

## Электромагнитные предвестники сильных землетрясений

© А. П. Сливинский<sup>1,2</sup>, Ф. И. Бушуев<sup>1</sup>, Н. А. Калюжный<sup>1,2</sup>, 2009

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория»,  
Николаев, Украина.

<sup>2</sup>Украинский радиотехнический институт, Николаев, Украина  
Поступила 10 ноября 2008 г.

*Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом*

На аппаратурному комплексі НДІ МАО по аномально великому відхиленню ходи годинника Федченка виділяються сейсмічні хвилі від деяких сильних землетрусів (Куріли, Пакистан, Індонезія, Малукське море, Туреччина, Греція та ін.). За декілька хвилин перед сейсмічною хвилею спостерігалось зменшення дисперсії показів астрономічного годинника Федченка, припустимо обумовлене приходом понаднизькочастотного електромагнітного випромінювання із епіцентра землетрусу. Подібні явища відмічалися раніше багатьма дослідниками при проведенні вибухових робіт.

On an equipment complex of research institute NAO longitudinal seismic waves from some strong earthquakes (Kuril Islands, Pakistan, Indonesia, Molucca sea, Greece and so forth) were recorded through abnormal deviations of the time dependence of Fedchenko's clock. Decreasing of a dispersion of indications of Fedchenko's clock presumably caused by arrival of an infra low frequency electromagnetic radiation from the epicenter of an earthquake was observed some minutes before the seismic wave. Similar phenomena (electromagnetic disturbances previous seismic waves from sources of explosions) were registered by many researches at carrying out of explosive works.

**Введение.** При проведении взрывных работ наряду с регистрацией электромагнитного излучения осуществлялась регистрация сейсмических волн деформации [Поиск..., 1988; Soloviev, Sweeney, 2005]. Наблюдалось электромагнитное излучение как опережающее сейсмические волны, так и совпадающее со временем их прихода. Скорость распространения сейсмической волны составила  $V_{PWF} \approx 4$  км/с. Предшествующее сейсмической волне электромагнитное излучение с периодом  $T \approx 10$  мс объяснялось электрическим дипольным излучением (ЭДИ) от источника взрыва [Soloviev, Sweeney, 2005]. По мнению авторов в эпицентре взрыва образование и разделение электрических зарядов формирует электрический ток, обуславливающий наблюдавшееся низкочастотное ЭДИ. По данным, представленным в работе [Soloviev, Sweeney, 2005], оценка скорости  $V_{ЭДИ}$  составляла  $\approx 38$  км/с. В связи с отсутствием специальной аппаратуры в НИИ НАО для регистрации прихода сейсмических волн использовался мониторинг показаний (хода) астро-

мических часов Федченко (АЧФ). В процессе анализа показаний АЧФ за несколько минут перед приходом сейсмических волн от некоторых сильных землетрясений наблюдались специфические искажения хода часов, на наш взгляд связанные с приходом электромагнитного предвестника землетрясения типа ЭДИ, сформировавшегося в эпицентре землетрясения.

**Характеристики астрономических часов Федченко.** В книге [Демидов, 1977] автор приводит слова знаменитого пулковского астронома, директора Главной астрономической обсерватории, профессора В.А. Крата: «Часы АЧФ являются лучшими из всех существующих типов маятниковых часов...» и от себя дополняет: «Маятниковые часы сегодня сменили профессию. Это уже не столько устройство для измерения времени (его гораздо лучше хранят атомные, квантовые генераторы), сколько точнейший гравиметрический прибор». С июля 2005 г. в НИИ НАО регулярно с тактом 2 с производится цифровая запись показаний времени часов Федченко.

Столь низкая тактовая частота записи данных существенно отличает этот регистрирующий прибор от традиционных сейсмодатчиков. АЧФ представляют собой вертикально подвешенный маятник, заключенный в герметичную колбу, вакуум внутри которой поддерживается на уровне ~4 мм ртутного столба. На рис. 1 приведена схема устройства АЧФ. Маятник состоит из стальных неподвижной 1 и подвижной 2 штанг (диаметром 6 мм и длиной 1 м, что соответствует периоду колебаний маятника 2 с) и прикрепленного к ней снизу груза массой 8 кг. Моменты времени  $T_{\Phi}$  показаний АЧФ определяются при замыкании и размыкании платиновых контактов 3, расположенных в верхней части колбы на неподвижной и подвижной штангах. В нижней части колбы для компенсации потерь механической энергии при движении маятника находится магнитоэлектрический при-

вод, состоящий из двух частей — подвижной и неподвижной. К нижнему концу подвижной части прикреплены два постоянных магнита 4 и 5. Неподвижная часть состоит из прямоугольной катушки  $W$  и электронной схемы, смонтированных в специальном отсеке пластмассовой пластины. Обмотка катушки имеет две секции. Одна секция освобождения — с нее снимается сигнал, отпирающий схему. Другая импульсная — на нее подается импульс тока от внешнего источника. В секциях катушки во время движения маятника возникают противоположные токовые импульсы. Взаимодействие магнитного поля катушки, определяемое величиной разности положительного и отрицательного импульсов, с полем постоянных магнитов создает необходимый подталкивающий импульс. Нормальная амплитуда колебаний маятника для АЧФ находится в пределах 90—110 дуговых мин. Источником питания АЧФ служит окисно-ртутный элемент  $E$  напряжением 1,4 В, что обеспечивает независимость работы электронной схемы от напряжения питающей цепи на пункте регистрации. Минимальная дисперсия показаний времени по часам Федченко составляет ~1 мкс. Подробное описание устройства АЧФ приведено в книге [Пипуныров, 1982].

Понятно, что наблюдения сейсмических событий с использованием АЧФ в силу указанных особенностей их устройства, могут содержать качественные отличия от данных, получаемых традиционными сейсмодатчиками.

Моменты  $T_{\Phi}$  показаний маятника сверялись с показаниями времени атомного стандарта частоты  $T_a$  службы времени НИИ НАО и оцифровывались. Для каждого  $i$ -го такта определялась разность  $T_{a\Phi i} = (T_a - T_{\Phi})_i$ . Для устранения существенного регулярного отклонения хода часов Федченко дополнительно составлялись и анализировались разности  $\Delta T_{a\Phi i} = T_{a\Phi i} - (ai + b)$ , где  $a$  и  $b$  — коэффициенты линейной аппроксимации показаний  $T_{a\Phi i}$  методом наименьших квадратов,  $\Delta T_{a\Phi i-1} = \Delta T_{a\Phi i} - \Delta T_{a\Phi i-1}$  и  $\tau_{i,i-1} = T_{a\Phi i} - T_{a\Phi i-1}$ .

Сейсмическая волна деформации при ее достаточной энергии, достигая маятник, может вызвать дополнительное увеличение флуктуаций моментов замыкания и размыкания платиновых контактов 3 (см. рис. 1), что, в свою очередь, может увеличить разброс показаний часов Федченко.

**Результаты анализа.** Учитывая уникальную чувствительность АЧФ к изменениям гравитационного поля, был проведен спектральный

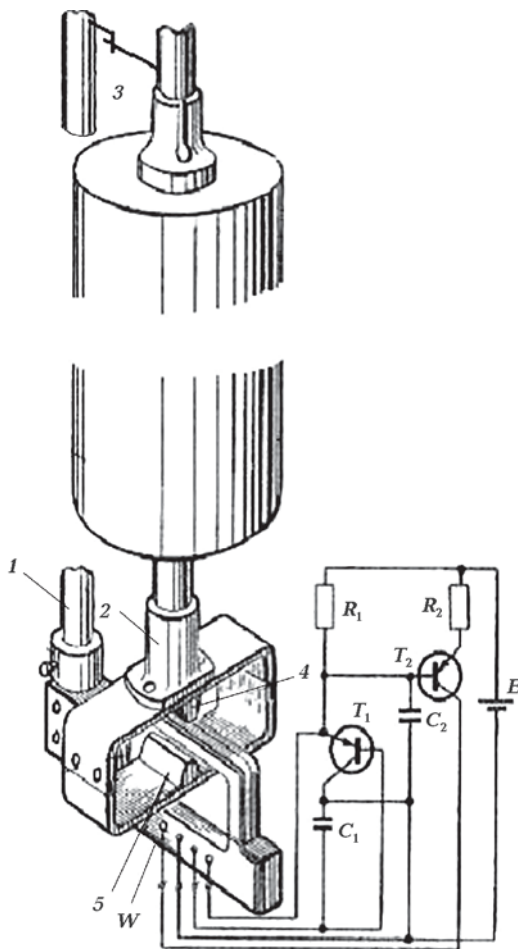


Рис. 1. Схема устройства АЧФ.

анализ массива наблюдаемых данных по показаниям АЧФ, усредненным на часовых интервалах времени (с 01.05.2008 по 31.05.2008). При этом отчетливо выделялись суточные и полусуточные колебания за счет притяжения Солнца и Луны. В дополнение к этому на избранном интервале времени с 01.05.2008 г. по 31.05.2008 г. проводился сравнительный анализ показаний АЧФ, усредненных на часовых интервалах, и значений температуры и давления, зарегистрированных метеостанцией НИИ НАО (см. <http://www.mao.nikolaev.ua/rus/meteo.html>). Корреляций показаний АЧФ и хода температуры и давления не выявлено.

С момента начала регулярной регистрации времени было зафиксировано 29 аномальных отклонений показаний часов, связыва-

емых с землетрясениями, указанными в таблице. Здесь не приводятся события, попавшие на периоды времени неисправностей аппаратуры и сбоях электропитания.

На рис. 2 приведен пример выделения сейсмической волны по показаниям АЧФ для землетрясения в Пакистане 08.10.2005 г. с эпицентром на расстоянии  $R = 3720$  км от пункта регистрации в НИИ НАО. По оси абсцисс отложено текущее время UTC, а по оси ординат — величины  $\Delta T_{a\Phi_i}$  и  $\Delta T_{\Phi_i, i-1}$ . Согласно данным, представленным на рис. 2 и в таблице, существенное увеличение величин  $\Delta T_{a\Phi_i}$  и  $\Delta T_{\Phi_i, i-1}$  произошло в 03:57:20, т. е. спустя  $\Delta t = 402$  с после первого удара. Отсюда оценка скорости распространения сейсмической волны деформации  $V_{p\approx} R/\Delta t \approx 9,3$  км/с. На

Характеристики землетрясений, зарегистрированных с начала пуска астрономических часов Федченко

№ п/п	Дата	Время, UTC	Район	$H$ , км	$M$	$R$ , км	$V_p$ , км/с	$V_{p\approx}$ , км/с	$T$ , с
1	2005.10.08	03:50:38	Пакистан	10	7,6	3720	9,3	9,5	120
2	2007.01.13	04:23:20	Курильские о-ва	10	8,2	8230	11,6	11,7	—
3	2007.03.09	03:22:43	Приморье	436	6,0	7380	10,6	12,5	—
4	2007.08.08	17:04:57	о-в Ява	280	7,5	9420	13,1	13,4	100
5	2007.09.12	11:10:26	о-в Суматра	30	8,4	8840	11,4	12,4	—
6	2007.09.12	23:49:01	о-в Суматра	10	7,8	8640	11,4	12,4	260
7	2007.09.28	13:38:58	Марианские о-ва	261	7,4	9690	13,1	13,3	—
8	2007.12.20	09:48:30	Турция	10	5,3	860	6,8	8	—
9	2007.12.26	23:47:12	Турция	10	5,3	830	6,8	7,8	250
10	2008.01.06	05:14:17	Греция	51	6,1	1320	7,7	8	150
11	2008.01.09	08:26:45	Китай	10	6,4	4730	9,9	10,3	106
12	2008.01.15	17:52:16	о-ва Фиджи	596	6,5	16050	14,4	14,1	360
13	2008.02.08	09:38:14	Северная Атлантика	10	6,9	7910	11,6	11,6	—
14	2008.02.20	18:27:11	Греция	35	6,1	1420	7,6	7,5	220
15	2008.03.03	14:11:14	Филиппины	18,5	6,9	9200	12,3	12,5	128
16	2008.03.20	22:33:00	Китай	22,9	7,2	4250	9,8	9,6	82
17	2008.03.28	00:16:23	Греция	59	5,8	1430	8,1	7,9	134
18	2008.04.09	12:46:13	Океания	35	7,3	15110	13,1	12,6	—
19	2008.05.07	08:00:22	Украина	10	4,9	195	5,7	5,5*	—
20	2008.05.12	06:28:01	Китай	10	7,8	6180	10,7	10,2	60
21	2008.06.01	01:57:23	Филиппины	22,4	6,4	8340	11,4	11,7	—
22	2008.06.08	12:25:29	Греция	10	6,1	1310	7,6	7,8	72
23	2008.06.13	23:43:46	Япония	10	6,8	8120	11,7	11,1	—
24	2008.06.18	01:58:43	Греция	65,8	5,4	1270	8	7,8	28
25	2008.07.13	14:58:32	Тайвань	10	6,2	8250	11,7	11,9	—
26	2008.07.15	03:26:37	Греция	68,4	6,4	1270	7,8	8,1	1060
27	2008.07.23	15:26:20	Япония	108	6,8	8110	11,9	11,9	48
28	2008.09.10	11:00:35	Иран	15	6,1	3050	8,7	9,2	242
29	2008.10.05	15:52:49	Киргизия	27	6,6	3440	8,7	9,3	230

Примечание:  $H$  и  $M$  — глубина очага и магнитуда землетрясения,  $R$  — расстояние от эпицентра землетрясения до пункта регистрации в г. Николаев,  $V_p$ ,  $V_{p\approx}$  — скорости распространения продольной сейсмической волны по данным АЧФ и данным ближайших к г. Николаеву сейсмостанций, представленным на сайтах <http://www.iris.edu/> и <http://earthquake.usgs.gov/>,  $T$  — период ЭДИ. \* — оценка скорости получена по данным сейсмостанции NE56 вблизи г. Одесса, предоставленным М. А. Лазаренко (Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины).

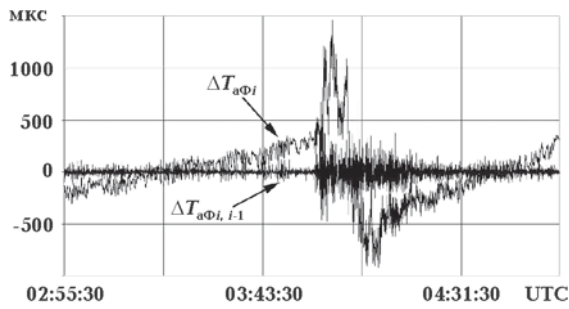


Рис. 2. Выделение сейсмической волны по показаниям АЧФ для землетрясения в Пакистане 08.10.2005 г. (03:50:38 UTC).

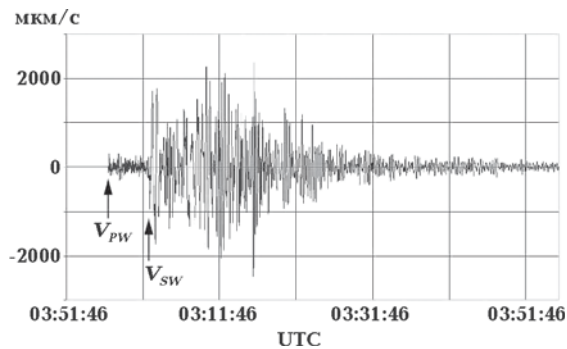


Рис. 3. Сейсмограмма землетрясения в Пакистане 08.10.2005 г. (03:50:38 UTC) по данным турецкой сейсмостанции ANTO.

рис. 3 для этого же события приводится сейсмограмма с турецкой сейсмостанции ANTO (Анкара), представленная на сайте <http://www.iris.edu/>. Выделяются два крутых фронта сейсмических волн. Первый фронт обусловлен приходом группы продольных (внутренних) волн, второй — приходом группы поверхностных волн деформации. Скорость прихода первого фронта составила  $V_{PW} \approx 9,2$  км/с, а второго  $V_{SW} \approx 5,0$  км/с. Из сравнения этих оценок со скоростью возмущения, полученной по показаниям АЧФ, следует, что аномальный ход показаний соответствовал волне деформации, пришедшей со скоростью группы продольных сейсмических волн. Максимальное отличие оценки скорости прихода продольной волны по показаниям часов Федченко  $V_p$  от оценки  $V_{PW}$  не превышало 15 %.

На рис. 2 для последовательности  $\Delta T_{\Phi_i, i-1}$  (временной тренд отсутствует) отчетливо видно заметное уменьшение дисперсии показаний часов Федченко примерно за 7 мин до прихода сейсмической волны в г. Николаев или за 15 с до землетрясения. Для последовательности с устранным линейным времен-

ным трендом  $\Delta T_{\alpha\Phi_i}$  на указанном 7-минутном интервале времени визуально выделяется колебательный процесс с периодом  $T \approx 120$  с. Аналогичные феномены наблюдались для событий 4, 6, 9, 10—12, 14—17 (см. таблицу). В тех случаях, когда было затруднительно оценить период  $T$ , оценка проводилась с помощью анализа Фурье на часовых интервалах времени перед землетрясениями. Соответствующие периоды колебаний приведены в таблице. Отметим, что уменьшения дисперсии наблюдались как после, так и перед землетрясениями. Например, для событий 4, 6, 10, 15 и 16 дисперсия уменьшилась после землетрясений спустя 6,8; 3,7; 0,5; 11,2 и 3 мин соответственно. Для событий 9, 11, 12, 14 и 17 феномен уменьшения дисперсии наблюдался за 3 мин, 40 с, 2 мин, 77 с и 4 мин перед землетрясениями соответственно.

Допуская сходство процессов при подземных взрывах и землетрясениях, можно предположить, что и перед приходом сейсмической волны может наблюдаться подобный электромагнитный предшественник. Тогда электрическое дипольное излучение из эпицентра землетрясения могло воздействовать на электронную схему либо на индукционную катушку часов Федченко, ухудшая добротность колебательной системы и тем самым уменьшая дисперсию показаний.

**Теоретическая интерпретация электромагнитного предшественника.** Для скорости  $V_{ЭДИ}$  распространения электрического дипольного излучения в среде с показателем преломления  $n$  имеем

$$V_{ЭДИ} = c/n, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме. В низкочастотном приближении [Ландау, Лифшиц, 1982] комплексный показатель преломления определяется выражением

$$n = \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — проводимость среды в С/м,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая проницаемость среды,  $T$  — период колебаний ЭДИ,  $i$  — мнимая единица. С помощью уравнений (1) и (2) получаем связь

$$|V_{ЭДИ}| = c/(\sigma T/2\pi\epsilon_0)^{1/2}. \quad (3)$$

Согласно уравнению (1), волновой вектор  $k$  ЭДИ можно представить в форме

$$k = \beta - i\alpha = \frac{\omega}{V_{\text{ЭДИ}}}(1-i) = \left(\frac{2\pi\sigma}{c^2 T \epsilon_0}\right)^{1/2} (1-i) = 2,8 \cdot 10^{-3} (\sigma/T)^{1/2} (1-i) \text{ м}^{-1}. \quad (4)$$

Поскольку мнимая часть волнового вектора определяет декремент затухания волны  $\alpha$ , то, согласно выражению (4), получим

$$\alpha = 2,8 \cdot 10^{-3} (\sigma/T)^{1/2}.$$

Понятно, что в реальных условиях проводимость среды существенно неоднородна и по глубине, и по дальности от очага землетрясения. Поэтому для грубых качественных оценок будем полагать, что проводимость среды составляет некоторое эффективное значение, сопоставимое с типичными значениями  $\sigma \approx 10^{-5}$  С/м. Так как мнимая часть волнового вектора определяет декремент затухания волны  $\alpha$ , то по известным значениям  $T$  и  $\sigma$  для события 1 (см. таблицу), согласно выражению (4), получим

$$\alpha \approx 9,84 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}.$$

Величиной обратной  $\alpha$  является  $\delta = 1/\alpha \approx 1200$  км, она определяет глубину скин-слоя ЭДИ для среды с избранной проводимостью  $\sigma \approx 10^{-5}$  С/м. Следовательно, подобные сверхнизкочастотные электромагнитные волны с такими параметрами могут распространяться в литосфере с малыми потерями на большие расстояния

**Оценки скорости и амплитуды ЭДИ.** Для известных экспериментальных данных по периоду колебаний ЭДИ и эффективной проводимости среды  $\sigma$ , пользуясь выражением (3), легко оценить  $V_{\text{ЭДИ}}$ . Полагая  $\sigma \approx 10^{-5}$  С/м, что вполне приемлемо для реальных экспериментальных величин проводимости, например для события 1 ( $T = 120$  с), с помощью равенства (3) находим  $V_{\text{ЭДИ}} \approx 43$  км/с. Полученная оценка по порядку величины согласуется с наблюдаемыми данными работы [Soloviev, Sweeney, 2005].

Учитывая большую величину  $\delta$  по сравнению с линейным размером излучающего диполя, его можно рассматривать в качестве вибратора Герца. Строгая теория распространения подобных боковых волн излагается в работе [Кинг, Смит, 1984]. В нашем

случае для качественной оценки напряженности поля ЭДИ  $E_{\text{ЭДИ}}$  можно ограничиться выражением, приведенным в работе [Айзенберг, 1962]:

$$E_{\text{ЭДИ}} \approx \left(\frac{Il}{4\pi\epsilon_0\omega}\right) \left[ (3\alpha/r^2) + i(\alpha^2/r - 3/r^3) \right] \times \exp(i\omega t - \alpha r), \quad (5)$$

где  $I$  и  $l$  — ток и линейный размер диполя соответственно, а  $r$  — расстояние точки наблюдения от источника ЭДИ. Для больших расстояний от источника, учитывая малость величины  $\alpha$ , следует оставлять только второй член выражения (5), откуда для оценки величины  $E_{\text{ЭДИ}}$ , согласно выражению (4), получим

$$E_{\text{ЭДИ}} \approx \left(\frac{Il\alpha^2}{4\pi\epsilon_0\omega r}\right) \exp(i\omega t - \alpha r) = \left(\frac{10^4 Il\sigma}{r}\right) \exp(i\omega t - \alpha r). \quad (6)$$

Используя выражение (4) и известное [Поиск..., 1988] эмпирическое выражение для  $l \sim 10^3 \exp M$ , где  $M$  — магнитуда землетрясения, аналитическую зависимость (6) от параметров среды и наблюдаемых данных можно представить в более удобном для оценок виде:

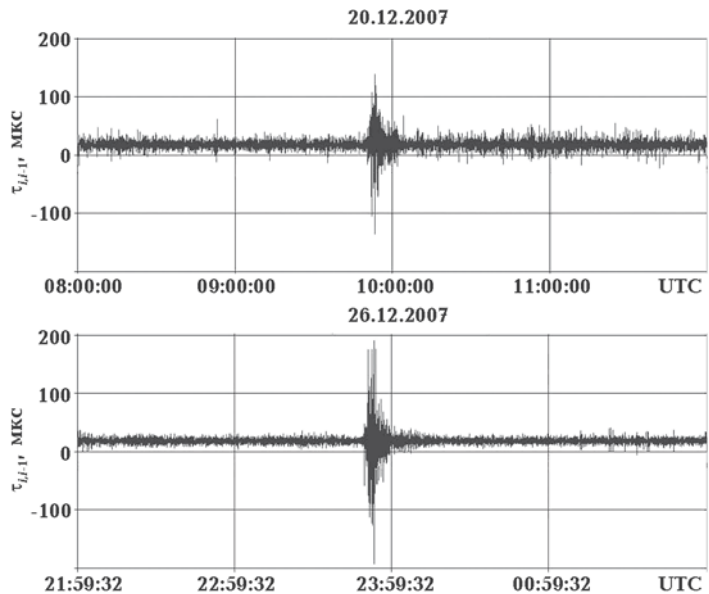


Рис. 4. Временные последовательности  $\tau_{ii-1}$  для землетрясений в Турции (события 8 и 9).

$$E_{\text{ЭДИ}} \approx \left( \frac{10^7 I \sigma}{r} \right) \exp(i\omega t + M - \alpha r). \quad (7)$$

В частности, на расстоянии  $r \approx 10000$  км от эпицентра землетрясения, подставив в (7) типичные значения тока  $I \approx 10^3$  А и  $M \approx 6$  [Поиск..., 1988], получаем оценку  $|E_{\text{ЭДИ}}| \approx 5$  мВ/м. Сигнал с напряженностью электрического поля такого уровня был сформирован в лабораторных условиях на расстоянии 1 м от катушки индуктивности часов Федченко. При включении пробного излучателя действительно наблюдалось (приблизительно вдвое) уменьшение дисперсии показаний часов Федченко.

Феномен уменьшения дисперсии показаний часов Федченко перед сейсмической волной наблюдался не во всех событиях, приведенных в таблице. Последнее обстоятельство может быть обусловлено степенью удаленности очага землетрясения от пункта регистрации, магнитудой, глубиной эпицентра, проводимостью среды вдоль трассы распространения ЭДИ, а также уровнем акустических шумов. Влияние уровня акустических шумов иллюстрирует рис. 4, где приводятся временные последовательности  $\tau_{i,i-1}$  для событий 8 и 9. Эти события имеют одинаковые параметры землетрясений, разница заключалась только в том, что событие 8 наблюдалось в дневных условиях, а событие 9 — в ночных. В верхней части приведена временная последовательность  $\tau_{i,i-1}$  для события 8, а в нижней части в том же масштабе — для события 9. Из сравнения данных видно, что фоновый шум показаний часов Федченко, предшествующий сейсмической волне, в дневных условиях для события 8 был приблизительно вдвое выше, чем в ночных условиях для события 9, что

могло маскировать феномен уменьшения дисперсии для события в дневных условиях его регистрации.

**Выводы.** Таким образом, полученные теоретические оценки величины  $V_{\text{ЭДИ}}$  по порядку величины совпадают с экспериментальными данными, представленными в работе [Soloviev, Sweeney, 2005]. Последнее обстоятельство указывает на непротиворечивость предлагаемой интерпретации явления. Если при проведении взрывных работ момент прихода ЭДИ можно отсчитывать от момента взрыва, то для землетрясений такая детерминированность может не соблюдаться и допускается возможность формирования тока в эпицентре землетрясения как после момента землетрясения, так и до него, в том числе и отсутствие формирования тока. Для решения вопроса о времени возникновения ЭДИ необходимо запустить мониторинг показаний АЧФ на астрономических обсерваториях, расположенных вблизи сейсмоактивных зон, что может также предоставить возможность определения длины цуга ЭДИ. Использование часов Федченко для наблюдения описанного феномена носит принципиальный характер, так как АЧФ, в отличие от стандартной аппаратуры регистрации сейсмических волн, позволяют косвенно регистрировать низкочастотные электромагнитные колебания наряду с возможностью проводить исследования долгопериодических процессов в интересах гравитодинамики. В заключение следует отметить, что электромагнитная природа предшественника требует проведения целенаправленных исследований для определения способов и методов регистрации ЭДИ, обусловленного формированием токовой системы в очаге землетрясения.

#### Список литературы:

- Айзенберг Г. З. Коротковолновые антенны. — Москва: Связьиздат, 1962. — 815 с.
- Демидов В. Е. Время, хранимое как драгоценность. — Москва: Знание, 1977. — 66 с.
- Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. — Москва: Мир, 1984. — Т. I. — 356 с.
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. — Москва: Наука, 1982. — 624 с.
- Пипуныров В. Н. История часов. — Москва: Наука, 1982. — 495 с.
- Поиск электромагнитных предвестников землетрясений / Под ред. М. Б. Гохберга. — Москва: Изд. ИФЗ, 1988. — 243 с.
- Soloviev S. P., Sweeney J. J. Generation of Electric and Magnetic Fields During Detonation of High Explosive Charges in Boreholes // J. Geophys. Res. — 2005. — 110. — B01312, doi:10.1029/2004JB003223.