Механика

УДК 539.3

DOI: 10.31429/vestnik-17-2-36-41

О ВОЗМОЖНЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЯХ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Евдокимова О. В., Бабешко О. М., Бабешко В. А., Бушуева О. А.

ABOUT POSSIBLE OCEANIC PHENOMENA FOR HORIZONTAL MOVEMENTS OF LITHOSPHERIC PLATES

O. V. Evdokimova[1], O. M. Babeshko[2], V. A. Babeshko[1,2], O. A. Bushueva[2]

[1] Southern Scientific Center, Russian Academy of Science, Rostov-on-Don, 344006, Russia
[2] Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia
e-mail: babeshko41@mail.ru

Abstract. In earlier works, the authors investigated the possibility of predicting a tsunami based on the study of the possibility of starting earthquakes in the oceanic environment. It is established that if the conditions for the occurrence of a starting earthquake that leads to vertical movement of the lithospheric plates, it is possible with prices even with a relatively small ballroom events. Such earthquakes are caused by heavy vertical impacts on the lithospheric plates. It is assumed that in the case of horizontal impacts on lithospheric plates, such as events are not possible. At the same time, with the horizontal movement of lithospheric plates, due to the increase in the number of degrees of freedom of movement of lithospheric plates, there is a need for a more detailed study of these events.

Keywords: block element, lithospheric plates, topology, differential factorization methods, exterior forms, block structures, boundary problems, starting earthquakes, tsunami.

Введение

Различные аспекты явления цунами исследовались во многих работах [1–11]. К ним относятся вопросы распространения уединенных волн в океанической среде. Ряд исследований связан с оценкой последствий воздействия цунами на прибрежные объекты. Имеются работы, связанные с попытками математического моделирования явления цунами как численно, так и аналитически. Некоторые исследования проводились с целью улавливания факта движения цунами с помощью специального подводного оборудования с передачей предупредительных радиосигналов в службы по чрезвычайным ситуациям. В работе [12] впервые дается метод, позволяющий прогнозировать цунами на основе стартовых землетрясений. Последние могут возникнуть в случае вертикальных подвижек литосферных плит при стартовых землетрясениях. Однако совершенно не изучен вопрос о возможности природных явлений в океанической зоне при стартовых землетрясениях, возникающих в случае горизонтальных подвижек литосферных плит. В настоящей работе исследуется один из вариантов возникновения природных событий в этом случае.

1. Основные уравнения

В качестве моделей литосферных плит, с учетом масштаба Земли и размеров ее коры в зонах суши и океана, приняты полубесконеч-

Евдокимова Ольга Владимировна, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Южного научного центра РАН; e-mail: evdokimova.olga@mail.ru.

Бабешко Ольга Мефодиевна, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник научно-исследовательского центра прогнозирования и предупреждения геоэкологических и техногенных катастроф Кубанского государственного университета; e-mail: babeshko49@mail.ru.

Бабешко Владимир Андреевич, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой математического моделирования Кубанского государственного университета, директор Научно-исследовательского центра прогнозирования и предупреждения геоэкологических и техногенных катастроф Кубанского государственного университета, заведующий лабораторией Южного федерального университета; e-mail: babeshko41@mail.ru.

Бушуева Ольга Алексеевна, студентка магистратуры факультета компьютерных технологий и математики Кубанского государственного университета; e-mail: olyabushuyeva@gmail.com.

Отдельные фрагменты работы выполнены в рамках реализации Госзадания Минобрнауки России на 2020 г. (проект FZEN-2020-0022), Южного научного центра РАН на 2020 г. (проект 00-20-13) № госрег. 01201354241, и при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 19-41-230003, 19-41-230004, 19-48-230014, 18-08-00465, 18-01-00384, 18-05-80008).

ные пластины Кирхгофа, расположенные на деформируемом основании. Такого рода модели достаточно надежно оправдали свое применение разных работах. Торцы литосферных плит параллельны и расположены встречно. Подводная плита имеет толщину, меньшую, чем плита суши. Океанический слой с учетом масштаба, описывается уравнениями мелкой воды. С учетом приливных колебаний исследуется случай контакта литосферных плит с основанием при пренебрежимо малых касательных контактных напряжениях и низкочастотных гармонических вертикальных воздействиях. Описанная проблема рассматривается в четырехблочной структуре, в каждом блоке которой поставлены соответствующие граничные задачи. Методом блочного элемента исследование сводится к изучению системы функциональных уравнений, позволяющих выявить условия возникновения стартового землетрясения. За основу при построении определяющих уравнений принимается подход, изложенный в [12].

Считаем, что на слой идеальной несжимаемой жидкости горизонтальные воздействия от плиты невозможны. На плиту действуют внешние гармонические во времени горизонтальные силы, вызываемые воздействием вязкой астеносферы. Кора Земли предполагается разделенной границей Конрада, выделяющей подвижный верхний слой гранита и нижний, базальтовый. В локальной системе координат $x_1x_2x_3$ с началом в плоскости x_1x_2, совпадающей со срединной плоскостью пластины, направленной вверх по нормали к пластине осью ox_3, осью ox_1, направленной по касательной к границе разлома, осью ox_2 — по нормали к его границе. Область, занятая левой плитой, обозначается индексом λ и описывается соотношениями $|x_1| \leqslant \infty$, $x_2 \leqslant -\theta$, а занятая правой — индексом r и координатами $|x_1| \leqslant \infty$, $\theta \leqslant x_2$. Для твердых литосферных плит уравнение Кирхгофа для фрагментов b, $b = \lambda, r$, занимающих области Ω_b с границами $\partial\Omega_b$, при горизонтальных гармонических воздействиях напряжением $t_{3b}e^{-i\omega t}$ сверху и $g_{3b}e^{-i\omega t}$ — снизу после исключения временного параметра имеют вид

$$\mathbf{R}_b\left(\partial x_1, \partial x_2\right)\mathbf{u}_b - \varepsilon_{5b}\mathbf{g}_b = \varepsilon_{5b}\mathbf{t}_b. \qquad (1.1)$$

Здесь каждая пластина рассматривается как многообразие с краем, где $\mathbf{u}_b = \{u_{1b}, u_{2b}\}$ — вектор перемещения точек пластин по горизонтальным направлениям срединной поверхности. Имеет место обозначение

$$\mathbf{R}_b\left(\partial x_1, \partial x_2\right)\mathbf{u}_b = \left\| \begin{matrix} \rho_{11} & \varepsilon_{2b}\frac{\partial^2 u_{2b}}{\partial x_1 \partial x_2} \\ \varepsilon_{2b}\frac{\partial^2 u_{1b}}{\partial x_1 \partial x_2} & \rho_{22} \end{matrix} \right\|,$$

$$\rho_{11} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \varepsilon_{1b}\frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \varepsilon_{4b}\right)u_{1b},$$

$$\rho_{22} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \varepsilon_{1b}\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \varepsilon_{4b}\right)u_{2b}.$$

Преобразование Фурье дифференциальной части системы уравнений имеет вид

$$-\mathbf{R}_b(-i\alpha_1, -i\alpha_2)\mathbf{U}_b = \left\| \begin{matrix} \xi_{11} & \xi_{12} \\ \xi_{21} & \xi_{22} \end{matrix} \right\|,$$

$$\xi_{11} = (\alpha_1^2 + \varepsilon_{1b}\alpha_2^2 - \varepsilon_{4b})U_{1b},$$

$$\xi_{22} = (\alpha_2^2 + \varepsilon_{1b}\alpha_1^2 - \varepsilon_{4b})U_{2b},$$

$$\xi_{12} = \varepsilon_{2b}\alpha_1\alpha_2 U_{2b}, \quad \xi_{21} = \varepsilon_{2b}\alpha_1\alpha_2 U_{1b},$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{F}_2\mathbf{u}, \quad \mathbf{G} = \mathbf{F}_2\mathbf{g}, \quad b = 1, 2, \ldots, B.$$

Здесь

$$\varepsilon_{1b} = 0{,}5(1-\nu_b), \quad \varepsilon_{2b} = 0{,}5(1+\nu_b), \quad \varepsilon_{3b} = \frac{h_b^2}{12},$$

$$\begin{gathered} \varepsilon_{4b} = \omega^2\rho_b\frac{1-\nu_b^2}{E_b}, \quad \varepsilon_{5b} = \frac{1-\nu_b^2}{E_b h_b}, \\ g_{1b} = \mu_b\left(\frac{du_{1b}}{dx_3} + \frac{du_{3b}}{dx_1}\right), \\ g_{2b} = \mu_b\left(\frac{du_{2b}}{dx_3} + \frac{du_{3b}}{dx_2}\right), \\ x_3 = 0, \end{gathered} \qquad (1.2)$$

$\mathbf{F}_2 \equiv \mathbf{F}_2(\alpha_1, \alpha_2)$ — двумерный оператор преобразования Фурье.

Кроме того, приняты обозначения: ν_b — коэффициент Пуассона, μ_b, E — модули сдвига и Юнга, h_b — толщина, ρ_b — плотность, ω — частота колебаний. $\mathbf{g}_b = \{g_{1b}, g_{2b}\}$, $\mathbf{t}_b = \{t_{1b}, t_{2b}\}$ — векторы контактных напряжений и внешних давлений соответственно, действующих по касательной к границе подложки в области Ω_b. В случае горизонтальных воздействий на пластины остаются лишь горизонтальные составляющие внешних напряжений. Граничные условия, которые ставятся на краях пластин, диктуются типом частей границ каждого блока. Так, при принятых обозначениях, в случае жесткого защемления края пластины необходимо потребовать, чтобы смещения в направлении осей локальной системы координат многообразия

x_1 и x_2 по касательной к срединной поверхности и по нормали соответственно, были равны нулю, т.е.

$$u_{1b} = 0, \quad u_{2b} = 0.$$

Выражения для нормальной N_{x_2} и $T_{x_1x_2}$ касательной составляющих к срединной поверхности на границе пластины даются соответственно соотношениями

$$N_{bx_2} = \frac{E_b}{1-\nu_b^2}\left(\frac{\partial u_{2b}}{\partial x_{2b}} + \nu\frac{\partial u_{1b}}{\partial x_{1b}}\right),$$

$$T_{bx_1x_2} = \frac{E_b}{2(1+\nu_b)}\left(\frac{\partial u_{2b}}{\partial x_{1b}} + \frac{\partial u_{1b}}{\partial x_{2b}}\right).$$

Здесь x_1 направлено по касательной к границе области, занятой пластиной, а x_2 — по нормали в построенной локальной системе координат.

В качестве деформируемого основания — подложки, на котором находятся пластины-покрытия, описываемого краевой задачей (1.1), можно принимать различные модели. Это могут быть деформируемое полупространство, слой, многослойное полупространство, в том числе анизотропное, вязкоупругие среды. Во всех перечисленных случаях соотношения между напряжениями на поверхности слоистой среды g_{kb}, $k = 1,2,3$ и перемещениями u_k, $k = 1,2,3$, имеют вид (1.2), со свойствами

$$\mathbf{u}(x_1, x_2, 0) = \\ = \frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int \mathbf{K}(\alpha_1, \alpha_2, 0)\mathbf{G}(\alpha_1, \alpha_2)\times \\ \times e^{-i\langle\alpha,\mathbf{x}\rangle}\,\mathrm{d}\alpha_1\,\mathrm{d}\alpha_2, \quad (1.3)$$

$$\langle\alpha, \mathbf{x}\rangle = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2,$$

$$\mathbf{K} = \|K_{mn}\|, \quad m, n = 1, 2,$$

$$\mathbf{K}(\alpha_1, \alpha_2, 0) = O(A^{-1}), \quad A = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \to \infty.$$

$K_{mn}(\alpha_1, \alpha_2, 0)$ — аналитические функции двух комплексных переменных α_k, в частности, мероморфные. Эти соотношения называются функциями влияния и опубликованы во многих работах [13].

Поведение блочного элемента, которым является слой толщины H_1 несжимаемой жидкости Ω_0 на океанической литосферной плите, описывается уравнениями мелкой воды следующего вида

$$p = (i\omega\rho\phi + \rho g\frac{ih_b}{\omega H_1^2}\Delta\phi)e^{-i\omega t} - we^{-i\omega t}.$$

Здесь p — давление в слое жидкости, ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения, ϕ — потенциал скоростей в жидкости, w — внешнее воздействие на слой. Учитывая, что на верхней границе литосферной плиты на нее оказывается давление слоя жидкости, с учетом взятой модели необходимо принять

$$t_{3b} = p, \quad u_{3b} = \frac{h_b}{i\omega H_1^2}\Delta\phi_b.$$

В то же время, следует иметь в виду, что слой жидкости не может повлиять на горизонтальные составляющие внешних воздействий, что оставляет без изменений функциональное уравнение. Влияние слоя жидкости на поверхности литосферной плиты носит гидростатический характер, что будет учтено в дальнейшем.

Для использования метода блочного элемента необходимо применить его алгоритм, включающий этапы внешней алгебры, внешнего анализа и фактор-топологии. На этапе внешней алгебры погрузим граничную задачу в топологическую структуру, индуцированную евклидовой метрикой введенной декартовой системы координат и построим функциональные уравнения вида [14]

Как сказано выше, в принятой постановке задачи о горизонтальных воздействиях на литосферные плиты и пренебрежимо малых вертикальных воздействиях для случая идеальной несжимаемой жидкости верхнего слоя горизонтальные воздействия жидкостью на плиты не оказываются. Плиты движутся в результате спрединговых воздействий на границе Мохоромвичича.

Функциональные уравнения для пластин, имеют в общем случае вид [14]

$$-\mathbf{R}_b(-i\alpha_{1b}, -i\alpha_{2b})\mathbf{U}_b = \\ = \int_{\partial\Omega_b} \omega_b - \varepsilon_{5b}\mathbf{F}_2(\alpha_{1b}, \alpha_{2b})(\mathbf{g}_b + \mathbf{t}_b), \quad (1.4)$$

$$\mathbf{U}_b = \{U_{1b}, U_{2b}\}, \quad b = 1, 2.$$

Здесь $\boldsymbol{\omega}_b$ — участвующий в (1.4) вектор внешних форм, имеющий представление

$$\boldsymbol{\omega}_b = \{\omega_1, \omega_2\},$$

$$\omega_{1b} = e^{i\langle\alpha,x\rangle}\times$$
$$\times\left\{-\left(\varepsilon_{1b}\frac{\partial u_{1b}}{\partial x_2}+\varepsilon_{2b}\frac{\partial u_{2b}}{\partial x_1}-i\varepsilon_{1b}\alpha_{2b}u_{1b}\right)\mathrm{d}x_1+\right.$$
$$\left.+\left(\frac{\partial u_{1b}}{\partial x_1}-i\alpha_{1b}u_{1b}-i\varepsilon_{2b}\alpha_{2b}u_{2b}\right)\mathrm{d}x_2\right\},$$

$$\omega_{2b} = e^{i\langle\alpha,x\rangle}\times$$
$$\times\left\{-\left(\varepsilon_{2b}\frac{\partial u_{1b}}{\partial x_1}+\frac{\partial u_{2b}}{\partial x_2}-i\alpha_{2b}u_{2b}\right)\mathrm{d}x_1+\right.$$
$$\left.+\left(\varepsilon_{1b}\frac{\partial u_{2b}}{\partial x_1}-i\varepsilon_{1b}\alpha_{1b}u_{2b}-i\varepsilon_{2b}\alpha_{2b}u_{1b}\right)\mathrm{d}x_2\right\}.$$

В соответствии с алгоритмом метода блочного элемента [14] данные относительно характера контактов блоков должны быть внесены в представление псевдодифференциального уравнения. Для его построения осуществляется дифференциальная факторизация матрицы-функции $\mathbf{R}_b(-i\alpha_1,-i\alpha_2)$ функционального уравнения [14]. Заметим, что факторизация выполняется в каждой локальной системе координат касательного расслоения границы $\partial\Omega_b$. Обозначим параметры левой от оси ox_1 пластины с индексом λ, а правой — индексом r. Применением алгоритма дифференциальной факторизации [14], строятся факторизующие матрицы-функции $\mathbf{D}_b(-i\alpha_{1b},-i\alpha_{2b})$ для левого и правого краев пластин. После приведения локальных систем к единой системе координат ox_1x_2, они имеют соответственно вид

$$\mathbf{D}_\lambda(-i\alpha_1,-i\alpha_2)=\left\|\begin{matrix}\delta_{11} & \delta_{12}\\ 0 & 1\end{matrix}\right\|, \qquad (1.5)$$

$$\delta_{11}=\frac{1}{\alpha_2-\alpha_{21-}}-\frac{1}{\alpha_2-\alpha_{22-}},$$

$$\delta_{12}=\frac{-\alpha_1}{(\alpha_2-\alpha_{21-})\alpha_{21-}}+\frac{\alpha_1}{(\alpha_2-\alpha_{22-})\alpha_{22-}},$$

$$\alpha_{21-}=-i\sqrt{\alpha_1^2-\varepsilon_{4\lambda}\varepsilon_{1\lambda}^{-1}},$$

$$\alpha_{22-}=-i\sqrt{\alpha_1^2-\varepsilon_{4\lambda}},$$

$$\mathbf{D}_r(-i\alpha_1,-i\alpha_2)=\left\|\begin{matrix}\psi_{11} & \psi_{12}\\ 0 & 1\end{matrix}\right\|,$$

$$\psi_{11}=\frac{1}{\alpha_2-\alpha_{21+}}-\frac{1}{\alpha_2-\alpha_{22+}},$$

$$\psi_{12}=\frac{-\alpha_1}{(\alpha_2-\alpha_{21+})\alpha_{21+}}+\frac{\alpha_1}{(\alpha_2-\alpha_{22+})\alpha_{22+}},$$

$$\alpha_{21+}=i\sqrt{\alpha_1^2-\varepsilon_{4r}\varepsilon_{1r}^{-1}},\quad \alpha_{22+}=i\sqrt{\alpha_1^2-\varepsilon_{4r}}.$$

Подействовав этими матрицами-функциями на функциональные уравнения слева и вычислив формы-вычета Лере [12,14], получаем псевдодифференциальные уравнения для левой пластины в виде

$$\mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1^\lambda)\left\langle\int\limits_{\partial\Omega_\lambda}\Big[\omega_{1\lambda}(\alpha_1,\alpha_{21-})-\right.$$
$$-\alpha_1\alpha_{21-}^{-1}\omega_{2\lambda}(\alpha_1,\alpha_{21-})\Big]-$$
$$-\varepsilon_{5\lambda}\mathbf{F}_2(\alpha_1,\alpha_{21-})\Big[(g_{1\lambda}+t_{1\lambda})-$$
$$\left.-\alpha_1\alpha_{21-}^{-1}(g_{2\lambda}+t_{2\lambda})\Big]\right\rangle=0,$$

$$\xi_1^\lambda\in\partial\Omega_\lambda,$$

$$\mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1^\lambda)\left\langle\int\limits_{\partial\Omega_\lambda}\Big[\omega_{1\lambda}(\alpha_1,\alpha_{22-})-\right.$$
$$-\alpha_1\alpha_{22-}^{-1}\omega_{2\lambda}(\alpha_1,\alpha_{22-})\Big]-$$
$$-\varepsilon_{5\lambda}\mathbf{F}_2(\alpha_1,\alpha_{22-})\Big[(g_{1\lambda}+t_{1\lambda})-$$
$$\left.-\alpha_1\alpha_{22-}^{-1}(g_{2\lambda}+t_{2\lambda})\Big]\right\rangle=0,$$

$$\xi_1^\lambda\in\partial\Omega_\lambda.$$

Аналогично на границе правой пластины имеем

$$\mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1^r)\left\langle\int\limits_{\partial\Omega_r}\Big[\omega_{1r}(\alpha_1,\alpha_{21+})-\right.$$
$$-\alpha_1\alpha_{21+}^{-1}\omega_{2r}(\alpha_1,\alpha_{21+})\Big]-$$
$$-\varepsilon_{5r}\mathbf{F}_2(\alpha_1,\alpha_{21+})\Big[(g_{1r}+t_{1r})-$$
$$\left.-\alpha_1\alpha_{21+}^{-1}(g_{2r}+t_{2r})\Big]\right\rangle=0,$$

$$\xi_1^r\in\partial\Omega_r,$$

$$\mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1^r)\Big\langle \int\limits_{\partial\Omega_r} \Big[\omega_{1r}(\alpha_1,\alpha_{22+})- -\alpha_1\alpha_{22+}^{-1}\omega_{2r}(\alpha_1,\alpha_{22+})\Big]- -\varepsilon_{5r}\mathbf{F}_2(\alpha_1,\alpha_{22+})\Big[(g_{1r}+t_{1r})- -\alpha_1\alpha_{22+}^{-1}(g_{2r}+t_{2r})\Big]\Big\rangle = 0,$$

$$\xi_1^r \in \partial\Omega_r.$$

Дальнейшее исследование граничной задачи о горизонтальном движении литосферных плит повторяет выполненные в [12, 14] математические действия. Они приводят к следующим результатам. Векторы контактных напряжений на краях пластин приобретают следующие концентрации напряжений, описываемые приводимыми ниже формулами для двух разных случаев.

В том случае, когда присутствует расстояние 2θ, $\theta > 0$ между литосферными плитами, контактные напряжения на краях пластин имеют представление [14]

$$\mathbf{g}_\lambda(x_1,x_2) = \boldsymbol{\sigma}_{1\lambda}(x_1,x_2)(-x_2-\theta)^{-1/2},$$

$$x_2 < -\theta,$$

$$\mathbf{g}_r(x_1,x_2) = \boldsymbol{\sigma}_{1r}(x_1,x_2)(x_2-\theta)^{-1/2},$$

$$x_2 > \theta.$$

Векторы $\boldsymbol{\sigma}_{1\lambda}$, $\boldsymbol{\sigma}_{1r}$ непрерывны по обоим параметрам.

В том случае, когда расстояние отсутствует, $\theta = 0$ между литосферными плитами, контактные напряжения на краях пластин имеют представление [14]

$$\mathbf{g}_\lambda(x_1,x_2) \to \boldsymbol{\sigma}_{2\lambda}(x_1,x_2)x_2^{-1}+ +\boldsymbol{\sigma}_{3\lambda}(x_1,x_2)\ln|x_2| + \boldsymbol{\sigma}_{4\lambda}(x_1,x_2)\operatorname{sgn} x_2,$$

$$\mathbf{g}_r(x_1,x_2) \to \boldsymbol{\sigma}_{2r}(x_1,x_2)x_2^{-1}+ +\boldsymbol{\sigma}_{3r}(x_1,x_2)\ln|x_2| + \boldsymbol{\sigma}_{4r}(x_1,x_2)\operatorname{sgn} x_2.$$

Это свидетельствует о стартовом землетрясении. В этом случае берега разлома мгновенно сближаются, что может сопровождаться локальным выбросом жидкости из области разлома вертикально вверх.

Возможно, такие события наблюдали мореплаватели, относя их только в подводным извержениям вулканов.

Вывод

Опираясь на результаты полученных исследований, можно заключить, что и в случае горизонтального сближения океанических литосферных плит на поверхности могут возникать опасные природные явления, состоявшие в локальном выбросе в зоне эпицентра стартового землетрясения вертикального столба жидкости. В связи с локальным характером события, оно,по мнению авторов, вряд ли может вызвать цунами, хотя детальное исследование должно подтвердить или опровергнуть это заключение.

Литература

1. *Багрянцев В.И., Куликов Е.А., Пул С.Л. и др.* Измерение длинных волн в открытом океане // В сб.: Волновые процессы в северо-западной части Тихого океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 11–27.
2. *Бернштейн В.А.* Цунами и рельеф океанического дна. Новосибирск: Наука, 1972. 142 с.
3. *Hebenstreit G.T., Murty T.S.* Tsunami amplitudes from local earthquakes in the Pacific northwest region of North America, Part 1, The outer coast // Marine Geodesy. 1989. Vol. 13. P. 101–146.
4. *Ng M., LeBlond P.H., Murty T.S.* Numerical simulation of tsunami amplitudes on the coast of British Columbia due to local earthquakes // Marine Geodesy. 1990. Vol. 13. P. 101–146.
5. *Miloh T., Striem H.L.* Tsunami effects at coast sites due to offshore faulting // Technophysics. 1978. Vol. 46. P. 347–356.
6. *Fine I.V., Rabinovich A.B., Thomson R.E., Kulikov E.A.* Numerical modeling of tsunami generated by submarine and subaerial landslides. In: Submarine Landslides and Tsunamis. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 2003, p. 72–93.
7. *Го Ч.Н.* О статистическом изучении распределения высот волн цунами вдоль побережья // В сб.: Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997, с. 73–79.
8. *Kulikov E.A., Spirin A.I., Rabinovich A.B., Poole S.L., Soloviev S.L.* Registration on of tsunamis in the open ocean // Marine Geodesy. 1983. Vol. 6. Iss. 3–4. P. 303–309.
9. *Filloux J.H.* Tsunami recorded on the open ocean floor // Geophys. Res. Let. 1983. Vol. 9. Iss. 1. P. 25–28.
10. *Куликов Е.А., Медведев П.П., Лаппо С.С.* Регистрация из космоса цунами 26 декабря 2004 г. в Индийском океане // ДАН. 2005. Т. 401. № 4. С. 537–542.
11. *Levin B., Kaistrenko V., Kharlamov A., Chepareva M., Kryshny V.* Physical processes in the ocean as indicators for direct tsunami registration from satellite // In: Proc.

1UGG/IOC Intern. Tsunami Symp., Wakayama, 1993. P. 309–320.
12. *Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М.* Метод блочного элемента в проблеме прогноза подготовки цунами // ДАН. 2019. Vol. 488. No. 3. P. 370—375. DOI: 10.1134/S1028335819090064
13. *Ворович И.И., Бабешко В.А.* Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. 320 с.
14. *Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M.* On a mechanical approach to the prediction of earthquakes during horizontal motion of litospheric plates // Acta Mechanica. 2018. Vol. 229. P. 4727–4739. DOI: 10.1007/s00707-018-2255-7

References

1. Bagryantsev, V.I., Kulikov, E.A., Pul, S.L. et al. Izmerenie dlinnykh voln v otkrytom okeane [Measurement of long waves in the open ocean]. In: *Volnovye protsessy v severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana* [Wave processes in the northwestern part of the Pacific Ocean]. DVNTs AN SSSR, Vladivostok, 1980, pp. 11–27. (In Russian)
2. Bernshteyn, V.A. *Tsunami i rel'ef okeanicheskogo dna* [Tsunami and ocean floor topography]. Nauka, Novosibirsk, 1972. (In Russian)
3. Hebenstreit, G.T., Murty, T.S. Tsunami amplitudes from local earthquakes in the Pacific northwest region of North America, Part 1, The outer coast. *Marine Geodesy*, 1989, vol. 13, pp. 101–146.
4. Ng, M., LeBlond, P.H., Murty, T.S. Numerical simulation of tsunami amplitudes on the coast of British Columbia due to local earthquakes. *Marine Geodesy*, 1990, vol. 13, pp. 101–146.
5. Miloh, T., Striem, H.L. Tsunami effects at coast sites due to offshore faulting. *Technophysics*, 1978, vol. 46, pp. 347–356.
6. Fine, I.V., Rabinovich, A.B., Thomson, R.E., Kulikov, E.A. Numerical modeling of tsunami generated by submarine and subaerial landslides. In: *Submarine Landslides and Tsunamis*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 2003, pp. 72–93.
7. Go, Ch.N. O statisticheskom izuchenii raspredeleniya vysot voln tsunami vdol' poberezh'ya [On a statistical study of the distribution of tsunami wave heights along the coast]. In.: *Geodinamika tektonosfery zony sochleneniya Tikhogo okeana s Evraziey* [Geodynamics of the tectonosphere of the junction zone of the Pacific Ocean with Eurasia]. IMGiG DVO RAN, Yuzhno-Sakhalinsk, 1997, pp. 73–79. (In Russian)
8. Kulikov, E.A., Spirin, A.I., Rabinovich, A.B., Poole, S.L., Soloviev, S.L. Registration on of tsunamis in the open ocean. *Marine Geodesy*, 1983, vol. 6, iss. 3–4, pp. 303–309.
9. Filloux, J.H. Tsunami recorded on the open ocean floor. *Geophys. Res. Let.*, 1983, vol. 9, iss. 1, pp. 25–28.
10. Kulikov, E.A., Medvedev, P.P., Lappo, S.S. Registratsiya iz kosmosa tsunami 26 dekabrya 2004 g. v Indiyskom okeane [Tsunami registration from space December 26, 2004 in the Indian Ocean]. *Doklady Akademii nauk* [Rep. of the Academy of Sciences], 2005, vol. 401, no. 4, pp. 537–542. (In Russian)
11. Levin, B., Kaistrenko, V., Kharlamov, A., Chepareva, M., Kryshny, V. Physical processes in the ocean as indicators for direct tsunami registration from satellite. In: *Proc. 1UGG/IOC Intern. Tsunami Symp.*, Wakayama, 1993, pp. 309–320.
12. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. Metod blochnogo elementa v probleme prognoza podgotovki tsunami [The block element method in the problem of forecasting tsunami training]. *Doklady Akademii nauk* [Rep. of the Academy of Sciences], 2019, vol. 488, no. 3, pp. 370—375. DOI: 10.1134/S1028335819090064 (In Russian)
13. Vorovich, I.I., Babeshko, V.A. *Dinamicheskie smeshannye zadachi teorii uprugosti dlya neklassicheskikh oblastey* [Dynamic mixed problems of elasticity theory for non-classical domains]. Nauka, Moscow, 1979. (In Russian)
14. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. On a mechanical approach to the prediction of earthquakes during horizontal motion of litospheric plates. *Acta Mechanica*, 2018, vol. 229, pp. 4727–4739. DOI: 10.1007/s00707-018-2255-7

Статья поступила 22 мая 2020 г.