

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКОВ НА ПРИЛИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В РЯДАХ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

*Полтавцева Е.В., Власов Ю.А.*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

*Научный руководитель: к.т.н. Гаврилов В.А.*

В работе отражены результаты исследования откликов на приливное воздействие во временных рядах геоакустической эмиссии с использованием данных непрерывных наблюдений на глубине 730 м в скважине Р-2 Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона.

В качестве метода выделения периодических компонент использован метод наложения эпох, позволяющий выделять приливные гармоники  $O_1$  ( $T_{O_1} = 25.82$  ч.) и  $M_2$  ( $T_{M_2} = 12.42$  ч.) из исходного ряда геоакустической эмиссии с точностью задания периода до секунд. Выполнена оценка интенсивности выявленных приливных составляющих.

*Ключевые слова: скважинные геоакустические измерения, приливное воздействие, метод наложения эпох.*

### ВВЕДЕНИЕ

В рамках данной работы была поставлена задача оценки влияния длиннопериодных деформаций приливного происхождения на геоакустическую эмиссию (ГАЭ). При этом использование рядов геоакустических данных, полученных при измерениях в достаточно глубоких скважинах, дает возможность более уверенной оценки влияния на ГАЭ приливных процессов, для которых величины относительных деформаций малы и не превышают  $10^{-6}$ .

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 [1], [9], что подтверждают результаты геоакустических измерений в глубокой скважине Г-1, расположенной в районе г. Петропавловска-Камчатского.

Однако в качестве материала для исследования приливных воздействий результаты геоакустических наблюдений на скважине Г-1 пришлось

исключить по причине интенсивного модулирующего воздействия на ГАЭ электромагнитного излучения техногенной природы ввиду близости к источникам городских помех. Ряды данных по ГАЭ, полученные на измерительном пункте Г-1, содержат интенсивную суточную периодичность как отклик на воздействие ЭМИ техногенного характера, вследствие чего выявить приливное воздействие не представляется возможным. Для проведения исследования были выбраны данные геоакустических измерений, проводимые на глубине 730 м в скважине Р-2 (53,08<sup>0</sup> с.ш.; 158,9<sup>0</sup> 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.

Следует отметить, что перед тем, как приступить к решению поставленной задачи, был проведен тщательный поиск в литературе сходных публикаций в данной области. Результатов каких-либо исследований на данную тематику касательно геоакустических наблюдений в глубокой скважине найдено не было. При этом вопрос о модулирующем воздействии длиннопериодных деформационных воздействий на высокочастотные (первые десятки Гц) сейсмические шумы [4], [5] вызвал в свое время острую научную полемику [2], главным образом, из-за высокого уровня помех в местах регистрации, недостаточной длительности наблюдений и недостатков алгоритма обработки результатов измерений. Более поздние исследования, в рамках которых были получены и обработаны с использованием метода наложения эпох достаточно длинные ряды измерений, позволили выявить статистически значимые приливные эффекты в сейсмических шумах [7], [6].

В работе представлены результаты исследования модулирующего воздействия приливных деформаций на ГАЭ по данным длительных непрерывных наблюдений на глубине 730 м в скважине Р-2 Петропавловска-Камчатского геодинамического полигона.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Одна из проблем выделения приливных гармоник связана с тем, что в общем массиве обрабатываемых данных априори содержатся составляющие небольшой амплитуды с периодами  $T_{12} = 12.0$  ч. и  $T_{24} = 24.0$  ч. неприливно происхождения, связанные с температурными изменениями в течение суток. Периоды этих составляющих по своим значениям очень близки к периодам некоторых основных гармоник приливных волн: полусуточной лунной главной  $M_2$  ( $T_{M_2} = 12.42$  ч.) и суточной лунной главной  $O_1$  ( $T_{O_1} = 25.82$  ч.). В этом случае неизбежно проявление эффекта биений, при котором амплитуда суммарных колебаний будет модулироваться с периодом биений, значительно превышающим периоды самих колебаний. 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.

Если при этом для выделения приливных гармоник используется временной ряд с длиной, не превышающей период биений, то появляется риск выбрать для анализа фазу с наименьшей амплитудой колебаний, что ухудшит результаты анализа.

Для решения поставленной задачи был разработан следующий алгоритм.

1. С целью исключения эффекта биений необходимо использовать временные ряды с длиной, значительно превышающей соответствующие периоды биений. В работе использовался ряд непрерывных геоакустических измерений длиной 166916 минутных отсчетов, полученных на интервале 2 декабря 2011 г. - 26 марта 2012 г. Значительная длина ряда в этом случае позволяет избежать влияния эффекта биений при выделении основных суточных и полусуточных приливных гармоник.

2. Из массива исходных данных по ГАЭ необходимо выделить компоненту с заданным периодом приливной волны. Для выделения периодиче-

ской составляющей был выбран метод наложения эпох (МНЭ) [8], реализованный в программном обеспечении собственной разработки.

3. В целях определения наличия отклика на приливное воздействие следует выбрать математический метод оценки интенсивности выделенной компоненты. В качестве такого метода в работе использовался принцип построения специального коэффициента, отражающего соотношение дисперсий полученной периодической гармонике и исходного ряда данных. Такой способ был предложен в работе [3]

4. Полученный результат необходимо сравнить с аналогичной обработкой случайного ряда, например, ряда гауссовского "белого" шума. Также для уверенного ответа на вопрос о наличии откликов ГАЭ на приливное воздействие необходимо провести дополнительную обработку рядов ГАЭ, связанную с удалением неприливных составляющих с периодами  $T_{12}$  и  $T_{24}$ .

Обработка данных, включающая генерацию случайных процессов, расчет дисперсий и линейные преобразования временных рядов в работе проводилась при помощи пакета программных средств ABD (авторы - А.В.Дещеревский, В.И.Журавлев, ИФЗ РАН, Москва).

Для решения задачи в работе использовался метод наложения эпох, принцип действия которого приведен ниже [8].

1. Исходный временной ряд  $F(t)$  длиной  $2L$  задается в виде таблицы значений и делится на части длиной  $T$ , где  $T$  - период приливной гармонике, подлежащей выделению.

2. Соответствующие значения ряда на каждом таком отрезке суммируются с последующим вычислением их среднего арифметического.

3. Из результатов вычисления составляется суммарная кривая  $Tr(t)$ , в которой будут четко выражены гармонике с периодом  $T$ . Из исходного отрезка  $2L$  выделяется часть наибольшей продолжительности  $rT$ , где  $r$  – целое число. Для определенности вначале рассматривается вариант, когда  $r$  – нечетное,  $r = 2k + 1$ , тогда  $Tr(t)$  будет выглядеть следующим образом:

$$Tr(t) = \frac{1}{2k+1} \sum_{l=-k}^k F(t+lT). \quad (1)$$

В случае же, когда  $r$  – четное,  $r = 2k$ , вычисления  $Tr(t)$  следующие:

$$Tr(t) = \frac{1}{2k} \sum_{l=-k}^{k-1} F(t + (l + \frac{1}{2})T). \quad (2)$$

Селективное действие МНЭ можно объяснить тем, что в случае, когда период  $T$  совпадает с периодом какой-то из компонент анализируемого сигнала, при вычислении среднего арифметического отрезков длиной  $T$  эта компонента практически не меняется, в то время как остальные составляющие сглаживаются.

4. Выделенная функция  $Tr(t)$ , рассчитанная по формуле (1), или (2), периодически продолжается на всю длину ряда  $2L$ .

Для реализации алгоритма МНЭ была разработана программа Age (автор - Ю.А.Власов). Перед аналогичными программными средствами программа Age имеет ряд преимуществ, прежде всего, это возможность задания пользователем периода приливной гармоник  $T$  с точностью до секунд, а также работа с временными рядами достаточно большой длительности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

При помощи программы Age были обработаны ряды данных по ГАЭ на предмет выделения суточной  $O_1$  ( $T_{O_1} = 25.82$  ч.) и полусуточной  $M_2$  ( $T_{M_2} = 12.42$  ч.) приливных гармоник, на рис. 1 представлены исходные данные и результат выделения.

На рис. 1 видно, что выделенные из данных по каждому каналу ГАЭ периодические составляющие  $O_1$  и  $M_2$  имеют неслучайный характер, что, по мнению авторов работы [3], уже свидетельствует в пользу наличия гармоник с такими периодами в исходных рядах. Тем не менее, не следует забывать о том, что периоды гармоник  $O_1$  и  $M_2$  очень близки к периодам  $T_{12}$  и  $T_{24}$  неприливного происхождения, которые содержатся в вариациях

уровня ГАЭ, хотя и с относительно весьма небольшой амплитудой. Таким образом, для подтверждения факта существования отклика на приливные воздействия одной неслучайной формы выделенных приливных гармоник явно недостаточно, и требуется применение математического критерия оценки интенсивности выявленных приливных периодичностей.

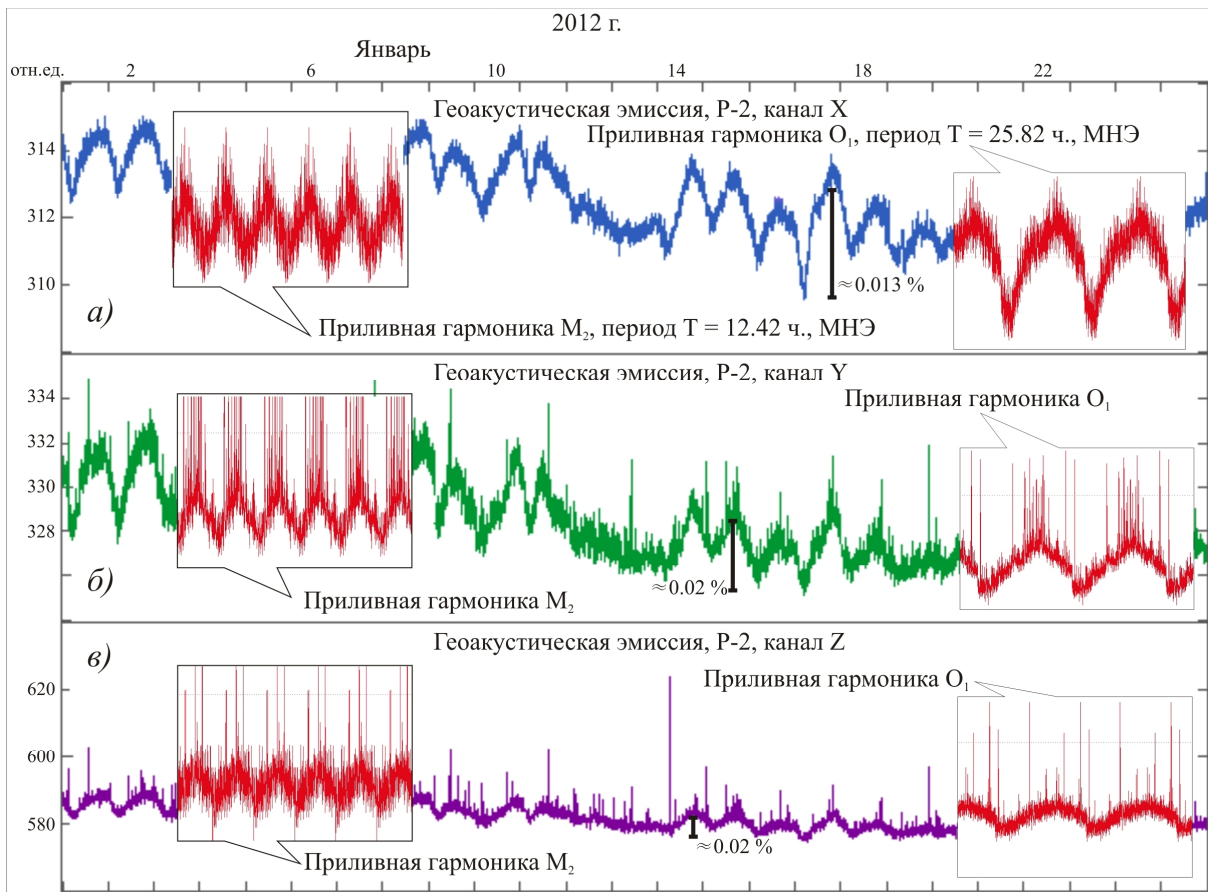


Рис. 1. Приливные гармоника  $O_1$  и  $M_2$ , выделенные из каналов X, Y, Z ГАЭ методом наложения эпох.

Для оценки интенсивности выделенной периодической компоненты использовался алгоритм, описанный в работе [3], суть которого заключается в расчете и последующем анализе коэффициента соотношения дисперсий полученной периодической гармоника и исходного ряда данных. При этом, чем ближе будут абсолютные значения коэффициента к нулю и чем равновероятнее их отклонения от нулевой отметки в обе стороны, тем случайнее будет содержание полученной периодической составляющей в ис-

ходном массиве данных. Напротив, значительное отклонение от нуля будет свидетельствовать о наличии в ряде компоненты с выбранным периодом. Расчет указанного коэффициента проводился по формуле:

$$V(T) = \left( \frac{L * D(T)}{T * D_0} - 1 \right) * 100\% , \quad (3)$$

где  $D(T)$  - дисперсия выделенной периодической компоненты с периодом  $T$  в минутных отсчетах,  $D_0$  - дисперсия исходного ряда,  $L$  - его длина в минутных отсчетах. Дисперсия рядов рассчитывалась с использованием пакета программ ABD, в частности, фильтра MinMax, позволяющего провести расчет среднеквадратичного отклонения (СКО) ряда в скользящем окне с последующим возведением ряда СКО в квадрат.

Для проверки алгоритма расчеты коэффициента  $V(T)$  по формуле (3) были проведены для приливных гармоник  $O_1$  и  $M_2$ , выделенных как из рядов ГАЭ, так и из сгенерированных рядов гауссовского "белого" шума. При этом для корректного сравнения ряды "белого" шума приводились к среднему значению и амплитуде рядов ГАЭ.

На рис. 2 приведены результаты расчетов коэффициентов интенсивности  $V(O_1)$  и  $V(M_2)$  для приливных гармоник  $O_1$  и  $M_2$ , выделенных при помощи МНЭ из канала  $Z$  исходного ряда ГАЭ и случайного сгенерированного ряда. Из представленных данных видно, что значения коэффициентов  $V(T)$ , полученные для ряда ГАЭ, в несколько раз превышают значения, рассчитанные для случайного ряда. Также следует отметить неслучайный характер рядов коэффициентов интенсивности для обеих приливных гармоник, в отличие от таких же рядов для случайных сигналов.

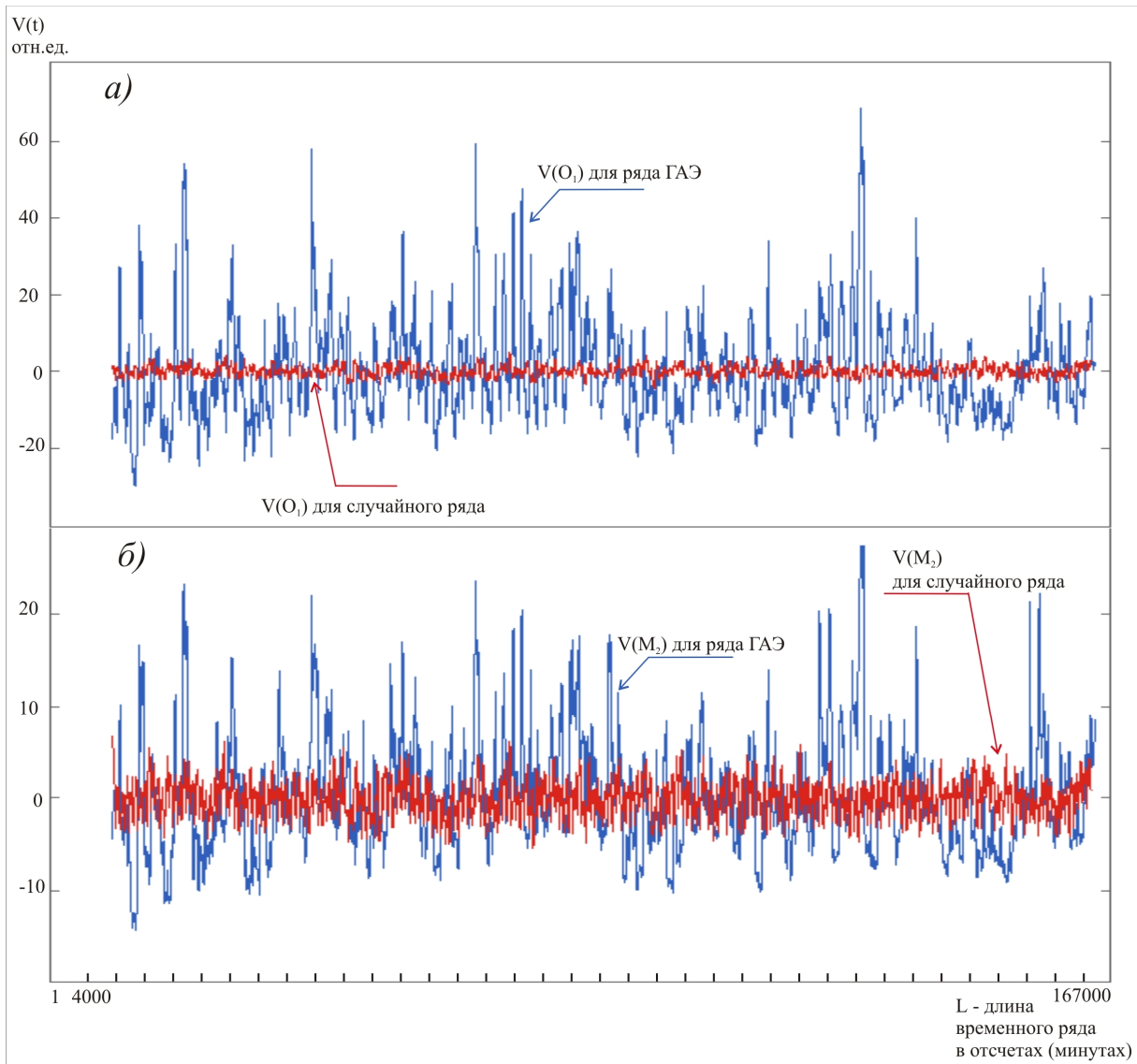


Рис. 2. Сравнение коэффициентов интенсивности для гармоник  $O_1$  (а) и  $M_2$  (б), выделенных как из ряда ГАЭ, канал Z, так и из случайного ряда.

Для подтверждения приливного происхождения геоакустических откликов была проведена дополнительная обработка рядов ГАЭ [3]. Из исходного ряда ГАЭ (канал Z) при помощи метода МНЭ были выделены, а затем вычтены компоненты с периодами  $T_{12}$  и  $T_{24}$ . После вычитания суточных и полусуточных компонент ряд ГАЭ вновь был обработан в целях выделения приливных гармоник  $O_1$  и  $M_2$ , после чего для такого ряда были повторно рассчитаны коэффициенты интенсивности выделенных приливных гармоник.



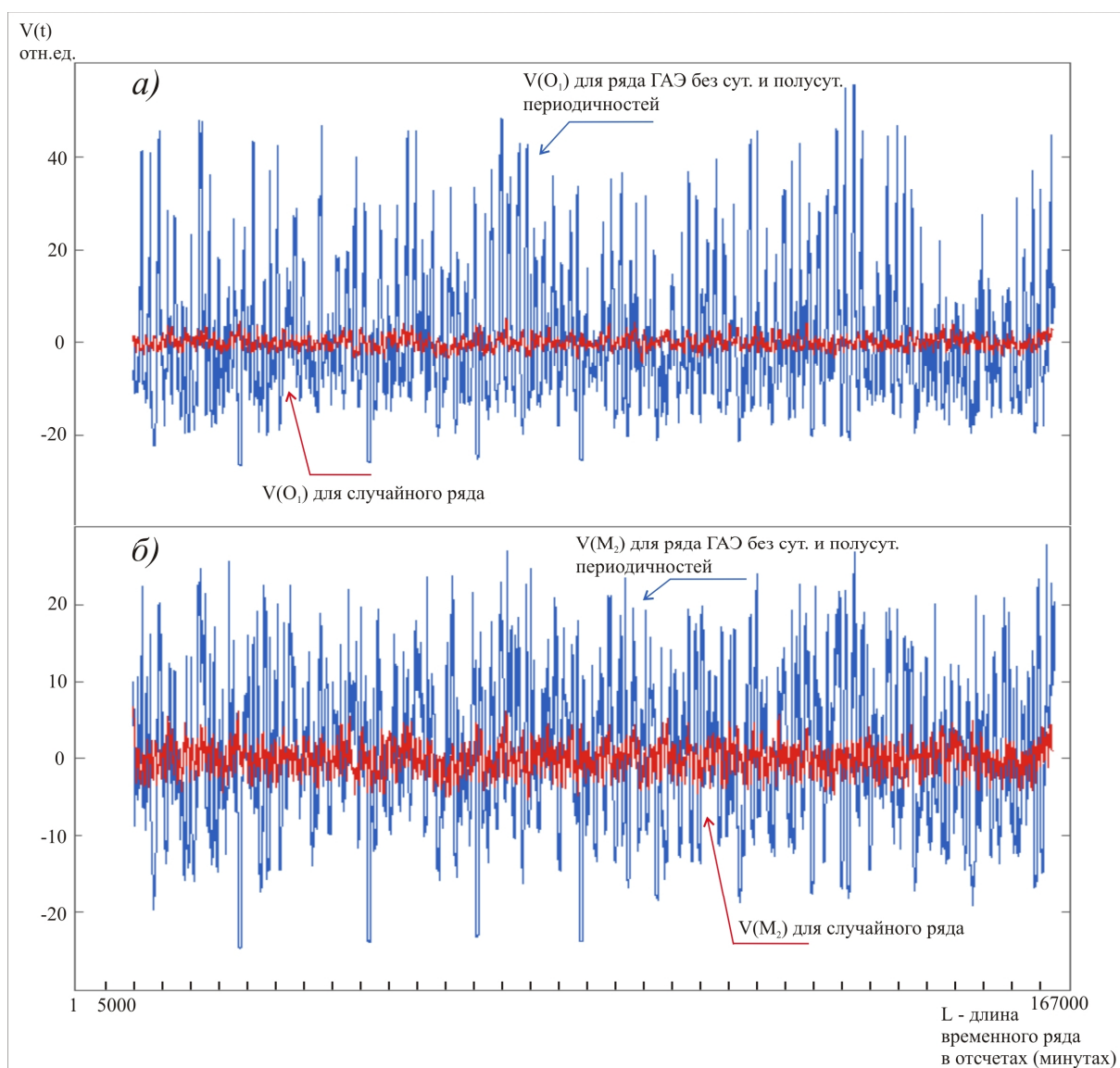


Рис. 3. Результаты расчета коэффициентов интенсивности приливных волн  $O_1$  (а) и  $M_2$  (б) для ряда с удаленными компонентами  $T_{12}$  и  $T_{24}$  в сравнении с результатами аналогичных расчетов для случайного ряда.

На рис. 3 представлены результаты дополнительной обработки рядов ГАЭ. Из данных, представленных на рис. 3, следует, что после вычитания из исходного ряда ГАЭ суточных и полусуточных компонент значения коэффициента интенсивности для приливных гармоник  $O_1$  и  $M_2$ , выделенных из обработанного таким образом ряда ГАЭ, по-прежнему значительно превышают значения коэффициентов для аналогичных компонент, рассчитанных для случайного ряда. Это означает, что выделяемые из исходных рядов ГАЭ отклики с периодами  $T_{O_1} = 25.82$  ч. и  $T_{M_2} = 12.42$  ч. не могут быть

связаны с компонентами спектра ГАЭ с периодами  $T_{12} = 12.00$  ч. и  $T_{24} = 24.00$  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 интенсивности для гармоник  $O_1$  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  $T_{12}$  и  $T_{24}$ , также подтверждают вывод о наличии в рядах ГАЭ откликов на приливные воздействия.

2. Используемый в работе метод наложения эпох и разработанная программа Age позволяют выделять из рядов ГАЭ составляющие с требуемыми периодами с точностью до секунд, позволяя исключать ошибки, связанные с принятием за приливной отклик суточных и полусуточных компонент ГАЭ неприливного происхождения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В.* Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // *Вулканология и сейсмология*. 2006. № 1. С. 52 - 67.
2. *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.
3. *Децеровский А.В., Сидорин А.Я.* Фликкер-шум и регулярные составляющие в вариациях электротеллурического поля. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 24 с.
4. *Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В.* Лунно-солнечная приливная периодичность в линиях спектров временных вариаций высокочастотных микро-сейсм // *ДАН СССР*. 1980. Т. 252. № 3. С. 577 - 580.
5. *Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В.* Явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов Земли. Открытия в СССР. М.: ВНИИПИ, 1984.
6. *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.
7. *Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н.* Выявление приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума в результате изменений напряженного состояния среды // *Вулканология и сейсмология*. 1997. № 4. С. 73 - 83.
8. *Серебренников М.Г., Первозванский А.А.* Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1965. 244 с.
9. *Gavrilov V.A., Bogomolov L.M., Morozova Yu.V., Storcheus A.V.* Variations of geoaoustic emission in a deep borehole: relevance to seismicity and physical origion // *Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке*. Бишкек. 2008. С. 198 - 211.

**RESEARCH OF REVERBERATIONS TO THE TIDAL INFLUENCE  
IN THE GEOACOUSTIC EMISSION***E.V. Poltavtseva, Yu.A. Vlasov**Institut of Volkanology and Seismology FEB RAS*

This work presents results of research of the reverberations to the tidal influence in the geoaoustic emission time-series based on the long-term measurements at a depth of 730 m in the R-2 borehole of the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamical providing ground.

The method of stages superposition was used as a method of the periodic components selection. 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 geoaoustic emission time-series with pinpoint accuracy in period assignment. The article also provides estimates of the detected tidal constituents intensity.

*Key words: borehole geoaoustic measurements, tidal influence, method of stages superposition.*