

Роль силы Кориолиса в динамике волн, возбуждаемых в океане глубокофокусными землетрясениями*

М. А. Носов^{1,2}, С. В. Колесов^{1,2}, Г. Н. Нурисламова^{1,2}, А. В. Большакова^{1,2}, К. А. Семенцов¹, В. А. Карпов^{1,2,†}

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

†Контактный e-mail: va.karpov@physics.msu.ru

На примере сейсмического события, обладающего магнитудой и механизмом глубокофокусного землетрясения у берегов Фиджи 19.08.2018, теоретически исследована связь параметров источника цунами с глубиной землетрясения. Показано, что сильные глубокофокусные землетрясения способны создавать обширные области косейсмических деформаций дна, размер которых сопоставим с баротропным радиусом деформации Россби. Волны цунами, формируемые такими источниками, обладают необычайно большой длиной и поэтому подвержены влиянию силы Кориолиса. Это влияние может варьироваться от существенного в высоких широтах до малозначительного в приэкваториальных районах. Методом численного моделирования исследовано влияние силы Кориолиса на слабые волны цунами, вызванные Фиджийским землетрясением 2018 г.

Ключевые слова: глубокофокусное землетрясение, цунами, теория мелкой воды, сила Кориолиса, радиус деформации Россби, численное моделирование.

Библиографическая ссылка: Носов М.А., Колесов С.В., Нурисламова Г. Н., Большакова А.В., Семенцов К.А., Карпов В.А. Роль силы Кориолиса в динамике волн, возбуждаемых в океане глубокофокусными землетрясениями // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 1. С. 73–85. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.006.

Введение

Первый всплеск интереса к учету силы Кориолиса в задаче о цунами относится к концу 20-го века, когда по этой теме была опубликована серия теоретических работ российских авторов [1–7]. Наблюдаемое в последние годы возрождение интереса к проявлениям эффектов вращения Земли в динамике цунами связано в первую очередь с бурным развитием численных моделей [8, 9]. Стремление к максимально точному воспроизведению волновых форм [10] побуждает учитывать в численной модели весь спектр факторов, которые могут оказывать влияние на волны цунами, в том числе и силу Кориолиса. Кроме того, численные модели представляют собой удобный инструмент для анализа характера проявления эффектов вращения Земли и их значимости, так как в численном эксперименте можно легко “включать” и “выключать” силу Кориолиса [11–14]. Но численные эксперименты, особенно если речь идет о воспроизведении реальных цунами,

*Title translation and abstract in English can be found on page 85.

© ИВТ СО РАН, 2019.

далеко не всегда позволяют проникнуть в физическую суть наблюдаемых явлений. Сложная структура волнового поля, обязанная в первую очередь формам рельефа дна и особенностям источника, затрудняет анализ тонких вторичных эффектов, к которым мы относим и эффекты вращения Земли. В этой связи не потеряли свою актуальность теоретические исследования, опирающиеся на точные аналитические решения [15–18].

Из геофизической гидродинамики известно, что сила Кориолиса весьма существенна для динамических явлений, масштабы которых сопоставимы с радиусом деформации Россби или превосходят его [19]. Для волн цунами в качестве масштаба следует рассматривать длину волны, которая определяется горизонтальной протяженностью очага цунами (областью значимых косейсмических деформаций дна). Известно, что типичный размер очага цунами (~ 100 км) заметно уступает типичному баротропному радиусу деформации Россби (~ 2000 км) [8, 9]. В этой связи можно утверждать, что эффекты вращения Земли, как правило, будут слабо проявляться в динамике волн цунами. Но из этого правила есть и исключения. В тех редких случаях, когда моментная магнитуда сейсмического события $M_w > 9$, размер очага цунами может оказаться сопоставимым с баротропным радиусом Россби. Кроме того, обширная область деформаций дна может быть присуща глубокофокусным землетрясениям.

Волновое поле, сформированное в водном слое в результате глубокофокусного сейсмического события, которое произошло под дном Охотского моря 24.05.2013, исследовано в работе [20]. Методом численного моделирования показано, что учет вращения Земли приводит к существенному изменению пространственного распределения максимальных амплитуд и волновых форм. Установлено, что различия в динамике волновых возмущений, рассчитанных с учетом и без учета силы Кориолиса, обусловлены главным образом волнами Кельвина, которые существуют только во вращающемся океане. Показано, что благоприятные условия для проявления эффектов вращения Земли вызваны сочетанием обширной области косейсмических деформаций, малых глубин Охотского моря и высоких широт.

У берегов Фиджи 19.08.2018 произошло еще одно сильное глубокофокусное землетрясение. Магнитуда и глубина Охотоморского 2013 г. и Фиджийского 2018 г. сейсмических событий оказались близкими. И в том и в другом случае волны цунами имели малую амплитуду и не представляли никакой угрозы. Главное различие между двумя событиями состоит в том, что в первом случае волновые явления были сосредоточены в полузамкнутом Охотском море, которое отделено от Тихого океана Курильскими островами, а во втором случае мы имеем дело с открытым океаном. Кроме того, источник Фиджийского цунами расположен заметно ближе к экватору, что несколько ослабляет проявления эффектов вращения Земли. Впрочем, оба события представляют несомненный интерес с точки зрения геофизической гидродинамики.

Настоящая работа преследует такие основные цели, как: 1) теоретический анализ роли силы Кориолиса в динамике волн, возбуждаемых в океане глубокофокусными землетрясениями; 2) исследование влияния эффекта вращения Земли на волны цунами, сформированные глубокофокусным Фиджийским землетрясением 2018 г., с применением метода численного моделирования.

1. Параметры землетрясения и источник цунами

По данным Геологической службы США (USGS), землетрясение у берегов Фиджи произошло 19.08.2018 в 00:19:40 UTC. Координаты эпицентра: 18.1652° S, 178.1458° W,

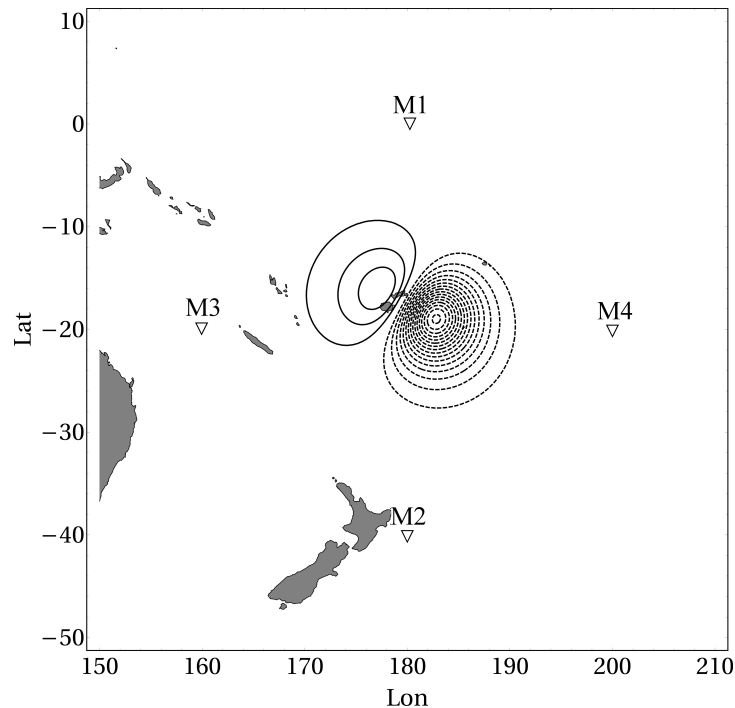


Рис. 1. Карта расчетной области. Изолиниями показана вертикальная компонента косейсмической деформации дна, которая возникла в результате землетрясения 19.08.2018 у берегов Фиджи (сплошная линия — поднятие, штриховая — опускание). Треугольниками отмечено расположение виртуальных мареографов (M). Lat — широта, Lon — долгота

глубина $h = 580.5$ км. Сейсмический момент составил $M_0 = 2.28 \cdot 10^{21}$ Н·м ($M_w = 8.2$). Механизм очага определялся углами: (NP1) Strike = 178° , Dip = 26° , Rake = -117° ; (NP2) Strike = 28° , Dip = 67° , Rake = -77° .

При моделировании Фиджийского цунами будем придерживаться традиционной концепции “мгновенного источника”, согласно которой в результате землетрясения на поверхности воды мгновенно возникает некоторое возмущение свободной поверхности (начальное возвышение) при нулевом поле скорости. Начальное возвышение полагаем равным вертикальной компоненте косейсмической деформации дна.

Косейсмическая деформация рассчитывалась по формулам Окада [21]. Очаг землетрясения аппроксимировался прямоугольной площадкой разрыва. Размеры площадки разрыва (длина L и ширина W), а также величина подвижки D определялись по величине сейсмического момента M_0 в соответствии с эмпирическими формулами [22, 23] ($L \approx 228$ км, $W \approx 65$ км и $D \approx 4.6$ м). Заметим, что косейсмические деформации очень слабо зависят от выбора нодальной плоскости — NP1 или NP2. Во всех дальнейших расчетах использованы данные, соответствующие плоскости NP1.

Деформации дна в источнике Фиджийского цунами представлены на рис. 1 изолиниями, которые соответствуют уровням $\pm 0.05A \cdot j$, где $j = 1, 2, 3, \dots$ и $A = \xi_{0\max} - \xi_{0\min}$. Источник имеет значительную горизонтальную протяженность ($\sim 10 \times 10^\circ$) и классическую биполярную форму: поднятие дна сочетается с опусканием. Амплитуда деформации дна невелика: максимальное поднятие составило $\xi_{0\max} \approx 0.010$ м, опускание — $\xi_{0\min} \approx 0.044$ м. В базе данных NGDC/WDS [24] сам факт события отмечен, но какие-либо сведения о высотах волн отсутствуют, что неудивительно при сантиметровой амплитуде деформаций дна в очаге цунами.

2. Связь параметров источника цунами с глубиной землетрясения

На примере сейсмического события, обладающего магнитудой и механизмом (NP1) Фиджийского землетрясения 19.08.2018, проанализируем связь параметров источника цунами с глубиной землетрясения h . На рис. 2 наглядно проиллюстрирован характер деформаций дна в очаге цунами при изменении глубины землетрясения h . Здесь также представлены результаты расчета вертикальных косейсмических деформаций, сформированных в результате действия набора гипотетических источников, глубина которых варьируется кратно от 50 до 400 км. Способ построения изолиний соответствует рис. 1. Из рис. 2 видно, что при увеличении глубины землетрясения амплитуда деформаций дна быстро падает, а площадь — возрастает.

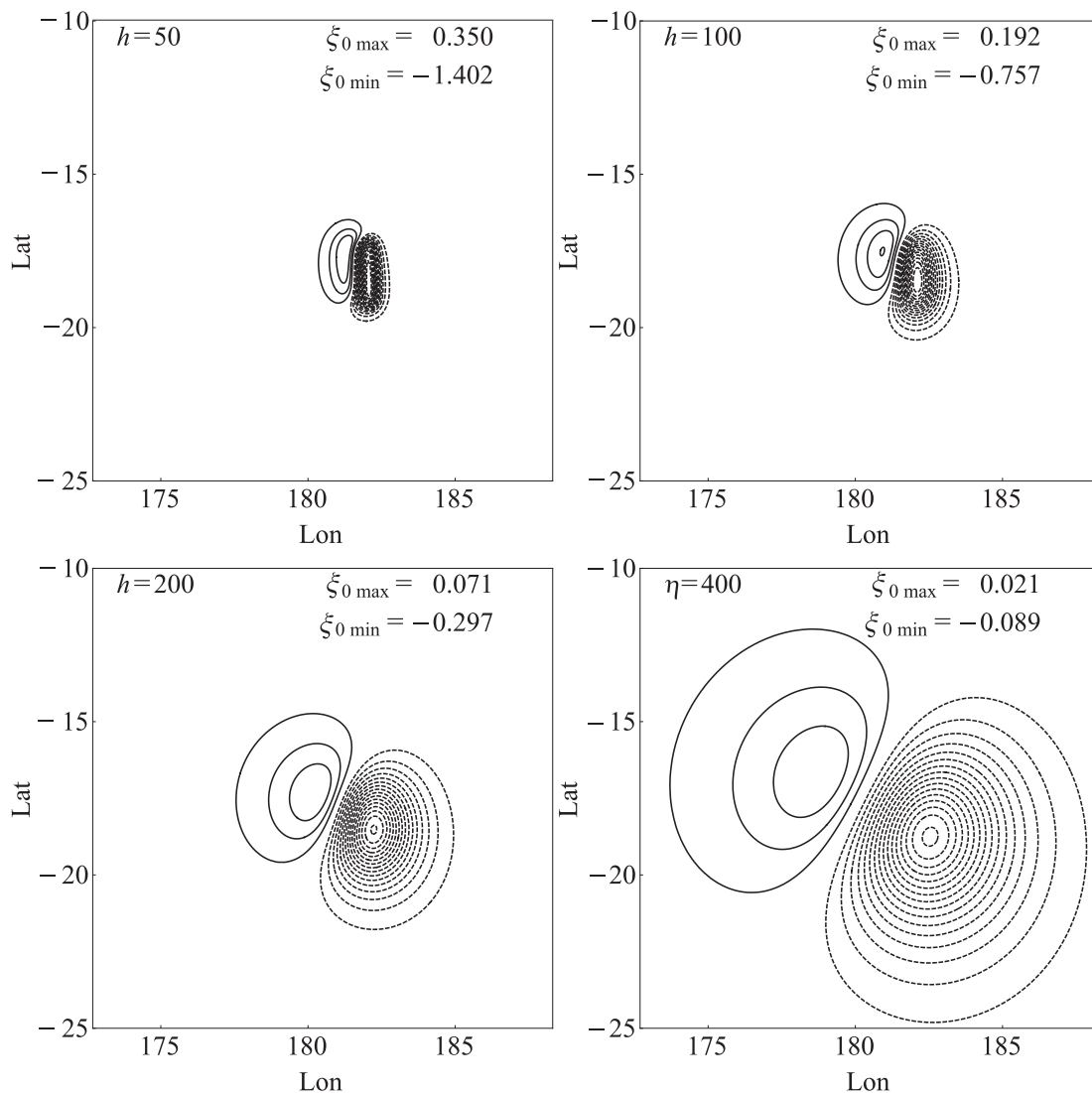


Рис. 2. Рассчитанная вертикальная компонента косейсмической деформации дна, вызванная гипотетическими сейсмическими источниками, механизм и магнитуда которых эквивалентны Фиджийскому землетрясению 19.08.2018, а глубина h варьируется кратно от 50 до 400 км. Схема построения изолиний аналогична рис. 1

Далее по деформациям дна определим параметры, характеризующие источник цунами. Первый параметр — это амплитуда деформации дна

$$A = \xi_{0 \max} - \xi_{0 \min}.$$

Второй параметр — потенциальная энергия начального возвышения

$$E = \frac{\rho g}{2} \iint \xi_0^2 ds, \quad (1)$$

где ρ — плотность воды ($\rho = 1030 \text{ кг/м}^3$), g — ускорение силы тяжести ($g = 9.8 \text{ м/с}^2$). Интеграл в формуле (1) рассчитывался методом прямоугольников с учетом сферичности Земли по расчетной области, показанной на рис. 1.

Третий параметр — площадь очага цунами S , которую мы определяли как площадь области, где абсолютная величина вертикальной деформации дна превышает пороговое значение, равное 5% амплитуды деформации: $|\xi_0| \geq 0.05A$.

Зависимости величин A , E и S от глубины сейсмического источника h представлены на рис. 3, а–в. Видно, что при увеличении глубины амплитуда и энергия имеют тенденцию к убыванию. При больших глубинах убывание выходит на классические асимптоты: $A \sim h^{-2}$, $E \sim h^{-2}$ [9, 25]. Площадь очага цунами, напротив, возрастает при увеличении глубины, и на больших глубинах эта зависимость выходит на асимптоту $S \sim h^2$. Существование локального экстремума на зависимости энергии от глубины, скорее всего, объясняется тем, что при малых глубинах, сопоставимых с размером площадки разрыва, амплитуда с ростом величины h спадает медленнее, чем увеличивается площадь, подверженная значительным деформациям. Впрочем, в контексте настоящего исследования наличие этого экстремума не представляется значимым.

В качестве четвертого параметра очага цунами будем рассматривать долю энергии начального возвышения, которая переходит к вихревым движениям. В работе [15] в приближении f -плоскости для океана фиксированной глубины нами получены аналитические формулы, описывающие потенциальную E_p и кинетическую E_k энергии геострофического вихря, возникающего во вращающемся океане фиксированной глубины вблизи очага цунами цилиндрической формы:

$$E_p/E = 1 - \mu^2 I_1^2(\mu) K_0^2(\mu) - 4I_1(\mu) K_1(\mu) + \mu^2 I_0^2(\mu) K_1^2(\mu),$$

$$E_k/E = \mu [I_1(\mu) K_2(\mu) - I_0(\mu) K_1(\mu)].$$

Здесь E — потенциальная энергия начального возвышения, эквивалентного по форме остаточной деформации дна; I_i — функция Инфельда; K_i — функция Макдональда; $\mu = R/R_0$ — отношение радиуса очага цунами R к радиусу деформации Россби, $R_0 = \sqrt{gH}/f$ (H — глубина океана, $f = 2\Omega \sin(\text{Lat})$ — параметр Кориолиса, Ω — угловая скорость вращения Земли, Lat — широта).

Итак, доля энергии, переходящая к вихревым движениям, определяется следующей формулой:

$$\gamma \equiv E_p/E + E_k/E. \quad (2)$$

Величина γ может рассматриваться как своеобразная мера влияния силы Кориолиса на генерацию цунами. При типичном для природных условий значении параметра $\mu \sim 0.1$ к геострофическому вихрю переходит около 1% энергии начального возвышения ($\gamma \sim 0.01$). В отдельных редких случаях, когда $\mu \sim 1$, к вихревым движениям переходит около 30% энергии ($\gamma \sim 0.3$). А при гипотетической ситуации $\mu \gg 1$

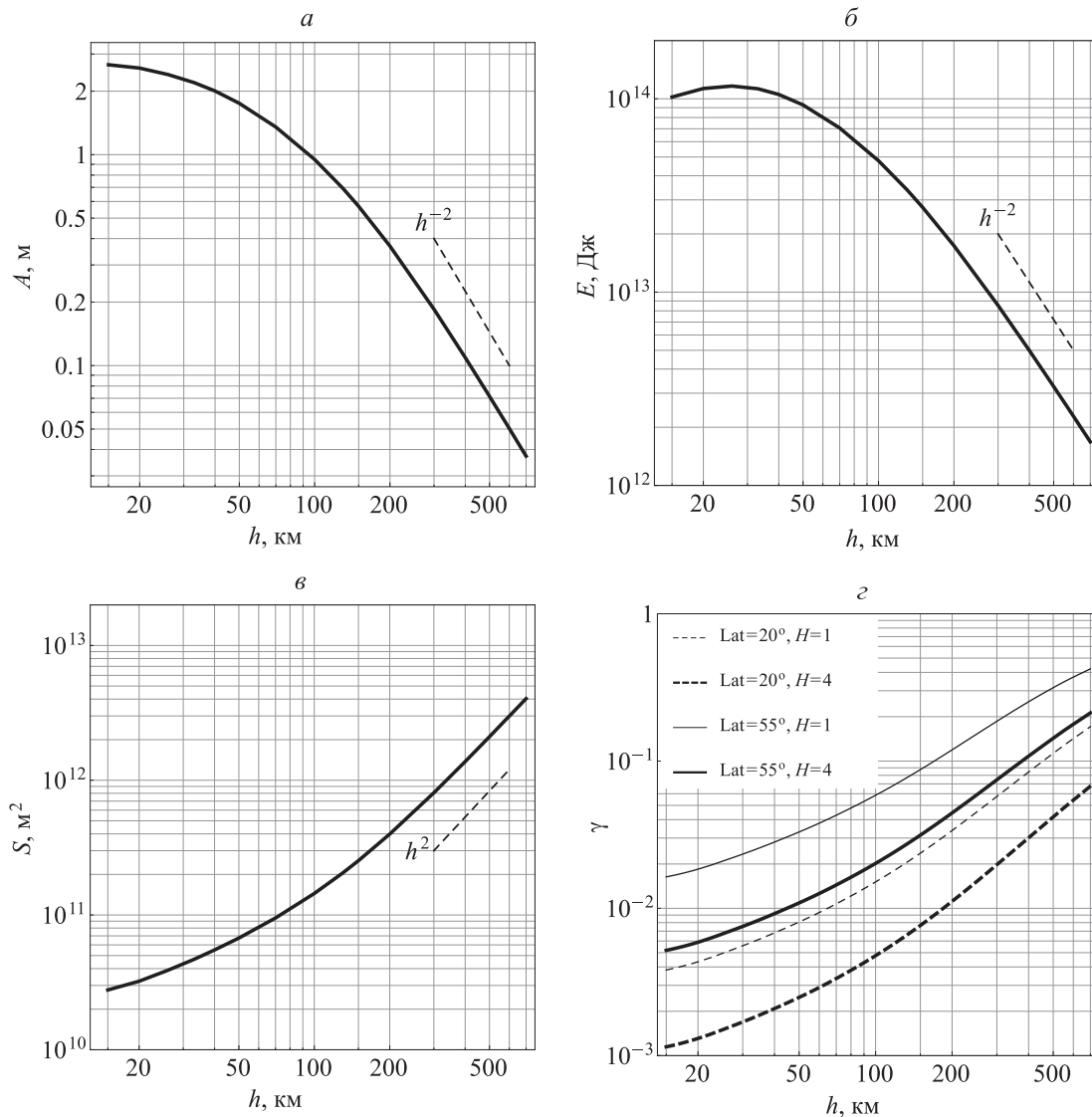


Рис. 3. Параметры очага цунами в зависимости от глубины сейсмического источника h : *a* — амплитуда вертикальной деформации дна A ; *б* — потенциальная энергия начального возвышения E ; *в* — площадь очага цунами S ; *г* — доля потенциальной энергии, переходящая к вихревым движениям γ , рассчитанная при различных глубинах океана H и широтах Lat . Механизм и магнитуда сейсмического источника эквивалентны Фиджийскому землетрясению 19.08.2018

волны цунами вообще не образуются и вся энергия захватывается вихревыми движениями ($\gamma = 1$).

Для расчета величины γ необходимо знать глубину океана, широту и радиус источника цунами. В таблице сведены для сравнения параметры двух очагов цунами, связанных с глубоководными землетрясениями. Видно, что радиус очага Охотоморского цунами 2013 г. заметно превосходит радиус Россби ($\mu \approx 1.4$). Доля энергии вихревого движения, оцениваемая по формуле (2), достигает солидной величины $\gamma \approx 0.43$. Следовательно, в этом случае проявления эффектов вращения Земли должны быть значительными, что и было подтверждено результатами численных экспериментов по воспроизведению динамики Охотоморского цунами 2013 г. с учетом и без учета силы Кориолиса [20].

Параметры очагов цунами в Охотском море 24.05.2013 и у берегов Фиджи 19.08.2018

Параметр	Охотское море, 2013	Фиджи, 2018
Моментная магнитуда M_w	8.3	8.2
Глубина землетрясения h , км	611	580.5
Широта эпицентра	54.9° N	18.2° S
Средняя глубина бассейна H_{av} , м	797	4055
Радиус Россби R_0 , км	743	4388
Радиус очага цунами ($R = \sqrt{S/\pi}$), км	1040	946
$\mu = R/R_0$	1.4	0.22
Параметр γ	0.43	0.046

Иная ситуация с очагом цунами у берегов Фиджи. Размер очага в этом случае, конечно, несколько меньше. Но гораздо более важную роль здесь играют значительная глубина океана и низкая широта, что приводит к возрастанию радиуса Россби до почти 4.5 тыс. км. В итоге отношение радиуса источника цунами к радиусу Россби становится малой величиной ($\mu \approx 0.22$) и оценка, проведенная по формуле (2), показывает, что к вихревым движениям переходит всего несколько процентов энергии ($\gamma \approx 0.046$). Таким образом, в случае Фиджийского цунами не следует ожидать очень сильного влияния силы Кориолиса.

На рис. 3, *г* представлена зависимость параметра γ от глубины землетрясения. Расчет выполнен для двух фиксированных значений широты (20 и 55°) и двух значений глубины океана (1 и 4 км). Радиус очага цунами в зависимости от глубины землетрясения определялся в соответствии с формулой $R = \sqrt{S/\pi}$. Зависимость площади источника цунами от глубины землетрясения представлена на рис. 3, *в*. Из рис. 3, *г* видно, что в случае глубокофокусных землетрясений ($h > 400$ км), происходящих в высоких широтах, к вихревым движениям переходит значительная доля энергии ($\gamma > 0.1$ при $H = 4$ км), что говорит о заметном влиянии вращения Земли на динамику волн цунами. Для экваториальных областей, например при $\text{Lat} = 20^\circ$, и типичных океанских глубин ($H = 4$ км) доля энергии, переходящая к вихревым движениям, составит всего несколько процентов ($\gamma \sim 0.01$), что говорит об относительно слабом влиянии вращения Земли.

3. Численная модель

Характеристики источника Фиджийского цунами 19.08.2018 позволяют предположить, что амплитуда волн составит всего несколько сантиметров, а их длина будет значительной ($\lambda \sim 2R \approx 1900$ км). В этой связи для воспроизведения динамики цунами целесообразно использовать линейную теорию длинных волн. Применение нелинейных уравнений или учет фазовой дисперсии в данном случае определенно не имеют никакого смысла.

Уравнения линейной теории длинных волн запишем с учетом силы Кориолиса, которую представим в традиционном приближении [9]:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + (\nabla, H\mathbf{v}) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -g\nabla\xi + \mathbf{v} \times \mathbf{f}, \quad (4)$$

где ξ — смещение свободной поверхности воды от равновесного положения; $\mathbf{v} = (U, V, 0)$ — вектор горизонтальной скорости течения; ∇ — дифференциальный оператор, действующий по горизонтали; $\mathbf{f} = (0, 0, f)$ — вертикальный вектор, характеризующий эффект вращения Земли.

Система уравнений (3), (4) дополнялась граничными и начальными условиями. На береговой линии (изобате $H_0 = 1$ м) ставилось условие непротекания, на внешних границах расчетной области, проходящих по океану, — условие свободного прохода для длинных гравитационных волн. В качестве начального условия использовалось начальное возвышение при нулевом поле скорости. Начальное возвышение полагалось равным вертикальной компоненте косейсмической деформации дна (см. рис. 1).

Уравнения (3), (4), дополненные начальными и граничными условиями, решались в сферических координатах явным конечно-разностным методом на сетке, которая известна как Arakawa C-grid [26]. Для учета силы Кориолиса применялся метод локального поворота вектора скорости (the local-rotation approach) [26], который позволяет сохранять стабильность численной схемы. Модель верифицировалась с применением аналитических решений, полученных в работе [18]. Результаты верификации представлены в [20].

Расчетная область простиралась по долготе от 150° E до 150° W и широте от 50° S до 10° N (см. рис. 1), а расчет проводился до времени $t_{\max} = 2$ сут. В качестве цифровой модели рельефа дна и суши использовался массив данных GEBCO_2014 Grid (<https://www.gebco.net>). Значения глубин в узловых точках расчетной сетки определялись методом триангуляции и линейной интерполяции. Расчетная сетка включала 600×639 узлов. Шаг по пространству в широтном направлении составлял 10.5 км, а в долготном направлении варьировался в зависимости от широты в диапазоне от 7.2 до 11.1 км. Шаг по времени определялся условием Куранта и составлял 15.8 с. В силу значительных размеров источника и, как следствие, длительных периодов волновых возмущений ($T > T_{\min} \approx 1$ ч) дальнейшее измельчение шагов сетки практического смысла не имело. Простая оценка минимальной длины волны, достигаемой на изобате $H_0 = 1$ м, дает $\lambda_{\min} = T_{\min} \sqrt{gH_0} \approx 11.3$ км. Видно, что минимальная длина волны приблизительно соответствует шагу сетки по пространству.

4. Результаты численного моделирования и их обсуждение

Для исследования влияния силы Кориолиса на динамику Фиджийского цунами 19.08.2018 сопоставлялись результаты двух численных экспериментов. В первом эксперименте волны цунами воспроизводились без учета силы Кориолиса, а во втором эксперименте — с учетом. Все прочие характеристики модели и входные данные оставались неизменными.

Предварительный теоретический анализ (см. разд. 2) позволил предположить, что вращение Земли не оказало сильного влияния на динамику Фиджийского цунами. Результаты численных экспериментов подтвердили теоретические предположения: ярких проявлений действия силы Кориолиса отмечено не было. При “включенной” или “выключенной” силе Кориолиса динамика волн, наблюдаемая по смещению свободной поверхности, практически не различалась. В обоих случаях волны, сформированные косейсмической деформацией дна, достигали открытых границ примерно через 3 ч, до этого момента времени полная механическая энергия водного слоя сохранялась постоянной. Через 12 ч в расчетной области оставалось примерно 20 % энергии начального

возвышения, через 24 ч — менее 10%. Слабые колебания уровня вблизи Фиджи, Новой Зеландии, у восточного побережья Австралии и многочисленных островов Океании, обусловленные захваченными краевыми волнами, сохранялись в течение всего расчетного времени.

На рис. 4 представлены временные развертки смещения свободной поверхности ξ , рассчитанные в четырех точках, положение которых отмечено на рис. 1 треугольниками и буквой “М” (мареограф). Серыми сплошными кривыми показаны результаты расчетов без учета силы Кориолиса (ξ_1), а черными пунктирными — с учетом (ξ_2). Черной сплошной линией показана разница $\Delta = \xi_2 - \xi_1$, которую можно интерпретировать как вклад силы Кориолиса в смещение свободной поверхности. Анализ сигналов, представленных на рис. 4, позволяет заключить, что энергонесущий период волн составляет порядка 3 ч, что превосходит типичные периоды, свойственные волнам цунами [9]. Оценка периода волн по размеру источника и скорости длинных волн, которая рассчитывалась по средней глубине океана в расчетной области (величины R и H_{av} приведены в таблице), дает близкую величину: $T = 2R/\sqrt{gH_{av}} \approx 2.6$ ч.

Из рис. 4 видно, что для точки М2, которая максимально удалена от экватора, учет силы Кориолиса приводит к заметному уменьшению амплитуды лидирующей волны ($\approx 30\%$) и некоторым изменениям волновой формы. Величина $\Delta\xi$ в этом случае име-

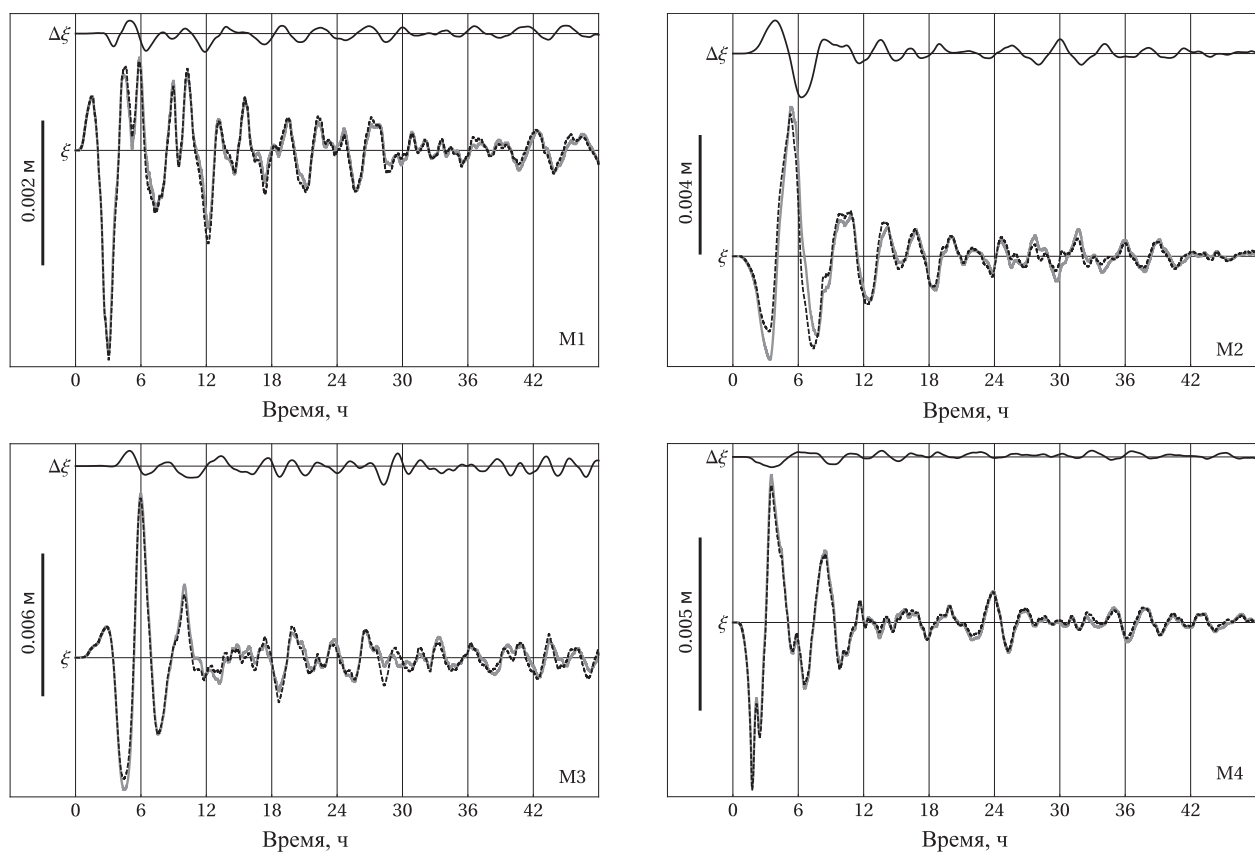


Рис. 4. Смещение свободной поверхности воды ξ , рассчитанное как функция времени в точках расположения виртуальных мареографов (см. рис. 1). Сплошными серыми линиями показаны волновые формы, рассчитанные без учета силы Кориолиса, черными пунктирными линиями — с учетом. Черной сплошной линией показана разница между расчетами, выполненными с учетом и без учета силы Кориолиса $\Delta\xi$

ет наибольшую амплитуду. Для точек М1, М3 и М4 величина $\Delta\xi$ существенно меньше. Примечательно, что для точки М1, расположенной на экваторе, различия между сплошной и пунктирной кривыми проявляются не сразу, а с задержкой (с 4-го часа), т. е. вступление $\Delta\xi$ запаздывает по сравнению с вступлением лидирующей волны цунами. Аналогичный эффект заметен для станции М3 и в меньшей степени для станции М4. Для станции М2 такой задержки не наблюдается. Физическая причина эффекта задержки, с нашей точки зрения, следующая. Лидирующая волна, регистрируемая виртуальными мареографами, расположенными вблизи экватора, проходит исключительно по области, где сила Кориолиса близка к нулю. Сигнал, следующий за лидирующей волной, включает в себя волны, отраженные формами рельефа дна, а также побережьями Австралии, Новой Зеландии и иных островов Океании. Значительную часть пути отраженные волны проходят по достаточно высоким широтам, где влияние силы Кориолиса более существенно.

Заключение

На примере сейсмического события, обладающего магнитудой и механизмом Фиджийского землетрясения 19.08.2018, теоретически исследована связь параметров источника цунами с глубиной землетрясения h . Показано, что амплитуда косейсмических деформаций дна монотонно убывает с увеличением глубины. Потенциальная энергия начального возвышения сначала незначительно возрастает, достигает максимума на глубинах $h \approx 25$ км и при дальнейшем увеличении глубины убывает. На больших глубинах амплитуда и энергия убывают по закону $\sim h^{-2}$. Площадь очага цунами, определяемая как площадь области косейсмических деформаций, абсолютная величина которой превышает 5% максимальной амплитуды, монотонно возрастает при увеличении глубины землетрясения, при больших глубинах — по закону $\sim h^2$. С использованием полученных ранее теоретических зависимостей построена связь доли энергии начального возвышения, которая переходит к вихревым движениям, с глубиной землетрясения.

На примере двух сильных глубокофокусных землетрясений (Охотское море, 2013 г. и Фиджи, 2018 г.) проанализировано соотношение радиуса деформации Россби и размеров очага цунами. Получены теоретические оценки, показывающие, что Охотоморское событие 2013 г. было подвержено сильному влиянию вращения Земли, а на динамику Фиджийского цунами 2018 г. вращение Земли не оказало существенного влияния (из-за близости к экватору и значительных глубин океана).

Теоретические оценки, относящиеся к Фиджийскому цунами 2018 г., подтверждены методом численного моделирования. Численное воспроизведение волн с учетом и без учета силы Кориолиса показало, что вращение Земли в целом незначительно влияет на волновое поле. Впрочем, для виртуального мареографа, расположенного к югу от источника на широте 40° S, амплитуда лидирующей волны под влиянием силы Кориолиса уменьшилась на $\approx 30\%$. Для станций, расположенных на экваторе или на широте 20° S, учет силы Кориолиса меняет амплитуду волн не более чем на 10%.

Для станций, расположенных в экваториальной зоне, обнаружен эффект задержки начала проявления различий в колебаниях уровня моря, рассчитанных с учетом и без учета силы Кориолиса, по сравнению с вступлением лидирующей волны цунами. Физическая причина эффекта задержки — различие в трассах волн, формирующих лидирующую волну и следующие за ней возмущения. Лидирующая волна проходит исключительно по приэкваториальной области, где сила Кориолиса близка к нулю.

Сигнал, следующий за лидирующей волной, формируется в том числе и теми волнами, трассы которых пролегают в более высоких широтах, где влияние силы Кориолиса более значимо.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00053).

Список литературы / References

- [1] **Войт С.С., Лебедев А.Н., Себекин Б.И.** Влияние вращения Земли на энергетические характеристики волн цунами // Исследования цунами. 1986. № 1. С. 15–20.
Voit, S.S., Lebedev, A.N., Sebeikin, B.I. Earth's rotation effect on energy characteristics of tsunami waves // Issledovaniya Tsunami. 1986. No. 1. P. 15–20. (In Russ.)
- [2] **Бобрович А.В.** Генерация волн и вихрей в океане подводными землетрясениями // Исследования цунами. 1990. № 4. С. 33–41.
Bobrovich, A.V. Generation of waves and vortices in the ocean by underwater earthquakes // Issledovaniya Tsunami. 1990. No. 4. P. 33–41. (In Russ.)
- [3] **Пелиновский Е.Н.** Гидродинамика волн цунами. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1996. 276 с.
Pelinovsky, E.N. Hydrodynamics of tsunami waves. Nizhniy Novgorod: IPF RAN, 1996. 276 p. (In Russ.)
- [4] **Ингель Л.Х.** Вихревой “след” землетрясения в море // Докл. РАН. 1998. Т. 362, № 4. С. 548–549.
Ingel', L.Kh. The vortical “trace” of an earthquake in the sea // Doklady Earth Science. 1998. Vol. 362, No. 7. P. 1036–1038.
- [5] **Доценко С.Ф.** Эффекты вращения Земли при генерации цунами подводными землетрясениями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35, № 5. С. 706–714.
Dotsenko, S.F. Effects of Earth rotation during tsunami generation by underwater earthquakes // Izvestiya Akademii Nauk. Fizika Atmosfery i Okeana. 1999. Vol. 35, No. 5. P. 641–647.
- [6] **Доценко С.Ф.** Генерация поверхностных волн и вихрей при смещениях эллиптического участка дна бассейна // Прикладная гидромеханика. 2000. Т. 2(74), № 4. С. 24–31.
Dotsenko, S.F. Generation of surface waves and vortices by a displacement of the elliptic part of the basin's bottom // Intern. J. of Fluid Mechanics Res. 2003. Vol. 20, No. 2. P. 153–165.
- [7] **Доценко С.Ф., Шокин Ю.И.** Генерация вихрей в непрерывно стратифицированной вращающейся жидкости при смещениях участка дна бассейна // Вычисл. технологии. 2001. Т. 6, № 1. С. 13–22.
Dotsenko, S.F., Shokin, Yu.I. Vortex generation in a continuously stratified rotating fluid under shifts of part of the basin bottom // Comput. Technologies. 2001. Vol. 6, No. 1. P. 13–22. (In Russ.)
- [8] **Носов М.А.** Волны цунами сейсмического происхождения: современное состояние проблемы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 5. С. 540–551.
Nosov, M.A. Tsunami waves of seismic origin: the modern state of knowledge // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. Vol. 50, No. 5. P. 474–484.
- [9] **Levin, B.W., Nosov, M.A.** Physics of tsunamis. Second Edition. Springer, 2016. 388 p.
- [10] **Watada, S., Kusumoto, S., Satake, K.** Traveltime delay and initial phase reversal of distant tsunamis coupled with the self-gravitating elastic Earth // J. of Geophysical Res.: Solid Earth. 2014. Vol. 119, No. 5. P. 4287–4310.

- [11] **Kowalik, Z., Knight, W., Logan, T., Whitmore, P.** Numerical modeling of the global tsunamis: Indonesian tsunami of 26 December 2004 // *Sci. of Tsunami Hazards*. 2005. Vol. 23, No. 1. P. 40–56.
- [12] **Dao, M.H., Tkalich, P.** Tsunami propagation modeling — a sensitivity study // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2007. Vol. 7, No. 6. P. 741–754.
- [13] **Løvholt, F., Pedersen, G., Gisler, G.** Oceanic propagation of a potential tsunami from the La Palma Island // *J. of Geophysical Res.: Oceans*. 2008. Vol. 113, No. C9. C09026.
- [14] **Kirby, J.T., Shi, F., Tehranirad, B. et al.** Dispersive tsunami waves in the ocean: Model equations and sensitivity to dispersion and Coriolis effects // *Ocean Modelling*. 2013. Vol. 62. P. 39–55.
- [15] **Носов М.А., Нурисламова Г.Н.** Потенциальный и вихревой следы цунамигенного землетрясения в океане // *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика и астрономия*. 2012. № 5. С. 44–48.
Nosov, M.A., Nurislamova, G.N. The potential and vortex traces of a tsunamigenic earthquake in the ocean // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2012. Vol. 67, No. 5. P. 457–461.
- [16] **Носов М.А., Нурисламова Г.Н.** Следы цунамигенного землетрясения во вращающемся стратифицированном океане // *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика и астрономия*. 2013. № 6. С. 54–59.
Nosov, M.A., Nurislamova, G.N. Traces of a tsunamigenic earthquake in a rotating stratified ocean // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2013. Vol. 68, No. 6. P. 490–496.
- [17] **Носов М.А., Нурисламова Г.Н., Мошенцева А.В., Колесов С.В.** Остаточные гидродинамические поля при генерации цунами землетрясением // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 5. С. 591–602.
Nosov, M.A., Nurislamova, G.N., Moshenceva, A.V., Kolesov S.V. Residual hydrodynamic fields after tsunami generation by an earthquake // *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. Vol. 50, No. 5. P. 520–531.
- [18] **Нурисламова Г.Н., Носов М.А.** Генерация цунами во вращающемся океане // *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2017. Т. 33, № 1. С. 58–66.
Nosov, M.A., Nurislamova, G.N. Tsunami generation in a rotating ocean // *Vestn. KRAUNTS. Earth Science*. 2017. Vol. 33, No 1. P. 58–66. (In Russ.)
- [19] **Gill, A.E.** *Atmosphere-ocean dynamics*. New York: Acad. Press, 1982. 662 p.
- [20] **Носов М.А., Колесов С.В., Нурисламова Г.Н., Большакова А.В.** Влияние вращения Земли на волны цунами, вызванные глубокофокусным Охотоморским землетрясением 2013 г. // *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика и астрономия*. 2018. № 6. С. 117–123.
Nosov, M.A., Kolesov, S.V., Nurislamova, G.N., Bolshakova, A.V. The effect of the Earth’s rotation on tsunami waves triggered by the 2013 deep-focus Okhotsk Sea earthquake // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2018. Vol. 73, No. 6. P. 702–709.
- [21] **Okada, Y.** Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. of the Seismological Soc. of America*. 1985. Vol. 75, No. 4. P. 1135–1154.
- [22] **Leonard, M.** Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release // *Bull. of the Seismological Soc. of America*. 2010. Vol. 100, No. 5A. P. 1971–1988.
- [23] **Носов М.А., Колесов С.В., Большакова А.В. и др.** Автоматическая система оценки цунамиопасности землетрясения // *Уч. записки физ. фак-та Московского ун-та*. 2018. № 5. С. 1850901-1–1850901-9
Nosov, M.A., Kolesov, S.V., Bolshakova, A.V. et al. Automatic rating system for the earthquake tsunami hazard // *Uch. Zapiski Fiz. Fakulteta Mosk. Un-ta*. 2018. No. 5. P. 1850901-1–1850901-9. (In Russ.)

- [24] National Geophysical Data Center. Global Historical Tsunami Database. Available at: <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.hazards:G02151> (accessed 26.10.2018).
- [25] **Okada, Y.** Simulated empirical law of coseismic crustal deformation // J. of Physics of the Earth. 1995. Vol. 43, No 6. P. 697–713.
- [26] **Kampf, J.** Advanced ocean modelling: using open-source software. Springer Science & Business Media, 2010. 181 p.

Поступила в редакцию 21 ноября 2018 г.

The role of Coriolis force in the dynamics of the waves excited in the ocean by deep-focal earthquakes

NOSOV, MIKHAIL A.^{1,2}, KOLESOV, SERGEY V.^{1,2}, NURISLAMOVA, GULNAZ N.^{1,2}, BOLSHAKOVA, ANNA V.^{1,2}, SEMENTSOV, KIRILL A.¹, KARPOV, VYACHESLAV A.^{1,2,*}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia

*Corresponding author: Karpov, Vyacheslav A., e-mail: va.karpov@physics.msu.ru

Using the example of a seismic event with the same magnitude and mechanism as for the 2018 Fiji deep-focus earthquake the relationship between the parameters of a tsunami source and the depth of an earthquake was theoretically investigated. It is shown that strong deep-focus earthquakes are capable of creating extensive areas of co-seismic deformations for the ocean bottom, the size of which is comparable to the barotropic Rossby deformation radius. Tsunami waves generated by such sources have an unusually large length, and therefore they are subject to the influence of the Coriolis force. The influence of the Coriolis force on the weak tsunami waves caused by the 2018 Fiji earthquake has been studied by numerical simulation. It was found that for a virtual sea-level station located to the south of the source at latitude of 40° S, the amplitude of the leading tsunami wave under the influence of the Coriolis force decreased by $\approx 30\%$. For virtual stations located at the equator or at latitude of 20° S, taking into account the Coriolis force changes the amplitude of the waves by no more than 10%. For stations located in the equatorial zone, the effect of delaying of the manifestation of differences in sea-level fluctuations, calculated with and without Coriolis force, as compared with the entry of the leading tsunami wave was discovered. A physical interpretation of the observed delay effect is proposed.

Keywords: deep-focus earthquake, tsunami, shallow water theory, Coriolis force, Rossby deformation radius, numerical simulation.

Cite: Nosov, M.A., Kolesov, S.V., Nurislamova, G.N., Bolshakova, A.V., Sementsov, K.A., Karpov, V.A. The role of Coriolis force in the dynamics of the waves excited in the ocean by deep-focal earthquakes // Computational Technologies. 2019. Vol. 24, No. 1. P. 75–87. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.006. (In Russ.)

Acknowledgements. This research was supported by RFBR (grant No. 16-05-00053).

Received 21 November 2018