

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 550.34.038.8

**ШИРОКОПОЛОСНЫЙ АКСЕЛЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ ЗЕМЛИ**

© 2020 г. А. С. Черепанцев^{а,*}, В. А. Салтыков^б

^а *Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета
Россия, 347928, Таганрог Ростовской обл., пер. Некрасовский, 44*

^б *Камчатский филиал ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН”
Россия, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9*

*e-mail: acherepantsev@sfedu.ru

Поступила в редакцию 01.08.2019 г.

После доработки 23.08.2019 г.

Принята к публикации 25.08.2019 г.

Рассмотрена физико-математическая модель акселерометра для регистрации сверхмалых колебаний поверхности (10^{-10} – 10^{-11} м) в диапазоне частот десятки герц, работающего на основе S-моды изгибных колебаний. Результаты моделирования позволили не только сравнить основные расчетные характеристики с экспериментальными параметрами имеющегося макета акселерометра, но и исследовать изменение свойств акселерометра при изменении механических и электрических параметров конструкции. Возможность включения последовательной серии биморфных элементов позволяет повысить чувствительность на выходе преобразователя до $10 \text{ В} \cdot \text{с}^2/\text{м}$ в рабочей полосе частот 10–100 Гц, что более чем на порядок превышает чувствительность имеющихся в настоящее время широкополосных систем, выполненных на основе пьезокерамических преобразователей. Резонансная частота акселерометра 520 Гц, поперечная чувствительность $\leq 1\%$. Описаны методика и особенности опытной регистрации сейсмических шумов акселерометром на сейсмостанции “Начики” на Камчатке. Показана эффективность использования системы регистрации для наблюдения приливных эффектов в сейсмических шумах.

DOI: 10.31857/S0032816220010115

ВВЕДЕНИЕ

Частотный диапазон 10–100 Гц фоновых колебаний поверхности Земли, обусловленных внутренними тектоническими процессами, является верхней границей рабочего диапазона стандартной аппаратуры сейсмических наблюдений и нижней границей технических вибраций. Однако чувствительность высокочастотных сейсмометров и низкочастотных датчиков вибраций является недостаточной для надежной регистрации эндогенных шумов Земли [2].

Для решения этой задачи предложен акселерометр, использующий сложную моду изгиба упругой биморфной пьезокерамической пластины [1–3]. Вместо традиционно используемой модели заделанной биморфной пластины с инерционной массой на свободном конце [4] нами рассмотрена S-мода изгиба пластины. Такая форма изгиба позволяет увеличить “рабочую” область деформации пьезокерамического преобразователя (рис. 1). Преимуществами предложенной конструкции являются использование не одиночного, а набора изгибных преобразователей, а также возможность

уменьшения коэффициента поперечной чувствительности и чувствительности к вращательным колебаниям.

Механическая конструкция акселерометра [3] содержит большое число конструктивных элементов, определяющих характеристики системы. Так, исходя из конкретной задачи регистрации выбранного выходного электрического параметра (напряжения или заряда), параметры конструкции могут существенно меняться.

Для выбора и оптимизации параметров конструкции, обеспечивающих выполнение поставленной задачи наблюдений, имеет смысл использовать современные возможности моделирования. В данной работе использован программный пакет Comsol Multiphysics 5.4 для комплексного решения физических задач на основе метода конечных элементов. Физические разделы механической теории упругости и электростатики позволяют полностью промоделировать как работу упругой механической системы акселерометра, так прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты преобразователя. Программная среда включает основные этапы моделирования: опре-

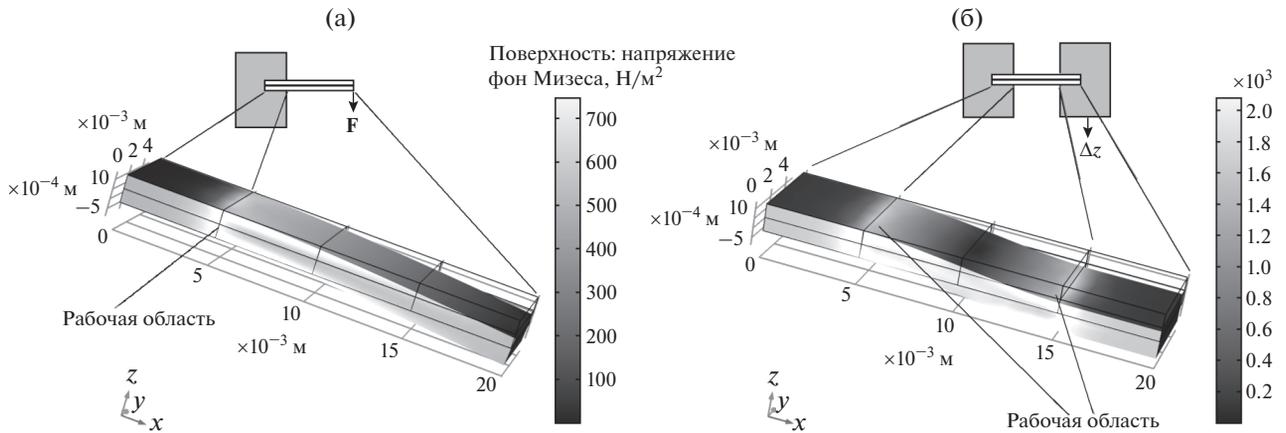


Рис. 1. Распределение эквивалентного напряжения по Мизесу (характеристика потенциальной энергии формоизменения) на поверхности биморфной пластины при различной форме ее изгиба: **а** – модель заделанного биморфа с одной стороны и приложенной вертикальной силы **F** к свободной границе с другой стороны; **б** – модель двухсторонне заделанного биморфа со смещением на величину Δz , формирующая S-моду изгиба. На рисунке схематически представлены области заделки пластин и участки рабочей поверхности пластин с максимальной деформацией и концентрацией поверхностного заряда.

деление геометрических параметров, физических параметров используемых материалов, визуализацию и исследование результатов.

КОНСТРУКЦИЯ И ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ АКСЕЛЕРОМЕТРА

Исходным шагом при моделировании физического процесса в пакете Comsol Multiphysics является задание геометрии объектов. На рис. 2 представлена расчетная конструкция акселерометра. Она представляет собой колебательную механическую систему, где в качестве пружин используются пьезокерамические пластины. Концы пластин заделаны в соединительные муфты так, чтобы при растяжении и сжатии пружин достигался S-образный изгиб пластин. Конструкция пружины содержит две биморфные пластины. Это минимальное количество пластин для достижения искомой формы изгиба. При необходимости по-

нижения жесткости пружины количество пластин может быть увеличено. Для компенсации синфазных компонент механических колебаний рассмотрено дифференциальное включение упругих элементов: пружины, расположенные над инерционной массой, испытывают сжатие, а пружины, расположенные под инерционной массой, растягиваются (см. рис. 2). Результаты моделирования сопоставлялись с характеристиками реального макета (рис. 3), в каждом дифференциальном плече которого установлено по три упругих элемента, включающих в себя пару пьезокерамических биморфных пластин.

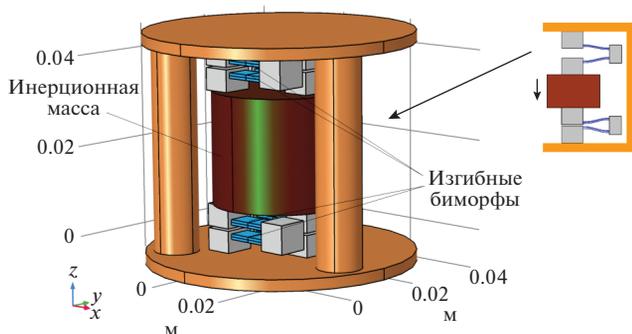


Рис. 2. Модельная геометрия конструкции акселерометра, построенная в Comsol Multiphysics.

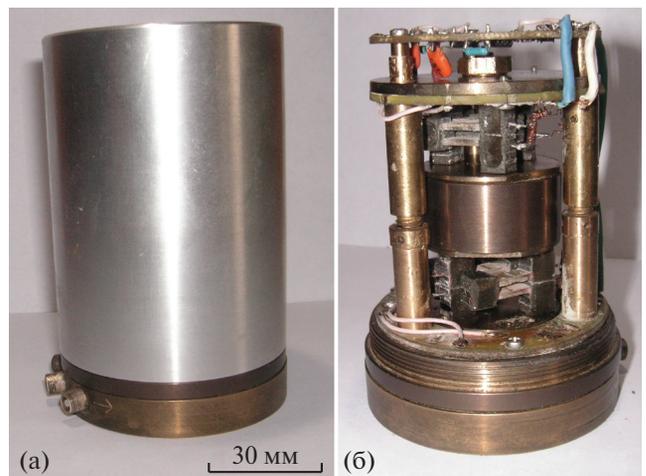


Рис. 3. Макетный образец акселерометра с S-образным изгибом биморфных пьезокерамических пластин: **а** – внешний вид; **б** – расположение элементов конструкции акселерометра.

Конструкция акселерометра содержит верхний и нижний упругие подвесы, инерционную массу, электронную плату предварительного усилителя. Предварительный усилитель представляет собой дифференциальный усилитель заряда с коэффициентом усиления 10, который предпочтителен при работе на высокоомную нагрузку. Как отмечено выше, для достижения нужной формы изгиба пластин использовано дифференциальное крепление упругих элементов. Для снятия выходного напряжения или заряда с электрода, напыленного на поверхность пластины, электрод разделен на два электрода, соответствующих областям сжатия и растяжения на отдельной пластине. Таким образом обеспечивается снятие разнополярных сигналов с отдельной пластины и соответственно дифференциальный характер выходного сигнала.

Биморфные пластины выполнены из пьезокерамики марки ЦТС-19, имеют размер $12 \times 5 \times 1.4$ мм и жестко заделаны в муфты. Муфты изготовлены из полиэфирной смолы, армированной стекловолокном. Инерционная масса колебательной системы акселерометра равна 350 г. Инерционная масса, стойки подвеса и основание прибора выполнены из латуни ЛС59-1.

Для сопоставления характеристик модели с действующим макетом рассмотрены параметры преобразователя ускорения основания $\Delta \ddot{z}$ при гармоническом воздействии в разность потенциалов ΔU на обкладках пластин. При этом использована последовательная коммутация снимаемых напряжений с отдельных пружин-преобразователей. Для модели выбрана пьезокерамика марки PZT-5, близкая по характеристикам к использованной в макете пьезокерамике ЦТС-19.

Одной из особенностей рассматриваемого акселерометра является режим движения инерционной массы в строго вертикальном направлении (расположение соответствует рис. 2). Такая конструкция предполагает минимизацию вклада в регистрируемый сигнал компонент колебаний по горизонтальным направлениям. Как правило, чувствительность имеющихся на рынке датчиков к ортогональным направлениям движения составляет 3–5%. Еще одной особенностью акселерометра является наличие в конструкции колебательной системы дополнительных механических контуров, которые могут влиять на линейность характеристик прибора в рабочей полосе частот.

С целью анализа указанных особенностей проведены модельные расчеты амплитудно-частотной характеристики акселерометра в широкой полосе частот, 1–2500 Гц, при трех ортогональных направлениях колебаний основания с постоянной величиной ускорения $a = 0.1$ м/с² (рис. 4).

Расчетное значение чувствительности акселерометра $H_Z = 29$ В · с²/м в рабочей полосе частот

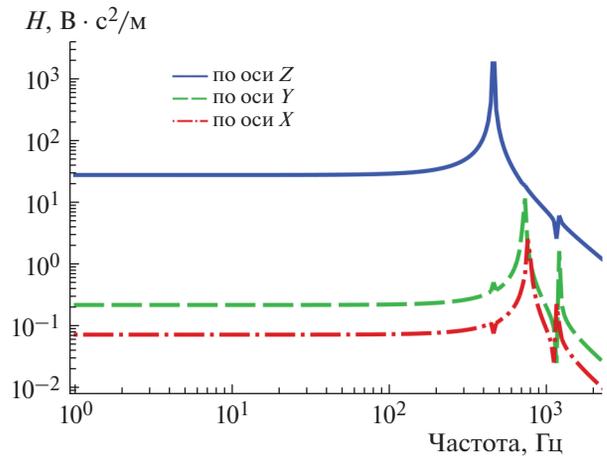


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика модели акселерометра, ориентированного вертикально (по оси Z) по ускорению, в трех взаимно перпендикулярных направлениях X, Y, Z.

10–100 Гц более чем на порядок превышает чувствительность имеющихся в настоящее время широкополосных систем, выполненных на основе пьезокерамических преобразователей [4, 5]. С учетом использования прецизионных малошумящих усилителей, имеющихся в настоящее время на рынке, такая чувствительность достаточна для регистрации ускорений $a_{\min} = 1 \cdot 10^{-7}$ м/с², что соответствует смещениям $4 \cdot 10^{-12}$ м на частоте 30 Гц, т.е. минимальным наблюдаемым уровням высокочастотного сейсмического шума.

Экспериментальное значение чувствительности для макета акселерометра (рис. 3) составило $H_Z = 10$ В · с²/м, что близко к расчетной оценке. Повышенное расчетное значение может быть связано как с использованием в макете иной марки пьезокерамики, так и с более высокой резонансной частотой макетного акселерометра ($f_{\text{модель}} = 455$ Гц, $f_{\text{макет}} = 520$ Гц).

Чувствительность акселерометра к ускорениям в ортогональных X-, Y-направлениях: $H_Y = 0.2$ В · с²/м, $H_X = 0.75$ В · с²/м – не превышает 0.1%, что существенно при проведении прецизионных измерений. Направления X, Y соответствуют расположению модели, указанному на рис. 2. Столь малая величина обусловлена эффектом дифференциального включения преобразовательных элементов как в механической, так и в электрической части. На рис. 5 представлены распределения по поверхности пьезопластины плотности зарядов при различных направлениях воздействующего ускорения. Как следует из распределений, при направлении ускорений вдоль оси Z плотность заряда в областях максимальных деформаций (см. рис. 1б) имеет противоположные знаки и при дифференциальном включении суммируется. При ускорениях в

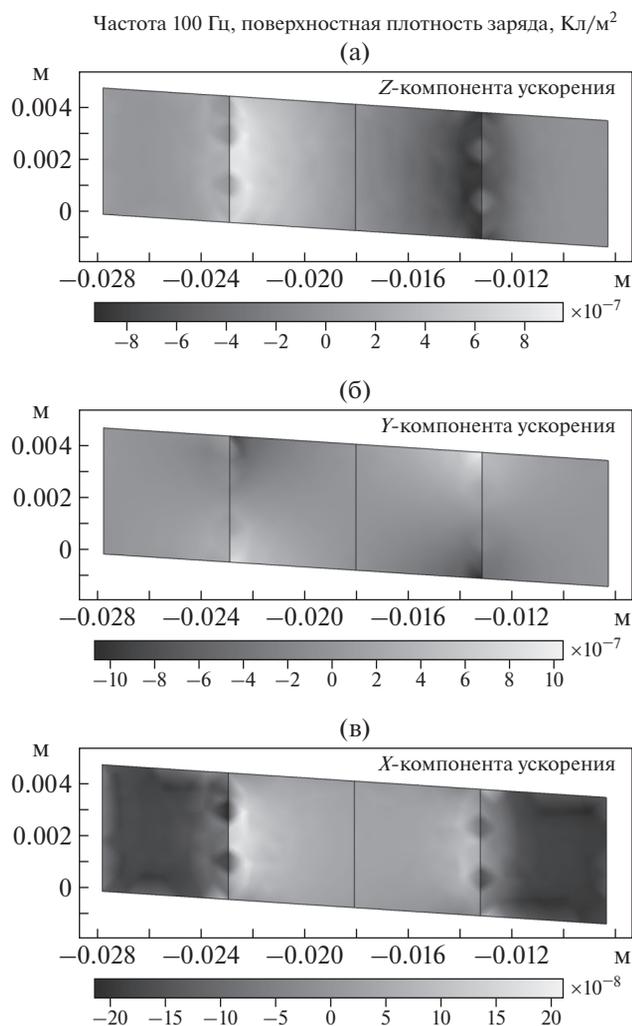


Рис. 5. Поверхностная плотность распределения заряда на поверхности биморфной пластины для акселерометра, ориентированного по оси Z , при различных направлениях действующего ускорения его основания: **а** – по оси Z ; **б** – по оси Y ; **в** – по оси X .

направлениях X , Y плотность заряда однополярная и соответственно компенсируется. Дополнительным фактором снижения чувствительности по X -, Y -направлениям является повышение жесткости упругой системы и соответственно увеличение резонансной частоты: $f_Z = 455$ Гц, $f_Y = 740$ Гц, $f_X = 800$ Гц.

Использованный программный пакет физического моделирования позволяет получить не только численный набор собственных частот колебаний сложной конструкции, но и визуализировать моды колебаний отдельных элементов, определяющих данный колебательный контур. Основной паразитный резонанс по Z -направлению определяется колебаниями пластин, нагруженных массой соединительной муфты, $f_{Z1} = 1050$ Гц. Он оказывается существенно выше рабочей полосы,

и его эффект может быть снижен при использовании антиалайзинговой низкочастотной фильтрации (фильтрации для устранения эффекта наложения спектров).

Анализ полученного поверхностного распределения заряда на биморфной пьезокерамической пластине (рис. 5) указывает на высокую неоднородность распределения. Основная часть заряда концентрируется в области, прилегающей к границам крепления пластин. При этом в центральной области пластин поверхностная плотность близка к нулю. Это позволяет дополнительно повысить коэффициент электромеханической связи путем ограничения поверхности электрода частью поверхности с максимальной плотностью заряда. Модельный расчет показывает, что при уменьшении поверхности электродов в три раза снимаемый заряд составит 0.9 от исходного. При этом коэффициент электромеханической связи возрастет в $0.9 \cdot 3 = 2.7$ раза.

В заключение следует отметить, что возможности моделирования характеристик акселерометра в пакете COMSOL Multiphysics намного больше рассмотренных в данной работе. Пакет позволяет исследовать различные температурные режимы, предельные прочностные нагрузки, влияние воздействия электромагнитных помех и т.д. Это дает возможность решить основную задачу построения акселерометра с учетом поставленных требований и особенностей эксплуатации. В данном случае анализ модели ограничивался вопросом регистрации сверхмалых колебаний поверхности в полосе частот, составляющей десятки герц.

Коммутация шести пружин, входящих в упругий подвес, может быть обеспечена различными способами и определяется решаемой задачей. При коммутации пружин с дифференциальным выходом появляется возможность проведения калибровки и оценки чувствительности системы. Для этого используется обратный пьезоэффект, когда одна из групп (верхняя или нижняя) пружин работает в режиме двигателя, а другая – в режиме генератора напряжения. Используя метод электромеханических аналогий, можно получить оценочные соотношения [6].

Будем предполагать, что биморфные пружины имеют одинаковые электрические и механические параметры. Исходными данными являются значения напряжения на стороне генератора при подаче напряжения заданной величины и частоты на стороне двигателя $U_r = \Phi(U_d)$. Оценка амплитудно-частотной характеристики включает в себя два этапа: расчет коэффициента электромеханической трансформации N и последующий расчет зависимости выходного напряжения от ускорения основания.

В расчетах используются параметры акселерометра, которые можно экспериментально изме-

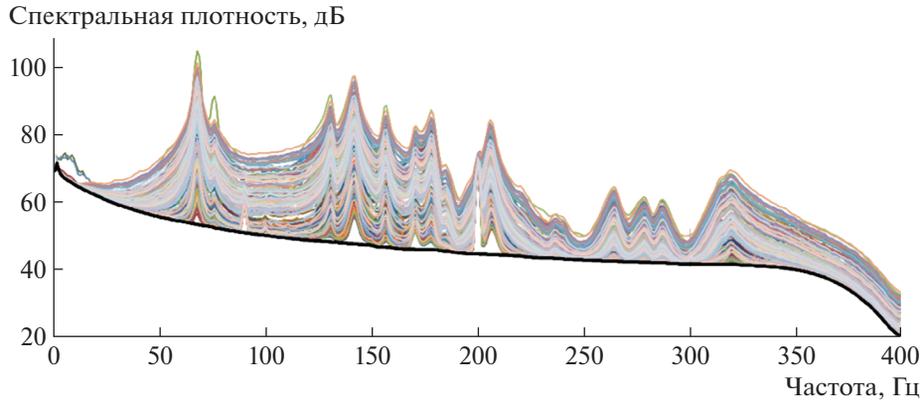


Рис. 6. Пример спектров часовых отрезков сейсмического шума, полученных на сейсмостанции “Начики” (Камчатка) (200 шт., 31.01.2014 8:00 – 08.02.2014 15:00). Минимальные значения соответствуют спектру собственных шумов аппаратуры (жирная линия).

речь: инерционная масса колебательной системы M , электрическая емкость биморфной пластины C , собственная частота колебаний ω_0 , механическая добротность Q , отношение амплитуд напряжений на стороне генератора и двигателя $\delta = U_r(\omega_0)/U_d(\omega_0)$. Тогда, исходя из электрической схемы работы в режиме электромеханоэлектрического преобразователя:

$$N = \sqrt{\frac{\delta}{1-\delta} \frac{M\omega_0 C}{Q}}. \quad (1)$$

Зная величину N , для оценки амплитудно-частотной характеристики справедливо выражение:

$$H(\omega) = \frac{2MN}{4N^2 + MC\omega_0^2 - MC\omega^2 + j\omega \frac{MC\omega_0}{Q}}. \quad (2)$$

В соотношении (2) учтено, что в рабочем режиме работы акселерометра верхняя и нижняя группы пружин находятся в режиме генератора.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРИЛИВНЫХ ЭФФЕКТОВ В СЕЙСМИЧЕСКОМ ШУМЕ

Подходы к построению широкополосного акселерометра с повышенной чувствительностью открывают новые перспективы в исследовании сейсмических шумов и, в частности, их использования в целях прогноза землетрясений и исследования предвестников. Это было продемонстрировано при опытной эксплуатации акселерометра.

Широкополосный акселерометр был установлен на постаменте сейсмостанции “Начики” (Камчатка). Регистрация широкополосного сейсмического сигнала акселерометром проводилась одновременно с использованием узкополосной аппаратуры [7]. Задачей такого эксперимента ста-

вилась не только опытная эксплуатация прибора, но и сопоставление получаемых при его использовании результатов с материалами режимных наблюдений сейсмического шума узкополосной аппаратурой, организованных в Камчатском филиале ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН” и ориентированных на мониторинг напряженно-деформированного состояния среды.

Первичный анализ включал в себя построение ежечасовых спектров сейсмического шума. На рис. 6 представлены 200 спектров. Спектр сигнала представляет собой набор компонент со стабильным соотношением их спектральных плотностей. Преимуществом регистрации сигнала с использованием предлагаемого прибора по сравнению с узкополосной регистрацией стала возможность выделения частот с наибольшим соот-

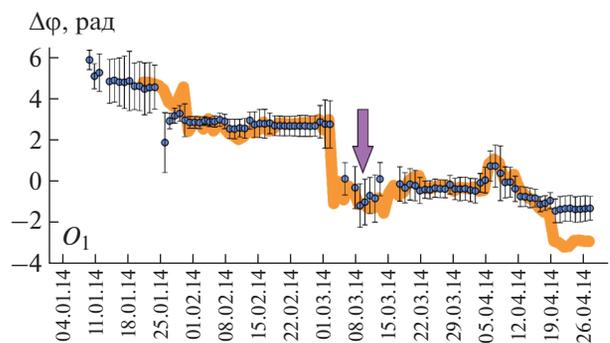


Рис. 7. Сопоставление временного хода фазового сдвига $\Delta\varphi$ приливной компоненты сейсмического шума при узкополосной ($f = 30$ Гц) (точки) и широкополосной (сплошная линия) регистрации относительно приливной волны O_1 . Стрелка указывает на время землетрясения 10 марта 2014 г. Магнитуда землетрясения $M_L = 5.0$, широта $\varphi = 52.06^\circ$ с.ш., долгота $\lambda = 157.83^\circ$ в.д., глубина $H = 136$ км, эпицентральное расстояние $\Delta = 115$ км.

ношением сигнал/шум, а также частот, на которых сигнал имеет заведомо техногенное происхождение (как пример, частоты 90 и 200 Гц на рис. 6). Выявленная устойчивость во времени частот, соответствующих спектральным максимумам, стала важным методическим результатом. Это позволило использовать разработанную для узкополосной регистрации процедуру мониторинга приливной компоненты сейсмического шума [8], включающую в себя расчет в скользящем временном окне амплитуды и фазы приливных вариаций спектра сейсмического шума. Приливное воздействие проявляется как периодическое (в соответствии с периодом волн, формирующих земные приливы) изменение амплитудного спектра сейсмического шума. Ранее [9] отмечалось, что в период подготовки сильного близкого землетрясения наблюдается стабилизация фазового сдвига между приливными вариациями амплитуды сейсмического шума и непосредственно приливным воздействием и последующее резкое изменение этого сдвига на 180° . Подобный эффект был получен и по данным опытной эксплуатации широкополосного акселерометра (рис. 7). Причем большим преимуществом по сравнению с узкополосной регистрацией стала возможность использования набора частот, а не единственной резонансной частоты и последующее усреднение получаемого временного хода, что позволило существенно уменьшить погрешность получаемых оценок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе эксперимента подтверждена возможность использования акселерометра для регистрации сверхмалых колебаний поверхности Земли в широком частотном диапазоне.

Высокочастотный широкополосный акселерометр повышенной чувствительности позволил

провести уникальный эксперимент по выделению перед сильным землетрясением фазовых изменений модуляции сверхслабых высокочастотных собственных шумов Земли, вызванных приливными деформационными процессами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-05-00185-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Черепанцев А.С.* // В сб. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: труды Третьей научно-технической конференции. (9–15 октября 2011 г. Петропавловск-Камчатский) Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2011. С. 410.
2. *Черепанцев А.С.* // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2014. № 1. С. 50.
3. *Черепанцев А.С., Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.* // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53. № 1. С. 29.
4. *Manfred Weber* Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K. <https://www.mmf.de/theorie.htm>
5. Seismic Accelerometer, Model 393B31, Specification Sheet, PCB Piezotronics. 2009. <http://www.pcb.com/>
6. *Аронов Б.С.* Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990.
7. *Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А.* // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 2. С. 24.
8. *Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н.* // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 110.
9. *Салтыков В.А.* // Физика Земли. 2017. № 2. С. 84.