів АГФ, які інтерпретують як попередники. Наведено попереднє калібрування показів АГФ за показами надпровідникових гравіметрів. Підтверджено характеристики мікросейсм, що породжуються вітровими навантаженнями.

On an equipment and software complex of the research institute NAO the long-period oscillations determined by dynamics of the Earth's inner core and of the tidal forces have been confirmed upon the analysis of temporal and spectral sequences of the reading deviations of the astronomical pendulum clock of Fedchenko (ACF). A processing method of the ACF readings has been developed. A model of the ACF reading deviations is proposed to simulate the physical processes determining the dynamics of perturbations. Short-period oscillations associated with spherical and toroidal free oscillations of the Earth have been detected after the strong Sichuan earthquake of 12.05.2008. Seismic waves from earthquakes are detected by abnormally large sudden departures of the ACF readings. A preliminary calibration of the ACF readings by the superconducting gravimeters readings is shown. Characteristics of micro seismic events caused by wind loads were reaffirmed. Anomalies interpreted as a "precursor" has been observed a few minutes before the arrival of seismic wave from certain earthquakes. These anomalies are manifested in a significant reduction of the background dispersion of the ACF readings.

**Введение.** В 1821 г. было начато и в 1829 г. завершено строительство в г. Николаев астрономической обсерватории, созданной для "обеспечения флота точным временем, картографирования берегов Черного, Азовского и Мраморного морей, создания астропунктов на побережье, обучения моряков астрономическим методам навигации, наконец, проведения аст-

рономических исследований, имеющих отношение к морской навигации" [Пинигин, Эраль, 2009]. Вместе с тем именно здесь впервые на территории Российской Империи в 1892 г. были начаты непрерывные сейсмические наблюдения, которые организовал директор обсерватории И. Е. Кортацци, используя в качестве датчика горизонтальный маятник, предоставлен-

ный ему немецким астрономом Ребер-Паш-витцем [Петров, Пинигин, 2006; Козырева и др., 2007]. В настоящее время Николаевская астрономическая обсерватория имеет статус научно-исследовательского института (НИИ НАО), где ведутся позиционные наблюдения малых планет, астероидов, искусственных спутников Земли и космического "мусора". Историческое прошлое, однако, подсказало идею вернуться к проведению измерений сейсмического и гравиметрического типа, используя для этого существующую аппаратуру обсерватории.

Как известно, гравиметры обладают уникальной чувствительностью к изменениям гравитационного поля. Вертикальные маятники также в некоторых случаях могут быть успешно использованы в качестве гравиметров. К таковым, например, можно отнести имеющиеся в НАО астрономические маятниковые часы Федченко (АЧФ), которые обладают уникальной чувствительностью к изменениям гравитационного поля. В книге [Демидов, 1977] автор приводит слова знаменитого пулковского астронома, директора Главной астрономической обсерватории, профессора В. А. Крата: "... Часы Федченко являются лучшими из всех существующих типов маятниковых часов ..." и от себя добавляет: "Маятниковые часы сегодня сменили профессию. Это уже не столько устройство для измерения времени (его гораздо лучше хранят атомные, квантовые генераторы), сколько точнейший гравиметрический прибор". В отличие от гравиметра измерения гравитационного поля и деформационных процессов на основе показаний АЧФ осуществляется за счет изменений хода времени и периода колебаний маятника. Последнее обстоятельство позволяет использовать показания АЧФ для исследования колебательных процессов и возмущений в широком диапазоне частот в интересах геодинамики и сейсмологии.

**Метод учета показаний АЧФ.** Структурная схема, технические характеристики и устройство АЧФ достаточно подробно представлены в работе [Сливинский и др., 2009]. В связи с этим рассмотрим методологию обработки наблюдаемых данных по показаниям АЧФ. Пусть  $t_i$  — показания времени атомного стандарта частоты НАО в момент размыкания контактов АЧФ, а  $i$  — порядковый номер  $t$ , начиная с какого-либо момента времени  $t_0$ . Точность измерений  $t$  составляет  $10^{-8}$  с. Последовательность  $t_i$  близка к арифметической прогрессии со знаменателем, равным

периоду маятника, который слабо отличается от двух секунд. Пусть  $P_T$  — величина теоретического (проектного) или номинального периода, равная 2 с, а  $P_\Sigma$  — эмпирический период АЧФ, превышающий  $P_T$  на  $\sim 18$  мкс. Тогда  $t_i$  можно представить двумя способами, введя две последовательности  $T_i$  и  $\delta T_i$ :

$$t_i = t_0 + iP_T + T_i, \quad (1)$$

$$t_i = t_0 + iP_\Sigma + \delta T_i. \quad (2)$$

Последовательность  $T_i$  (параметр  $T_\Phi$  в работе [Сливинский и др., 2009]) называется еще ходом или шкалой времени и имеет существенный регулярный ход, увеличиваясь на одну секунду каждые  $\sim 1,28$  суток. Для его устранения будем рассматривать разность соседних отсчетов  $T_i$ :  $dT_i = T_i - T_{i-1}$  или  $dT_i = t_i - t_{i-1} - P_T = P_i - P_T$ , которая характеризует текущий период качания маятника  $P_i$ . Последовательность  $\delta T_i$  зависит от вариаций возмущений хода АЧФ, так как равна  $\delta T_i = T_i - \tilde{T}_i$ , где  $\tilde{T}_i$  — линейное приближение для шкалы времени. В работе [Сливинский и др., 2009] в качестве  $\tilde{T}_i$  использовались оценки методом наименьших квадратов линейного тренда  $T_i$ . В данной работе  $\tilde{T}_i$  будем вычислять по формуле  $\tilde{T}_i = T_0 + i(P_\Sigma - P_T)$ , которая получается из выражений (1) и (2) для начальных условий  $T_0 \neq 0$ ,  $\delta T_0 = 0$ . В качестве  $T_0$  берется дробная часть начального момента времени, выраженного в секундах. Ниже будет показано, что существует прямая связь  $\delta T_i$  с возмущениями периода колебаний маятника АЧФ. Анализ разностей  $dT_i$  и  $\delta T_i$  как раз и позволяет использовать АЧФ в качестве гравиметра.

**Вариации отклонений хода АЧФ.** С учетом введенных обозначений получаем следующие соотношения для измеренных значений периода качаний маятника и шкалы времени АЧФ:

$$P_i = dT_i + P_T, \quad (3)$$

$$T_i = T_0 + \sum_{j=1}^i dT_j. \quad (4)$$

Исходя из выражения для периода качания маятника  $P = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ , где  $l$  — длина стержня маятника,  $g$  — ускорение свободного паде-

ния, связь между возмущенными величинами в первом приближении будет

$$\Delta P \approx \frac{\tilde{P}}{2} \left( \frac{\Delta l}{\tilde{l}} - \frac{\Delta g}{\tilde{g}} \right), \quad (5)$$

где параметры с тильдой соответствуют невозмущенным значениям. Выражение (5) позволяет оценить чувствительность измерений с помощью АЧФ вариаций гравитационного потенциала в общепринятых единицах Гал (1 Гал =  $10^{-2}$  м/с<sup>2</sup>). Полагая  $\Delta l/l = 0$ , имеем

$$\Delta g = -2\tilde{g} \frac{\Delta P}{\tilde{P}}. \quad (6)$$

Минимальная дисперсия вариации периода часов Федченко на отрезках времени в отсутствии микросейсм составила величину порядка 1 мкс. Полагая  $\Delta P \approx 1$  мкс и  $\tilde{P} = 2$  с, из выражения (6) получаем оценку предельной чувствительности  $|\Delta g| \approx 10^{-6} \tilde{g} \approx 1$  мГал.

В реальных условиях мы не располагаем абсолютно точным значением  $\tilde{P}$ . В качестве максимально приближенного к невозмущенному значению  $\tilde{P}$  использовалось среднее значение периода АЧФ на интервале анализа:

$$\tilde{P} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} dT_j + P_T = \overline{dT} + P_T, \quad (7)$$

где  $N$  — объем выборки для шкалы времени. Используя выражения (3), (5) и (7), уравнение (4) для хода времени АЧФ примет следующий вид:

$$T_i = T_0 + i\overline{dT} + \frac{\overline{dT} + P_T}{2} \sum_{j=1}^i \left( \frac{\Delta l_j}{\tilde{l}} - \frac{\Delta g_j}{\tilde{g}} \right).$$

Или, учитывая малость  $\overline{dT}$  в сравнении с  $P_T$ , получим

$$T_i = T_0 + i\overline{dT} + \frac{P_T}{2} \sum_{j=1}^i \left( \frac{\Delta l_j}{\tilde{l}} - \frac{\Delta g_j}{\tilde{g}} \right).$$

Отсюда, полагая эмпирический период  $P_3$  равным  $\tilde{P}$  и выразив  $\overline{dT}$  через  $P_3$  и  $P_T$ , найдем величину  $\delta T_i$ :

$$\delta T_i \approx \frac{P_T}{2} \sum_{j=1}^i \left( \frac{\Delta l_j}{\tilde{l}} - \frac{\Delta g_j}{\tilde{g}} \right). \quad (8)$$

Из вида выражения (8) следует, что возмущения хода АЧФ складываются из двух факторов — относительных изменений длины стержня и ускорения свободного падения. В свою очередь относительное изменение длины стержня  $\Delta l/l$  состоит из двух независимых величин, зависящих от температуры и деформации. Для  $\Delta g/g$  можно указать, например, такие независимые аддитивные составляющие, как локальные изменения гравитационного потенциала, действия приливных сил планет и Солнца, движения ядра Земли относительно мантии.

Отметим, что согласно выражению (8), каждая  $i$ -я величина  $\delta T_i$  содержит когерентно накопленные возмущения  $\Delta l/l$  и  $\Delta g/g$ . Когерентное накопление вытекает из определения (4) шкалы времени АЧФ. Для последующего анализа будем считать последовательность  $\delta T_i$  главной. Помимо этого можно образовать производные от главной последовательности вида

$$\Delta T_i = \delta T_i - \delta T_{i-1} = dT_i - \overline{dT}.$$

При спектральном анализе полезность производной последовательности состоит в том, что процедура ее составления должна приводить к существенному подавлению низкочастотных когерентных составляющих.

Выражение (8) позволяет проводить моделирование физических процессов, используя различные типы шумовых сигналов и колебательных либо импульсных сигналов. Пусть  $s_j$  — значение смеси сигнала и помехи в момент времени  $j$ , вычисленное в соответствии с принятой моделью. Тогда модельное значение разности хода можно определить, используя выражение (8):

$$\delta \tilde{T}_i = \sum_{j=1}^i s_j. \quad (9)$$

**Результаты анализа длиннопериодических процессов.** В работе [Сливинский и др., 2009] приведены некоторые предварительные результаты гравиметрических измерений на основе показаний АЧФ. Для удобства иллюстрации отклонений  $\delta T_i$  хода времени АЧФ на длительном интервале времени с 11.12.2007

по 10.12.2008 были вычислены среднечасовые значения  $\delta T_i$ , обозначаемые как  $\delta T_k$ , где  $k$  — порядковый номер часа (такая процедура приводит к уменьшению помех приблизительно на два порядка, что должно привести к увеличению чувствительности). При этом оценка  $dT$  была выполнена на всем интервале анализа без прореживания и усреднения. Полученные таким образом  $N$  значений временной последовательности  $\delta T$  длиной 1 год ( $N = 8784$  часов) представлены на рис. 1.

Ярко выраженная мода колебаний характеризуется полугодовым периодом, возможно, связанным с сезонным перераспределением массы Земли в системе Земля — океан — атмосфера [Сидоренков, 2002] либо с особенностями орбитального движения.

Наличие длительных дрейфов в вышеприведенной последовательности представляет определенные трудности для проведения спектральных оценок в высокочастотных областях спектра, в связи с чем в работе [Сливинский и др., 2009] отдельно демонстрировались три спектральных интервала. На подобные трудности указывалось, например, в работе [Peters, 2004], где сигнальная информация предварительно фильтровалась с использованием прореживания и окна Хэннинга. В нашем случае для уменьшения влияния продолжительных дрейфов на высокочастотные участки спектра, которое приводит к их относительному подавлению, использовалась производная главной последовательности  $\Delta T_k = \delta T_k - \delta T_{k-1} = \overline{T_k} - \overline{T_{k-1}} - \left( \overline{\tilde{T}_k} - \overline{\tilde{T}_{k-1}} \right)$ . Согласно выражению (8), величина  $\Delta T_k$  содержит разность возмущений в двух соседних часовых тактах, что должно существенно уменьшать вклад от

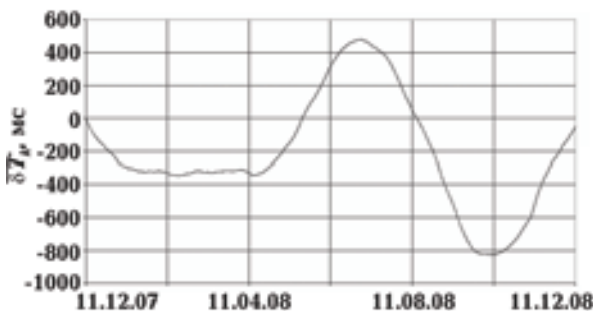


Рис. 1. Среднечасовые отклонения хода времени АЧФ ( $\delta T_k$ ) на интервале наблюдения с 11.12.2007 по 10.12.2008.

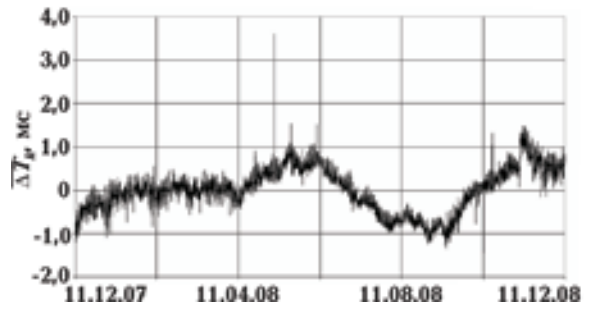


Рис. 2. Производная последовательность ( $\overline{\Delta T_k}$ ) среднечасовых значений хода времени АЧФ на интервале наблюдения с 11.12.2007 по 10.12.2008.

долговременных "регулярных" составляющих, характеризующих длительные дрейфы временных последовательностей (рис. 2). Видно, что амплитуда длиннопериодического полугодового колебания действительно существенно уменьшилась.

На рис. 3 демонстрируется Фурье-преобразование от производной последовательности, приведенной на рис. 2. Амплитуда спектра ( $A$ ) на этом рисунке в наносекундах и соответствует гармоническим составляющим периода колебаний маятника АЧФ или (по определению) разности  $dT$ , т. е. учитывает обработку, которая была применена к исходной выборке  $dT_i$ , а именно, накопление в соответствии с выражением (4), вычисление разности  $\delta T_i$ , ее усреднение на часовых интервалах и, наконец, переход к разностям соседних часовых средних. Отчетливо выделяются лунный месячный период (28,2 дней, что соответствует частоте 0,41 мкГц) и ряд комбинационных периодов, лунные и солнечные суточные колебания (25,8 и 24 часа или 10,8 и

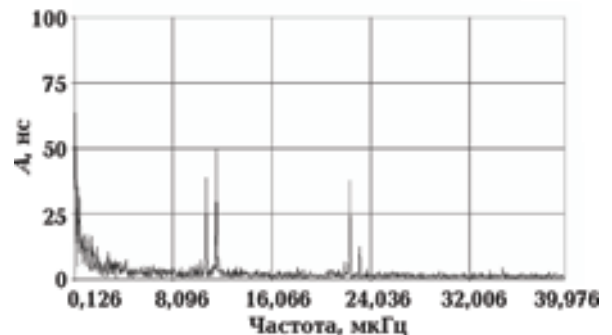


Рис. 3. Спектр производной последовательности  $\overline{\Delta T_k}$ , представленной на рис. 2.

11,6 мкГц соответственно), приливные лунные и солнечные колебания с периодами 12,6, 12,4 (максимум — 22,4 мкГц) и 12 часов. Кроме того, выделены колебания с периодами ~ 8 часов (34,7 мкГц), которые связываются со свободными колебаниями динамической системы эластичная мантия — ядро Земли [Баркин, 2005].

Разумеется, все особенности спектрального распределения в основном сохранились такими же, как это было изложено в работе [Сливинский и др., 2009], но теперь, за счет существенного подавления основной низкочастотной составляющей, остальные спектральные линии отчетливо видны на одном графике.

**Моделирование вариаций хода и периода АЧФ.** Моделирование временной последовательности вариаций хода АЧФ проводилось на основании выражения (9) для случая, когда  $s$  является аддитивной смесью помехи и гармонических колебаний:

$$s_j = \varepsilon_j + \sum_{m=0}^{M-1} A_m \sin \left( 2\pi \frac{f_m}{f_{\text{dis}}} j + \psi_m \right), \quad (10)$$

где  $j$  — порядковый номер отсчета моделируемой смеси (сигнал + шум);  $\varepsilon_j$  — выборочное значение случайной величины (шума);  $f_{\text{dis}} = 0,5$  Гц — частота дискретизации;  $M$  — количество колебаний (мод) сигнала;  $A_m, f_m, \psi_m$  — амплитуда, частота и начальная фаза  $m$ -го колебания,  $m = 0, \dots, M-1$ .

Для моделирования были избраны семь основных экспериментально выделенных мод, т. е.  $M = 7$ , параметры которых приводятся в табл. 1. Амплитуды  $A_m$  и фазы  $\psi_m$  избранных мод оценивались методом ДПФ экспе-

риментальной временной последовательности среднечасовых вариаций хода АЧФ  $\overline{\delta T_k}$ , представленной на рис. 1, с учетом обработки, которая была применена к исходной выборке  $dT_i$  для вычисления  $\overline{\delta T_k}$ . Найденные указанным образом амплитуды практически не отличаются от величин, представленных на рис. 3 и полученных по выборке  $\Delta T_k$ . Для приближенных оценок можно использовать следующее соотношение между  $A_m$  и амплитудой  $a_m$  гармонических составляющих главной последовательности  $\delta T_i$ :

$$A_m \approx \frac{a_m}{n_m} \pi, \quad (11)$$

где  $n_m$  — объем выборки (количество отсчетов) на интервале времени, равном половине периода частоты  $f_m$ , в то же время приведенное соотношение может быть получено из выражения (8) после подстановки под знак

$$\text{суммы } A_m \sin \left( 2\pi \frac{f_m}{f_{\text{dis}}} j + \psi_m \right).$$

На рис. 4 представлены модельные расчеты временной последовательности вариаций хода  $\delta T_k$  (тонкая линия и шкала ординат слева) и вариаций производной последовательности  $\Delta T_k$  (шкала ординат справа) АЧФ, выполненные в соответствии с уравнениями (9) и (10) и с учетом семи гармоник (см. табл. 1) и шума  $\varepsilon_n$ , закон распределения которого был нормальным со средним  $\bar{\varepsilon} = 18$  мкс и СКО, равным 3 мкс.

Из сравнения экспериментальных данных (см. рис. 1, 2) с результатами модельных расчетов (см. рис. 4) следует их хорошее качественное совпадение.

**Т а б л и ц а 1.** Параметры семи основных мод колебаний, выделенных из временной последовательности среднечасовых вариаций хода АЧФ, представленной на рис. 1

Мода колебаний ( $m$ )	Амплитуда ( $A_m$ ), мкс	Период $\left( \frac{1}{f_m} \right)$	Начальная фаза ( $\psi_m$ ), град
0	0,121	366 дней	3,7
1	0,285	183 дня	135,7
2	0,154	122 дня	229,5
3	0,088	91,5 дня	194,6
4	0,043	25,8 часа	124,4
5	0,046	23,9 часа	98,1
6	0,039	12,4 часа	152,0

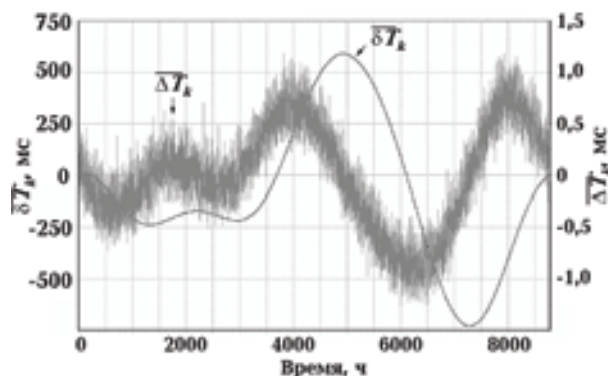


Рис. 4. Результаты моделирования главной и производной последовательностей  $\delta T_k$  и  $\Delta T_k$ .

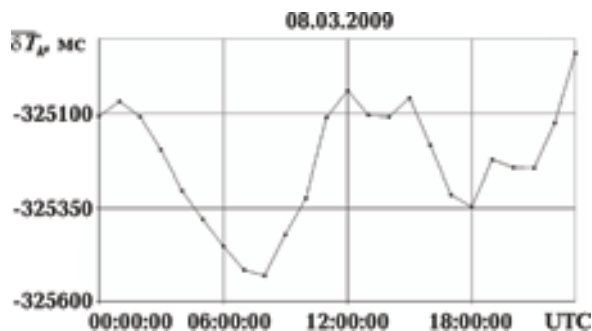


Рис. 6. Среднечасовая главная последовательность хода АЧФ ( $\delta T$ ), полученная 08.03.2008.

**Предварительная калибровка АЧФ в качестве гравиметра.** Значимость амплитуды спектральной плотности лунного приливного периода (12,4 часа) позволяет провести непосредственное сравнение отклонений хода АЧФ, обусловленных лунными приливами, с аналогичными данными других исследователей. На рис. 5, взятом из работы [Agora et al., 2008], приводятся изменения гравитационного потенциала за счет лунных приливов, полученные на сверхпроводниковом гравиметре SG TT70. Амплитуда колебаний гравитационного потенциала при этом составила величину  $\Delta g \approx 80$  мГал.

Из данных, представленных на рис. 6, следует, что также, как и на рис. 5, период основной моды отклонений хода АЧФ соответствует лунному приливному периоду, а отклонение показаний АЧФ составило величину  $a \approx 250$  мкс, которая после учета когерентного накопления по порядку величины совпадает с амплитудой  $A_m \approx 0,04$  мкс из табл. 1 для  $m = 6$ .

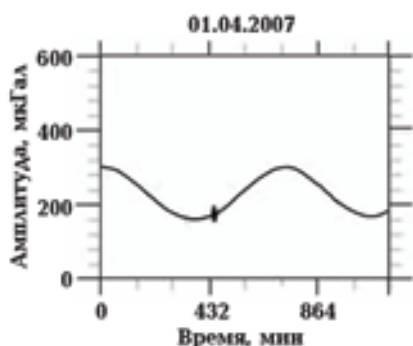


Рис. 5. Изменения гравитационного потенциала, наблюдавшиеся на сверхпроводниковом гравиметре SG TT70 в течение суток 01.04.2007 г.

Сравнение показаний АЧФ и сверхпроводникового гравиметра позволяет величине отклонения периода АЧФ (равной 0,5 нс) формально поставить в соответствие  $\sim 1$  мкГал, или 0,5 мкс соответствуют  $\sim 1$  мГал, что в два раза отличается от значений, полученных непосредственно из выражения (6), где 1 мкс соответствует 1 мГал. Таким образом, несмотря на упрощенность проведенных сравнительных оценок амплитуды лунных приливов, можно считать удовлетворительным совпадение этих двух независимых оценок величины флуктуаций периода колебаний АЧФ в размерных единицах гравитационного потенциала (Гал). Последнее обстоятельство позволяет с доверием относиться к экспериментальным данным, получаемым с помощью АЧФ.

На сайте <http://www.gg.uwyo.edu/> по данным Потсдамского геофизического института приводятся примеры уровней вариаций гравитационного потенциала для хорошо известных наблюдаемых явлений (табл. 2).

Для реальных условий дислокации АЧФ (близость автотрассы, строительные-монтажные работы, хозяйственная деятельность и пр.) экспериментальные значения вариаций хода АЧФ для физических процессов, указанных в первом пункте табл. 2, которые можно рассматривать как импульс, либо как кратковременное увеличение дисперсии, составляют величины от 10 до 100 мкс, что соответствует вариациям гравитационного потенциала в интервале от 5 до 50 мГал. Такие величины на три-четыре порядка превышают помеховую обстановку, оцениваемую для места дислокации сверхпроводниковых гравиметров. Значения амплитуды отклонений хода АЧФ для землетрясений характеризуются внезапным

**Т а б л и ц а 2. Примеры вариаций гравитационного потенциала по данным Потсдамского геофизического института\* и периода колебаний АЧФ в зависимости от физического фактора**

Длительность периода физического воздействия	Физический фактор	Вариации гравитационного потенциала (Потсдам)	Вариации периода колебаний АЧФ
0,1—10 с	Природные или производимые человеческой деятельностью микросейсмы	> 100 мкГал	> 50 нс
0,1—20 с	Землетрясения	> 1000 мкГал	> 1 мкс
1 мин — 1 ч	Свободные колебания Земли	> 1 мкГал	> 0,5 нс
1 мин — 1 ч	Вариации атмосферного давления	> 20 мкГал	> 4 нс
8 ч — 1 год	Притяжения небесных тел	> 300 мкГал	> 0,15 мкс
—	Вариации грунтовых вод	~ 10 мкГал/м	~ 5 нс/м
365 дней	Ежегодные приливные волны	до 3—6 мкГал	до 1—3 нс
436 дней	Чэндлеровская мода	> 10 мкГал	> 5 нс
—	Постледниковые вертикальные смещения масс либо производимые за счет человеческой деятельности, а также за счет пред- и постсейсмических изменений	< 1 мкГал	< 0,5 нс
4—8 ч	Слитеровские моды	~ 1 нГал	~ 10 <sup>-3</sup> нс
—	Моды ядра Земли	~ 1 нГал	~ 10 <sup>-3</sup> нс
—	Околонежное свободное колебание Земли	~ 10 нГал	~ 5 · 10 <sup>-3</sup> нс

Примечание: \* — данные взяты с сайта <http://www.gg.uwo.edu/geol2005a/lectures/lec3/gravity%20variations%20in%20time.PDF>.

скачком от 1 мкс (1 мГал) до 300 мкс (150 мГал) с последующим постепенным затуханием. Эта особенность поведения позволяет легко отличать ее на фоне множественных микросейсм. Физические процессы, указанные в остальных десяти пунктах табл. 2, несмотря на свою очевидную малость, могут реально проявиться в изменениях хода АЧФ за счет когерентного накопления колебаний с достаточно длительными периодами, которое следует из выражения (8), либо за счет достаточно длинной выборки для Фурье-преобразования.

**Свободные колебания Земли, обусловленные сильным землетрясением.** После землетрясения вблизи о-ва Суматра 26.12.2004 многими исследователями с помощью сверхпроводниковых гравиметров были зафиксированы свободные колебания Земли как сфероидального, так и тороидального типов, параметры

которых приведены, например, в работах [Aroga et al., 2008; Nath et al., 2005; Park et al., 2005].

Наиболее полный объем наблюдаемых экспериментальных данных по сферическим колебаниям Земли, вызванным землетрясением 26.12.2004, изложен в работе [Lei et al., 2007] и представлен в табл. 3. Здесь базовые моды свободных колебаний Земли обозначены символами  ${}_0S_n$  и рядом с ними приводятся соответствующие номиналы частот ( $f$ ) в мГц. Для диапазона периодов сферических колебаний длина когерентного накопления составляет ~ 1000 тактов. Кроме того, согласно данным табл. 2 и в соответствии с выражением (11), отклонение хода АЧФ составит величину ~ 1 мГал, что находится на пределе чувствительности АЧФ. Однако в данной работе когерентное накопление сферических колебаний не производилось. Для их выделения ис-

**Т а б л и ц а 3. Частоты базовых сферических колебаний Земли, возбужденных большим землетрясением вблизи о-ва Суматра 26.12.2004, по данным [Lei et al., 2007]**

${}_0S_n$	$f$ , мГц	${}_0S_n$	$f$ , мГц	${}_0S_n$	$f$ , мГц	${}_0S_n$	$f$ , мГц
${}_0S_0$	0,8145	${}_0S_{11}$	1,8642	${}_0S_{21}$	2,9783	${}_0S_{31}$	3,9067
${}_0S_2$	0,3095	${}_0S_{12}$	1,9905	${}_0S_{22}$	3,0749	${}_0S_{32}$	3,9983
${}_0S_3$	0,4687	${}_0S_{13}$	2,1143	${}_0S_{23}$	3,1714	${}_0S_{33}$	4,098
${}_0S_4$	0,6474	${}_0S_{14}$	2,2331	${}_0S_{24}$	3,2655	${}_0S_{34}$	4,1716
${}_0S_5$	0,8393	${}_0S_{15}$	2,3470	${}_0S_{25}$	3,3621	${}_0S_{35}$	4,2583
${}_0S_6$	1,0386	${}_0S_{16}$	2,4609	${}_0S_{26}$	3,4561	${}_0S_{36}$	4,3548
${}_0S_7$	1,2304	${}_0S_{17}$	2,5698	${}_0S_{27}$	3,5453	${}_0S_{37}$	4,4415
${}_0S_8$	1,4112	${}_0S_{18}$	2,6763	${}_0S_{28}$	3,6344	${}_0S_{38}$	4,5281
${}_0S_9$	1,5770	${}_0S_{19}$	2,7778	${}_0S_{29}$	3,7235	${}_0S_{39}$	4,6222
${}_0S_{10}$	1,7256	${}_0S_{20}$	2,8793	${}_0S_{30}$	3,8176	${}_0S_{40}$	4,7113

пользовалось частотное разрешение, т. е. применялось преобразование Фурье с большим основанием, соответствующим 30 суткам с 12.05.08 по 12.06.08. Выбранный интервал времени сразу следовал за разрушительным Сычуаньским землетрясением с магнитудой  $M = 7,8$ , произошедшим 12.05.2008. Спектральному анализу подвергалась временная последовательность 2-секундных отсчетов величины  $\Delta T_i$  (рис. 7).

ваньским землетрясением с магнитудой  $M = 7,8$ , произошедшим 12.05.2008. Спектральному анализу подвергалась временная последовательность 2-секундных отсчетов величины  $\Delta T_i$  (рис. 7).

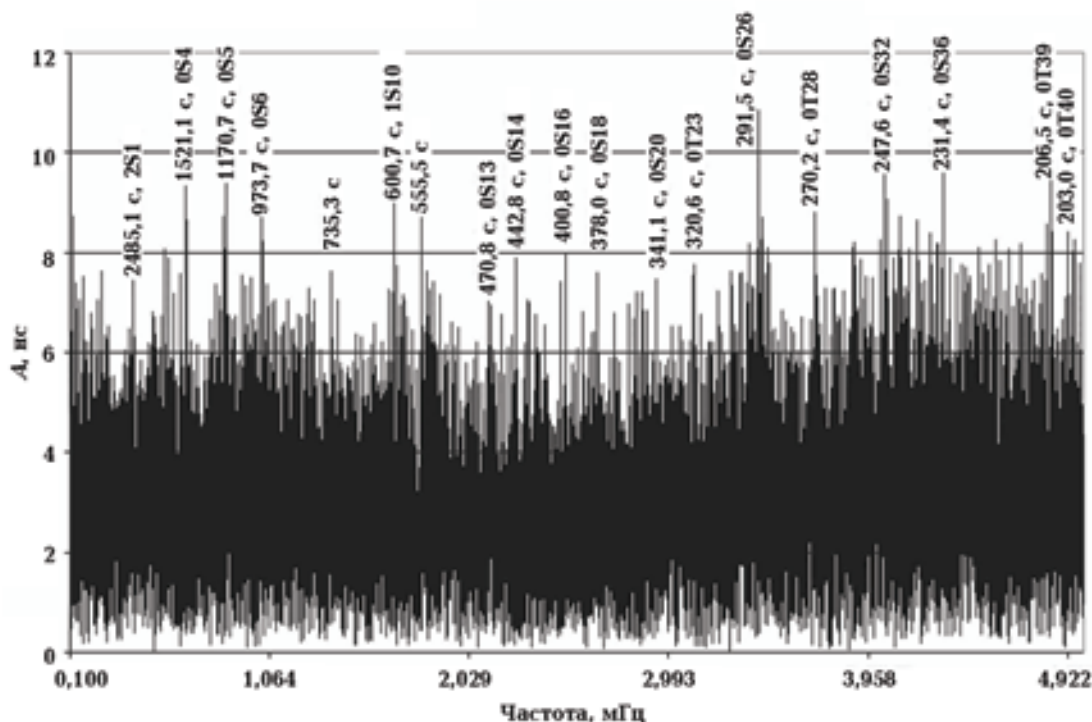


Рис. 7. Спектр производной последовательности  $\Delta T_i$  в диапазоне частот 0,1 до 5 мГц, полученный на интервале времени с 12.05.08 по 12.06.08, следующем сразу за разрушительным Сычуаньским землетрясением 12.05.2008.



Здесь ось абсцисс соответствует частоте колебаний, а ось ординат — амплитуде спектральных составляющих. Для локальных максимумов спектра, которые удалось отождествить со свободными колебаниями Земли, сверху приводится значение периода колебаний и символ соответствующей шаровой функции. Из сравнения данных, представленных на рис. 7 и помещенных в табл. 3, следует, что из 39 колебаний, наблюдаемых после землетрясения вблизи о-ва Суматра 26.12.2004, в случае более слабого Сычуаньского землетрясения 12.05.08 уверенно проявились 19 колебаний. Большой энергетикой при этом обладали более высокочастотные сферические колебания Земли.

**Микросейсмы, порождаемые ветровыми нагрузками.** В работе [Сливинский и др., 2009] впервые было отмечено, что развитие ураганного ветра с 22.11.2008 на 23.11.2008 (скорость отдельных порывов ветра достигала 90 км/ч) привело к существенному увеличению дисперсии показаний  $dT_i$  и усилению акустических шумов в окрестности периодов колебаний порядка 6,6—4,5 с. Подобные возмущения ранее были обнаружены также по данным сейсмических станций во время прохождения урагана "Катрин" в мексиканском заливе, когда наблюдались многочисленные "микросейсмы" за счет океанических возмущений (данные представлены на сайте <http://arxiv.org/html/physics/0506162>). В нашем случае микросейсмы могли порождаться "дрожью" поверхности земли, возникающей за счет ветровой нагрузки 185-метровой телевизионной вышки, расположенной в ~250 м от места установки АЧФ. Следовательно, на первый взгляд независимые физические механизмы имеют тождественное проявление и вызывают увеличение спектральной плотности показаний в окрестности периодов колебаний порядка 6,6—4,5 с.

Для дополнительного подтверждения подобного явления было рассмотрено развитие штормового ветра 22.05.2009 — динамику изменения скорости ветра по данным метеостанции НИИ НАО (<http://www.mao.nikolaev.ua/eng/meteo.html>) и отклонений хода АЧФ.

Из данных, приведенных на рис. 8, следует, что возникновение и исчезновение множественных микросейсм отчетливо коррелирует с развитием и угасанием штормового ветра; а на рис. 9 — что произошло усиление колебаний с периодами около 6—4,5 с, тем самым подтвердились результаты работы [Сливин-

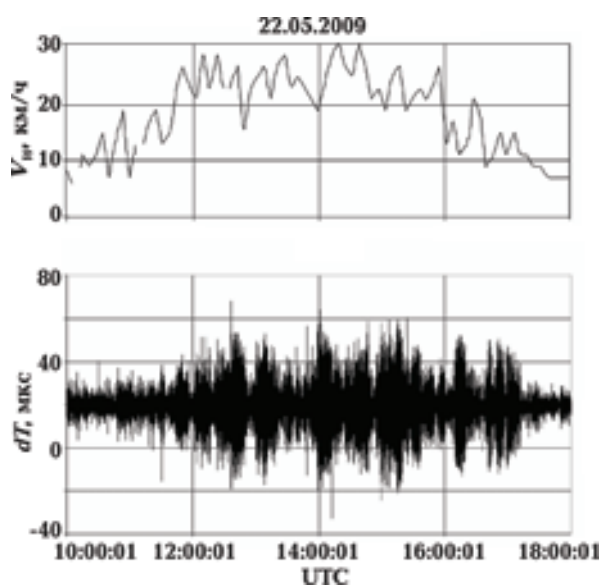


Рис. 8. Графики изменения скорости ветра ( $V_w$ ) и показаний АЧФ ( $dT_i$ ) во время развития штормового ветра 22.05.2009 с 10 : 00 до 18 : 00 UTC.

ский и др., 2009] о подобию физических механизмов, порождающих микросейсмы на суше и на море.

**Аномалии показаний АЧФ, предшествующие приходу сейсмических волн.** Сейсмическая волна деформации при ее достаточной энергии по достижении маятника могла вызвать дополнительное увеличение флуктуаций момента размыкания контактов АЧФ, что, в свою очередь, увеличивало разброс показаний часов Федченко [Сливинский и др., 2009]. С момента публикации указанной работы с помощью АЧФ было дополнительно зарегистрировано еще 31 событие (землетрясение). При этом в 10 событиях было обнаружено заметное уменьшение дисперсии показаний АЧФ

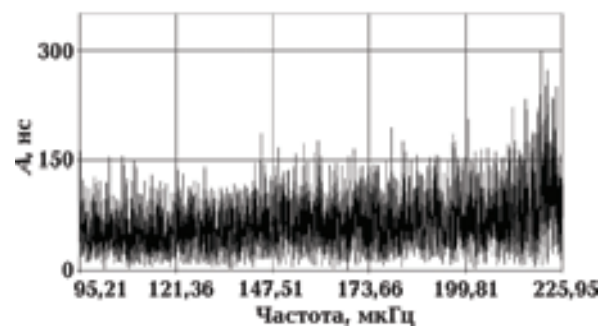


Рис. 9. Спектр показаний АЧФ ( $dT_i$ ) на отрезке времени с 10 : 00 до 18 : 00 UTC 22.05.2009.

( $dT_i$ ) на интервале времени за несколько минут перед приходом сейсмической волны. В то же время на временной последовательности  $\delta T_i$  визуально выделялся колебательный процесс с периодом от нескольких десятков до нескольких сотен секунд. В статье [Сливинский и др., 2009] подобный феномен был обозначен как "предшественник" и была предложена его физическая и теоретическая интерпретация.

**Выводы.** Описаны технические характеристики и предложен метод обработки показаний АЧФ для целей исследований сейсмических и геодинамических процессов. Подтверждены хорошо известные лунный месячный период (28,2 дней) и ряд комбинационных периодов, лунные и солнечные суточные колебания (25,8, 24 ч), приливные лунные и солнечные колебания с периодами 12,6, 12,4 (максимум) и 12 ч соответственно. Кроме того, выделены колебания с периодами 8 ч, которые связываются со свободными колебаниями динамической системы эластичная мантия — ядро Земли. Из сравнения амплитуд хорошо известных приливных возмущений гравитационного потенциала Земли, полученных на сверхпроводниковых гравиметрах, с измерениями отклонений показаний АЧФ полу-

чено соответствие единиц измерения. Предложены модель отклонений показаний хода АЧФ для имитации физических процессов, определяющих динамику возмущений, и метод уменьшения влияния длиннопериодических составляющих на качество высокочастотных составляющих спектра сигнальной информации. Обнаружены свободные сферические колебания Земли, порожденные сильным Сычуаньским землетрясением. По сравнению с последствиями землетрясения на о-ве Суматра 26.12.2004 число выявленных мод оказалось вдвое меньше, а энергетика мод проявилась в более высокочастотной области спектра. Подтвердились спектральные особенности микросейсм, порождаемых сильными ветровыми нагрузками. Дополнительно подтверждены специфические искажения показаний АЧФ за несколько минут перед приходом сейсмических волн от некоторых сильных землетрясений.

**Благодарности.** Авторы считают своим долгом выразить благодарность заведующему лабораторией околоземной астрономии НИИ НАО А. В. Шульге за постоянное внимание к работе, стимулирующие дискуссии и замечания, а также А. П. Александрову за внимательное прочтение работы и ценные замечания.

### Список литературы

- Баркин Ю. В. Колебания системы ядро — мантия Земли и их отражение в природных процессах. Нелинейный мир: Тез. докл. X междисциплин. науч. конф. 27 июня — 2 июля 2005. Выпуск 10. — Нижний Новгород: ННГУ, 2005. — С. 15.
- Демидов В. Е. Время, хранимое как драгоценность. — Москва: Знание, 1977. — 66 с.
- Козырева Л. И., Мишина Р. Л., Сигорин А. Я. Организаторы первых инструментальных сейсмических наблюдений в России: И. Е. Кортацци (1837—1903) и Г. В. Левицкий (1852—1917) // Геофиз. исследования. — 2007. — Вып. 7. — С. 146—147.
- Петров Г. М., Пинигин Г. И. Иван Кортацци — астроном Черноморского флота. — Николаев: Атолл, 2006. — 126 с.
- Пинигин Г. И., Эраль С. Ф. Династия астрономов Кнорре. — Николаев: Атолл, 2009. — 144 с.
- Сливинский А. П., Бушуев Ф. А., Калюжный Н. А. Аномалии показаний астрономических часов Федченко перед некоторыми сильными землетрясениями // Сейсм. приборы. — 2009. — Вып. 45, № 1. — С. 62—76.
- Сигоренков Н. С. Физика нестабильности вращения Земли. — Москва: Физматлит, 2002. — 384 с.
- Peters R. D. Folded Pendulum Measurements of Earth's Free Oscillations. — 2004. — <http://physics.mercer.edu/petepag/eigen.html>
- Arora B.R., Kamal J., Kumar A., Rawat G., Kumar N., Choubey V.M. First observations of free oscillations of the earth from Indian superconducting gravimeter in Himalaya // Current Sci. — 2008. — 95, № 11. — P. 1611—1617. — <http://www.ias.ac.in/currsci/dec102008/1611.pdf>
- Nath S.K., Bhattacharya S.N., Vyas M., Pal I., Sengupta P., Mitra S., Mohanty W. K., Ganguli S. S. The great Sumatra — Andaman earthquake of

- 26 December 2004 as perceived from the broadband seismograms of Indian Institute of Technology, Kharagpur Seismological Observatory // *Current Sci.* — 2005. — **88**, № 9. — P. 1381—1383. — <http://www.ias.ac.in/currenscimay102005/1381.pdf>
- Park J., Song T.A., Tromp J., Oka E., Stein S., Rault G., Clevede E., Laske G., Kanamori H., Davis P., Berger J., Braitenberg C., Camp M.V., Lei X., Sun H., Xu H., Rosat S.* Earth's Free Oscillations Excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman Earthquake // *Science.* — 2005. — **308**. — P. 1139—1144. — <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/308/5725/1139>
- Lei X. E., Sun H. P., Hsu H. T., Shi Y. L.* Check of Earth's free oscillations excited by Sumatra-Andaman Large Earthquake and discussions on the anisotropy of inner core // *Science in China Series D-Earth Sciences.* — 2007. — **50**, № 6. — P. 909—917. — <http://www.scichina.com:8080/sciDe/EN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=307462>