

УДК 551.466

О ВОЗМОЖНОСТИ ЦУНАМИ В ОХОТСКОМ МОРЕ ПРИ ГЛУБОКОФОКУСНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

© 2016 г. А. И. Зайцев^{1,2}, Е. Н. Пелиновский¹⁻³, А. А. Куркин², И. С. Костенко^{1,2}, А. Ялченир⁴

¹Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН
693023 Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
603950 Нижний Новгород, ул. Минина, 24

³Институт прикладной физики РАН 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

⁴Технический университет Центральной Азии 06800, Турция Анкара, бульвар Думлупинара, 1
(Middle East Technical University, 06800, Ankara, Turkey, Dumlupinar Bulvari)

E-mail: aizaytsev@mail.ru, aakurkin@gmail.

Поступила в редакцию 17.11.2014 г.,
после доработки 24.09.2015 г.

Произошедшее 24 мая 2013 г. в акватории Охотского моря землетрясение магнитудой 8.3 явилось наиболее сильным в этом регионе. Проведено моделирование возможного цунами от такого землетрясения. Расчеты подтвердили, что высоты волн достаточно малы, поскольку глубина гипоцентра землетрясения была 640 км. Дан анализ колебаний буев DART в окрестности очага землетрясения. Показано, что они не связаны с волнами цунами. Анализ имеющихся мареограмм в различных пунктах Охотского моря показал, что в одном случае (о. Итуруп) наблюдаемые колебания уровня моря с высотой около 4 см могут быть отождествлены с волнами цунами.

Ключевые слова: землетрясение, цунами, численное моделирование, гипотетический источник цунами, Охотское море.

DOI: 10.7868/S0002351516020103

ВВЕДЕНИЕ

24 мая 2013 г. 05:44:49 UTC (9:44 по московскому времени) произошло сильное землетрясение в западной части Охотского моря. По данным геологической службы РАН [15] магнитуда основного толчка составила 8.3 и координаты эпицентра: 54.874° N, 153.281° E; глубина гипоцентра составила 640 км (рис. 1). Другие характеристики землетрясения представлены в [13]. Сахалинским центром цунами была объявлена тревога цунами на всем охотоморском побережье о-ва Сахалин и Курильских о-ов; отбой тревоги прозвучал 24 мая в 10 часов 17 минут по московскому времени, спустя 33 минуты после землетрясения.

Следует заметить, что данное землетрясение явилось сильнейшим в акватории Охотского моря за последние 100 лет. Сейсмические волны, возбужденные этим землетрясением, распространились на большие расстояния и привели к колебаниям почвы на расстоянии до 8000 км; они ощущались в центральной части России, в том числе в Москве и Нижнем Новгороде [7]. Глубина гипоцентра в 640 км землетрясения 24 мая 2013 г.

даже с такой большой магнитудой, как 8.3 слишком велика, чтобы вызвать заметные волны цунами. Если бы глубина фокуса была бы меньшей, то волны цунами могли бы быть катастрофическими. Сейсмичность этой части Охотского моря приурочена к так называемой зоне Заврицкого–Беньофа и обусловлена субдукцией океанической Тихоокеанской плиты под Евразийскую, которая на удалении от глубоководной впадины (порядка 700 км) находится на глубине не менее 600 км. Мелкофокусная сейсмичность в данном районе практически полностью отсутствует. Поэтому с точки зрения цунами надо обсуждать только глубоководные землетрясения.

Целью настоящей статьи является оценка возможных параметров волн цунами, которые могли бы возникнуть при землетрясении 24 мая 2013 г., и, как нам представляются, зарегистрированы на о-ве Итуруп. Обычно глубоководные землетрясения даже не анализируются с точки зрения возможных цунами. Поэтому другой целью данной статьи является привлечение внимания к выяснению возможностей современных методов расчета

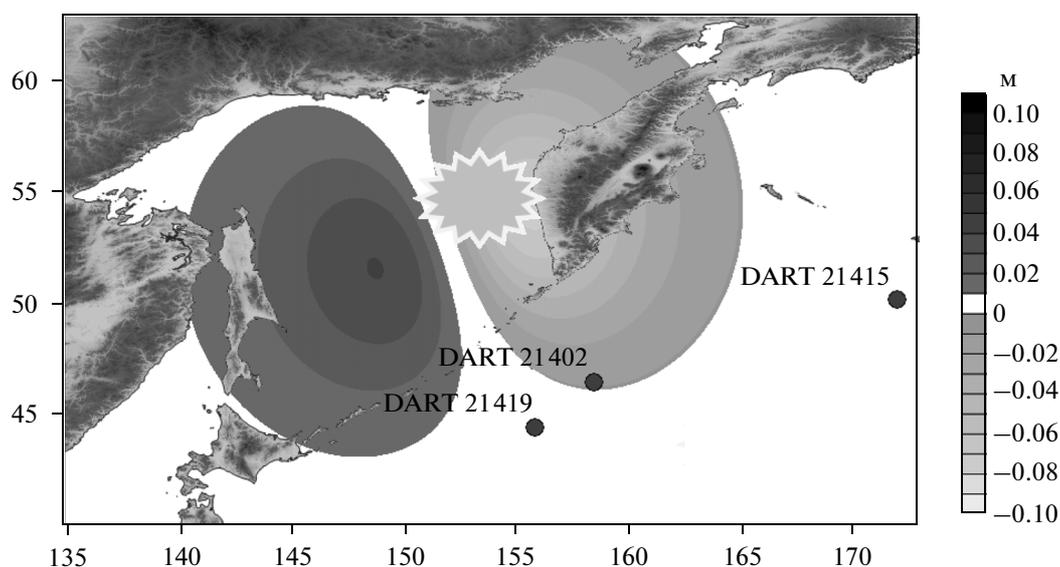


Рис. 1. Положение буев DART и эпицентра землетрясения 24 мая 2013 г. Показан также рассчитанный очаг цунами.

цунами для оценки возможных цунами от глубоководных землетрясений. Построение источника цунами и моделирование распространения волн цунами проводилось с использованием программного комплекса NAMI DANCE [14]. В качестве начальных условий выбирались известные статические очаги Окада [11] и Мэншина–Смэйли [9]. Неожиданным результатом расчетов явилось, что даже в случае глубоководного землетрясения смещения уровня воды в очаге могут составить несколько сантиметров и, следовательно, могут быть зарегистрированы современными методами. Приводятся также данные регистрации этого события на буях международной системы DART. Расчеты показывают, что высоты цунами могут достигать в отдельных пунктах 10 и более см, однако в местах нахождения мареографов высоты волн, согласно расчетам, не превышали несколько см, что препятствует их наблюдению береговыми мареографами. Тем не менее нам представляется, что наблюдаемые колебания уровня моря на о-ве Итуруп обусловлены именно цунами.

1. РАССЧИТАННЫЙ ОЧАГ ЦУНАМИ

Параметры землетрясения 24 мая 2013 г. взяты с сайта геофизической службы РАН [15]: длина разлома 300 км, ширина разлома 60 км, угол между меридианной и линией разлома (strike angle) 177° , угол падения (dip angle) 10° , угол направления подвижки (rake (slip) angle) -107° , смещение 10 м. Очаг цунами представлен на рис. 1. Очаг цунами, рассчитанный по формуле Окада [11],

представляет собой знакопеременное смещение уровня моря с понижением в сторону полуострова Камчатка. Фактически рассчитанный очаг описывает смещение морского дна и суши, и только в морской части его можно отождествлять со смещением воды в очаге. Высота (разница между максимальным поднятием дна и его максимальным понижением) составляет 0.1 м. Последняя цифра оказалась для нас сюрпризом, поскольку означала, что цунами даже при такой большой глубине фокуса, в принципе, может быть зафиксировано современными средствами. Вообще говоря, решение Окада описывает статическое (ближнее) поле в теории упругого полупространства, которое спадает с расстоянием достаточно медленно по степенному закону. Так, в другой его работе [10] получена зависимость между максимальным вертикальным смещением в очаге и параметрами точечного источника землетрясения

$$\lg H[\text{см}] = 1.5M_w - 2 \lg h[\text{км}] - 5.96, \quad (1)$$

где M_w – магнитуда землетрясения, H – максимальная высота смещения дна в очаге и h – глубина фокуса. Из (1) следует, что высота спадает обратно пропорционально квадрату глубины фокуса и для глубины в 640 км составляет 0.07 м. Как видим, согласие расчетов по двум различным формулам Окада оказалось достаточно хорошим¹.

¹ Для мелкофокусных землетрясений приближение точечного очага не работает, что отмечается в [8].

Итак, как показывают расчеты по “точной” формуле Окады, как и по его приближенной формуле, максимальное смещение дна моря (а значит, и уровня воды) в очаге Охотскоморского землетрясения 2013 г. могло достигать почти 10 см (смещение вверх около 4 см, вниз — 7 см). Результаты расчетов, естественно, зависят от модели очага и могут меняться в несколько раз, что в данном случае не является критичным. Так, использование модели очага PREM (Preliminary Reference Earth Model), сделанное Э. Окалем (E. Okal) (частное сообщение), приводит к следующим оценкам: поднятие дна на 1.3 см и опускание на 2.5 см; эти оценки косвенно подтверждены данными GPS [12]. Аналогичные расчеты были выполнены для аппроксимации очага по формулам Мэншина—Смэйли [9]. В этом случае максимальное повышение дна (1,1 см) происходят в точке с координатами: $55.2^\circ \text{ N } 147.2^\circ \text{ E}$, а понижение (2.2 см) в точке с координатами: $54.0^\circ \text{ N } 157.2^\circ \text{ E}$, эта точка лежит на суше, на Камчатском полуострове. На величину смещения влияет также величина коэффициента Пуассона (комбинации коэффициентов Ляме; для деталей смотри статью [8]), который в расчетах был выбран равным 0.25. В любом случае подтверждается, что смещения дна и уровня воды в несколько сантиметров должны были происходить в эпицентральной зоне Охотскоморского землетрясения 2013 г.

2. ДАННЫЕ БУЕВ DART

Нами выполнен анализ записей буев международной системы DART, наиболее близко расположенных к очагу землетрясения. Дискретность записей составляет 15 минут; при поступлении данных о горизонтальных движениях в толще воды дискретность записи увеличивается до 1 мин, а при вертикальных смещениях водной поверхности более 0.03 м дискретность равна 15 с. Далее будут представлены 1-минутные записи уровня моря на протяжении 5 часов на фоне приливных колебаний, начинающиеся за 45 минут до основного толчка землетрясения. Положение этих буев представлено на рис. 1. Один из них, DART 21419, расположен в точке с координатами: $44.455^\circ \text{ N } 155.736^\circ \text{ E}$. На записи (рис. 2а) представлены колебания донного давления, пересчитанного в смещение уровня моря по гидростатической формуле. Заметные колебания в диапазоне волн цунами (спайки в записи удалены) начинаются с 50 мин (5 мин после начала землетрясения) и заканчиваются примерно на 125 мин (80 мин после землетрясения). Головная волна знакопеременная: сначала импульс положительной полярности, а за ним — отрица-

тельной полярности. Максимальная высота смещения уровня воды достигает 0.03 м (при анализе записей с дискретностью 15 с высота волны 0.09 м). Следующая заметная волна отрицательной полярности высотой до 0.03 м появляется примерно через 12 мин.

Аналогичные колебания видны на записи российского буя DART 21402, расположенного в точке с координатами: $46.488^\circ \text{ N } 158.343^\circ \text{ E}$ (восточнее острова Симушир, см. рис. 1), эта запись воспроизводится на рис. 2б. Максимальная высота смещения уровня воды достигает 0.03 м (при анализе записей с дискретностью 15 с высота волны 0.18 м).

Приведем также запись колебаний уровня моря на буе DART 21415 (глубина 4707 м), расположенного в точке с координатами $50.183^\circ \text{ N } 171.847^\circ \text{ E}$ (рис. 1), она показана на рис. 2в. Максимальная высота смещения уровня воды при анализе 1-минутных записей достигает 0.04 м, а при анализе записей с дискретностью 15 с — 0.42 м.

Время вступления представленных волн на всех буях DART одинаковое, что является невозможным в случае распространения цунами по акватории океана. Как будет показано ниже, буи системы DART не записали волны цунами (или, точнее сказать, они не выделены на фоне шумов), и их осцилляции связаны с сейсмоакустическими процессами в очаге землетрясения. В настоящее время разработаны математические модели, позволяющие описать совместно сейсмоакустические колебания и волны цунами [4, 12]; эти модели достаточно сложны и здесь не используются. Мы сосредоточились на расчете только волн цунами.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН ЦУНАМИ В ОЧАГЕ

В расчетах мы использовали очаг цунами, вычисленный по формуле Окады и представленный на рис. 1. Построение источника цунами и моделирование распространения волн цунами, как уже упоминалось, проводилось с использованием программного комплекса NAMI DANCE [14]. Шаг между узлами сетки используемой батиметрии был 0.0075 градуса, что в данных широтах эквивалентно 500–678 м. Время распространения цунами в Охотском море составляет примерно 2–3 часа, поэтому численное моделирование запускалось на 6 часов с момента землетрясения. На берегу использовались отражающие граничные условия (приближение вертикальной стенки) в последних узлах расчетной сетки.

В первую очередь, мы попытались сопоставить данные расчетов с измеренными колебани-

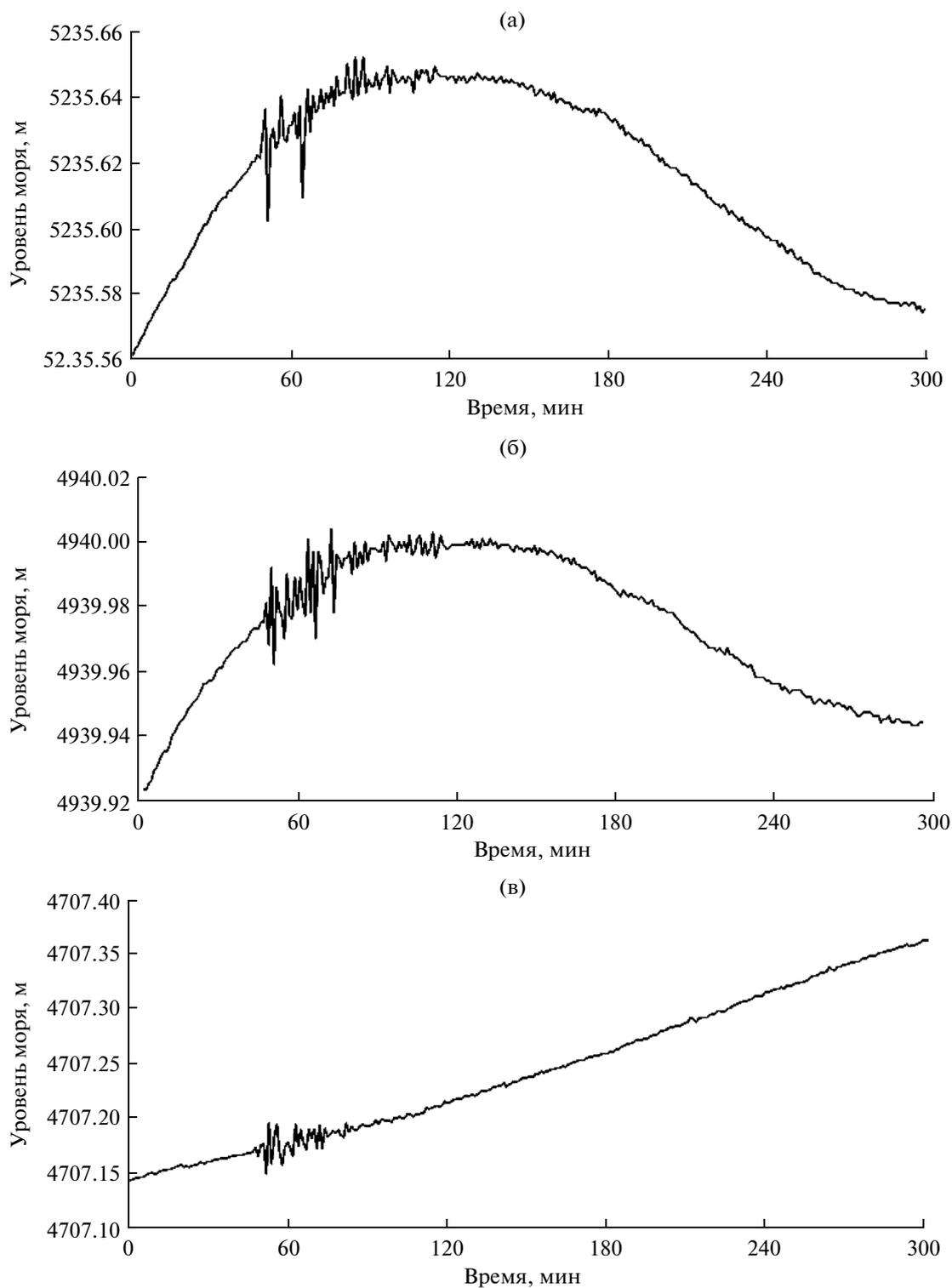


Рис. 2. Запись колебаний уровня моря: а – DART 21419 (глубина 5235 м); б – DART 21402 (глубина 4940 м); в – DART 21415 (глубина 4707 м). По вертикальной оси отложены колебания уровня воды относительно дна, а по горизонтальной оси время, отсчитываемое от 05 UTC (45 минут перед землетрясением).

ями уровня моря, зарегистрированными системой DART. На рис. 3а показано такое сравнение для буя DART 21419 (глубина 5235 м). Использовались записи измерений, включающие дискретность измерений 1 мин и 15 с, наблюдаемая запись очищена от приливных колебаний. Ясно видно, что первоначальные относительно большие (0.09 м) колебания уровня воды, зафиксированные на бую, не связаны с волнами цунами, которые развиваются позже (примерно на 20 мин). Эти колебания обусловлены сейсмоакустическими явлениями при землетрясении, и они маскируют слабые цунами в очаге. В сущности, расчеты демонстрируют сначала опускание уровня моря на высоту приблизительно 0.01 м продолжительностью 1 час, потом поднятие на 0.02 м так же с продолжительностью 1 час. На этом фоне заметен слабый шумовой сигнал на пределе вычислительной точности.

Аналогичные результаты получаются для буя DART 21402, глубина 4940 м (рис. 3б). На нем записаны короткие колебания с размахом около 0.2 м в момент землетрясения. Расчеты демонстрируют эволюцию начального возмущения, а также появление небольшой волны отрицательной полярности с амплитудой приблизительно 0.04 м, эта волна возникла сразу после основного толчка. Спустя 1 час возникает поднятие уровня на 0.01 м.

Буй DART 21415 демонстрирует наиболее сильное смещение в очаге (0.42 м), см. рис. 3в. В расчетах видно появление низкочастотного понижения уровня воды (0.04 м) продолжительностью почти час, а также слабая волна цунами с амплитудой приблизительно 0.01 м спустя 120 мин после землетрясения.

Приведенное сопоставление показывает трудности использования буюв DART в очаге цунами для регистрации слабых волн цунами, которые маскируются сейсмоактивными процессами.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЦУНАМИ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Распространение цунами в дальней зоне изучалось в рамках теории мелкой воды. Распределение максимальных значений положительных амплитуд волн цунами в Охотском море за все время моделирования показано на рис. 4. Оно показывает направление главного удара цунами на западное побережье полуострова Камчатка и северо-восточное побережье о-ва Сахалин.

Спустя 20 мин волны цунами, согласно расчетам, распространились по всей акватории Охотского моря, а также по северо-западной акватории Тихого океана. Максимальное значение

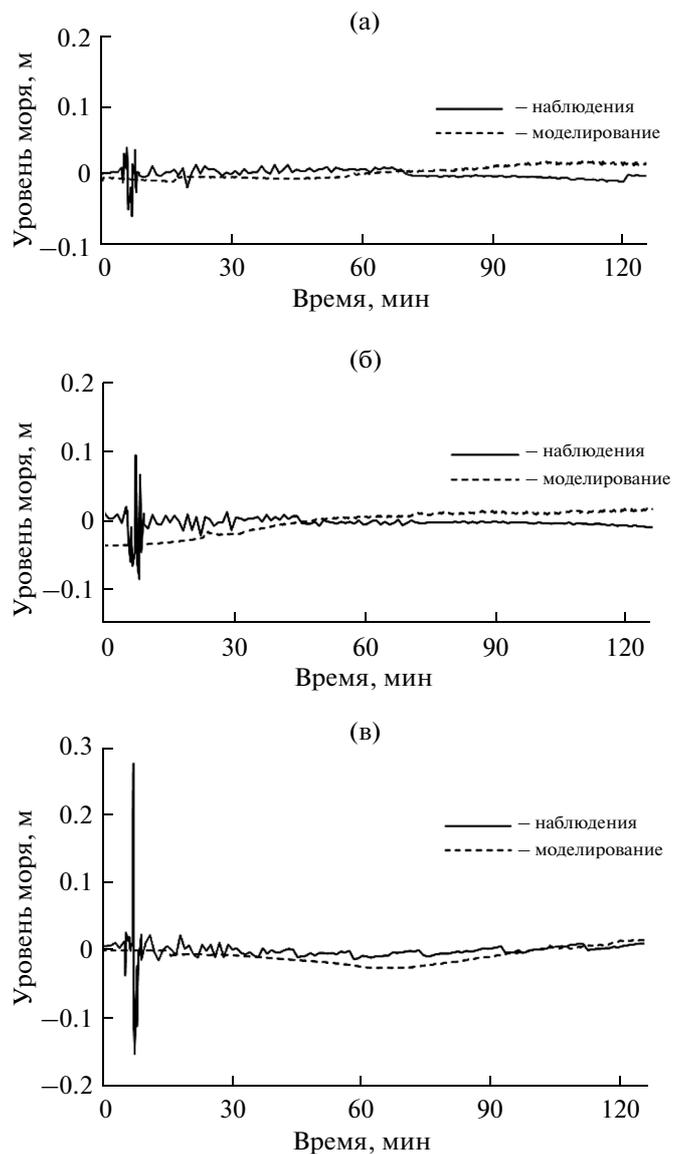


Рис. 3. Сопоставление результатов расчетов уровня моря и наблюдений: а – DART 21419 (глубина 5235 м); б – DART 21402 (глубина 4940 м); в – DART 21415 (глубина 4707 м) (1 – наблюдения, 2 – моделирование).

подъема уровня воды в расчетной области через 20 мин равно 0.12 м, а опускания уровня – 0.05 м. Через 1 час волны цунами распространились на значительные расстояния и отразились от побережья Охотского моря. В мелководных зонах высота волны начинает увеличиваться и может достигать в отдельных точках 0.2 м, что в принципе может быть зарегистрировано. Обсудим более детально районы максимального проявления рассчитанных волн цунами.

На побережье о-ва Сахалин (рис. 5а) наибольшему воздействию, согласно расчетам, подверга-

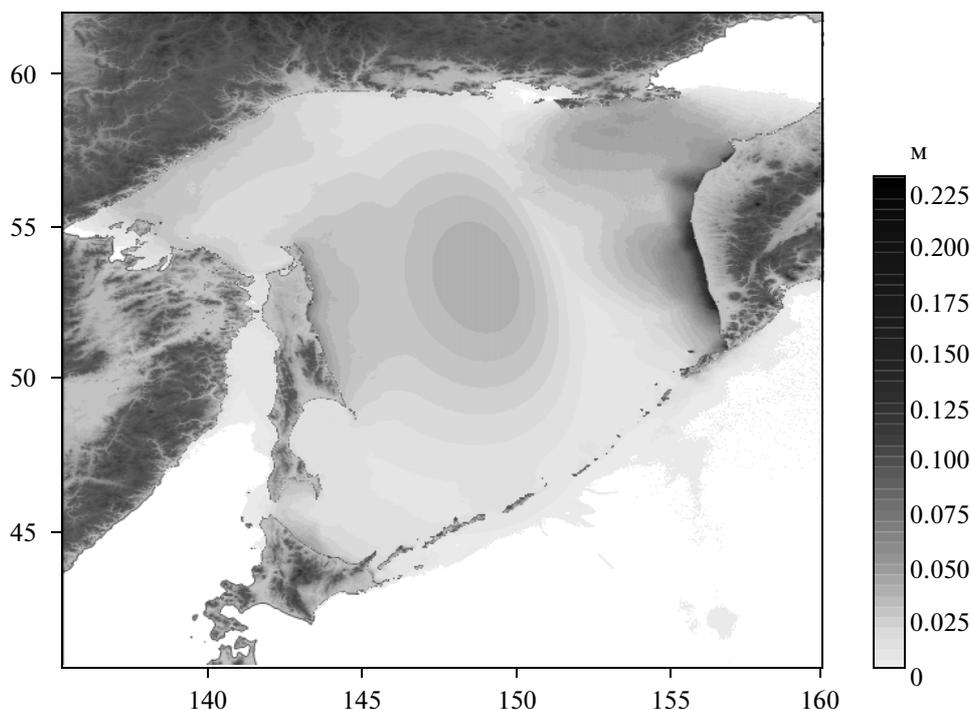


Рис. 4. Распределение максимальных значений рассчитанных положительных амплитуд волн цунами.

ется территория северо-восточной части острова. Максимальные значения высот волн севернее мыса Терпения не превышают 0.16 м, а среднее значение высот волн равно 0.06 м. Согласно расчетам в районах п. Стародубское и г. Поронайск (расположенных южнее), где имеются мареографные наблюдения, максимальные высоты цунами не превышают 3 см, и они меньше наблюдаемых фоновых колебаний уровня моря.

Распределение высот волн вдоль западного побережья Камчатки показано на рис. 5б. Максимальные рассчитанные высоты волн вдоль западного побережья полуострова Камчатка расположены между 52 и 55° N. При моделировании максимальное значение волн составляет 0.22 м, а средняя высота вдоль всего западного побережья полуострова Камчатка равно 0.13 м. Эти волны могли бы быть заметны на мареографах, но у нас отсутствуют мареограммы из населенных пунктов на Камчатке.

Анализ доступных мареограмм в Охотском море (Стародубское, Поронайск, Южно-Курильск, Курильск) показал, что только на охотоморском побережье о-ва Итуруп (Курильск) во время цунами наблюдались повышенные колебания уровня моря, совпадающие по амплитуде и форме с рассчитанными (0.04 м), см. рис. 6. Наблюдаемые колебания не затухают так быстро, как расчи-

танные, что может быть связано с сейшевыми колебаниями в бухте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прошедшее 24 мая 2013 г. сильнейшее землетрясение в Охотском море не вызвало цунами в силу большой глубины фокуса (640 км), хотя и было зарегистрировано системой буев DART. Для расчетов цунами использовано несколько разных моделей очага, приводящих к вариациям высот волн в 2–3 раза. В самом неблагоприятном варианте согласно расчетам высоты волн цунами вблизи побережья Сахалина оказываются порядка 0.06 м, а на Камчатке – 0.13 м. Для пунктов Охотского моря, где имеются мареографы, проведено сравнение результатов расчета с данными наблюдений. Только для Курильска (о. Итуруп) можно говорить о схожести наблюдаемых колебаний уровня моря с высотой до 4 см с рассчитанными. Отсюда вытекает важный вывод, что можно пытаться выделить колебания уровня моря во время глубокофокусных землетрясений, что ранее вообще никогда не делалось. Разумеется, возможные цунами от таких землетрясений являются очень слабыми, однако их изучение важно с научной точки зрения.

Проведенный анализ события 2013 г., наряду с ранее выполненными исследованиями [1–3, 5, 6],

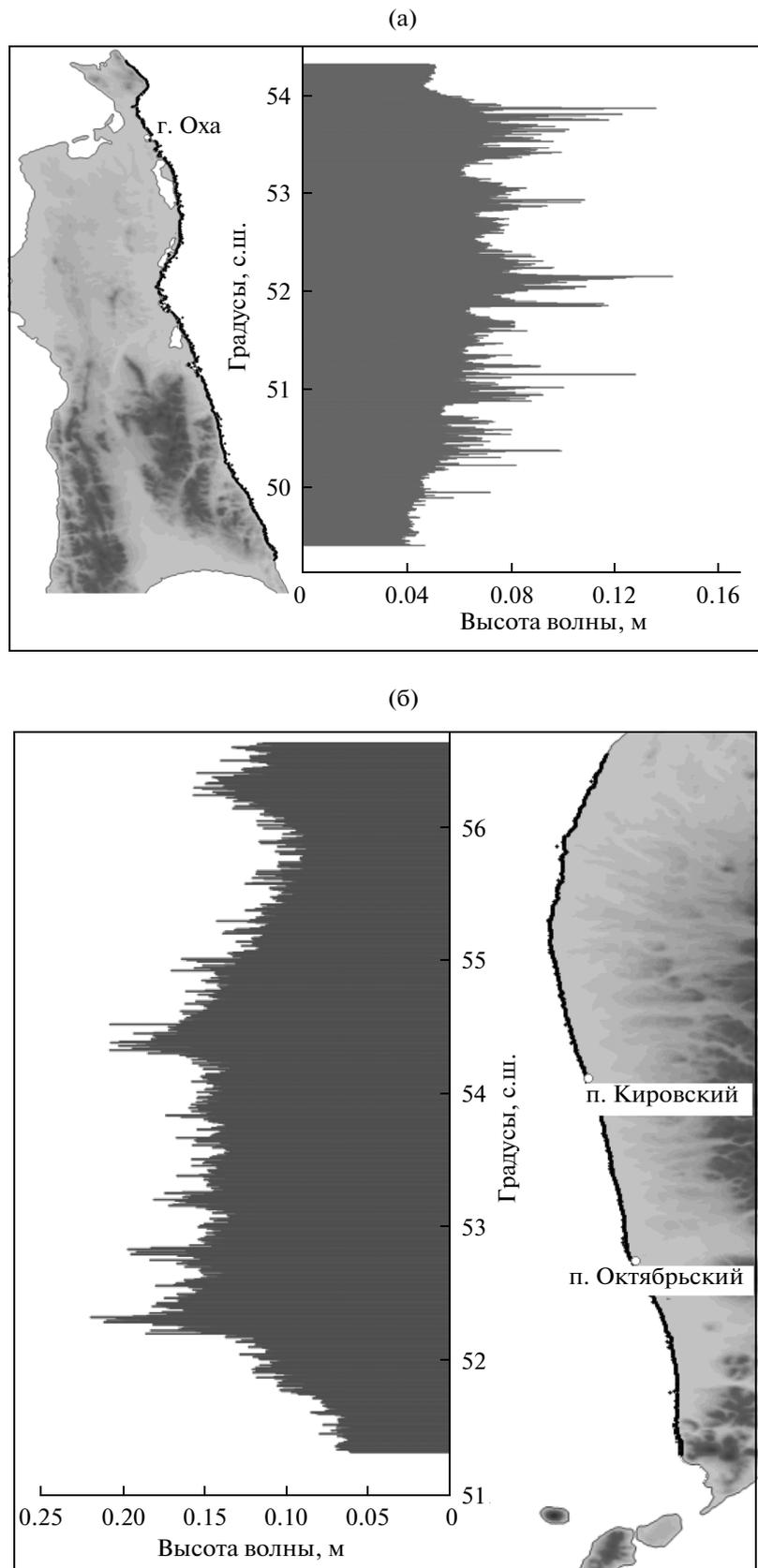


Рис. 5. Распределение максимальных высот волн: а – вдоль северо-восточного побережья о-ва Сахалин; б – вдоль западного побережья полуострова Камчатка.

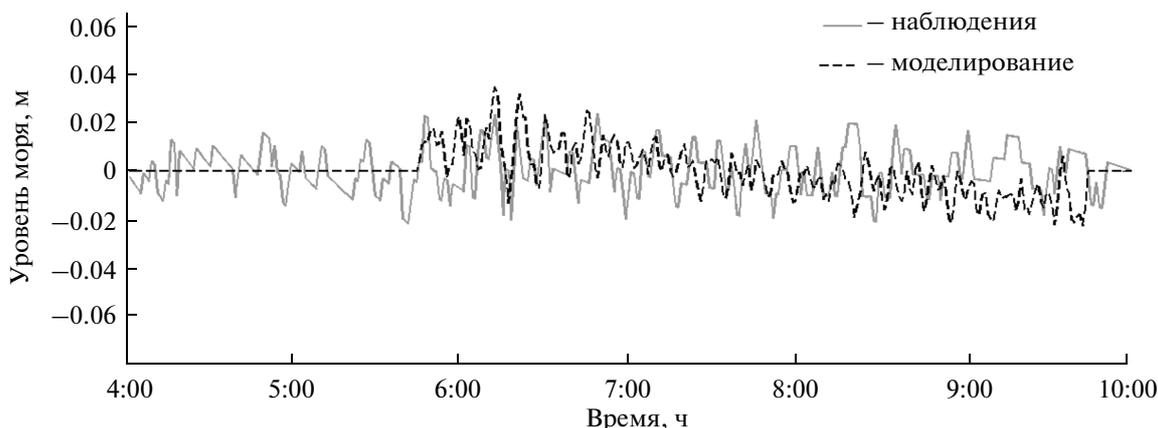


Рис. 6. Сопоставление результатов расчетов и наблюдений в г. Курильск (1 – наблюдения, 2 – моделирование).

подчеркивает важность специального исследования рисков цунами в Охотском море.

Представленные результаты получены в ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (соглашение № 14.574.21.0089 (уникальный идентификатор соглашения – RFMEFI57414X0089)). Авторы благодарны М. Носову и Э. Окалю за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Куликов Е.А. и др. Оползни на восточном склоне о. Сахалин как источники возможных цунами // ДАН. 2013. Т. 449. № 3. С. 334–337.
2. Зайцев А.И., Ковалев Д.П., Куркин А.А. и др. Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование // ДАН. 2008. Т. 421. № 2. С. 249–252.
3. Ким Х.С., Рабинович А.Б. Цунами на северо-западном побережье Охотского моря. Природные катастрофы и стихийные бедствия в Дальневосточном регионе. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. С. 206–218.
4. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
5. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Катаева Л.Ю., Баранов Б.В. Генерация и распространение катастрофических цунами в бассейне Охотского моря: Возможные сценарии // ДАН. 2006. Т. 410. № 4. С. 528–531.
6. Лобковский Л.И., Рабинович А.Б., Куликов Е.А. и др. Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) // Океанология. 2009. Т. 49. № 2. С. 181–197.
7. Татевосян Р.Э., Косарев Г.Л., Быкова В.В. и др. Глубокофокусное землетрясение с M_w 8.3, ощутившееся на расстоянии 6500 км // Физика Земли. 2014. № 3. С. 154–162.
8. Bolshakova A.V., Nosov M.A. Parameters of tsunami source versus earthquake magnitude // Pure Appl. Geophys. 2011. V. 168. P. 2023–2031.
9. Manshinha L., Smylie D.E. The displacement fields of inclined faults // Bull. Am. Seismol. Soc. 1971. V. 61(5). P. 1433–1440.
10. Okada Y. Simulated empirical law of coseismic crustal deformation // J. Phys. Earth. 1995. V. 43. P. 697–713.
11. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. V. 75(4). P. 1135–1154.
12. Okal E., Saloor N., Freymueller J. et al. The implosive component of the 2013 Okhotsk Sea deep earthquake: Evidence from radial modes and constraints from geodetic data // Geophys. Res. Abstr. 2014. V. 16. P. EGU2014-16456.
13. Ye L., Lay T., Kanamori H., Koper K.D. Energy release of the 2013 M_w 8.3 Sea of Okhotsk earthquake and deep slab stress heterogeneity // Science. 2013. V. 341. P. 1380.
14. Программный комплекс NAMI DANCE // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://namidance.ce.metu.edu.tr/>.
15. Сайт геофизической службы РАН // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info_quake.pl?mode=1&id=2.

О ВОЗМОЖНОСТИ ЦУНАМИ В ОХОТСКОМ МОРЕ ПРИ ГЛУБОКОФОКУСНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

© 2016 г. А. И. Зайцев^{1,2}, Е. Н. Пелиновский¹⁻³, А. А. Куркин², И. С. Костенко^{1,2}, А Ялченир⁴

¹Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН
693023 Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
603950 Нижний Новгород, ул. Минина, 24

³Институт прикладной физики РАН 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

⁴Технический университет Центральной Азии 06800, Турция Анкара, бульвар Думлупинара, 1
(Middle East Technical University, 06800, Ankara, Turkey, Dumlupinar Bulvari)

E-mail: aizaytsev@mail.ru, aakurkin@gmail.

Поступила в редакцию 17.11.2014 г.,
после доработки 24.09.2015 г.

Произошедшее 24 мая 2013 г. в акватории Охотского моря землетрясение магнитудой 8.3 явилось наиболее сильным в этом регионе. Проведено моделирование возможного цунами от такого землетрясения. Расчеты подтвердили, что высоты волн достаточно малы, поскольку глубина гипоцентра землетрясения была 640 км. Дан анализ колебаний буев DART в окрестности очага землетрясения. Показано, что они не связаны с волнами цунами. Анализ имеющихся мареограмм в различных пунктах Охотского моря показал, что в одном случае (о. Итуруп) наблюдаемые колебания уровня моря с высотой около 4 см могут быть отождествлены с волнами цунами.

Ключевые слова: землетрясение, цунами, численное моделирование, гипотетический источник цунами, Охотское море.