

## ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

**Горизонтальные движения водного слоя при прохождении волн цунами по данным густой сети глубоководных станций уровня моря**Г. Н. Нурисламова<sup>а</sup>, М. А. Носов<sup>б</sup>*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: <sup>а</sup> gulnaz1205@yandex.ru, <sup>б</sup> nosov@phys.msu.ru*

Статья поступила 23.05.2016, подписана в печать 01.07.2016.

Предлагается метод восстановления горизонтальных движений водного слоя при прохождении волн цунами по данным густой сети глубоководных станций уровня моря. Метод применен для расчета горизонтальной скорости течения и горизонтального смещения частиц воды в области постановки станций DONET/JAMSTEC при прохождении цунами Тохоку 2011 г. Установлено, что амплитуда скорости составляла  $\sim 0.01$  м/с, а амплитуда смещения превышала 10 м.

*Ключевые слова:* измерения цунами, донные кабельные станции, уровень моря, длинные волны, горизонтальные движения.

УДК: 551.466.62. PACS: 91.30.Nw.

**Введение**

В последнее десятилетие широкое развитие получили методы изучения и прогноза волн цунами по данным глубоководных станций уровня моря [1, 2]. Принцип работы глубоководного мареографа — измерение вариаций давления датчиком, установленным на дне океана, — был предложен еще в конце 1960-х гг. [3]. Вариации придонного давления при прохождении длинных волн пропорциональны смещению свободной поверхности океана по вертикали от равновесного положения (закон гидростатики), что обеспечивает простую и удобную интерпретацию наблюдаемых сигналов. Кроме того, вариации давления, регистрируемые на дне океана, оказываются свободными от шумов — проявлений коротких поверхностных (ветровых) волн.

Среди глубоководных измерителей цунами наибольшую известность приобрела система Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART) [4], включающая ныне более 60 станций, установленных в цунамиактивных регионах Мирового океана. За единичными исключениями станции DART расположены на значительном удалении друг от друга: расстояние между станциями обычно превышает длину волн цунами. Поэтому восстановление волнового поля по данным станций DART представляет собой нетривиальную задачу, которая, вероятно, не имеет однозначного решения.

В 2006–2011 гг. вблизи побережья п-ва Кии (о-в Хонсю, Япония) была развернута сеть глубоководных обсерваторий DONET (Dense Ocean-floor Network System for Earthquakes and Tsunamis)/JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology) [5], включающая несколько десятков глубоководных станций, расположенных на расстоянии 15–20 км друг от друга. В противополо-

жность редкостоящим станциям DART система DONET представляет собой «густую сеть», которая позволяет различать детали волнового поля при прохождении цунами.

К моменту катастрофического землетрясения и цунами в Японии 11 марта 2011 г. (Тохоку 2011) функционировали 10 станций DONET, все они успешно зарегистрировали сейсмические и гравитационные волны, связанные с этим событием [6, 7]. Наличие данных о пространственном распределении и временной динамике вариаций придонного давления открывает уникальную возможность восстановления горизонтальных движений водного слоя при прохождении волн цунами.

Интерес к горизонтальным движениям не является случайным. Он связан с потенциальной возможностью использования этих данных в системе оперативного прогноза цунами. Дело в том, что информация о горизонтальных движениях может быть получена без привлечения данных об уровне моря, например с использованием дрейфтеров, оснащенных системой спутниковой навигации, спутниковых снимков высокого разрешения, акустических доплеровских измерителей течения.

Ранее горизонтальные движения водного слоя, сопровождающие генерацию и распространение цунами в открытом океане, исследовались почти исключительно теоретически [8–16]. Редким исключением из этого правила выступает работа [17], авторам которой по данным акселерометра удалось выявить горизонтальные (1.33 м) и вертикальные (0.14 м) движения айсберга в море Росса при прохождении Индонезийского цунами 2004 г.

Основными целями настоящей работы являются: 1) разработка метода восстановления горизонтальных движений водного слоя (скорость и смещение) при прохождении волн цунами по данным густой

сети глубоководных станций уровня моря и 2) восстановление горизонтальных движений при прохождении цунами Тохоку 2011 по данным, полученным системой DONET.

Завершая вводный раздел, заметим, что разрабатываемый метод восстановления горизонтальной скорости течения может иметь прямое практическое приложение для оперативного прогноза (предвычисления) цунами. Решение задачи прогноза, основанное на ассимиляции гидрофизических измерений [18], вообще говоря, предполагает введение в модель данных как о смещении поверхности океана, так и о горизонтальной скорости течения. Связано это с тем, что нелинейные уравнения теории длинных волн, используемые в прогностических моделях, записываются в терминах «смещение свободной поверхности» — «поле горизонтальной скорости течения».

### 1. Предварительная обработка данных

На рис. 1 представлено взаимное расположение станций DONET и очага цунами Тохоку 2011. Очаг цунами — область значительных косейсмических деформаций дна океана — показан изолиниями (красные линии — поднятие, синие — опускание, шаг изолиний 0.5 м). Косейсмические деформации рассчитаны нами [14] с применением формул Окада [19] по модели распределения подвижки, предоставленной Геологической службой США (USGS). Из рисунка видно, что станции DONET располагались на значительном удалении от очага цунами — примерно в 800 км.

На рис. 2 в качестве примера представлены вариации придонного давления, зарегистрированные станцией DONET A2 (красная кривая). Частота дискретизации сигнала составляет 10 Гц.

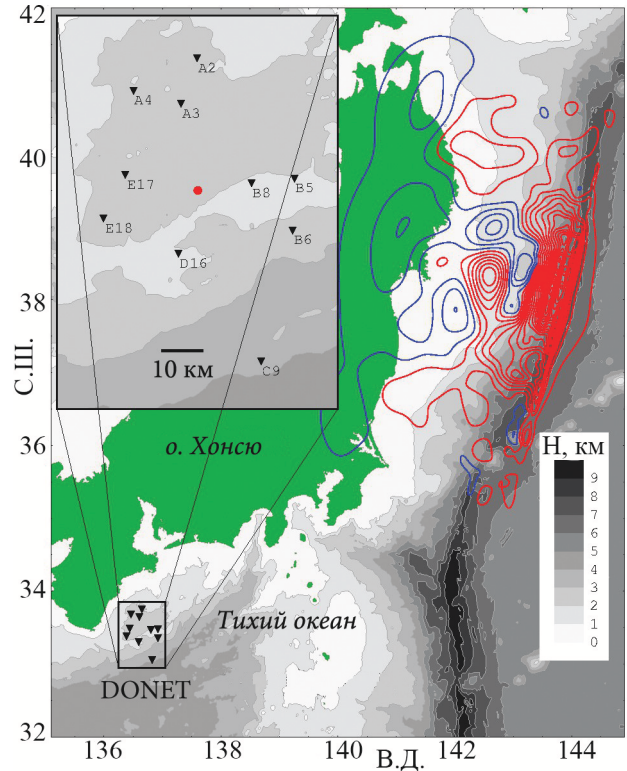


Рис. 1. Взаимное расположение станций DONET (черные треугольники) и источника цунами Тохоку 2011 г. — косейсмической деформации дна (красная линия — поднятие, синяя — опускание, интервал 0.5 м). Изобаты построены с интервалом 1 км, цветовая шкала глубин показана в правом нижнем углу. В левом верхнем углу на врезке детально показана область расположения станций DONET. В нижней части врезки по центру изображен масштаб длин (10 км). Красный кружок показывает точку, для которой выполнялись расчеты, представленные на рис. 3 и 4

Из сигнала, показанного на рисунке, предварительно было вычтено гидростатическое давление, вели-

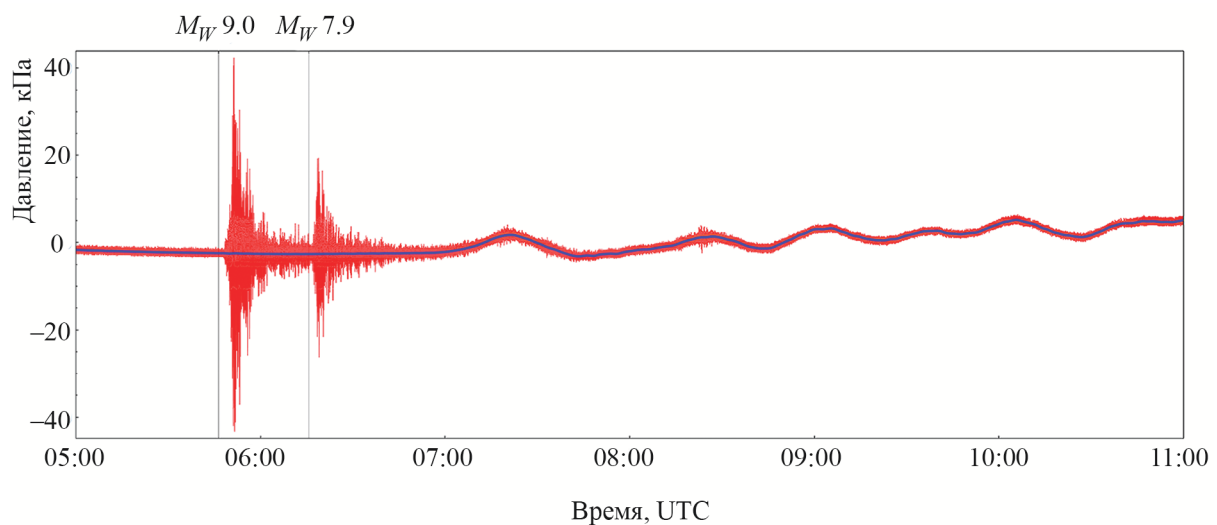


Рис. 2. Вариации придонного давления, зарегистрированные станцией A2 системы DONET во время землетрясения и цунами Тохоку 2011 г.: красная кривая — оригинальный сигнал, синяя кривая — результат низкочастотной фильтрации с частотой отсечки 0.005 Гц. Данные предварительно приведены к нулевому уровню путем вычитания гидростатического давления ( $\approx 20376$  кПа). Вертикальными линиями отмечены моменты начала основного землетрясения ( $M_W 9.0$ ) и первого сильного афтершока ( $M_W 7.9$ )

чина которого ( $\approx 20376$  кПа) многократно превосходит амплитуду вариаций ( $\approx 40$  кПа). Вариации придонного давления представляют собой суперпозицию проявлений сейсмических, гидроакустических и гравитационных волн. Вступление сейсмических волн заметно на записи через несколько минут после момента начала основного землетрясения ( $M_W 9.0$  — 05:46:24 UTC) и первого сильного афтершока ( $M_W 7.9$  — 06:15:40 UTC). Вступление лидирующей волны цунами наблюдается более чем через час после основного землетрясения. Примечательно, что сейсмические и порожденные ими гидроакустические волны проявляются на записи со значительно большими амплитудами по сравнению с волнами цунами [2, 7].

Метод восстановления горизонтальных движений водного слоя при прохождении цунами будем основывать на теории длинных волн. Использование теории длинных волн для обработки измеренных вариаций давления подразумевает, что из исходных данных должны быть выделены только те компоненты сигнала, которые соответствуют длинным гравитационным волнам. Опишем методику обработки сигналов.

На *первом этапе* вариации давления приводились к нулевому уровню путем вычитания из сигнала среднего значения за временной интервал 4.5 сут (с 09:00/10.03.2011 до 21:00/14.03.2011). Именно в указанный временной интервал все 10 станций работали без сбоев. Приведение сигнала к нулевому уровню необходимо для устранения статических погрешностей в измерениях придонного давления.

На *втором этапе* из вариаций давления отфильтровывались высокочастотные компоненты, которые не имеют отношения к длинным гравитационным волнам. Известно, что в монохроматической волне смещение свободной поверхности воды относительно равновесного положения  $\xi$  связано с вариациями придонного давления  $p$  следующей классической формулой [20]:

$$\frac{p}{\rho g \xi} = \frac{1}{\text{ch}(kH)}, \quad (1)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести;  $H$  — глубина океана;  $\rho$  — плотность воды;  $k$  — волновое число, связь которого с циклической частотой волн дается дисперсионным соотношением  $\omega^2 = gk \text{th}(kH)$ . Из формулы (1) следует, что короткие (высокочастотные) волны проявляются в вариациях придонного давления с ослаблением или не проявляются вовсе, в то время как длинные волны проявляются без ослабления — в соответствии с законом гидростатики  $p = \rho g \xi$ . Это свойство используется при интерпретации измерений гравитационных волн донными датчиками давления [1, 2, 21]. Итак, при удалении высокочастотных компонент сигнала, которые не могут иметь отношения к длинным гравитационным волнам, частота отсечки фильтра  $f_c$  выбиралась таким образом, чтобы вариации придонного давле-

ния  $p$  соответствовали закону гидростатики  $p = \rho g \xi$  с точностью не хуже 10% [2, 18]:

$$f_c \approx 0.0718 \sqrt{g/H}. \quad (2)$$

Станции системы DONET установлены на глубинах от 1924 м (B8) до 3511 м (C9), причем большинство из них — на глубинах около 2000 м. Для глубины 2000 м частота отсечки фильтра, рассчитанная с применением формулы (2), составляет  $f_c \approx 0.005$  Гц. Для дальнейшей обработки данных важно, что минимальные длины рассматриваемых гравитационных волн ( $\lambda_c = \sqrt{gH}/f_c \approx 13.9H \approx 28000$  м) соответствуют, а в ряде случаев и превосходят расстояние между станциями.

Результат выделения низкочастотной составляющей вариаций давления (частота отсечки фильтра  $f_c \approx 0.005$  Гц), зарегистрированных станцией A2, показан на рис. 2 синей кривой. Видно, что высокочастотные компоненты сигнала, соответствующие сейсмическим и гидроакустическим волнам, подавлены, а проявления приливных волн и волн цунами остались без изменения.

На *третьем этапе* обработки частота оцифровки сигнала уменьшалась с 10 Гц до 0.1 Гц. После фильтрации эту процедуру можно было проводить без потери информации. Затем для каждого дискретного момента времени по значениям давления в 10 опорных точках, местоположение которых определяется географическими координатами станций DONET, строилась интерполяционная функция (сплайны), описывающая пространственное распределение давления внутри области постановки станций.

В итоге обработки исходных рядов данных мы имели аналитическое по пространству и дискретное во времени представление для поля придонного давления  $p(\text{Lon}, \text{Lat}, t_i)$ , где  $\text{Lon}$  — долгота,  $\text{Lat}$  — широта,  $t_i$  — дискретные моменты времени.

## 2. Восстановление горизонтальных движений: метод и результаты

На рис. 3,а показана динамика уровня моря, рассчитанная с использованием интерполяционной функции  $p(\text{Lon}, \text{Lat}, t_i)$  для точки, которая расположена приблизительно в центре области постановки станций DONET ( $\text{Lon} = 136.65^\circ$  в.д.,  $\text{Lat} = 33.45^\circ$  с.ш.). Местоположение этой точки показано на рис. 1 красным кружком. Смещение свободной поверхности мы полагали связанным с придонным давлением законом гидростатики  $\xi(\text{Lon}, \text{Lat}, t_i) = p(\text{Lon}, \text{Lat}, t_i)/\rho g$ . Для численных расчетов использовались следующие значения плотности воды и ускорения силы тяжести:  $\rho = 1030$  кг/м<sup>3</sup>,  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup>.

Из рис. 3,а видно, что в колебаниях уровня моря проявляются как приливные волны, так и волны цунами. Амплитуда колебаний уровня ( $\sim 1$  м)

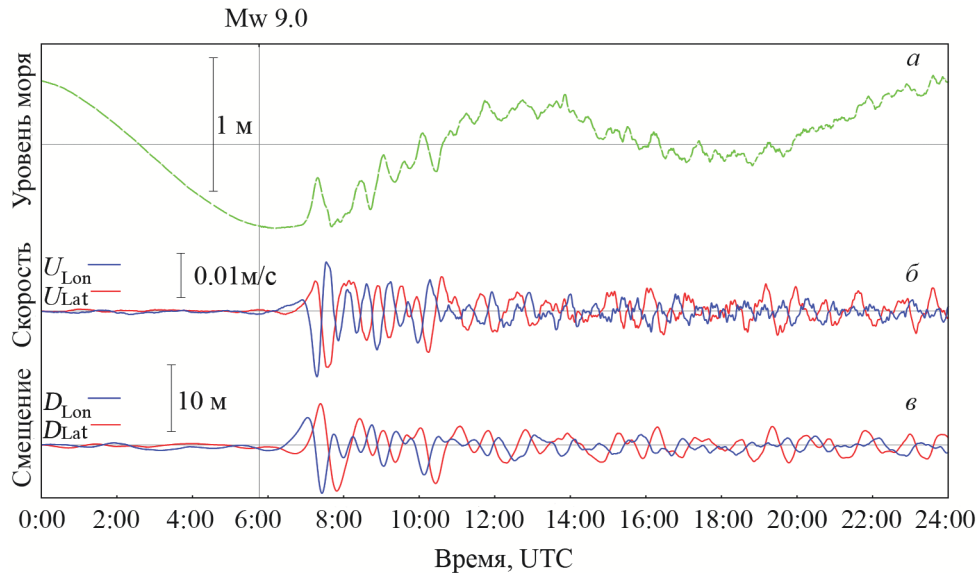


Рис. 3. Уровень моря (а), долготная и широтная компоненты скорости течения (б), долготная и широтная компоненты смещения частиц воды (в) при прохождении волн цунами Тохоку 2011 г., восстановленные по данным станций DONET в точке с координатами  $\text{Lon} = 136.65^\circ$  в. д.,  $\text{Lat} = 33.45^\circ$  с. ш. (красный кружок на рис. 1). Масштабы величин (1 м, 0.01 м/с, 10 м) показаны вертикальными отрезками. Вертикальной линией отмечен момент начала основного землетрясения ( $M_W 9.0$ )

существенно уступает глубине океана в рассматриваемой области ( $H \approx 2000$  м), что обеспечивает возможность использования линейной теории длинных волн [2, 8]. Наблюдаемый период волн цунами ( $\sim 1$  ч) заметно меньше периода вращения Земли вокруг своей оси. Это дает основание пренебречь в уравнениях силой Кориолиса, а также и приливообразующими силами. С учетом всех высказанных выше предположений динамическое уравнение теории длинных волн приобретает простой вид

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = -g \nabla \xi, \quad (3)$$

где  $\mathbf{U} \equiv (U_{\text{Lon}}, U_{\text{Lat}})$  — вектор горизонтальной скорости течения и его долготная и широтная компоненты,  $\nabla$  — дифференциальный оператор, действующий по горизонтали. Компоненты вектора  $\nabla \xi$  рассчитывались по полю придонного давления  $p(\text{Lon}, \text{Lat}, t_i)$  с использованием связи  $\xi = p/\rho g$ .

Зная правую часть уравнения (3), можно рассчитать поле горизонтальной скорости путем прямого интегрирования уравнения по времени. Начальное поле скорости течения будем полагать нулевым. Заметим, что на самом деле мы, конечно, рассчитываем не саму скорость, а «добавку» к существующим в океане фоновым течениям — линейность задачи позволяет использовать принцип суперпозиции.

Процедура интегрирования по времени в частотной области эквивалентна делению на частоту. Следовательно, эта процедура приводит к «усилению» низкочастотных компонент сигнала. Интегрирование по времени функции, которая известна приближенно (из натурных измерений), обычно приводит к ошибкам, возрастающим во времени. Для исключения таких эффектов временные ряды, представляющие собой компоненты вектора  $\nabla \xi$ , подвергались допол-

нительной обработке по следующей схеме. Каждый ряд обрабатывался скользящим средним с гауссовым окном. Затем из исходного ряда вычитался усредненный ряд. Фактически такая обработка представляла собой фильтр низких частот, который гарантированно приводит исходный ряд к нулевому среднему уровню. Ширина окна фильтра подбиралась таким образом, чтобы без искажения воспроизводить сигнал с периодами до 3600 с, а более длиннопериодные возмущения подавлять. В итоге с учетом предварительной обработки данных, описанной в разд. 1, мы имели дело с сигналом в диапазоне периодов от 200 до 3600 с, что соответствует классическому диапазону периодов волн цунами [2, 8].

На рис. 3, б представлен результат восстановления долготной и широтной компонент скорости течения в точке с координатами  $\text{Lon} = 136.65^\circ$  в. д.,  $\text{Lat} = 33.45^\circ$  с. ш. (красный кружок на рис. 1) за 11 марта 2011 г. с 00:00 до 24:00 UTC. Восстановление горизонтальной скорости для других точек, лежащих внутри области постановки станций DONET, дает близкие результаты. Поэтому здесь мы ограничимся только одним примером расчета для вышеназванной точки. Из рис. 3, б видно, что долготная и широтная компоненты скорости имеют небольшую амплитуду ( $\sim 0.01$  м/с). Из оценок, представленных в работе [18], следует, что время добегающей длинной волны от рассматриваемой точки до берега не превышает 1000 с. Следовательно, в данной точке только лидирующая волна цунами может рассматриваться как бегущая. На последующих стадиях волновое возмущение представляет собой суперпозицию бегущих, отраженных и захваченных шельфом волн. В бегущей синусоидальной длинной волне амплитуды скорости течения и



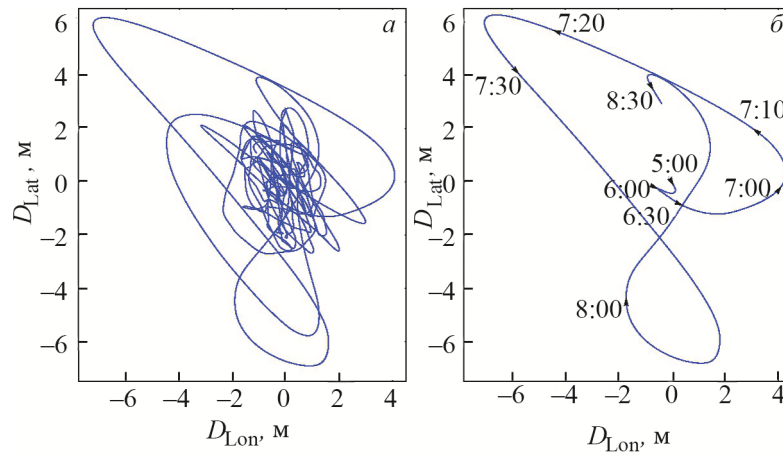


Рис. 4. Горизонтальные движения частиц воды (трек) при прохождении волн цунами Тохоку 2011 г., восстановленные по данным станций DONET в точке с координатами  $Lon = 136.65^\circ$  в. д.,  $Lat = 33.45^\circ$  с. ш. (красный кружок на рис. 1): а — с 00:00 до 24:00 UTC; б — с 05:00 по 08:40 UTC

и смещения поверхности воды  $\xi$  связаны простой формулой [8]

$$u = \xi \sqrt{g/H}, \quad (4)$$

которая позволяет получить независимую оценку скорости для лидирующей волны цунами. Из рис. 3, а видно, что амплитуда лидирующей волны цунами составила  $\xi \approx 0.3$  м. Глубина океана в рассматриваемой точке ( $Lon = 136.65^\circ$  в. д.,  $Lat = 33.45^\circ$  с. ш.), по данным GEBCO, составляет  $H \approx 2039$  м. Подставляя эти значения в формулу (4), получаем оценку  $u \approx 0.02$  м/с, которая хорошо согласуется с амплитудой скорости в лидирующей волне цунами, восстановленной путем интегрирования уравнения (3):  $\sqrt{U_{Lon}^2 + U_{Lat}^2} \approx 0.017$  м/с.

Выявление скоростей порядка сантиметров в секунду на фоне иных океанических процессов *in situ*, очевидно, представляет непростую задачу. Однако следует заметить, что при прохождении волны цунами вся водная толща движется по горизонтали одинаковым образом. Возможно, что использование именно этого свойства позволит достоверно обнаруживать слабые течения, ассоциирующиеся с цунами в открытом океане (например, системой дрейфтеров, расположенных на различных глубинах).

Известно, что при выходе цунами на мелководье амплитуда волн растет в соответствии с законом Грина:  $\xi \sim H^{-1/4}$  [2, 8]. Учитывая закон Грина и формулу (4), получаем, что, по сравнению с амплитудой волн, амплитуда скорости горизонтальных течений при уменьшении глубины растет существенно быстрее:  $u \sim H^{-3/4}$ . Быстрый рост скоростей течений в мелководной зоне, с одной стороны, дает возможность более надежного выявления цунами, но, с другой стороны, вблизи берега эти течения могут представлять серьезную угрозу для навигации.

Интегрирование скорости течения по времени позволяет восстановить горизонтальные смещения частиц воды. Методика обработки сигнала здесь была аналогична той, которая применялась для вос-

становления скорости течения. На рис. 3, в представлена динамика горизонтального смещения частиц воды (долготная и широтная компоненты) за 11 марта 2011 г. в окрестности точки с координатами  $Lon = 136.65^\circ$  в. д.,  $Lat = 33.45^\circ$  с. ш. (красный кружок на рис. 1). Соответствующий трек, который описывала частица воды, представлен на рис. 4. Из рисунка хорошо видно, что наиболее интенсивные движения сопровождают прохождение лидирующей волны цунами. Затем движения медленно затухают. В целом характер горизонтальных движений, восстановленных по данным DONET, соответствует результатам численного моделирования [14]. Видимая хаотичность и продолжительность горизонтальных движений, ассоциирующихся с волнами цунами, обязана влиянию захваченных волн. Амплитуда горизонтальных движений частиц воды составляет  $\sim 10$  м, что превышает амплитуду вертикальных движений (смещение поверхности воды  $\sim 0.3$  м) более чем на порядок. Такие значительные горизонтальные смещения, безусловно, могут быть обнаружены с использованием дрейфтеров, оснащенных системой спутниковой навигации.

### Заключение

Предложен метод восстановления горизонтальных движений водного слоя при прохождении волн цунами по данным густой сети глубоководных станций уровня моря. В основе метода лежит прямое интегрирование динамического уравнения теории длинных волн с известной правой частью — силой градиента давления, которая рассчитывается путем интерполяции распределенных точечных измерений донного давления. Описана методика обработки исходных рядов вариаций давления, ключевым элементом которой является выделение низкочастотного сигнала, соответствующего проявлениям длинных волн.

Работоспособность метода продемонстрирована на примере катастрофического цунами 11 марта

2011 г. (цунами Тохоку 2011), зарегистрированно-го сетью донных обсерваторий DONET/JAMSTEC, установленных на глубинах около 2000 м в 800 км от источника цунами. Установлено, что амплитуда горизонтальной скорости течения в волнах цунами составляла  $\sim 0.01$  м/с, а горизонтальные смещения ( $\sim 10$  м) более чем на порядок превышали вертикальные колебания поверхности воды ( $\sim 0.3$  м).

Данные DONET получены в соответствии с «Implementing Agreement Between Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology on Early tsunami detection methods on the base of real-time seafloor observatory network» (2013). Авторы признательны JAMSTEC за предоставленные данные.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 16-35-00231, 16-05-00053, 16-55-50018).

### Список литературы

1. Рабинович А.Б. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. **50**, № 5. С. 508. (Rabinovich A.B. // Izv. Atmos. Ocean Phys. 2014. **50**. P. 445.)
2. Levin B.W., Nosov M.A. Physics of Tsunamis, Second Edition. Springer, 2016.
3. Соловьев С.Л. // Проблема цунами. М.: Наука, 1968.
4. Bernard E., Meinig C. // Proc. of Oceans. XI MTS/IEEE. Piscataway (N.J.), 19–22 September 2011. N 6106894. Kona: IEEE, 2011.
5. Kaneda Y. // Proc. OCEANS Conf. 2010.
6. Matsumoto H., Kaneda Y. // Proc. XI SEGJ Intern. Symp. Yokohama, 2013. P. 493.
7. Носов М.А., Семенцов К.А., Колесов С.В. и др. // Докл. РАН. 2015. **461**, № 5. С. 593. (Nosov M.A., Seментsov K.A., Kolesov S.V., Matsumoto H., Levin B.W. // Dokl. Earth Sci. 2015. **461**. P. 408.)
8. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Н. Новгород, 1996.

9. Ингель Л.Х. // Докл. РАН. 1998. **362**, № 4. С. 548. (Ingel' L.Kh. Dokl. Earth Sci. 1998. **362**, N 7. P. 103.)
10. Доценко С.Ф. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1999. **35**, № 5. С. 706. (Dotsenko S.F. // Izv. Atmos. Ocean Phys. 1999. **35**. P. 641.)
11. Доценко С.Ф., Шокин Ю.И. // Вычисл. Технологии. 2001. **6**, № 1. С. 13. (Dotsenko S.F., Shokin Yu.I. // Computational Technologies. 2001. **6**. P. 13.)
12. Носов М.А., Мошенцева А.В., Левин Б.В. // Докл. РАН. 2011. **438**, № 5. С. 694. (Nosov M.A., Moshentseva A.V., Levin B.W. // Dokl. Earth Sci. 2011. **438**. P. 853.)
13. Носов М.А., Нурисламова Г.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2012. № 5. С. 44. (Nosov M.A., Nurislamova G.N. // Moscow University Phys. Bull. 2012. **67**, N 5. P. 457.)
14. Nosov M.A., Moshenceva A.V., Kolesov S.V. // Pure and Appl. Geophys. 2013. **170**, N 9, 10. P. 1647.
15. Носов М.А., Нурисламова Г.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. № 6. С. 54. (Nosov M.A., Nurislamova G.N. // Moscow University Phys. Bull. 2013. **68**. P. 490.)
16. Носов М.А., Нурисламова Г.Н., Мошенцева А.В. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. **50**, № 5. С. 591. (Nosov M.A., Nurislamova G.N., Moshenceva A.V. et al. // Izv. Atmos. Ocean Phys. 2014. **50**. P. 520.)
17. Okal E.A., MacAyeal D.R. // Seismol. Res. Letts. 2006. **77**. P. 659.
18. Носов М.А., Григорьева С.С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 4. С. 109. (Nosov M.A., Grigorieva S.S. // Mosc. Univ. Phys. Bull. 2015. **70**. P. 326.)
19. Okada Y. // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1985. **75**, N 4. P. 1135.
20. Лакомб А. Физическая океанография. М.: Мир, 1974. (Lacombe H. Cours d'océanographie physique: Théories de la circulation générale. Houles et vagues. (Gauthier-Villars, Paris, 1965).)
21. Кузнецов К.И., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Ковалев П.Д. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. **52**, № 2. С. 242. (Kuznetsov K.I., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Kovalev P.D. // Izv. Atmos. Ocean Phys. 2014. **50**, N 2. P. 213.)

### The horizontal motion of a water layer during the passage of tsunami waves based on data from a dense ocean-floor network of deepwater sea-level stations

G. N. Nurislamova<sup>a</sup>, M. A. Nosov<sup>b</sup>

<sup>1</sup>Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>gulnaz1205@yandex.ru, <sup>b</sup>nosov@phys.msu.ru.

A method for the retrieval the horizontal motion of a water layer during the passage of a tsunami wave is proposed based on the data from a dense network of sea-level deepwater stations. The method is applied for calculation of the horizontal velocity of the flow and displacement of water particles in the vicinity of the DONET/JAMSTEC observatories during the passage the 2011 Tohoku tsunami. It was found that the amplitude of the flow speed was  $\sim 0.01$  m/s, while the amplitude of the displacement exceeded 10 m.

**Keywords:** tsunami measurements, bottom cable stations, sea level, long waves, horizontal motion.

PACS: 91.30.Nw.

Received 23 May 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2016. **71**, No. 5. Pp. 520–525.

### Сведения об авторах

1. Нурисламова Гульназ Нуровна — аспирантка; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: gulnaz1205@yandex.ru.

2. Носов Михаил Александрович — докт. физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: nosov@phys.msu.ru.