

УДК 550.34

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКОВ НА ПРИЛИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В РЯДАХ СКВАЖИННЫХ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2013 Е.В. Полтавцева, Ю.А. Власов, В.А. Гаврилов

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: jenya@kscnet.ru*

В статье приводятся основные результаты исследований модулирующего воздействия приливных деформаций на геоакустическую эмиссию (ГАЭ) по данным продолжительных измерений на глубине 730 м в скважине Р-2 Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. С использованием метода наложения эпох были выделены периодические компоненты с периодами приливных волн  $O_1$  ( $T_{O_1} = 25.82$  ч) и  $M_2$  ( $T_{M_2} = 12.42$  ч) из исходного ряда ГАЭ. Выполнен расчет коэффициентов значимости выделенных периодических компонент.

*Ключевые слова: геоакустическая эмиссия, глубокая скважина, периодические компоненты.*

### ВВЕДЕНИЕ

При исследованиях физических причин, обуславливающих изменения интенсивности геоакустических процессов в реальной геосреде, неизбежно возникают вопросы, связанные с учетом влияния длиннопериодных деформаций различного происхождения. Прежде всего, это относится к оценкам влияния деформационных процессов приливного происхождения, поскольку в этом случае основные параметры воздействия рассчитываются с высокой точностью. Известно, что вопрос о модулирующем воздействии длиннопериодных деформаций на высокочастотные (первые десятки Гц) сейсмические шумы (Рыкунов и др., 1980; Рыкунов и др., 1984) вызвал в свое время острую научную полемику (Гальперин и др., 1987; Diakonov et al., 1990; Galperin et al., 1990). Сомнения в реальности эффекта модуляции сейсмических шумов были в значительной степени связаны с высоким уровнем помех в местах регистрации, с недостаточной длительностью наблюдений и упрощенной методикой обработки результатов измерений. Более поздние исследования, в рамках которых были получены и обработаны достаточно длинные ряды измерений, позволили выявить статистически значимые приливные эффекты в сейсмических шумах (Салтыков и др., 2008; Салтыков и др., 1997).

Вместе с тем, эти результаты, как и результаты начального этапа исследований, были получены при размещении сейсмоакустических датчиков вблизи дневной поверхности (не глубже 35 м), то есть в условиях весьма высокого уровня помех экзогенного происхождения. Очевидно, что использование рядов сейсмоакустических (геоакустических) данных, полученных при измерениях в достаточно глубоких скважинах, дает возможность более надежно оценивать влияние на геоакустическую эмиссию (ГАЭ) приливных процессов, для которых максимальная величина относительных деформаций составляет около  $3 \cdot 10^{-8}$ . Так, согласно результатам, полученным при измерениях на скважине Г-1, расположенной в районе г. Петропавловска-Камчатского, установка геофонов в скважинах на глубинах порядка 800-1000 м позволяет снизить влияние шумов экзогенного происхождения на частотах 30-160 Гц более чем на два порядка (Гаврилов и др., 2006; Gavrilov et al., 2008). К сожалению, несмотря на более чем 30-летний период исследований модулирующего воздействия приливных деформаций на геоакустические процессы, публикации по указанной теме, базирующиеся на данных продолжительных измерений в достаточно глубоких скважинах, до последнего времени отсутствовали (по крайней мере, авторам не удалось их обнаружить). В рамках данной статьи представлены результаты исследования модулирующего воздействия приливных деформаций на

ГАЭ по данным измерений продолжительностью четыре месяца на глубине 730 м в скважине Р-2 Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе использовались данные геоакустических измерений, проводимых с 2010 г. на глубине 730 м в скважине Р-2 (53.08° с.ш.; 158.9° в.д.), расположенной в лесном массиве в 20 км на северо-восток от г. Петропавловска-Камчатского на значительном удалении от источников различных техногенных помех. Скважина имеет глубину 1504 м, обсажена до глубины 768 м. В геологическом отношении район скважины Р-2 отличается молодыми рыхлыми породами вулканогенного происхождения<sup>1</sup>. Структуры пород преимущественно алевропсоммитовые, реже псаммоалевритовые и алевролитовые. До глубины 1500 м преобладают алевропесчаники, алевролиты, песчаники в неравномерном переслаивании, в том числе песчаники с примесью гравия. Уровень воды в скважине находится на глубине около 21 м. По результатам продолжительных измерений можно отметить отсутствие в рядах уровня воды скважины откликов на приливные воздействия.

Геоакустические измерения в скважине Р-2 проводились с использованием трехкомпонентного геофона, в котором использовались пьезо-керамические датчики типа А1612 производства ЗАО «Геоакустика» (Сейсмоприемники..., 2006). Сигнал на выходе датчиков пропорционален ускорению, номинальное значение коэффициента преобразования составляет 1.0 В·с<sup>2</sup>·м<sup>-1</sup>, среднеквадратическое значение собственных шумов датчиков в диапазоне 0.2–400 Гц не превышает 2·10<sup>-5</sup> м·с<sup>-2</sup>. Полоса пропускания измерительного тракта составляла 30–1000 Гц по уровню 0.7. Анализируемые ряды ГАЭ содержали данные измерений модуля сигнала ГАЭ с интервалом осреднения, равным одной минуте.

В рамках данной работы использовались ряды непрерывных трехкомпонентных геоакустических измерений, полученных на интервале 02 декабря 2011 г. – 26 марта 2012 г.

### МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Для выявления скрытых приливных периодичностей в исходных данных был использован известный метод наложения эпох (Дещеревский, Лукк, 2002; Дещеревский, Сидорин, 1999;

Серебренников, Первозванский, 1965, Теребиж, 1992; Vuijs-Ballot, 1847). Предпочтение указанному методу перед другими методами, например, методами, основанными на спектральном анализе, было отдано, в первую очередь, по причине того, что при заранее известном периоде выделяемой компоненты использование метода наложения эпох существенно упрощает оценки ее значимости.

Суть метода заключается в разбиении исходного ряда ГАЭ  $F(t)$  длиной  $L$  на равные отрезки (эпохи) длиной  $T$ , где  $T$  – период приливной периодичности, подлежащей выделению; после этого соответствующие значения ряда на каждом отрезке суммируются. Периодическая компонента с периодом  $T$  при этом будет возрастать пропорционально числу эпох  $N$ , в то время как значения сигналов с другими периодами будут возрастать медленнее. В частности, если периодическая компонента выделяется на фоне «белого» шума, то отношение амплитуды выделяемой компоненты к амплитуде шумов будет увеличиваться пропорционально величине  $(N)^{1/2}$ . Таким образом, при значительной длине исходного ряда амплитуда сигнала с заданным периодом будет существенно превышать уровень шумов.

Одна из проблем выделения приливных периодичностей из временных рядов геофизических данных связана с тем, что в общем массиве обрабатываемых данных априори содержатся составляющие техногенного и природного происхождения с периодами  $T_{12} = 12.0$  ч и  $T_{24} = 24.0$  ч, которые по своим значениям близки к периодам некоторых основных приливных волн, например, полусуточной лунной главной компоненты  $M_2$  ( $T = 12.42$  ч), суточной лунно-солнечной деклинационной компоненты  $K_1$  ( $T = 23.93$  ч), суточной лунной главной компоненты  $O_1$  ( $T = 25.82$  ч). В этом случае амплитуда огибающей суммарного сигнала будет изменяться (модулироваться) с периодом, равным периоду биений:

$$T_{\Delta} = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}.$$

Так, например, для приливной гармоники  $M_2$  и техногенной гармоники  $T_{12}$  период биений будет составлять 15 суток, а для гармоник  $O_1$  и  $T_{24}$  – 14 суток. Для выделения суточных и полусуточных приливных гармоник минимальная длина ряда в таком случае должна быть не меньше периода биений. В рамках настоящей работы использовались ряды данных непрерывных геоакустических измерений, где каждый ряд содержал 166916 минутных отсчетов. Четырехмесячная длина каждого ряда позволяет в данном случае надежно выделять полусуточные и суточные компоненты, обеспечивая при этом требуемую разрешающую

<sup>1</sup> Евтухов А.Д., Чебыкин И.Н., Патракова Т.П. Отчет о проведении общих поисков термальных вод на Радыгинской площади в 1991–1995 гг., ТОО «Аква», п. Термальный Камчатской обл., 1995. 128 с.

способность при выделении компонент с близкими периодами.

Для реализации алгоритма метода наложения эпох была разработана программа age (А. с. № 2013618293, age), позволяющая задавать периоды выделяемых периодичностей с необходимой точностью до сотых долей часа, а также обеспечивать удобство работы с временными рядами достаточно большой длительности. Для задания периодов выделяемых периодичностей с требуемой точностью при использовании временных рядов с минутными отсчетами программа age предусматривает интерполяцию исходных данных. Если в полученных в результате обработки рядах выделенных периодичностей с секундными отсчетами допустимы данные с минутным осреднением, то в таких случаях программой age может быть использована обратная процедура децимации.

При помощи программы age были обработаны ряды геоакустических данных на предмет выделения суточной  $O_1$  ( $T = 25.82$  ч) и полусуточной  $M_2$  ( $T = 12.42$  ч) приливных периодичностей (рисунок). Из приводимых на рисунке данных видно, что выделенные из рядов ГАЭ периодические составляющие с указанными периодами имеют неслучайный характер. Это, по мнению авторов работы (Дещеревский, Сидорин, 1996), уже свидетель-

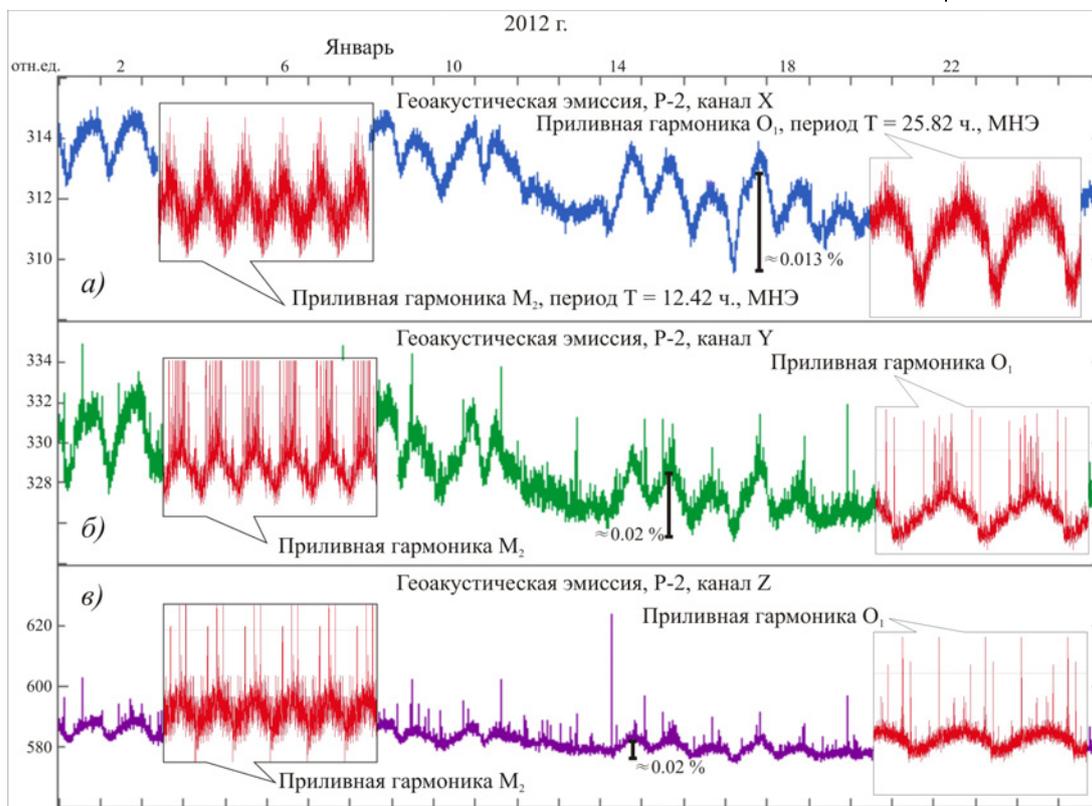
ствует о наличии компонент с такими периодами в исходных рядах. Для подтверждения неслучайности выявленных периодичностей был использован критерий Аббе-Линника (Линник, 1958), целью которого является проверка гипотезы об отсутствии периодического сдвига в наблюдениях  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Отсутствие периодического сдвига в исходных данных будет в данном случае говорить о случайном характере выявленных периодичностей. Для проверки рассчитывается следующая статистическая характеристика  $r$ :

$$r = \frac{q^2}{s_1^2}, \text{ где} \tag{1}$$

$$q^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2,$$

$$s_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Для больших выборок ( $n > 60$ ) рассчитанная величина  $r$  распределена приближенно по нормальному закону с параметрами  $(1, \frac{(n-2)}{(n-1)(n+1)})$ , и для подтверждения, либо опровержения выдвинутой гипотезы об отсутствии сдвига рассчитывается теоретическая величина  $r_p$ :  $r_p \approx 1 + U_p \sqrt{\frac{(n-2)}{(n-1)(n+1)}}$ , где



Фрагменты временных рядов каналов X, Y, Z ГАЭ и формы приливных периодичностей  $O_1$  и  $M_2$ , выделенных методом наложения эпох.

$U_p$  –  $p$ -процентная квантиль стандартного нормального распределения.

Вероятность  $P\{r \leq r_p\} = p$ , где  $p = 0.001; 0.01; 0.05$  в том случае, если мы принимаем гипотезу о наличии систематического сдвига в данных. Соответственно гипотеза отвергается, если рассчитанное значение  $r$  оказывается меньше теоретического  $r_p$ .

Для имеющихся данных (рассматривались приливные периодичности  $O_1$  и  $M_2$  длиной  $n = 1441$  отсчет, выделенные из ряда геоакустических данных канала  $Z$ ) были рассчитаны статистики  $r$ , а также теоретическая величина  $r_p$ . В расчете  $r_p$  1%-ая квантиль стандартного нормального распределения рассчитывалась согласно соотношению  $U_p = -U_{1-p} = -2.33$ . Таким образом, были получены следующие значения:

$$\begin{aligned} r_p &= 0.9386630126; \\ r(O_1) &= 0.10869051 < r_p; \\ r(M_2) &= 0.20867244 < r_p. \end{aligned}$$

По критерию Аббе-Линника следует, что оба ряда выделенных приливных периодичностей содержат систематический сдвиг с вероятностью 99%, что говорит об их неслучайном характере.

Тем не менее, необходимо учитывать, что периоды приливных волн  $O_1$  и  $M_2$  очень близки к периодам  $T = 12.00$  и  $T = 24.00$  неприливно происхождения, которые содержатся в вариациях уровня ГАЭ, хотя и с относительно небольшой амплитудой. По этой причине для подтверждения факта существования отклика на приливные воздействия одной неслучайной формы выделенных приливных периодичностей явно недостаточно, и в этом случае требуется оценка интенсивности выявленных приливных периодичностей с использованием соответствующего математического критерия.

#### МЕТОД ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОСТИ ПРИЛИВНОГО ОТКЛИКА В РЯДАХ ГАЭ

Для оценки значимости выделенной периодической компоненты использовался алгоритм, описанный в работе (Дещеревский, Сидорин, 1996), суть которого заключается в построении коэффициента значимости, отражающего соотношение дисперсий полученной периодичности и исходного ряда данных. При этом, чем ближе будут абсолютные значения коэффициента к нулю, тем случайнее будет содержание полученной периодической составляющей в исходном массиве данных. И наоборот – значительное отклонение от нуля будет свидетельствовать о наличии в ряде компоненты с выбранным периодом. Расчет коэффициента значимости производился по формуле:

$$V_T = \left( \frac{L * D_T}{T * D_0} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $D_T$  – дисперсия выделенной периодической компоненты с периодом  $T$ ,  $D_0$  – дисперсия исходного ряда,  $L$  – его длина.

Для проверки алгоритма расчеты коэффициента значимости  $V_T$  были проведены для приливных периодичностей  $O_1$  и  $M_2$ , выделенных как из рядов ГАЭ, так и из сгенерированных рядов гауссовского «белого» шума. Следует отметить, что в рамках решаемой задачи, связанной с оценками значимости выделенных из рядов ГАЭ приливных периодичностей, выбор вида шума («белый», «розовый» и прочие) для случайного ряда не имеет принципиального значения. Гауссовский «белый» шум был выбран по причине удобства программной реализации в виде временного ряда.

Результаты расчетов коэффициентов значимости для приливных периодичностей  $O_1$  и  $M_2$ , выделенных при помощи метода наложения эпох из исходного ряда ГАЭ:

$$V_{O_1} = 15.051; V_{M_2} = 8.3482.$$

Значения аналогичных коэффициентов для периодичностей, выделенных из случайного сгенерированного ряда:

$$V_{O_1} = 0.0068; V_{M_2} = -0.0082.$$

Значения коэффициентов  $V_T$ , полученные для ряда ГАЭ в несколько сотен раз превышают значения, рассчитанные для случайного ряда, – последние, как и ожидалось, близки к нулевой отметке, что говорит о случайности выделенных приливных составляющих из ряда «белого» шума и подтверждает значимость приливных компонент, полученных из ряда ГАЭ.

Для подтверждения приливного происхождения периодичностей, выделенных из рядов геоакустических данных, была проведена дополнительная обработка одного из исходных рядов ГАЭ, суть которой заключалась в следующем. Из исходного ряда ГАЭ (канал  $Z$ ) при помощи метода наложения эпох были выделены, а затем вычтены компоненты с периодами  $T = 12$  ч и  $T = 24$  ч, такой прием был применен в работе (Дещеревский, Сидорин, 1996). После вычитания указанных компонент данный ряд ГАЭ вновь был обработан на предмет выделения приливных периодичностей  $O_1$  и  $M_2$ . Затем для такого ряда были повторно рассчитаны коэффициенты значимости выделенных приливных периодичностей. Результаты расчета коэффициентов значимости приливных волн  $O_1$  и  $M_2$  для ряда с удаленными компонентами  $T = 12$  ч и  $T = 24$  ч в сравнении с результатами аналогичных расчетов для случайного ряда:

$$V_{O_1} = 14.4995; V_{M_2} = 10.1512 -$$

значения коэффициентов для ряда ГАЭ, канал  $Z$ , с предварительно выделенными и удаленными суточными и полусуточными периодичностями;

$$V_{O_1} = 0.0337; V_{M_2} = 0.0269 -$$

значения коэффициентов для случайного сгенерированного ряда также с удаленными суточными и полусуточными периодичностями.

После вычитания из исходного ряда ГАЭ компонент с периодами  $T = 12$  ч и  $T = 24$  ч значения коэффициента значимости для приливных периодичностей  $O_1$  и  $M_2$ , выделенных из обработанного таким образом ряда ГАЭ, по-прежнему значительно превышают значения коэффициентов для аналогичных компонент, рассчитанных для случайного ряда, которые снова близки к нулю.

Это означает, что выделяемые из исходных рядов ГАЭ отклики с периодами суточной лунной главной компоненты  $O_1$  ( $T = 25.82$  ч) и полусуточной лунной главной компоненты  $M_2$  ( $T = 12.42$  ч) не могут быть связаны с компонентами спектра ГАЭ с периодами  $T = 12.00$  ч и  $T = 24.00$  ч.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показывают, что ряды данных геоакустических измерений в скважине Р-2 на глубине 730 м, содержат периодические составляющие с периодами, соответствующими периодам приливных волн  $O_1$  и  $M_2$  (25.82 ч и 12.42 ч соответственно). Указанный вывод подтверждается сравнением коэффициентов значимости для периодичностей  $O_1$  и  $M_2$ , выделяемых для рядов ГАЭ, в сравнении с результатами аналогичных расчетов для сгенерированного случайного ряда. Результаты дополнительных исследований, связанные с обработкой ряда ГАЭ с удаленными компонентами  $T = 12$  ч и  $T = 24$  ч, также подтверждают вывод о наличии в рядах ГАЭ откликов на приливные воздействия.

2. Использованный в работе метод наложения эпох и разработанная программа age позволяют выделять из рядов ГАЭ составляющие с требуемыми периодами, сводя к минимуму возможность принятия за приливной отклик суточных и полусуточных компонент ГАЭ неприливного происхождения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 12-05-00670-а), Президиума ДВО РАН (грант 12-III-A-08-167) и программы для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (грант НШ-5583.2012.5).

Авторы признательны к.ф.-м.н. В.А. Салтыкову и к.ф.-м.н. А.В. Дещеревскому за конструктивные и полезные замечания к работе.

## Список литературы

А. с. №2013618293. age.

Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В.  
Вариации уровня геоакустической эмис-

сии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 52-67.

Гальперин Е.И., Винник Л.П., Петерсен Н.В. О модуляции высокочастотного сейсмического шума приливными деформациями литосферы // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. № 12. С. 102 - 109.

Дещеревский А.В., Лукк А.А. Выделение регулярных составляющих во временных вариациях геофизических параметров методом разложения на негармонические компоненты // Вулканология и сейсмология. 2002. № 5. С. 65-78.

Дещеревский А.В., Сидорин А.Я. Фликкер-шум и регулярные составляющие в вариациях электротеллурического поля. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 24 с.

Дещеревский А.В., Сидорин А.Я. Некоторые вопросы методики оценки среднесезонных функций для геофизических данных. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 40 с.

Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Государственное издательство Физико-математической литературы, 1958. 333 с.

Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Лунно-солнечная приливная периодичность в линиях спектров временных вариаций высокочастотных микросейсм // ДАН. 1980. Т. 252. № 3. С. 577-580.

Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов Земли // Открытия в СССР в 1983 г. М.: ВНИИПИ, 1984. С. 46.

Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 110-124.

Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Вариации приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума в результате изменений напряженного состояния среды // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 73-83.

Сейсмоприемники пьезоэлектрические А16. Руководство по эксплуатации. ЗАО «Геоакустика». 2006. 40 с.

Серебрянников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1965. 244 с.

Теребиж В.Ю. Анализ временных рядов в астрофизике. М.: Наука, 1992. 392 с.

Vuijs-Ballot C.H.D. Les Changement Periodiques de Temperature. Utrecht, 1847. 123 p.

- Diakonov B.P., Karryev B.S., Khavroshkin O.B. et al.* Manifestation of Earth deformation processes by high-frequency seismic noise characteristics // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1990. V. 63. № 3-4. P. 151-162.
- Galperin E.I., Petersen N.V., Sitnikov A.V., Vinnik L.P.* On the properties of short-period seismic noise // *Physics of The Earth and Planetary Interiors*. 1990. V. 63. № 3-4. P. 163-171.
- Gavrilov V.A., Bogomolov L.M., Morozova Yu.V., Storcheus A.V.* Variations of geoacoustic emission in a deep borehole: relevance to seismicity and physical origin // *Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке*. Бишкек. 2008. С. 198-211.

## INVESTIGATION OF RESPONSE TO THE TIDAL EFFECT IN TIME-SERIES OF THE BOREHOLE GEOACOUSTIC MEASUREMENTS

**E.V. Poltavtseva, Yu.A. Vlasov, V.A. Gavrilov**

*Institute of Volkanology and Seismology FEB RAS, 683006*

This paper presents the main research results from investigation of the tidal deformation modulating effects on the geoacoustic emission based on the long-term measurements at a depth of 730 m in the borehole R-2 within the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamical monitored area.

The method of stages superposition was used to select the periodic components. This method allows selecting tidal harmonic curves  $O_1$  ( $T_{O_1} = 25.82$  h.) и  $M_2$  ( $T_{M_2} = 12.42$  h.) from the original geoacoustic emission time-series with pinpoint accuracy in period assignment. The article also provides estimates on the detected tidal constituents intensity.

*Keywords: geoacoustic emission, deep borehole, tidal harmonic curves.*