

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 происхождения¹. Структуры пород преимущественно алевропсоммитовые, реже псаммоалевритовые и алевритовые. 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 пьезокерамические датчики типа А1612 производства ЗАО «Геоакустика» (Сейсмоприемники..., 2006). Сигнал на выходе датчиков пропорционален ускорению, номинальное значение коэффициента преобразования составляет 1.0 В·с²·м⁻¹, среднеквадратическое значение собственных шумов датчиков в диапазоне 0.2–400 Гц не превышает 2·10⁻⁵ м·с⁻². 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

¹ 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-

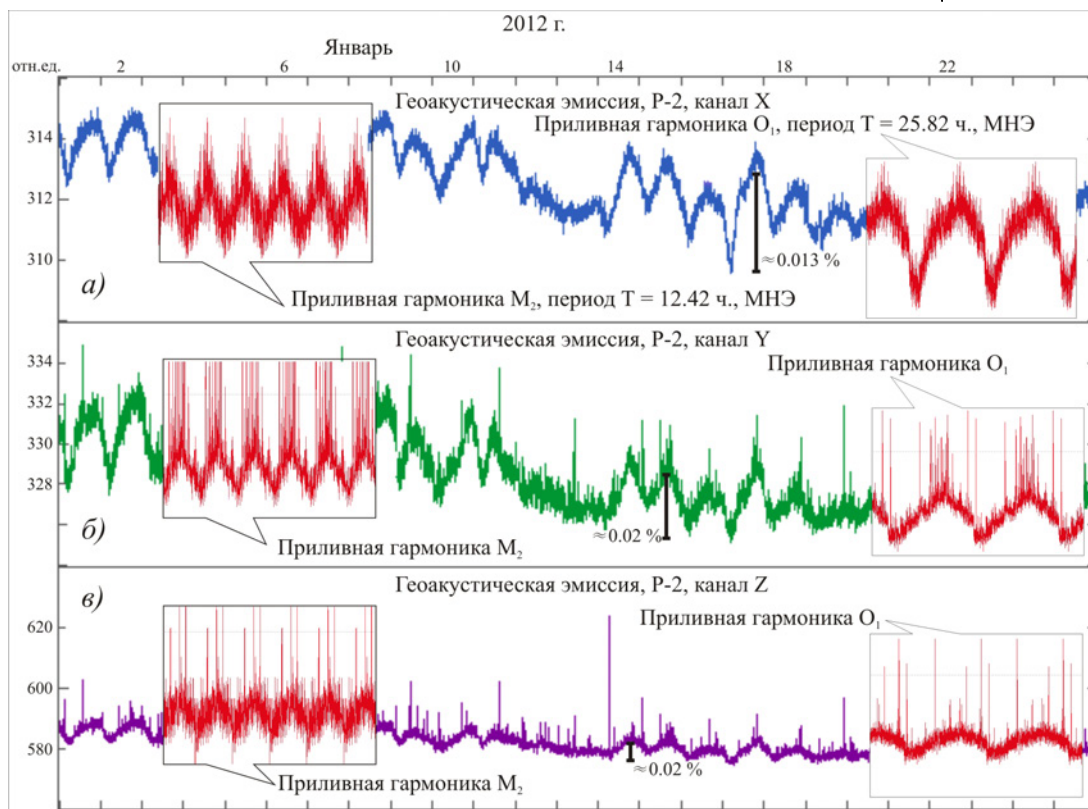
ствует о наличии компонент с такими периодами в исходных рядах. Для подтверждения неслучайности выявленных периодичностей был использован критерий Аббе-Линника (Линник, 1958), целью которого является проверка гипотезы об отсутствии периодического сдвига в наблюдениях x_1, x_2, \dots, x_n . Отсутствие 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.