

## МЕХАНИКА

УДК 539.3

doi: 10.31429/vestnik-15-3-12-18

## О СТАРТОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ

Бабешко В. А., Евдокимова О. В., Бабешко О. М., Хрипков Д. А.,  
Телятников И. С., Евдокимов В. С., Шестопапов В. Л.

## STARTING EARTHQUAKES IN THE COASTAL ZONE

V. A. Babeshko<sup>1,2</sup>, O. V. Evdokimova<sup>1</sup>, O. M. Babeshko<sup>2</sup>, D. A. Khripkov<sup>2</sup>, I. S. Telyatnikov<sup>1</sup>,  
V. S. Evdokimov<sup>1</sup>, V. L. Shestopalov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southern Scientific Center, Russian Academy of Science, Rostov-on-Don, 344006, Russia

<sup>2</sup> Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia

e-mail: babeshko41@mail.ru

*Abstract.* In the coastal zones of the seismically territory the seismicity as a rule is connected with the processes of subduction. It consists in moving of the sea or oceanic lithospheric plates under the lithospheric plates of the land. As a result the parallel faults are formulated in the oceanic lithospheric plates, laying on the layer of compacted asthenosphere. Early developed the models characterizing the preparation of starting earthquakes for different types of stresses on tectonic plates and parallels of the faults the gives possibility to predict of arising of the earthquakes was implemented. This analysis may at the same time show ways to deflect them, i. e. to possibly reduce or to predict earthquake risk. The investigation of the arisen block structure used the topological approach. The boundary problem imbeds into the topological structure and transforms in the functional equations. Applying automorphism the pseudodifferential equations are received and analyzed. It was proved that the starting earthquake can take place in this case and the relevant conditions are received.

*Keywords:* block element, factorization, topology, integral and differential factorization methods, exterior forms, block structures, boundary problems, singular peculiarity.

## 1. Основные уравнения

Исследованию вопросов подготовки, свершения и последствий землетрясений посвящено большое число отечественных и зарубежных публикаций [1–10]. В работах авторов [11–13] развит механический подход для прогноза землетрясений, основанный в выявлении такой концентрации напряжений в

литосферных плитах, которая, без сомнений, будет разрушать среду. Такие землетрясения были названы стартовыми, так как они возникают до взаимодействия между собой литосферных плит.

Исследования были посвящены изучению землетрясений на суше. Ниже рассматривается случай прибрежной территорий, включающей часть суши и водной акватории, на-

Бабешко Владимир Андреевич, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, зав. 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.

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.

Хрипков Дмитрий Александрович, научный сотрудник Кубанского государственного университета; e-mail: vestnik@kubsu.ru.

Телятников Илья Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории математики и механики Южного научного центра РАН; e-mail: ilux\_t@list.ru.

Евдокимов Владимир Сергеевич, студент Кубанского государственного университета, лаборант Южного научного центра РАН; e-mail: evdok\_vova@mail.ru.

Шестопапов Валерий Леонидович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математики и механики Южного научного центра РАН; e-mail: vlshestopalov@gmail.com.

Отдельные фрагменты работы выполнены в рамках реализации Госзадания Минобрнауки на 2018 г. (проекты 9.8753.2017/8.9), ЮНЦ РАН на 2018 г. (проект 00-18-04) № госрег. 01201354241, программ президиума РАН П-16 (проект 00-18-21) и П-52 (проект 00-18-29) и при поддержке грантов РФФИ (проекты 16-41-230214, 16-41-230218, 16-48-230216, 17-08-00323, 18-08-00465, 18-01-00384, 18-05-80008).

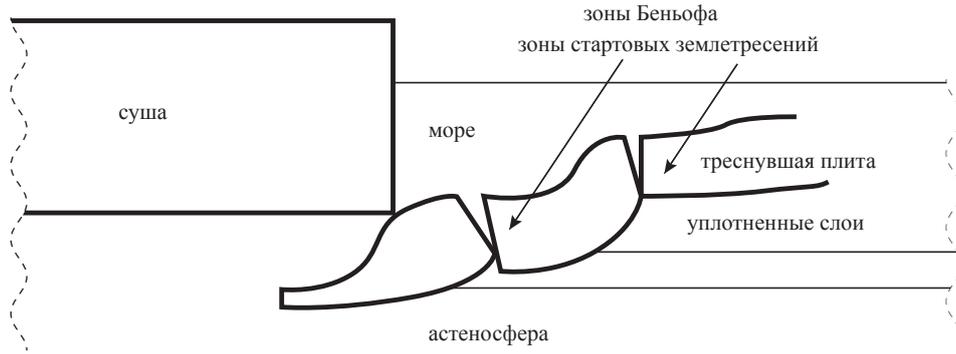


Рис. 1

пример, океана. Предполагается, что взаимодействуют литосферные плиты суши и океана таким образом, что океаническая плита продвигается под литосферную плиту суши, порождая процесс субдукции. В процессе субдукции океаническая плита, лежащая на деформируемом основании, изламывается в упруго деформируемой части (рис. 1). Это порождает совокупность параллельных изломов, представляющих разломы литосферных плит. Совокупность разломов представляет, при наличии близости берегов, зоны возможных стартовых землетрясений. Именно это зоны называются сейсмофокальными зонами Бенъофа, где наиболее часто случаются землетрясения.

Ниже строится модель поведения блочной структуры при наличии совокупности трех параллельных разломов. С учетом масштаба литосферные плиты моделируются пластинами Кирхгофа. При этом воздействие океана рассматривается как поверхностное давление сверху на океаническую литосферную плиту. Таким образом, имеется четыре фрагмента океанической литосферной плиты с тремя разломами. Среди них один, правый, имеет бесконечную ширину, остальные — конечную. В тех случаях, когда берега разломов не смыкаются, имеют место два их положения: когда между ними имеется отличное от нуля расстояние и когда оно отсутствует. В первом случае берега литосферных плит удалены друг от друга и находятся на линейно деформируемом основании. Считаем, что поверхность между берегами разлома свободна от напряжений, а на торцах плит действуют внешние силы, направленные по правилу внешних векторов. Граничные задачи рассматриваются в системе координат  $x_1x_2x_3$  с началом в плоскости  $x_1x_2$ , совпадающей со срединной плоскостью пластины, осью  $ox_3$ ,

направленной вверх по нормали к пластине, осью  $ox_1$ , направленной по касательной к границе разлома, осью  $ox_2$  — по нормали к его границе. Плиты, представляющие фрагменты покрытия, занимают области  $\Omega_n$   $|x_1| \leq \infty$ ,  $c_{2n-1} \leq x_2 \leq c_{2n}$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $c_{2N} = \infty$  с левой  $\partial\Omega_{2n-1}$  и правой  $\partial\Omega_{2n}$  границами. Номера разломов следуют за номерами фрагментов покрытий, возможны два состояния для разлома  $n$ :  $c_{2n} - c_{2n+1} < 0$ ,  $c_{2n} - c_{2n+1} = 0$ . Ограничимся случаем лишь вертикальных воздействий на пластины, считая, что на торцах могут задаваться отличные от нуля изгибающие моменты и перерезывающие силы. Уравнение Кирхгофа для фрагментов  $b$  плит,  $b = 1, 2, \dots, N$ , занимающих области  $\Omega_b$ , при указанных вертикальных гармонических воздействиях напряжением  $t_{3b}e^{-i\omega t}$  сверху и  $g_{3b}e^{-i\omega t}$  снизу после сокращения гармонической составляющей, имеет вид [11–13]

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_b(\partial x_1, \partial x_2)u_{3b} + \varepsilon_{53b}(t_{3b} - g_{3b}) &\equiv \\ &\equiv \left( \frac{\partial^4}{\partial x_1^4} + 2\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^4}{\partial x_2^4} - \varepsilon_{43b} \right) u_{3b} + \\ &\quad + \varepsilon_{53b}(t_{3b} - g_{3b}) = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_b(-i\alpha_1, -i\alpha_2)U_{3b} &\equiv R_b(-i\alpha_1, -i\alpha_2)U_{3b} \equiv \\ &\equiv (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^2 U_{3b}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{3b} = \mathbf{F}_2 u_{3b}, \quad G_{3b} = \mathbf{F}_2 g_{3b}, \quad T_{3b} = \mathbf{F}_2 t_{3b}, \\ b = 1, 2, \dots, N, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_b = -D_{b1} \left( \frac{\partial^2 u_{3b}}{\partial x_2^2} + \nu_b \frac{\partial^2 u_{3b}}{\partial x_1^2} \right) = \\ = f_{3b}(\partial\Omega_b), \quad (1.1) \end{aligned}$$

$$D_{b1} = \frac{D_b}{H^2}, \quad D_{b2} = \frac{D_b}{H^3},$$

$$\begin{aligned}
Q_b &= -D_{b2} \left( \frac{\partial^3 u_{3b}}{\partial x_2^3} + (2 - \nu_b) \frac{\partial^3 u_{3b}}{\partial x_1^2 \partial x_2} \right) = \\
&= f_{4b}(\partial\Omega_b), \\
u_{3b} &= f_{1b}(\partial\Omega_b), \quad \frac{\partial u_{3b}}{H \partial x_2} = f_{2b}(\partial\Omega_b), \\
D_b &= \frac{E_b h_b^3}{12(1 - \nu_b^2)}, \\
\varepsilon_{43b} &= \omega^2 \rho_b \frac{(1 - \nu_b^2) 12 H^4}{E h_b^2}, \quad \varepsilon_{53b} = \frac{(1 - \nu_b^2) 12 H^4}{E_b h_b^3}, \\
\varepsilon_6^{-1} &= \frac{(1 - \nu) H}{\mu}.
\end{aligned}$$

Связь между граничными напряжениями и перемещениями на поверхности упругой среды, на которой находятся плиты, дается соотношениями

$$\begin{aligned}
u_3(x_1, x_2) &= \varepsilon_6^{-1} \sum_{n=1}^N \iint_{\Omega_n} k(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) \times \\
&\quad \times g_{3n}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2, \\
-\infty &\leq x_1, x_2 \leq \infty, \\
k(x_1, x_2) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha, x)} d\alpha_1 d\alpha_2,
\end{aligned} \tag{1.2}$$

$$U_3(\alpha_1, \alpha_2) = \varepsilon_6^{-1} K(\alpha_1, \alpha_2) \sum_{n=1}^N G_{3n}(\alpha_1, \alpha_2),$$

$K(\alpha_1, \alpha_2, x_3)$  — аналитическая функция двух комплексных переменных  $\alpha_k$ , в частности, мероморфная, ее многочисленные примеры приведены в [14].

Здесь для пластин приняты обозначения:  $\nu_b, \nu$  — коэффициенты Пуассона блоков и основания соответственно,  $\mu$  — модуль сдвига основания,  $E_b$  — модуль Юнга,  $h_b$  — толщина блока,  $\rho_b$  — плотность,  $\omega$  — частота колебаний,  $g_{3b}, t_{3b}$  — значения контактных напряжений и внешних давлений, действующих вдоль оси  $x_3$  в области  $\Omega_b$  соответственно.  $\mathbf{F}_2 \equiv \mathbf{F}_2(\alpha_1, \alpha_2)$  и  $\mathbf{F}_1 \equiv \mathbf{F}_1(\alpha_1)$  двумерный и одномерный операторы преобразования Фурье соответственно,  $M_b$  и  $Q_b$  — изгибающий момент и перерезывающая сила;  $f_1(\partial\Omega_b)$  вертикальное перемещение на границе;  $f_2(\partial\Omega_b)$  — угол поворота срединной плоскости вокруг оси  $x_1$ , в системе координат  $x_1 o x_2$ ,  $H$  — размерный параметр подложки, например, толщина слоя;  $u_{3b}$  — вертикальные перемещения под блочными элементами,  $u_{3b0}$  — вертикальные перемещения нижнего основания вне

блочных элементов,  $u_3$  — вертикальные перемещения нижнего основания по всей длине. Обозначения заимствованы из [13, 14].

## 2. Метод блочных структур

Рассматривая плиты и основание (1.1) как блочную структуру, состоящую из трех деформируемых блоков, применим для ее исследования метод блочного элемента. Этот метод, как описано в [15], предполагает как первый шаг погружение средствами внешней алгебры граничной задачи в топологическую структуру. В результате строится функциональное уравнение граничной задачи для блочной структуры. Многошаговый алгоритм дальнейших исследований функционального уравнения, уже не имеющих никакого отношения к аппарату внешней алгебры, назван авторами внешним анализом в теории блочного элемента [15]. Он включает дифференциальную факторизацию матриц-функций с элементами из нескольких комплексных переменных, реализацию автоморфизма, состоящую в вычислении форм-вычетов Лере либо неполных функциональных уравнений Винера–Хопфа, построение псевдодифференциальных уравнений, извлечение из них интегральных уравнений, диктуемых конкретными граничными условиями краевой задачи, решение интегральных уравнений и получение интегрального представления решения граничной задачи в каждом блоке в форме «упакованного» блочного элемента. Наконец, производится «склейка» решений каждого блока, состоящая в построении фактор-топологии некоторых топологических пространств, являющихся декартовыми произведениями топологических пространств носителей и решений. Применяя этап внешней алгебры, функциональное уравнение граничной задачи запишем в виде

$$\begin{aligned}
R_b(-i\alpha_1, -i\alpha_2) U_{3b} &\equiv [(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^2 - \varepsilon_{43b}] U_{3b} = \\
&= - \int_{\partial\Omega_b} \omega_b - \varepsilon_{53b} S_{3b}(\alpha_1, \alpha_2), \tag{2.1}
\end{aligned}$$

$$S_{3b}(\alpha_1, \alpha_2) = \mathbf{F}_2(\alpha_1, \alpha_2)(t_{3b} - g_{3b}), \quad b = \lambda, r.$$

Здесь  $\omega_b$  — участвующие в представлении внешние формы [11–13], имеющие, с учетом выбора системы координат, вид

$$\begin{aligned}
\omega_b(x_1, x_2) &= e^{i(\alpha, x)} \times \\
&\times \left\{ - \left[ \frac{\partial^3 u_{3b}}{\partial x_2^3} - i\alpha_2 \frac{\partial^2 u_{3b}}{\partial x_2^2} - \alpha_2^2 \frac{\partial u_{3b}}{\partial x_2} + i\alpha_2^3 u_{3b} + \right. \right.
\end{aligned}$$

$$+ 2 \frac{\partial^3 u_{3b}}{\partial x_1^2 \partial x_2} - 2i\alpha_2 \frac{\partial^2 u_{3b}}{\partial x_1^2} \Big] dx_1 +$$

$$+ \left[ \frac{\partial^3 u_{3b}}{\partial x_1^3} - i\alpha_1 \frac{\partial^2 u_{3b}}{\partial x_1^2} - \alpha_1^2 \frac{\partial u_{3b}}{\partial x_1} + i\alpha_1^3 u_{3b} \right] dx_2 \Big\},$$

$$b = 1, 2, \dots, 4,$$

а в частном случае прямолинейной границы представимые формулами

$$\omega_b = e^{i(\alpha, x)} \times$$

$$\times \left\{ - \left[ i\alpha_2 M_b D_b^{-1} - Q_b D_b^{-1} - (\alpha_2^2 + \nu_b \alpha_1^2) \frac{\partial u_{3b}}{\partial x_2} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + i\alpha_2 [\alpha_2^2 + (2 - \nu_b) \alpha_1^2] u_{3b} \right] \right\} dx_1,$$

В формуле (1.2) при интегрировании, в случае плиты конечных размеров, граница  $\partial\Omega_b$  правой плиты представляет собой два торца — левый и правый. Поскольку область, занятая плитой, рассматривается как топологическое многообразие с краем, то на границе вводятся локальные координаты, ориентация которых согласована с ориентацией внутренности многообразия.

В результате для каждого блока блочной системы получаются следующие псевдодифференциальные уравнения:

$$\mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1) \left\langle \int_{\partial\Omega_{2n-1}} \left\{ i\alpha_{21-} D_n^{-1} M_n - D_n^{-1} Q_n - \right. \right.$$

$$\left. \left. - (\alpha_{21-}^2 + \nu_n \alpha_1^2) \frac{\partial u_{32n-1}}{\partial x_2} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + i\alpha_{21-} [\alpha_{21-}^2 + (2 - \nu_n) \alpha_1^2] u_{32n-1} \right\} \times \right.$$

$$\times e^{i(\alpha_1 x_1 + \alpha_{22-} - c_{2n-1})} dx_1 -$$

$$- \int_{\partial\Omega_{2n}} \left\{ i\alpha_{21-} D_n^{-1} M_n - D_n^{-1} Q_n - \right.$$

$$\left. \left. - (\alpha_{21-}^2 + \nu_n \alpha_1^2) \frac{\partial u_{32n}}{\partial x_2} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + i\alpha_{21-} [\alpha_{21-}^2 + (2 - \nu_n) \alpha_1^2] u_{32n} \right\} \times \right.$$

$$\times e^{i(\alpha_1 x_1 + \alpha_{22-} - c_{2n})} dx_1 +$$

$$+ \varepsilon_{53n} [G_{3n}(\alpha_1, \alpha_{21-}) - T_{3n}(\alpha_1, \alpha_{21-})] \Big\rangle = 0,$$

$$\mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1) \left\langle \int_{\partial\Omega_{2n-1}} \left\{ i\alpha_{22-} D_n^{-1} M_n - D_n^{-1} Q_n - \right. \right.$$

$$\left. \left. - (\alpha_{22-}^2 + \nu_n \alpha_1^2) \frac{\partial u_{32n-1}}{\partial x_2} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + i\alpha_{22-} [\alpha_{22-}^2 + (2 - \nu_n) \alpha_1^2] u_{32n-1} \right\} \times \right.$$

$$\times e^{i(\alpha_1 x_1 + \alpha_{22-} - c_{2n-1})} dx_1 -$$

$$- \int_{\partial\Omega_{2n}} \left\{ i\alpha_{22-} D_n^{-1} M_n - D_n^{-1} Q_n - \right.$$

$$\left. \left. - (\alpha_{22-}^2 + \nu_n \alpha_1^2) \frac{\partial u_{32n}}{\partial x_2} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + i\alpha_{22-} [\alpha_{22-}^2 + (2 - \nu_n) \alpha_1^2] u_{32n} \right\} \times \right.$$

$$\times e^{i(\alpha_1 x_1 + \alpha_{22-} - c_{2n})} dx_1 +$$

$$+ \varepsilon_{53n} [G_{3n}(\alpha_1, \alpha_{22-}) - T_{3n}(\alpha_1, \alpha_{22-})] \Big\rangle = 0.$$

К ней добавляется такая же система псевдодифференциальных уравнений с заменой  $\alpha_{21-}$  на  $\alpha_{21+}$  и  $\alpha_{22-}$  на  $\alpha_{22+}$ .

Система псевдодифференциальных уравнений под номером 4 имеет вид

$$\int_{\partial\Omega_{2N-1}} \left\{ i\alpha_{21+} D_N^{-1} M_N - D_N^{-1} Q_N - \right.$$

$$\left. \left. - (\alpha_{21+}^2 + \nu_N \alpha_1^2) \frac{\partial u_{32N-1}}{\partial x_2} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + i\alpha_{21+} [\alpha_{21+}^2 + (2 - \nu_N) \alpha_1^2] u_{32N-1} \right\} \times \right.$$

$$\times e^{i(\alpha_1 x_1 + \alpha_{21+} + c_{2N-1})} dx_1 +$$

$$+ \varepsilon_{53N} [G_{3N}(\alpha_1, \alpha_{21+}) - T_{3N}(\alpha_1, \alpha_{21+})],$$

$$\int_{\partial\Omega_{2N-1}} \left\{ i\alpha_{22+} D_N^{-1} M_N - D_N^{-1} Q_N - \right.$$

$$\left. \left. - (\alpha_{22+}^2 + \nu_N \alpha_1^2) \frac{\partial u_{32N-1}}{\partial x_2} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + i\alpha_{22+} [\alpha_{22+}^2 + (2 - \nu_N) \alpha_1^2] u_{32N-1} \right\} \times \right.$$

$$\times e^{i(\alpha_1 x_1 + \alpha_{22+} + c_{2N-1})} dx_1 +$$

$$+ \varepsilon_{53N} [G_{3N}(\alpha_1, \alpha_{22+}) - T_{3N}(\alpha_1, \alpha_{22+})].$$

В подынтегральных функциях приняты обозначения

$$\alpha_{21-} = -i\sqrt{(\alpha_1)^2 - \sqrt{\varepsilon_{b43}}},$$

$$\begin{aligned}\alpha_{22-} &= -i\sqrt{(\alpha_1)^2 + \sqrt{\varepsilon_{b43}}}, \\ \alpha_{21+} &= i\sqrt{(\alpha_1^r)^2 - \sqrt{\varepsilon_{b43}}}, \\ \alpha_{22+} &= i\sqrt{(\alpha_1^r)^2 + \sqrt{\varepsilon_{b43}}}.\end{aligned}$$

Уравнения для левой полубесконечной плиты остаются теми же, что были получены ранее. Анализируя построенные псевдодифференциальные уравнения для случая плиты ограниченной протяженности, можно видеть увеличение числа неизвестных, порождаемых дополнительной границей по сравнению со случаем единственной границы у полуограниченной плиты. Исследования этого случая показывают, что наличие у плиты еще одной границы не изменяет типа особенностей как в случае удаленности берегов разлома, так и при сближении, однако влияет на значения коэффициентов при особенностях.

Используя подход, изложенный в [11–13], с учетом формы областей  $\Omega_b$  в виде полос бесконечной протяженности, применим преобразование Фурье по координате  $x_1$ .

Введем следующую систему обозначений:

$$\begin{aligned}\mathbf{Y}_{2n-1} &= \{y_{12n-1}, y_{22n-1}, y_{12n}, y_{22n}\}, \\ \mathbf{Z}_{2n-1} &= \{z_{12n-1}, z_{22n-1}, z_{12n}, z_{22n}\}, \quad n = \overline{1, 4}, \\ y_{1s} &= D_n^{-1} \mathbf{F}_1 M_s, \quad y_{2s} = D_n^{-1} \mathbf{F}_1 Q_s, \\ z_{1s} &= \mathbf{F}_1 \frac{\partial u_{3s}}{\partial x_2}, \quad z_{2s} = \mathbf{F}_1 u_{3s}, \quad s = \overline{1, 4}, \\ \mathbf{F}_1 g &= \mathbf{F}_1(\alpha_1)g, \quad \mathbf{F}_2 g = \mathbf{F}_2(\alpha_1, \alpha_2)g, \\ \mathbf{K}_{2n-1} &= \{k_{12n-1-}, k_{22n-1-}, k_{12n-1+}, k_{22n-1+}\}, \\ k_{1s-} &= \varepsilon_{53s} \mathbf{F}_2(\alpha_1, \alpha_{21-})(t_{3s} - g_{3s}), \\ k_{2s-} &= \varepsilon_{53s} \mathbf{F}_2(\alpha_1, \alpha_{22-})(t_{3s} - g_{3s}), \\ k_{1s+} &= \varepsilon_{53s} \mathbf{F}_2(\alpha_1, \alpha_{21+})(t_{3s} - g_{3s}), \\ k_{2s+} &= \varepsilon_{53s} \mathbf{F}_2(\alpha_1, \alpha_{22+})(t_{3s} - g_{3s}).\end{aligned}$$

В результате получим системы четырех алгебраических уравнений для каждого блочного элемента, которые в матричном виде имеют представление

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_{2n-1} \mathbf{Y}_{2n-1} + \mathbf{B}_{2n-1} \mathbf{Z}_{2n-1} + \mathbf{K}_{2n-1} &= 0, \\ n &= \overline{1, 4}.\end{aligned}$$

Рассмотрим тот случай, когда изгибающий момент и перерезывающая сила равны нулю, то есть торцы плит свободны от напряжений,  $\mathbf{Y}_{2n-1} = 0$ .

В этом случае решение систем алгебраических уравнений представимы в виде

$$\mathbf{Z}_{2n-1} = -\mathbf{B}_{2n-1}^{-1} \mathbf{K}_{2n-1}.$$

Внося найденные решения во внешние формы (2.1), получим

$$\begin{aligned}U_{3b} &= -R_b^{-1}(-i\alpha_{1b}, -i\alpha_{2b}) \times \\ &\times \left[ \int_{\partial\Omega_b} \omega_b + \varepsilon_{53b} \mathbf{F}_2(g_{3b} - t_{3b}) \right], \\ b &= \overline{1, 4}.\end{aligned}$$

Сопрягая блочные элементы с основанием (1.1), (1.2), то есть строя фактортопологии [15], приходим к системе функциональных уравнений вида

$$\begin{aligned}\sum_{b=1}^4 U_{3b} + \sum_{b=0}^3 U_{3b0} &= U_3, \\ -\sum_{b=1}^4 R_b^{-1}(-i\alpha_1, -i\alpha_2) \times \\ &\times \left[ \int_{\partial\Omega_b} \omega_b + \varepsilon_{53b} (G_{3b} - T_{3b}) \right] = \\ &= \varepsilon_6^{-1} K(\alpha_1, \alpha_2) \sum_{n=1}^4 G_{3n}(\alpha_1, \alpha_2).\end{aligned}$$

С целью выделения параметров концентраций напряжений в рассматриваемой сложной блочной структуре в построенном функциональном уравнении последовательно будем выделять разломы, рассматривая их в индивидуальных локальных координатах  $x$ , перпендикулярных  $x_2$  с началом в центре разлома. В изучаемой граничной задаче возможны две положения берегов разломов: когда расстояние между берегами разломов отлично от нуля, обозначим его  $2\theta > 0$ , и когда  $\theta = 0$ . Обозначим в выбранной системе координат функцию левого блока  $G_{32n-1}(\alpha_1, \alpha_2) = G^-(\alpha_1, \alpha_2)$ , а правого блока  $G_{32n+1}(\alpha_1, \alpha_2) = G^+(\alpha_1, \alpha_2)$ .

Тогда функциональные уравнения принимают вид, изученный в [11–13]

$$\begin{aligned}&[\varepsilon_{532n-1}(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{-2} + \varepsilon_6^{-1} K(\alpha_1, \alpha_2)] \times \\ &\times G^+(\alpha_1, \alpha_2) = \\ &= -[\varepsilon_{532n+1}(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{-2} + \varepsilon_6^{-1} K(\alpha_1, \alpha_2)] \times \\ &\times G^-(\alpha_1, \alpha_2) + U_{3\theta}(\alpha_1, \alpha_2) +\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{-2} [A_{2n-1}k_{12n-10} + B_{2n-1}k_{22n-10} + \\
 & \quad + A_{2n+1}k_{12n+10} + B_{2n+1}k_{22n+10} + \\
 & \quad + \varepsilon_{532n-1}T^+(\alpha_1, \alpha_2) + \varepsilon_{532n+1}T^-(\alpha_1, \alpha_2)], \\
 & \quad \theta > 0, \\
 U_{3\theta}(\alpha_1, \alpha_2) & = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\theta}^{\theta} u_3(x_1, x) e^{i(\alpha, x)} dx_1 dx, \\
 & [\varepsilon_{532n+1}(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{-2} + \varepsilon_6^{-1}K_1(\alpha_1, \alpha_2)] \times \\
 & \quad \times G^+(\alpha_1, \alpha_2) = \\
 & = - [\varepsilon_{532n-1}(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{-2} + \varepsilon_6^{-1}K_1(\alpha_1, \alpha_2)] \times \\
 & \quad \times G^-(\alpha_1, \alpha_2) + \\
 & + (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{-2} [A_{2n-1}k_{12n-10} + B_{2n-1}k_{22n-10} + \\
 & \quad + A_{2n+1}k_{12n+10} + B_{2n+1}k_{22n+10} + \\
 & \quad + \varepsilon_{532n-1}T^+(\alpha_1, \alpha_2) + \varepsilon_{532n+1}T^-(\alpha_1, \alpha_2)], \\
 & \quad \theta = 0.
 \end{aligned}$$

Здесь  $A_{2n-1}$ ,  $B_{2n-1}$ ,  $A_{2n+1}$ ,  $B_{2n+1}$  — выражения сложного вида, которые ради краткости, опущены. Заметим, что представленные функциональные уравнения в качестве неизвестных имеют не только функции  $G^+(\alpha_1, \alpha_2)$ ,  $G^-(\alpha_1, \alpha_2)$ , но также и функционалы  $G^+(\alpha_1, \alpha_{2+})$ ,  $G^-(\alpha_1, \alpha_{2-})$ ,  $G^+(\alpha_1, \alpha_{2+})$ ,  $G^-(\alpha_1, \alpha_{2-})$ , которые линейно входят в  $k_{sn0}$  и нуждаются в определении. Получили два разных функциональных уравнения Винера–Хопфа. Первое — обобщенное функциональное уравнение Винера–Хопфа, в связи с присутствием функции  $U_{3\theta}(\alpha_1, \alpha_2)$ . Оно решается изложенным в [14] обращением системы двух интегральных уравнений второго рода с вполне непрерывными операторами в некотором пространстве непрерывных с весом функций, которая, после преобразований, имеет вид

$$\begin{aligned}
 X^+ - \left\{ -\frac{M_1^+}{M_2^-} Y^- e^{-i2\alpha_2\theta} \right\}^+ & = \left\{ \frac{1}{M_2^-} \Phi e^{-i\alpha_2\theta} \right\}^+, \\
 Y^- + \left\{ \frac{M_2^-}{M_1^+} X^+ e^{i2\alpha_2\theta} \right\}^- & = \left\{ \frac{1}{M_1^+} \Phi e^{i\alpha_2\theta} \right\}^-, \\
 M_1 & = M_1^+ M_1^-, \quad M_2 = M_2^+ M_2^-, \\
 M_2^+ G^+ & = X^+, \quad M_1^- G^- = Y^-, \\
 M_1 & = [\varepsilon_{53\lambda}(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{-2} + \varepsilon_6^{-1}K(\alpha_1, \alpha_2)], \\
 M_2 & = [\varepsilon_{53r}(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{-2} + \varepsilon_6^{-1}K(\alpha_1, \alpha_2)].
 \end{aligned}$$

Здесь приняты обозначения работы [14].

После решения граничной задачи, определения функций  $G^+(\alpha_1, \alpha_2)$  и  $G^-(\alpha_1, \alpha_2)$ ,

требуется найти значения функционалов  $G^+(\alpha_1, \alpha_{2+})$  и  $G^-(\alpha_1, \alpha_{2-})$ , а также продифференцированные по второму параметру функционалы вида  $G'_+(\alpha_1, \alpha_{2+})$ ,  $G'_-(\alpha_1, \alpha_{2-})$ . Для их определения строится система линейных алгебраических уравнений, описанная в [11–13].

Достаточно просто доказывается, что решение первого функционального уравнения для  $\theta > 0$  приводит к следующим свойствам контактных напряжений между плитами и подложкой на краях в локальной системе координат

$$\begin{aligned}
 g_{32n-1}(x_1, x) & = \sigma_{12n-1}(x_1, x)(-x - \theta)^{-1/2}, \\
 & \quad x < -\theta, \\
 g_{32n+1}(x_1, x) & = \sigma_{12n+1}(x_1, x)(x - \theta)^{-1/2}, \\
 & \quad x > \theta
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

для достаточно гладких  $t_{3b}$ . Второе функциональное уравнение является уравнением Винера–Хопфа. Обращение второго уравнения приводит при  $x \rightarrow 0$  к следующим свойствам решений

$$\begin{aligned}
 g_{32n-1}(x_1, x) & \rightarrow \sigma_{22n-1}(x_1, x_2)x^{-1}, \\
 g_{32n+1}(x_1, x) & \rightarrow \sigma_{22n+1}(x_1, x)x^{-1}.
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Функции  $\sigma_{nb}(x_1, x)$ ,  $n = 1, 2$  непрерывны по обоим параметрам.

### Выводы

Учет в функциональном уравнении всех остальных членов приводит лишь к изменению величин функций  $\sigma_{nb}(x_1, x)$ ,  $n = 1, 2$  и не влияет на характер особенностей. Имея детальное описание распределения параллельных разломов, механические и геометрические характеристики блоков блочной структуры с параллельными разломами, на основании разработанной модели можно прогнозировать наиболее вероятные зоны возможных землетрясений, анализируя формулы (2.2), (2.3) для разных разломов.

### Литература

1. *Певнев А.К.* Пути к практическому прогнозу землетрясений. М.: ГЕОС, 2003. 154 с.
2. *Reid N.F.* The Mechanism of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906. Rep. of the State Investigation Commiss. Vol. 2, pt. 1. Washington, 1910. 56 p.
3. *Голлицын Б.Б.* Избранные труды. Т. 2. М. Изд-во АН СССР, 1960. 465 с.

4. Gutenberg B., Richter C. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press, 1954. 310 p.
5. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 670 с.
6. Гамбургцев Г.А. Перспективный план исследований по проблеме «Изыскание и развитие прогноза землетрясений» // Развитие идей Г.А. Гамбургцева в геофизике. М.: Наука, 1982. С. 304–311.
7. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 104 с.
8. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
9. Кейлис-Борок В.А. Динамика литосферы и прогноз землетрясений // Природа, 1989, № 12. С. 10–18.
10. Алексеев А.С. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Колл. монограф. Изд-во СО РАН, 2004. 388 с.
11. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. The problem of physical and mechanical precursors of an earthquake: Place, time, and intensity // Doklady Physics. 2016. Vol. 61. No. 2. P. 92–97. DOI: 10.1134/S1028335816020099
12. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On the possibility of predicting some types of earthquake by a mechanical approach // Acta Mechanica. 2018. DOI: 10.1007/s00707-017-2092-0
13. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. A starting earthquake with harmonic effects // Doklady Physics. 2016. Vol. 61. No. 11. P. 551–554. DOI: 10.1134/S1028335816110021
14. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. 320 с.
15. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. The theory of the starting earthquake // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2016. №1, ч. 2. С. 37–80. DOI: 10.31429/vestnik-13-1-2-37-80
2. Reid, N.F. The Mechanism of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906. Rep. of the State Investigation Commiss., vol. 2, pt. 1. Washington, 1910. 56 p.
3. Golitsyn, B.B. Selected works, vol. 2. Academy of science of USSR, Moscow, 1960. (In Russian)
4. Gutenberg, B., Richter, C. Seismicity of the Earth and associated phenomena, Princeton Univ. Press, 1954.
5. Rikhter, Ch. Elementary seismology. Izdatelstvo inostrannoy literatury, Moscow, 1963. (In Russian)
6. Gamburtsev, G.A. Perspective plan of research "Research and development of earthquake forecasting". In: The Development of the ideas of G. A. Gamburtsev in Geophysics. Nauka, Moscow, 1982, pp. 304–311. (In Russian)
7. Sadovskiy, M.A., Bolkhovitinov, L.G., Pisarenko, V.F. Deformation of geophysical environment and seismic process. Nauka, Moscow, 1987. (In Russian)
8. Sobolev, G.A. Fundamentals of earthquake prediction. Nauka, Moscow, 1993. (In Russian)
9. Keylis-Borok, V.A. Lithosphere dynamics and earthquake prediction. Nature, 1989, no. 12, pp. 10–18. (In Russian)
10. Alekseev, A.S., et al. Active seismology with powerful vibrational sources. Siberian Branch of Academy of Science, 2004. (In Russian)
11. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. The problem of physical and mechanical precursors of an earthquake: Place, time, and intensity. Doklady Physics, 2016, vol. 61, no. 2, pp. 92–97. DOI: 10.1134/S1028335816020099
12. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. On the possibility of predicting some types of earthquake by a mechanical approach. Acta Mechanica, 2018. DOI: 10.1007/s00707-017-2092-0
13. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. A starting earthquake with harmonic effects. Doklady Physics, 2016, vol. 61, no. 11, pp. 551–554. DOI: 10.1134/S1028335816110021
14. Vorovich, I.I., Babeshko, V.A. Dynamic mixed problems of elasticity theory for non-classical domains. Nauka, Moscow, 1979. (In Russian)
15. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. The theory of the starting earthquake. Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation, 2016, no. 1, pt. 2, pp. 37–80. DOI: 10.31429/vestnik-13-1-2-37-80
1. Pevnev, A.K. Ways to practical earthquake prediction. GEOS, Moscow, 2003. (In Russian)

### References