

Взаимосвязь ускорений сейсмических движений дна и вариаций придонного давленияВ. А. Карпов^{1,*}, К. А. Семенцов^{1,†}, Х. Матсумото^{2,‡}, Й. Канеда^{3,§}¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики моря и вод суши
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.²Японское Агентство по Морским и Наземным Исследованиям и Технологий (JAMSTEC)
Япония, Натсусима, Йокосука 237-00061³Институт Образования, Исследований, и Кооперации регионов для Кризисного Менеджмента,
Сикоку, Университет Кагава, 1-1, Саиваи-чо, Такаматсу, Кагава 760-8521, Япония
(Статья поступила 13.07.2017; Подписана в печать 13.07.2017)

По данным глубоководных обсерваторий DONET исследована взаимосвязь вариаций придонного давления и ускорения колебаний дна при землетрясении Тохоку 2011. Методом кросс-спектрального анализа подтверждено существование линейной связи между вариациями давления и вертикальной компонентой ускорения в диапазоне частот «вынужденные колебания». Связь проявляется как близкое к единице значение квадрата когерентности при практически нулевом сдвиге фаз. Показано, что наблюдающиеся для некоторых станций незначительные отклонения от этого правила связаны с вкладом в вариации давления горизонтальных колебаний близлежащих подводных склонов.

PACS: 92.10.hl

УДК: 551.466.62; 550.344.42

Ключевые слова: цунами, DONET, придонное давление, ускорение колебаний дна, кросс-спектр, землетрясение Тохоку 2011.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее эффективным современным средством оперативного прогноза цунами являются глубоководные станции уровня моря. [1, 2]. Метод регистрации колебаний уровня моря, соответствующих длинным гравитационным волнам, был предложен С. Л. Соловьевым в 60–70 гг. 20 века [3] и основан на прецизионном измерении придонного давления. К настоящему времени развернуто несколько систем, использующих глубоководные датчики давления для измерения волн цунами: DART [4, 5], GITEWS [6, 7], NEPTUNE [8], EMSO [9], DONET [10–12].

Единственным недостатком описываемого метода является зашумленность сигнала проявлениями сейсмических и гидроакустических волн. Вблизи сейсмического источника уровень этих шумов существенно превосходит уровень сигнала цунами. Понимание природы сигналов, регистрируемых датчиками давления, имеет важное значение для выделения сигнала цунами в автоматическом режиме.

Спектр сейсмических движений дна охватывает диапазон от 0.001 до 100 Гц [1]. Нижняя граница спектра обусловлена максимальной длительностью процессов разрыва в очаге землетрясения, верхняя — затуханием высокочастотных сейсмических волн. В работах [1, 12] предложено рассматривать две характерные частоты водного слоя f_g , f_{ac} . При колебани-

ях дна гравитационные волны возникают на частотах $f < f_g = \alpha\sqrt{g/H}$, где g — ускорение силы тяжести, H — глубина океана, α — числовой коэффициент ~ 1 , значение которого определяется из аналитического решения задачи о генерации гравитационных волн колебаниями участка дна [1]. Мы возьмем $\alpha_{100} \approx 0.366$, соответствующее стократному ослаблению амплитуды волны по сравнению с амплитудой колебаний дна. Гидроакустические волны возникают при колебаниях дна: $f > f_{ac} = c/4H$, где c — скорость звука в воде, а f_{ac} — это частота нулевой моды водяного столба как естественного четверть-волнового резонатора ($f_n = c(1 + 2n)/4H$) [13]. В нашей работе мы исследуем частотный диапазон $f_g < f < f_{ac}$, который соответствует вынужденным колебаниям, когда водный слой следует за движениями дна. В этом диапазоне $p = \rho Ha$ из второго закона Ньютона. Заметим, что диапазону вынужденных колебаний соответствует значительная, а иногда и основная часть энергии регистрируемых колебаний [1].

Нашей целью в рамках данной работы было подтверждение линейной зависимости давления от вертикальной компоненты ускорения движения океанического дна в диапазоне частот вынужденных колебаний и проверка гипотезы, согласно которой небольшие отклонения от этой зависимости связаны со вкладом горизонтальных колебаний подводных склонов, расположенных вблизи глубоководных станций.

Возможность данного исследования обеспечила развернутая в 2006–2011 годах сеть глубоководных станций DONET, содержащая как датчики давления, так и сейсмометры [10–12].

*E-mail: va.karpov@physics.msu.ru

†E-mail: sebbest@yandex.ru

‡E-mail: hmatsumoto@jamstec.go.jp

§E-mail: kanedaykg@cc.kagawa-u.ac.jp

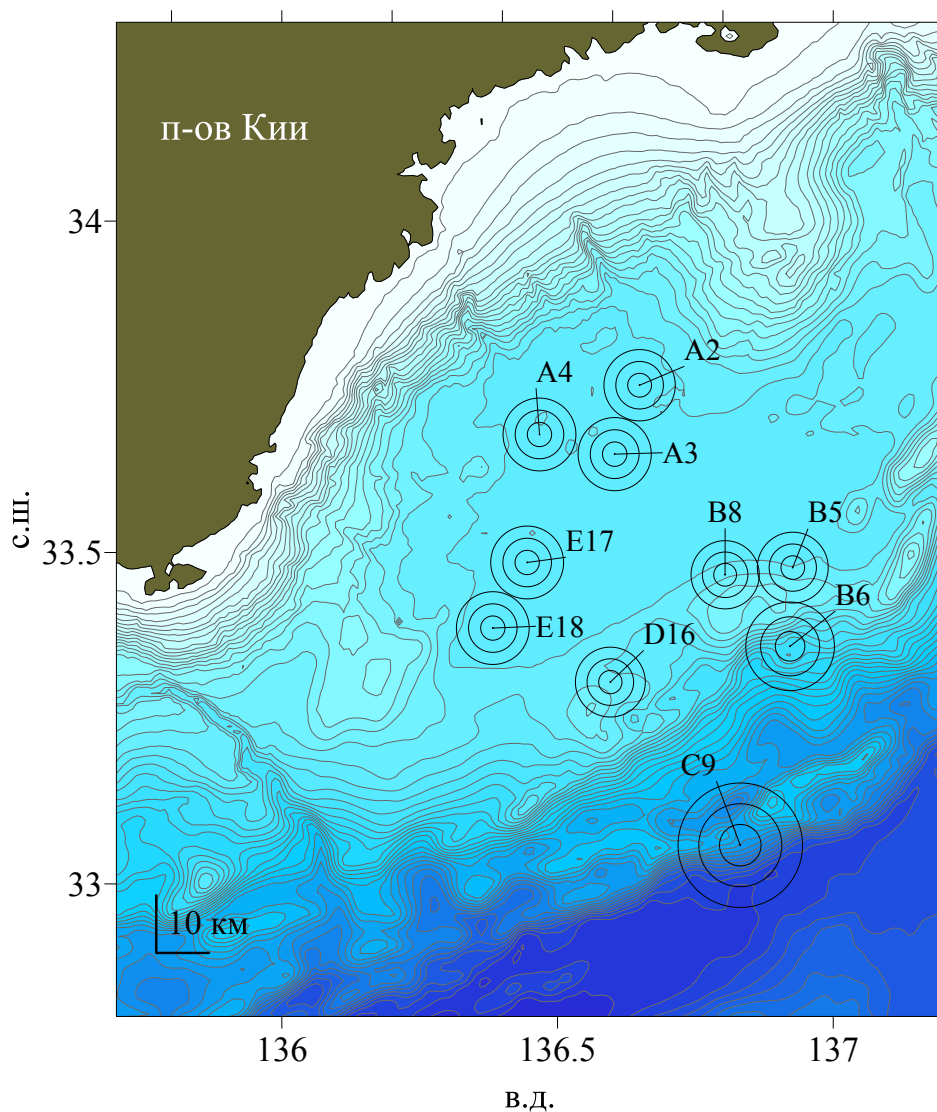


Рис. 1: Рельеф дна в районе размещения обсерваторий DONET. Радиусы круговых меток каждой станции равны 1,2 и 3-м глубинам океана в точках расположения станций. Изобаты построены с интервалом 100 м

1. ОПИСАНИЕ НАТУРНЫХ ДАННЫХ

Сеть DONET-1 размещена у юго-восточного побережья Японии в районе разлома Нанкай на границе Евразийской и Филиппинской плит. Филиппинская плита погружается под Евразийскую со скоростью около 65 мм/год. Мощные землетрясения случаются в этом районе каждые 100-150 лет, и основной целью сети является мониторинг сейсмической активности в этом регионе.

Сеть состоит из 5 управляющих (научных) узлов, к каждому из которых присоединены до 8 измерительных платформ. К измерительным платформам могут присоединяться различные датчики. Изначально это

блок давления и сейсмоблок, размещенные на расстоянии не более 10 м друг от друга. Блок измерения давления состоит из погруженных в масло двух датчиков давления, гидрофона и термометра. Сейсмоблок — это титановый цилиндр, содержащий в себе два сейсмметра: широкополосный велосиметр (Guralp CMG-3T) и акселерометр (Metrozet TSA-100S) [10, 11].

В нашей работе мы проводили анализ данных, полученных при землетрясении и цунами Тохоку 11 марта 2011 года. Катастрофическое землетрясение с моментальной магнитудой $M_w = 9.0$ произошло в 05:46 UTC вблизи острова Хонсю. Координаты эпицентра были определены JMA [14] как 38.322° с.ш. 142.369° в.д. К моменту землетрясения функционировали 10 станций DONET. Несмотря на отдаленность района

расположения DONET от эпицентра землетрясения (750 км), сила толчков была столь велика, что вызвала насыщение широкополосных велосиметров, и для анализа оказались пригодны только данные акселерометров.

В анализе использовались трехчасовые записи (с 05:30 UTC до 08:30 UTC 11 марта 2011). Это данные датчиков давления с частотой оцифровки 10 Гц и исключенной приливной составляющей колебаний. А также акселерограммы, имевшие частоту оцифровки 200 Гц и приведенные к частоте 10 Гц. Длина каждой записи составила 108000 отсчетов.

В качестве примера анализируемых волновых форм на рис. 2 представлены сигналы, полученные станцией КМА02. На графике четко проявляется основное сейсмическое событие M_w 9.0 и первый сильный афтершок M_w 7.9. Максимальное значение ускорения составило для данной станции 7.5 см/с^2 , а максимальная амплитуда вариаций давления — 44.5 КПа . Вступление волны цунами наблюдалось около 07:05 UTC и достигло максимальной высоты 40 см около 07:15.

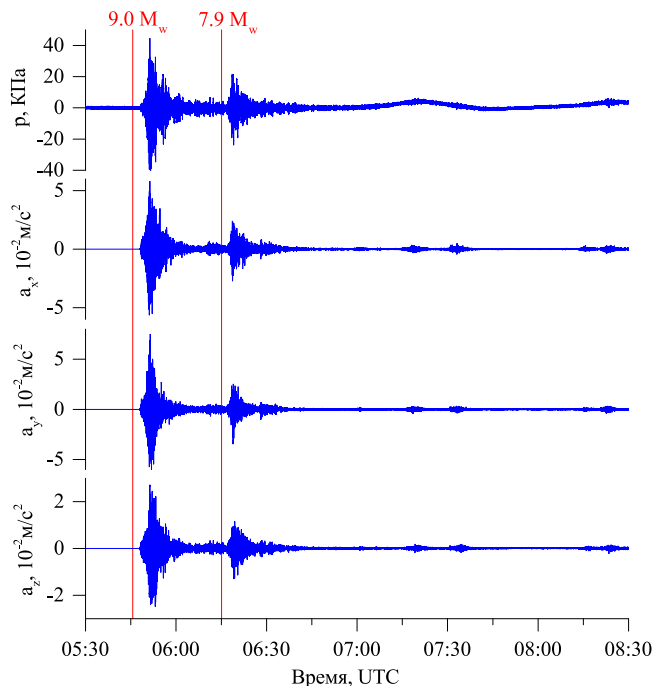


Рис. 2: Вариации давления p и компоненты ускорения a_x , a_y и a_z , зарегистрированные станцией DONET КМА02 11 марта 2011 года. Красными вертикальными линиями отмечены время главного толчка и первого сильного афтершока

2. КРОСС-СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Для исследования данных применялся кросс-спектральный анализ [15]. В целях уменьшения случайной ошибки использовались усреднённые оценки

данных величин. Усреднение было осуществлено с помощью метода Уелча [16]. В результате теоретических оценок и анализа тестовых синтетических сигналов, мы остановились на размере окна 2^{13} отсчетов с 50% перекрытием, что дает для наших 108000 отсчетов 27 окон. Теоретическая нормализованная случайная ошибка оценки квадрата когерентности составляет 3.1×10^{-3} при частотном разрешении 5 мГц.

Результаты кросс-спектрального анализа вариаций давления и вертикальной компоненты ускорения представлены на рисунке 3 синей линией. На них мы можем видеть, что сигналы действительно являются пропорциональными в диапазоне «вынужденных колебаний», т. е. в диапазоне между частотами f_g и f_a . Разница фаз между вертикальным ускорением и давлением в этом диапазоне также близка к нулю. Это совпадает с теоретическими представлениями.

Для некоторых станций наблюдаются заметные отклонения квадрата когерентности от 1 и разницы фаз от 0. Если мы обратимся к карте расположения глубоководных станций (рис. 1), то увидим, что отклонения возникают в тех случаях, когда станции расположены вблизи подводных склонов. С нашей точки зрения, нарушение линейной зависимости может быть объяснено вкладом в вариации давления горизонтальных колебаний подводных склонов.

3. ОЦЕНКА ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ ИСТОЧНИКА ВАРИАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Оценим дальное действие источника вариаций давления, расположенного на дне океана. Введем систему отсчета с вертикальной осью $0z$ и горизонтальными осями $0x, 0y$. Начало системы отсчета расположим на невозмущенной свободной поверхности воды. Водный слой будем считать несжимаемым, а действием силы тяжести пренебрежем. Эти допущения очевидно имеют силу в диапазоне вынужденных колебаний. Предположим, что прямоугольный участок $2a \times 2b$ ровного горизонтального дна на глубине H , гармонически колеблется с циклической частотой ω :

$$\eta(x, y, t) = Ae^{i\omega t}(\theta(x+a) - \theta(x-a))(\theta(y+b) - \theta(y-b)).$$

Тогда, в рамках линейной потенциальной теории, имеем следующую постановку задачи [1]:

$$\begin{aligned} \Delta F &= 0, \\ z = 0 : F &= 0, \\ z = -H : \frac{\partial F}{\partial z} &= \frac{\partial \eta}{\partial t}, \end{aligned}$$

где F — потенциал скорости течения. Решая задачу с помощью преобразования Фурье и метода разделения переменных, найдем выражение для величины F , по которому рассчитаем давление:

$$p(x, y, z, t) = -\rho \frac{\partial F}{\partial t} = \frac{4AH\rho\omega^2 e^{i\omega t}}{\pi^2} I(x, y, z),$$

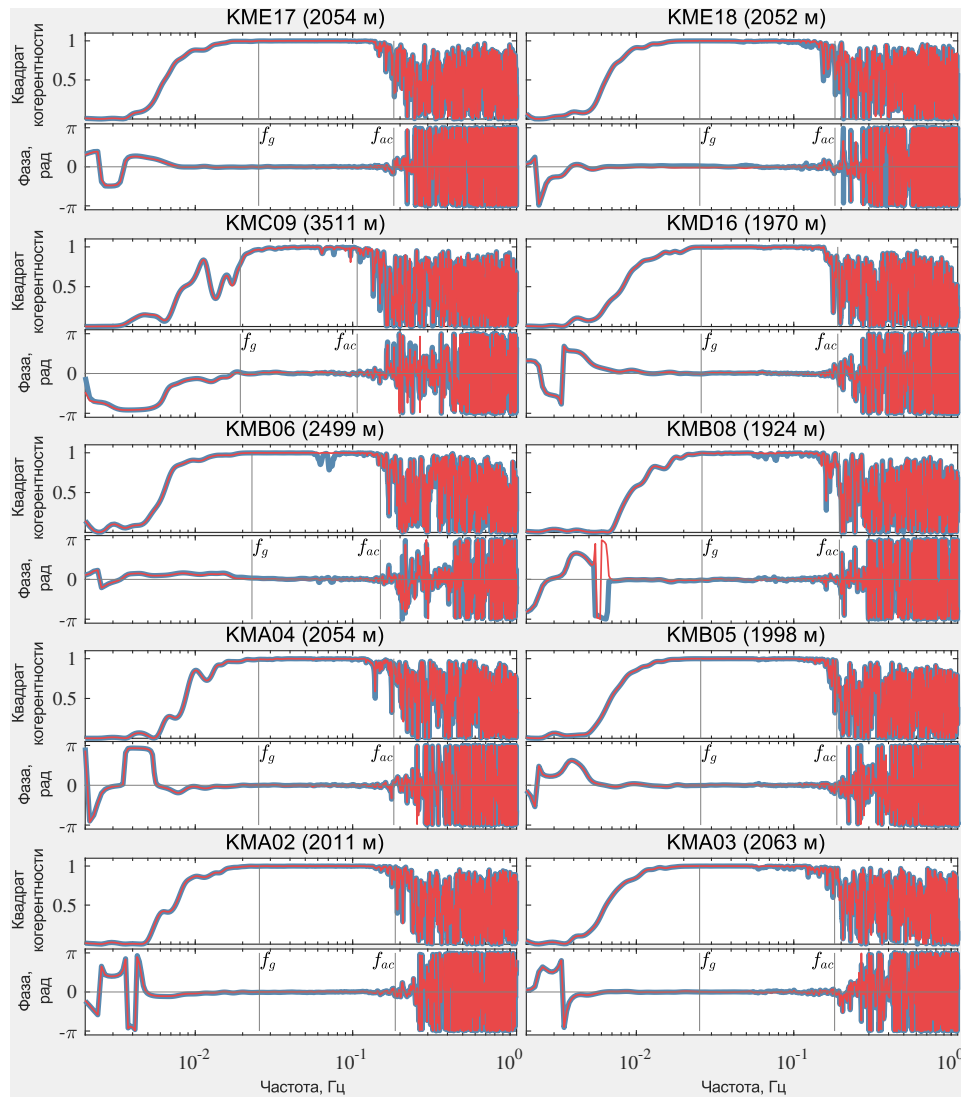


Рис. 3: Кросс-спектры вариаций придонного давления и ускорений сейсмических колебаний дна, зарегистрированные станциями DONET (синие кривые получены с учетом только вертикального ускорения, красные — с учетом оптимальной линейной комбинации всех трех компонент ускорения). Над каждым из спектров указано название станции и глубина океана в точке ее расположения. Вертикальные линии соответствуют теоретическим значениям критических частот f_g и f_{ac} , ограничивающих диапазон вынужденных колебаний

где

$$I(x, y, z) = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{\sin(ma)}{m} \frac{\sin(nb)}{n} \frac{\text{sh}(kz)}{k \text{ch}(k)} \cos(mx) \cos(ny) dm dn.$$

В последних выражениях x, y, z, a, b, m, n — безразмерные величины, выраженные в глубинах H и $k^2 = m^2 + n^2$. Таким образом амплитуду давления на дне ($z = -1$) можно представить как

$$p(x, y) = \frac{4}{\pi^2} \rho H A \omega^2 I(x, y) = \frac{4}{\pi^2} \rho H a_z I(x, y).$$

На рис. 4 представлены графики зависимости амплитуды придонного давления от расстояния до центра колеблющегося участка. Для представления результатов мы ограничимся случаем источника квадратной формы ($a = b$) и рассмотрим давление на оси $0x$ ($y = 0$). Из рисунка видно, что вне зависимости от размеров источника, удаление от его границы на расстояние равное одной глубине, снижает амплитуду давления на порядок, а при удалении на три глубины — на три порядка. Следовательно, значимый вклад в давление вносят колебания дна, происходящие на удалении не более 2–3 глубин океана от точки измерения.

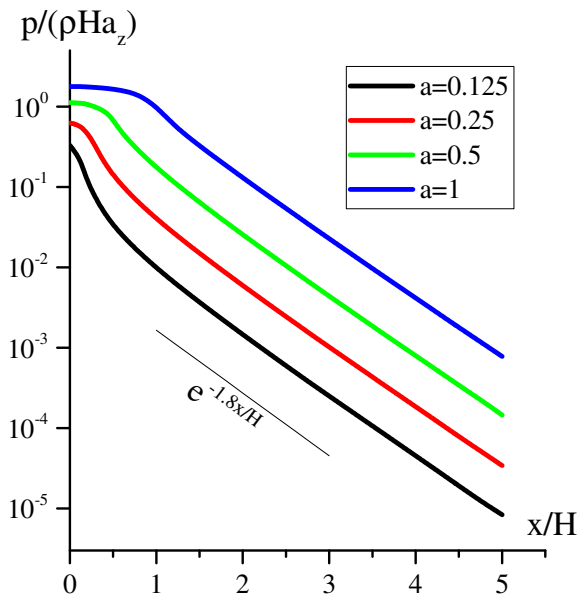


Рис. 4: Зависимость амплитуды придонного давления, создаваемого источником квадратной формы (вертикальные колебания участка дна), от расстояния до центра источника. Расчет выполнен для четырех различных размеров источника (указаны на рисунке). Поведение расчетных кривых вне источника соответствует $\sim e^{-1.8x/H}$ (тонкая черная линия)

4. КРОСС-СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С УЧЕТОМ ТРЕХ КОМПОНЕНТ УСКОРЕНИЯ

Пусть поверхность неровного дна описывается функцией $z = -H(x, y)$. Тогда вклад горизонтальных компонент движения неровного дна в движения вертикального столба жидкости, формирующего вариации давления, можно выразить [1] формулой:

$$p = -\rho \left(\frac{\partial H}{\partial x} a_x + \frac{\partial H}{\partial y} a_y + a_z \right).$$

Возьмем участок дна $6H \times 6H$, центром которого является станция DONET, разобьем его на n^2 квадратов, для каждого из которых известны средняя глубина H_j и ее градиенты $\partial H / \partial x|_j$ и $\partial H / \partial y|_j$. Учитывая вышеизложенное и предполагая, что для нашего диапазона частот и выделенного участка дна можно считать его колеблющимся как единое целое, мы можем получить результирующее давление как сумму вкладов от каждого квадрата:

$$p = \sum_j p_j = \sum_j \frac{4I_j H_j \rho}{\pi^2} \left[\frac{\partial H}{\partial x} \Big|_j a_x + \frac{\partial H}{\partial y} \Big|_j a_y + a_z \right] = \rho (k_x a_x + k_y a_y + k_z a_z).$$

Таким образом, если наше предположение верно, должна существовать линейная комбинация временных рядов компонент ускорения, обладающая «идеальным» кросс-спектром с давлением. И действительно, такие комбинации могут быть найдены с помощью поиска максимума интеграла по кривой квадрата когерентности в диапазоне частот вынужденных колебаний. Результаты для найденных комбинаций представлены на рис. 3 красной линией. Хорошо видно, что наблюдаемые на синих кривых «дефекты» квадрата когерентности и разности фаз могут быть исправлены при учете горизонтальных колебаний подводных склонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взаимный анализ вариаций придонного давления и ускорений движения дна, зарегистрированных во время катастрофического землетрясения Тохоку 2011, подтверждает существование диапазона частот вынужденных колебаний, в котором вариации давления линейно зависят от вертикальной компоненты ускорения колебаний дна. Проявлением этой линейной связи является единичное значение квадрата когерентности при нулевом сдвиге фаз. Установлено, что наблюдающиеся незначительные отклонения от этого правила обязаны вкладу горизонтальных колебаний близлежащих подводных склонов. Подтверждена корректность теоретического определения частот, ограничивающих диапазон вынужденных колебаний. Теоретически показано, что вариации давления, вызываемые колебаниями участка дна, убывают при удалении от границы источника по закону $\sim \exp(-1.8x/H)$.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 16-35-00232, 16-55-50018). Данные DONET были получены в рамках договора между Физическим факультетом МГУ и JAMSTEC.

- [1] Levin B., Nosov M. Physics of tsunamis. 2-nd ed. London. Springer. 2016.
- [2] Rabinovich A. B., Eble M. C. *Pure Appl. Geophys.* **172**. P. 3281.
- [3] Соловьев С. Л. Проблема цунами. М.: Наука. С.7.
- [4] Titov V. V., Gonzalez F. I., Bernard E. N., Eble M. C.,

- Mofjeld H. O., Newman J. C., Venturato A. J. *Nat. Hazards.* **35**, 1. Special Issue. U.S. National Tsunami Hazard Mitigation Program. 2005. P. 41.
- [5] Bernard E. N., Meinig C. *OCEANS 2011. IEEE.* P. 1.
- [6] Rudloff A., Lauterjung J., Munch U., Tinti, S. *Natl. Haz. Earth Sys. Sci.* 2009. **9**. P. 1381.

- [7] Munch U., Rudloff A., Lauterjung J. *Natl. Haz. Earth Sys. Sci.* 2011. **11**. P. 765.
- [8] Thomson R., Fine I., Rabinovich A., Mihaly S., Davis E., Heesemann M., Krassovski M. *Geophys. Res. Lett.* 2009. **38**. L11701.
- [9] Favali P., Beranzoli L. *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2009. **602**. P. 21.
- [10] Araki E., Yokobiki T., Kawaguchi K., Kaneda Y. Underwater Technology Symposium (UT). 2013. IEEE International. P. 1.
- [11] Araki E., Kawaguchi K., Kaneko S., Kaneda Y. OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean. IEEE. P. 1.
- [12] Hiroyuki M., Nosov M.A., Kolesov S.V., Yoshiyuki K. *J. Disaster Res.* **12**. 2017. P. 163.
- [13] Bolshakova A., Inoue S., Kolesov S., Matsumoto H., Nosov M., Ohmachi T. *Russ. J. Earth Sci.* 2011. **12**, N2. P. 1.
- [14] Электронный ресурс. Japan Meteorological Agency. URL: http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/Information_on_2011_Earthquake.html
- [15] Bloomfield P. Fourier analysis of time series: an introduction. 2nd ed. New York. Wiley, 2000.
- [16] Bendat J.S., Piersol A.G. Random data: analysis and measurement procedures. 4th ed. Hoboken. Wiley, 2010.

The correlation between accelerations of ocean-bottom seismic motions and pressure variations

V. A. Karpov^{1,a}, K. A. Sementsov^{1,b}, H. Matsumoto^{2,c}, Y. Kaneda^{3,d}

¹*Chair of Physics of Sea and Inland Water, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2-15, Natsushima, Yokosuka 237-00061, Japan*

³*Institute of Education, Research and Regional Cooperation for Crisis Management, Shikoku, Kagawa University
1-1 Saiwai-cho, Takamatsu, 760-8521, Japan*

E-mail: ^a*va.karpov@physics.msu.ru*, ^b*sebbest@yandex.ru*, ^c*hmatsumoto@jamstec.go.jp*, ^d*kanedaykg@cc.kagawa-u.ac.jp*

According to the data of deepwater DONET observatories, the relationship between ocean-bottom pressure variations and acceleration of ocean-bottom motions during the 2011 Tohoku earthquake was investigated. The method of cross-spectral analysis confirmed the existence of a linear relationship between the pressure variations and the vertical acceleration component in the «forced oscillation» frequency range. The connection is manifested as a close to unity value of magnitude-squared coherence at practically zero phase lags. It is shown that the slight deviations from this rule observed for some stations are related to the contribution to pressure variations of horizontal seismic motions of nearby underwater slopes. PACS: 92.10.hl

Keywords: tsunami, DONET, ocean-bottom pressure, ocean-bottom acceleration, cross-spectrum, the 2011 Tohoku earthquake.

Received 13 July 2017.

Сведения об авторах

1. Карпов Вячеслав Александрович — бакалавр; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: *va.karpov@physics.msu.ru*.
2. Семенов Кирилл Александрович — ст. лаборант; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: *sebbest@yandex.ru*.
3. Матсумото Хироюки — исследователь, тел.: +81-(0)46-866-3811, e-mail: *hmatsumoto@jamstec.go.jp*.
4. Канеда Ёшиюки — профессор, тел.: +81-87-832-1666, e-mail: *kanedaykg@cc.kagawa-u.ac.jp*.