

УДК 550.34; 539.3
DOI: 10.7868/25000640230101

ОБ ОДНОМ РЕЗОНАНСНОМ ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ

© 2023 г. О.В. Евдокимова¹, академик В.А. Бабешко², В.С. Евдокимов²,
О.М. Бабешко², М.В. Зарецкая², В.Л. Шестопалов¹

Резюме. На основании последних исследований в области контактных задач с деформируемым штампом обнаружено, что эти результаты имеют важные приложения в вопросе прогноза землетрясений. В контактных задачах с деформируемым штампом при колебаниях могут возникать дискретные резонансы. Появление дискретной резонансной частоты в контактных задачах о действии деформируемых штампов на слоистой среде было предсказано академиком И.И. Воровичем. Вышли работы, в которых показано, что это явление может приводить к нарастанию сейсмичности в сейсмоопасных зонах. В настоящей статье дано теоретическое изложение построения уравнения резонансных частот и приведены экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности колебательных подвижек литосферных плит.

В работе рассмотрен случай взаимодействия с многослойным основанием двух литосферных плит, разделенных разломом. Изучен тот случай, когда разлом достаточно велик и литосферные плиты удалены торцами. Каждая из литосферных плит оказывается автономной и может рассматриваться как деформируемый штамп. Применяется новейшая, разработанная методом блочного элемента, теория деформируемых штампов. В процессе исследования применен созданный новый универсальный метод моделирования, позволяющий решения векторных граничных задач для систем дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих материалы сложных реологий, представлять разложенными по решениям отдельных скалярных граничных задач.

Недавно разработанная теория контактных задач с деформируемыми штампами, действующими на слоистое основание, позволила в явном виде выявлять соотношения, описывающие резонансные частоты гармонически колеблющихся штампов. Результат применен для литосферной плиты в форме полосы конечной ширины, лежащей на слоистом основании, моделируемой деформируемым штампом. Для этого случая найдено соотношение, позволяющее вычислять резонансные частоты, свидетельствующие о возможном разрушении плиты, то есть землетрясении.

Ключевые слова: литосферные плиты, резонансы, землетрясение, контактная задача, деформируемые штампы, интегральное уравнение.

ON ONE RESONANT APPROACH TO ASSESSING THE STATE OF SEISMICITY

O.V. Evdokimova¹, Academician RAS V.A. Babeshko², V.S. Evdokimov²,
O.M. Babeshko², M.V. Zaretskaya², V.L. Shestopalov¹

Abstract. Based on the latest research in the field of deformable stamp contact problems, it was found that these results have important applications in the issue of earthquake prediction. In contact problems with a deformable die, discrete resonances may occur during vibrations. The appearance of a discrete resonant frequency in contact problems on the action of deformable stamps on a layered medium was predicted in the works of Academician I.I. Vorovich. Works have been published showing that this phenomenon can lead to

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: ras@ssc-ras.ru, babeshko41@mail.ru

² Кубанский государственный университет (Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation), Российская Федерация, 350059, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, e-mail: rector@kubsu.ru

the increase of seismicity in earthquake-prone zones. This paper provides a theoretical explanation of resonant frequencies equation construction and provides experimental data indicating the possibility of oscillatory movements of lithospheric plates.

The paper considers the case of interaction with a multilayer base of two lithospheric plates separated by a fault. The case is being studied when the fault is large enough and the lithospheric plates are removed by the ends. Each of the lithospheric plates turns out to be autonomous and can be considered as a deformable stamp. The latest theory of deformable stamps developed by the block element method is applied. In the course of the research, a new universal modeling method was used that allows the solutions of vector boundary value problems for systems of partial differential equations describing materials of complex rheologies to be decomposed according to solutions of individual scalar boundary value problems.

The recently developed theory of contact problems with deformable stamps acting on a layered base has made it possible to explicitly identify the relations describing the resonant frequencies of harmonically oscillating stamps. The result is applied to a lithospheric plate in the form of a strip of finite width lying on a layered base, modeled by a deformable stamp. For this case, a ratio has been found that allows us to calculate the resonant frequencies indicating the possible destruction of the plate, that is, an earthquake.

Keywords: lithospheric plates, resonances, earthquake, contact problem, deformable stamps, integral equation.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе с использованием разработанного авторами нового универсального метода моделирования [1], позволяющего исследовать граничные задачи для сред сложной реологии путем разложения их по решениям более простых граничных задач, в частности для уравнений Гельмгольца, были получены возможности углубленного исследования некоторых математических проблем сейсмологии.

Оказалось доступным выявлять новые свойства, явления и процессы, описываемые решениями сложных граничных задач, путем изучения более простых. В дальнейшем в рамках указанных разложений изучаются упрощенные граничные задачи, и выявленные свойства могут переноситься посредством разложений на случаи исследования граничных задач для сложных материалов. К числу таких свойств относится выявление резонансов в контактных задачах для деформируемых штампов, лежащих на многослойном основании. Именно этот подход был использован при изложении теории деформируемых штампов в работе [2].

В статье авторов [3] достаточно подробно описан взгляд выдающихся ученых-геофизиков академиков Г.А. Гамбурцева [4] и М.А. Садовского [5] на необходимость привлечения к прогнозным исследованиям в сейсмологии методов механики, теории прочности и разрушения, учета блочного строения коры Земли. Особо отметим высказывание Г.А. Гамбурцева: «Изыскание методов прогноза времени землетрясений следует направить в первую очередь

в сторону поиска механических предвестников землетрясений. Такие поиски могут быть успешными только в том случае, если они будут основываться на глубоком изучении всех деталей механизма быстрых и медленных движений блоков земной коры сейсмоактивных районов».

Следуя механике прочности и разрушения [2], можно ожидать еще один процесс, способствующий подготовке землетрясений, – резонансный, которому посвящена настоящая статья и который достаточно подробно освещен в работе [3].

Он возможен в автономной литосферной плите или ее фрагменте при условии, что на нее оказывается гармоническое воздействие и она ограничена хотя бы в одном направлении. Возможность совершения колебательных движений литосферных плит описана в ряде публикаций, где решающую роль играют приливные эффекты, вызываемые притяжением Луны. Они отмечены, например, в работах [6; 7]. В частности, особую роль могут играть нелинейные колебания коры Земли. Колебательные движения наблюдаются экспериментально с использованием высокоточных приемников GPS/ГЛОНАСС (рис 1).

Именно этот подход освещен в работе.

Следует упомянуть многочисленные предвестники землетрясений, а также подходы и методы. Некоторые из них приведены ниже. Работа [8] связана с коровыми предвестниками и геодезическими исследованиями. В работе [9] разработан способ прогноза землетрясений деформационным подходом. В статье [10] предвестник сейсмичности оценивается по анализу подвижек, регистрируемых

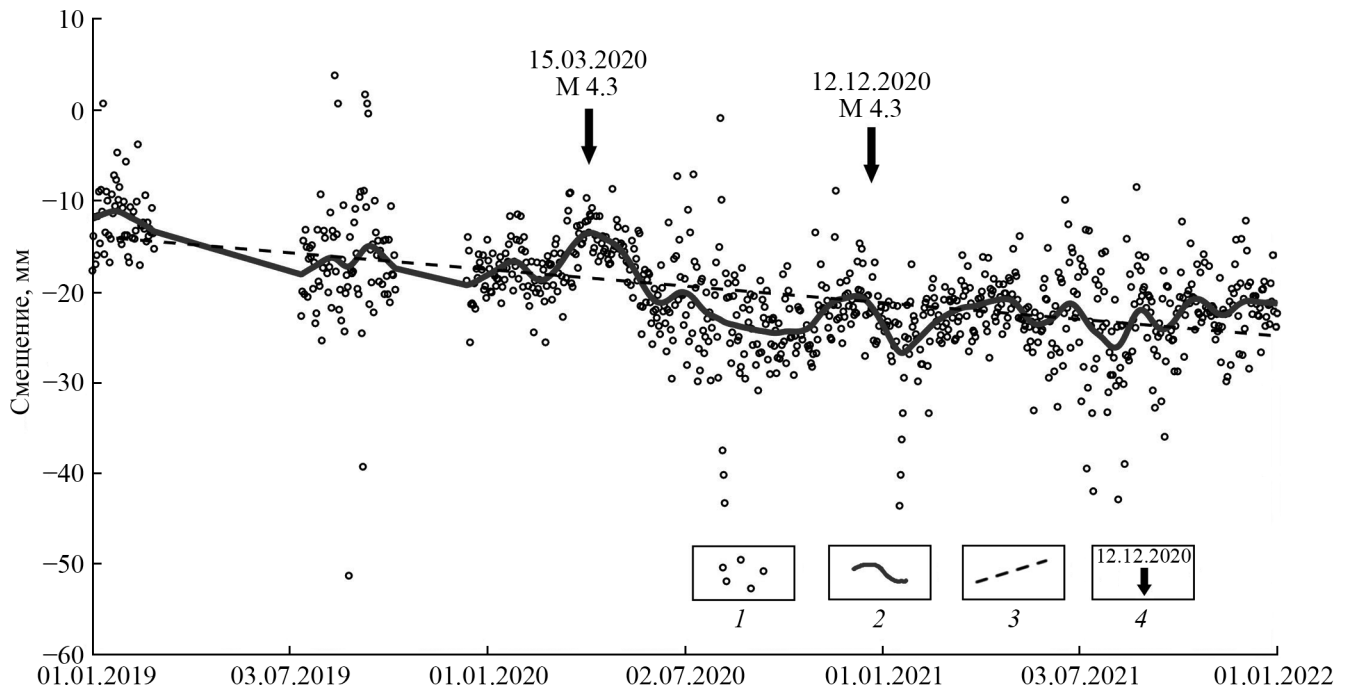


Рис. 1. Медленные колебательные движения по высоте литосферной плиты, наблюдаемые приемником GPS/ГЛОНАСС на станции Геленджик в 2019–2022 гг. 1 – исходные измерения смещения станции; 2–3 – траектория движения: 2 – сглаженная, 3 – тренд; 4 – дата и магнитуда землетрясения.

Fig. 1. Slow oscillatory movements along the height of the lithospheric plate, observed by GPS/GLONASS receiver at Gelendzhik station in 2019–2022. 1 – initial measurements of station displacement; 2–3 – motion path: 2 – smoothed, 3 – trend; 4 – date and magnitude of the earthquake.

приборами. В работе [11] исследуется прогноз землетрясений на основе сильных подвижек грунтов. В публикации [12] обсуждается вопрос роли землетрясений в сглаживании дефектов. В статье [13] приводится обзор критических ситуаций при прогнозировании землетрясений. В работе [14] обсуждается вопрос о возможности прогноза землетрясений, в [15] – на основе анализа ситуации, предшествующей Мексиканскому землетрясению, выдвигаются предвестники сильных землетрясений. В статье [16] излагаются результаты лабораторных экспериментов по прогнозу разрушения среды в результате импульсных воздействий, образующих трещины. В публикации [17] анализируется роль тектонических разломов, вызывающих землетрясения.

Объединяя все сказанное, в данной работе исследуется возможное влияние колебаний литосферных плит или их фрагментов на подготовку условий для возникновения очага землетрясений.

Впервые существование дискретного спектра в задачах теории упругости для неоднородной полосы, приводящее к резонансу, было обнаружено академиком И.И. Воровичем [18; 19]. Полоса ста-

новится неоднородной, если на нее действует деформируемый штамп. В контактных задачах с абсолютно твердым штампом подобное явление не наблюдается.

Авторы рассматривают результаты применения механических подходов как дополнение к исследованиям геофизиков, опубликовавших важные материалы в многочисленных работах, и находят целесообразным дальнейшее совместное изучение степени полезности получаемых результатов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается многослойная среда, на ее верхней границе вводится декартова система координат таким образом, что ось ox_3 направлена по внешней нормали, остальные оси, ox_1 и ox_2 , лежат в касательной плоскости. Предполагается, что в области полосы $\Omega(-B \leq x_1 \leq B, |x_2| \leq \infty)$ расположена деформируемая литосферная плита, представляющая деформируемый штамп. На них оказываются внешние воздействия гармонических колебаний, описываемые функцией $e^{-i\omega t}$. Здесь ω – частота гармонических воздействий, t – параметр време-

ни. С учетом применения нового универсального метода моделирования [1] можно рассматривать плиту и штамп как объекты, состоящие из материалов сложной реологии. Однако поскольку решения граничных задач для тел сложной реологии могут быть разложены по решениям граничных задач для уравнений Гельмгольца в случае гармонических колебаний, то достаточно рассматривать граничную задачу для деформируемого штампа, описываемую этим уравнением.

При рассмотрении, например, линейно деформируемой реологической среды, описываемой системой уравнений Ламе, предполагается, что в зоне контакта действует штамп без трения, то есть в зоне контакта действуют только нормальные напряжения. Вне штампа напряжения отсутствуют. Методом, описанным в работе [20], смешанная задача сводится к решению интегрального уравнения вида:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-B}^B k(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) q(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = f(x_1, x_2),$$

$$-B \leq x_1 \leq B, |x_2| \leq \infty, \quad (1)$$

$$k(x_1, x_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2)} d\alpha_1 d\alpha_2.$$

Здесь $q(x_1, x_2)$ – контактные напряжения под штампом; $f(x_1, x_2)$ – перемещения в зоне контакта; $k(x_1, x_2)$ – ядро интегрального уравнения; функция $K(\alpha_1, \alpha_2)$ – преобразование Фурье ядра интегрального уравнения. Задача состоит в рассмотрении случая деформируемой литосферной плиты, то есть деформируемого штампа. Ранее указанные задачи решались только численным методом. В результате оставались вне исследования некоторые особенности решений в динамических задачах. Кроме этого, численные методы оказывались либо малоэффективными, либо несостоятельными в случаях, когда границы постановки граничных задач уходят на бесконечность, либо оказывались очень больших размеров. Разработанный авторами подход [1] открыл возможность использовать фракталы, то есть упакованные блочные элементы, являющиеся решениями достаточно простых граничных задач, при исследовании граничных задач для многокомпонентных сред. Решения сложных граничных задач представляются в виде комбинации фракталов.

С учетом этой возможности в качестве деформируемого штампа принимаются фракталы – решения граничных задач в рассматриваемых областях,

являющиеся упакованными блочными элементами для уравнения Гельмгольца.

Рассматривается случай литосферной плиты в форме полосы, имеющей большую относительную ширину и лежащей на многослойном основании. В соответствии с методом работы [1] необходимо построить в области $\Omega(-B \leq x_1 \leq B, |x_2| \leq \infty)$, $B \gg 1$ фракталы – упакованные блочные элементы, которые будут рассматриваться как деформируемые штампы. В соответствии с описанным выше рассматривается двумерное уравнение Гельмгольца в указанной области:

$$[\partial^2 x_1 + \partial^2 x_2 + p^2] \varphi(x_1, x_2) = g(x_1, x_2),$$

$$g(x_1, x_2) = q(x_1, x_2) - t(x_1, x_2). \quad (2)$$

Здесь $\varphi(x_1, x_2)$ – вертикальное перемещение в зоне контакта; $q(x_1, x_2)$ – контактные напряжения, действующие на объект снизу, которые надо определить; $t(x_1, x_2)$ – заданные внешние воздействия сверху на объект. Кроме этого, задаются граничные условия, которые имеют вид области $\Omega_2(-B \leq x_1 \leq B)$

$$\varphi(x_1, x_2) = \varphi(-B, x_2), \quad x_1 \rightarrow -B,$$

$$\varphi(x_1, x_2) = \varphi(B, x_2), \quad x_1 \rightarrow B.$$

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Способ их построения изложен во многих публикациях авторов, например в работе [3].

Двумерная задача (1), (2) сводится к одномерному интегральному уравнению с вещественным параметром α_2 в результате осуществления преобразования Фурье по координате x_2 .

Тогда интегральное уравнение (1) принимает вид:

$$\int_{-B}^B k_0(x_1 - \xi_1) q(\xi_1) d\xi_1 = f(x_1),$$

$$q(\xi_1) = q(\xi_1, \alpha_2), \quad k_0(x_1) = k(x_1, \alpha_2), \quad (3)$$

$$k_0(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_0(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1,$$

$$K_0(\alpha_1) = K(\alpha_1, \alpha_2), \quad K_0(\alpha_1) = P_0^{-1}(\alpha_1) R_0(\alpha_1).$$

Ради краткости считаем, что функция $K_0(\alpha_1)$ является четной, мероморфной и на бесконечности обладает асимптотическим поведением $K_0(\alpha_1) = O(\alpha_1^{-1})$, $Im \alpha_1 = 0$.

Таким свойством обладают ядра интегральных уравнений, построенные для смешанных задач на многослойной среде [4].

Функция $K_0(\alpha_1)$ представляется отношением двух целых функций $R_0(\alpha_1)$ и $P_0(\alpha_1)$, имеющих счетные множества нулей, уходящих на бесконечность в окрестностях мнимых осей.

Примеры смешанных задач, в которых встречаются подобные интегральные уравнения, имеются в многочисленных публикациях, например в работе [4]. Граничные задачи (2) для блочного элемента становятся одномерными:

$$\begin{aligned} (\partial x_1 + k^2)\varphi(x_1) &= g(x_1), \quad g(x_1) = q(x_1) - t(x_1), \\ k^2 &= p^2 - \alpha_2^2, \\ \varphi(x_1) + \varphi(x_1, \alpha_2), \quad g(x_1) &= g(x_1, \alpha_2), \\ \varphi(x_1, \alpha_2) &= \varphi(-B), \quad x_1 \rightarrow -B, \\ \varphi(x_1, \alpha_2) &= \varphi(B), \quad x_1 \rightarrow B, \quad x_1 \in \Omega_2. \end{aligned} \quad (4)$$

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В дальнейшем рассматриваем упрощенный случай литосферной плиты в полосе $\Omega(-B \leq x_1 \leq B, |x_2| \leq \infty)$, $B \gg 1$, полагая, что ее свойства не изменяются вдоль координаты x_2 . В этом случае имеет место значение параметров $k = p = c\omega$. Здесь постоянный параметр c зависит от свойств материала плиты.

Применив к (4) метод блочного элемента [2], получим следующее представление для упакованных блочных элементов. Для внешней формы $\omega_B(\alpha_1)$ главного компонента упакованных блочных элементов имеем:

$$\begin{aligned} \omega_B(\alpha_1) &= \Delta^{-1} \left\{ [e^{-i\alpha_1 B} 2ik(e^{i(\alpha_1 - k)2B} - 1) + \right. \\ &\quad + i(\alpha_1 - k)e^{i\alpha_1 B}] \varphi_B(B) + \\ &\quad + [e^{i\alpha_1 B} 2iz(-e^{-i(\alpha_1 - k)2B} + 1) + \\ &\quad + i(\alpha_1 - k)e^{-i\alpha_1 B}] \varphi_B(-B) + \\ &\quad + G_B(k)(-e^{i(\alpha_1 + k)B} + e^{-i(\alpha_1 + k)B}) + \\ &\quad \left. + G_B(-k)(e^{i(\alpha_1 - k)B} - e^{-i(\alpha_1 - k)B}) \right\} - G_B(\alpha_1), \\ \Delta &= -2i \sin k2B, \\ G_B(\alpha_1) &= \int_{-B}^B g_B(x_1) e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \\ Q_B(\alpha_1) &= \int_{-B}^B q_B(x_1) e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \\ T_B(\alpha_1) &= \int_{-B}^B t_B(x_1) e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad \omega_B(\pm k) = 0. \end{aligned}$$

Тогда вертикальные перемещения в форме упакованных блочных элементов имеют вид:

$$\varphi_B(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega_B(\alpha)}{\alpha^2 - k^2} e^{-i\alpha x_1} d\alpha. \quad (5)$$

Для приведения смешанной граничной задачи к интегральному уравнению приравняем перемещения (3) $f_B(x_1)$ в зоне контакта, составленные для многослойного основания, и перемещения упакованного блочного элемента (5) $\varphi_B(x_1)$ в обеих задачах, предварительно применив к ним преобразование Фурье. Это дает соотношения:

$$\begin{aligned} K_0(\alpha_1) Q_B(\alpha_1) + E_B(\alpha_1) &= -(\alpha_1^2 - k^2)^{-1} Q_B(\alpha_1) + S_B(\alpha_1), \\ S_B(\alpha_1) &= (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} \langle \omega_B(\alpha_1) + Q_B(\alpha_1) \rangle. \end{aligned}$$

Здесь $E_B(\alpha_1)$ – часть поверхности границы многослойной среды, свободная от контакта. Объединив члены, содержащие преобразования Фурье контактных напряжений, и применив к этим равенствам обращение Фурье по параметру α_1 , получаем интегральное уравнение Винера – Хопфа на отрезке:

$$\begin{aligned} \int_{-B}^B k(x_1 - \xi_1) q_B(\xi_1) d\xi_1 &= s_B(x_1), \quad -B \leq x_1 \leq B, \\ k(x_1) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \\ K(\alpha_1) &= K_0(\alpha_1) + (\alpha_1^2 - k^2)^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Заметим, что оба уравнения содержат в правой части неизвестные функционалы $Q_B(k)$, $Q_B(-k)$ решений интегральных уравнений, которые находятся после обращения интегральных уравнений. Это одна из особенностей, присущая контактным задачам для деформируемых штампов, взятых в виде упакованных блочных элементов. В случае жестких штампов такие функционалы не возникают. Именно определение перечисленных функционалов, зависящих от частоты, привело к получению соотношений, определяющих резонансные частоты в контактных задачах с деформируемым штампом.

Опуская метод решения интегрального уравнения (6), детально изложенный в работе [2], приведем представление контактных напряжений под литосферной плитой и соотношение, позволяющее вычислять резонансные частоты для деформируемой литосферной плиты, которые могут инициировать землетрясения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Асимптотическое при $B \gg 1$ решение, трансформированное к обозначениям настоящей статьи, имеет вид:

$$Q_B(\alpha_1) = Q_1(\alpha_1) + Q_2(\alpha_1) + Q_3(\alpha_1) + S_{0B}(\alpha_1).$$

Здесь приняты обозначения:

$$\begin{aligned}
 Q_1(\alpha_1) &= -\langle Q_B(k) \sin(\alpha_1 + k)B + \\
 &+ Q_B(-k) \sin(\alpha_1 - k)B \rangle 2iM_1(\alpha_1), \\
 Q_2(\alpha_1) &= \langle Q_B(k) \{M_3(\alpha_1) \sin(\alpha_1 + k)B\}^+ + \\
 &+ Q_B(-k) \{M_3(\alpha_1) \sin(\alpha_1 - k)B\}^+ \rangle 2i(\alpha_1 - k)M_2(\alpha_1), \\
 Q_3(\alpha_1) &= \langle Q_B(k) \{M_5(\alpha_1) \sin(\alpha_1 + k)B\}^- + \\
 &+ Q_B(-k) \{M_5(\alpha_1) \sin(\alpha_1 - k)B\}^- \rangle 2i(\alpha_1 + k)M_4(\alpha_1), \\
 M_1(\alpha_1) &= \frac{P_{0-}(\alpha_1) P_{0+}(\alpha_1)}{R_-(\alpha_1) R_+(\alpha_1)}, \\
 M_2(\alpha_1) &= \frac{(\alpha_1 - k)P_{0-}(\alpha_1)e^{-i\alpha_1 B}}{R_-(\alpha_1)}, \\
 M_3(\alpha_1) &= \frac{P_{0+}(\alpha_1)e^{-i\alpha_1 B}}{R_+(\alpha_1)(\alpha_1 - k)}, \\
 M_4(\alpha_1) &= \frac{(\alpha_1 + k)P_{0+}(\alpha_1)e^{-i\alpha_1 B}}{R_+(\alpha_1)},
 \end{aligned}$$

$$M_5(\alpha_1) = \frac{P_{0-}(\alpha_1)e^{i\alpha_1 B}}{R_-(\alpha_1)(\alpha_1 + k)}.$$

Опуская достаточно простые, но громоздкие вычисления, подобные выполненным в задаче А, получаем значения функционалов в форме:

$$\begin{aligned}
 Q_B(k) &= \Delta_B^{-1}[S_{0B}(-k)C_{13}(k) - S_{0B}(k)D_{22}(-k)], \\
 Q_B(-k) &= \Delta_B^{-1}[S_{0B}(-k)D_{11}(k) + S_{0B}(k)C_{23}(-k)], \\
 \Delta_B(k) &= D_{11}(k)D_{22}(-k) - C_{13}(k)C_{23}(-k).
 \end{aligned}$$

Соотношение, позволяющее вычислять резонансные частоты, при которых решение обращается в бесконечность, имеет вид:

$$\Delta_B = D_{11}(k)D_{22}(-k) - C_{13}(k)C_{23}(-k) = 0.$$

Значение всех функций и применяемых операторов либо детально описаны в работе [2], либо указан способ их построения. Функции $C_{m,n}(k)$, $D_{m,n}(k)$, $\Delta_B(k)$ существуют и выражаются через введенные функции M_r , $r = 1, 2, \dots, 5$.

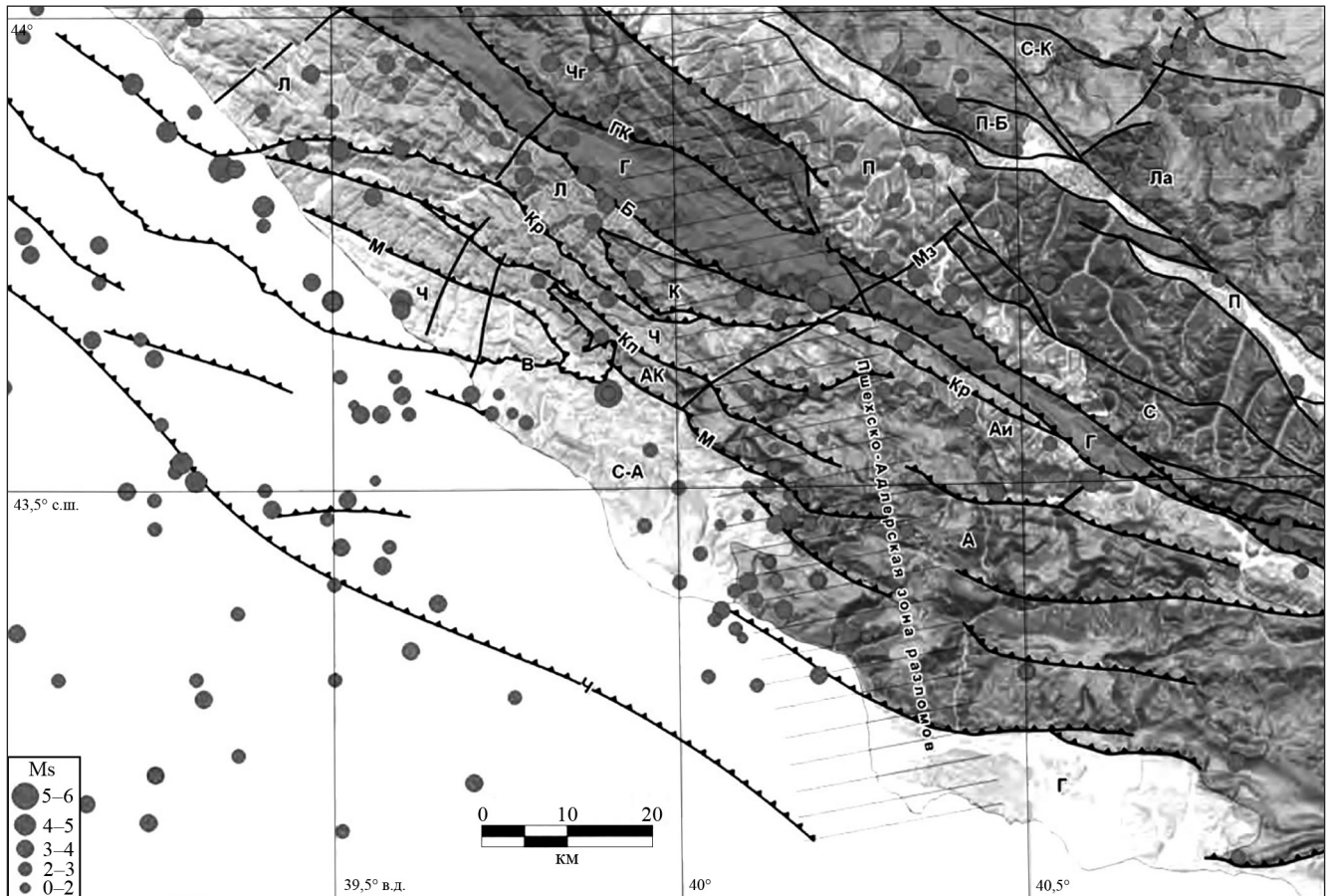


Рис. 2. Разломы территории Сочи-Краснополянской сейсмической зоны, делящие кору Земли на фрагменты литосферных плит (по материалам [21]).

Fig. 2. Faults of the territory of the Sochi-Krasnaya Polyana seismic zone dividing the Earth's crust into fragments of lithospheric plates (adapted from [21]).

Внося значения найденных функционалов в правые части полученных решений интегральных уравнений, найдем решение смешанных задач, зависящее только от внешних воздействий и заданных граничных условий на границах полосы. Оно имеет вид:

$$q_B(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q_B(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1.$$

Построенное решение задачи для полосовой литосферной плиты имеет резонанс в связи с конечной ее шириной.

ВЫВОДЫ

Литосферные плиты, как правило, имеют достаточно большие размеры.

На рисунке 2 показаны разломы на территории Сочи-Краснополянской сейсмической зоны, кото-

рые делят кору Земли в регионе на фрагменты литосферных плит. Каждый из них может испытывать в той или иной мере воздействие дискретных резонансов, описанных выше, в связи с приливными воздействиями Луны, приводящее к медленным колебаниям литосферных плит (рис. 1).

С учетом особенностей контактных задач, имеющих концентрации контактных напряжений на краях, резонанс в таких плитах, скорее всего, будет проявляться на разломах. Таким образом, ограниченность размеров плиты хотя бы по одной координате приведет к появлению одного или более дискретных резонансов, что может вызвать землетрясение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 22-21-00129.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. 2021. Фрактальные свойства блочных элементов и новый универсальный метод моделирования. *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. 499: 21–26. doi: 10.31857/S2686740021040039
2. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. 2022. О контактных задачах с деформируемым штампом. *Проблемы прочности и пластичности*. 84(1): 25–34. doi: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-25-34
3. Евдокимова О.В., Бабешко В.А., Павлова А.В., Евдокимов В.С., Бабешко О.М. 2022. Об одном новом предвестнике повышенной сейсмичности. *Геология и геофизика Юга России*. 12(4): 47–58. doi: 10.46698/VNC.2022.80.98.004
4. Гамбурцев Г.А. 1982. Перспективный план исследований по проблеме «Изыскание и развитие прогноза землетрясений». В кн.: *Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике*. М., Наука: 304–311.
5. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. 1987. *Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс*. М., Наука: 104 с.
6. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. 2021. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. *Геология и геофизика Юга России*. 11(4): 70–82. doi: 10.46698/VNC.2021.77.59.006
7. Ферронский В.И., Ферронский С.В. 2007. *Динамика Земли*. М., Научный мир: 336 с.
8. Певнев А.К. 2003. *Пути к практическому прогнозу землетрясений*. М., ГЕОС: 154 с.
9. Чернов Ю.К. 1989. *Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической оценки территории*. Ташкент, Фан: 296 с.
10. Atkinson B.K. 1981. Earthquake prediction. *Physics in Technology*. 12(2): 60–68. doi: 10.1088/0305-4624/12/2/104
11. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Yu. 2020. Strong ground motion simulation for forecasting the probable seismic

- impacts in the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 56(5): 644–655. doi: 10.1134/S1069351320050018
12. Di Toro G., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M., Shimamoto T. 2011. Fault lubrication during earthquake. *Nature*. 471(7339): 494–498. doi: 10.1038/nature09838
13. Geller R.J. 1997. Earthquake prediction: a critical review. *Geophysical Journal International*. 131(3): 425–450. doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb06588.x
14. Kagan Y.Y. 1997. Are earthquake predictable? *Geophysical Journal International*. 131(3): 505–525. doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb06595.x
15. Kerr R.A. 1979. Earthquake prediction: Mexican quake shows one way to look for the big ones. *Science*. 203(4383): 860–862. doi: 10.1126/science.203.4383.860
16. Lu X., Lapusta N., Rosakis A.J. 2007. Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes. *PNAS*. 104(48): 18931–18936. doi: 10.1073/pnas.070426810
17. Mogi K. 1967. Earthquake and fracture. *Tectonophysics*. 5(1): 35–55. doi: 10.1016/0040-1951(67)90043-1
18. Ворович И.И. 1979. Спектральные свойства краевой задачи теории упругости для неоднородной полосы. *Доклады АН СССР*. 245(4): 817–820.
19. Ворович И.И. 1979. Резонансные свойства упругой неоднородной полосы. *Доклады АН СССР*. 245(5): 1076–1079.
20. Ворович И.И., Бабешко В.А. 1979. *Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей*. М., Наука: 320 с.
21. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Горбатиков А.В. 2014. *Эндогенные опасности Большого Кавказа*. М., ИФЗ РАН: 256 с.

REFERENCES

1. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. 2021. Fractal properties of block elements and a new universal modeling method. *Doklady Physics*. 66(8): 218–222. doi: 10.1134/S1028335821080012

2. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. 2022. On contact problems with deformable stamp. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 84(1): 25–34. (In Russian). doi: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-25-34
3. Evdokimova O.V., Babeshko V.A., Pavlova A.V., Evdokimov V.S., Babeshko O.M. 2022. About one new precursor of increased seismicity. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 12(4): 47–58. (In Russian). doi: 10.46698/VNC.2022.80.98.004
4. Gamburtsev G.A. 1982. [Prospective plan of research on the problem “Exploration and development of earthquake forecast”]. In: *Razvitie idey G.A. Gamburtseva v geofizike. [Development of G.A. Gamburtsev's ideas in geophysics]*. Moscow, Nauka: 304–311. (In Russian).
5. Sadovalskiy M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. 1987. *Deformirovanie geofizicheskoy sredy i seismicheskiy protsess. [Geophysical environment deformation and seismic process]*. Moscow, Nauka: 104 p. (In Russian).
6. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I. 2021. [Nonlinear vibrations of soil strata according to instrumental and numerical data]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 11(4): 70–82. (In Russian). doi: 10.46698/VNC.2021.77.59.006
7. Ferronskiy V.I., Ferronskiy S.V. 2007. *Dinamika Zemli. [Earth dynamics]*. Moscow, Nauchnyy mir: 336 p. (In Russian).
8. Pevnev A.K. 2003. *Puti k prakticheskomu prognozu zemletryaseniy. [Paths to practical earthquake forecasting]*. Moscow, GEOS: 154 p. (In Russian).
9. Chernov Yu.K. 1989. *Sil'nye dvizheniya grunta i kolichestvennaya otsenka seismicheskoy otsenki territorii. [Strong ground movements and quantitative assessment of seismic assessment of the territory]*. Tashkent, Fan: 296 p. (In Russian).
10. Atkinson B.K. 1981. Earthquake prediction. *Physics in Technology*. 12(2): 60–68. doi: 10.1088/0305-4624/12/2/104
11. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Yu. 2020. Strong ground motion simulation for forecasting the probable seismic impacts in the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 56(5): 644–655. doi: 10.1134/S1069351320050018
12. Di Toro G., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M., Shimamoto T. 2011. Fault lubrication during earthquake. *Nature*. 471(7339): 494–498. doi: 10.1038/nature09838
13. Geller R.J. 1997. Earthquake prediction: a critical review. *Geophysical Journal International*. 131(3): 425–450. doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb06588.x
14. Kagan Y.Y. 1997. Are earthquake predictable? *Geophysical Journal International*. 131(3): 505–525. doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb06595.x
15. Kerr R.A. 1979. Earthquake prediction: Mexican quake shows one way to look for the big ones. *Science*. 203(4383): 860–862. doi: 10.1126/science.203.4383.860
16. Lu X., Lapusta N., Rosakis A.J. 2007. Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes. *PNAS*. 104(48): 18931–18936. doi: 10.1073/pnas.070426810
17. Mogi K. 1967. Earthquake and fracture. *Tectonophysics*. 5(1): 35–55. doi: 10.1016/0040-1951(67)90043-1
18. Vorovich I.I. 1979. [Spectral properties of the elastic theory boundary problem for an inhomogeneous band]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 245(4): 817–820. (In Russian).
19. Vorovich I.I. 1979. [Resonance properties of elastic nonuniform strip]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 245(5): 1076–1079. (In Russian).
20. Vorovich I.I., Babeshko V.A. 1979. *Dinamicheskie smeshannye zadachi teorii uprugosti dlya neklassicheskikh oblastey. [Dynamic mixed elastic theory problems for non-classical domains]*. Moscow, Nauka: 320 p. (In Russian).
21. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich L.E., Sobisevich A.L., Gorbatiykov A.V. 2014. *Endogennyye opasnosti Bol'shogo Kavkaza. [Endogenous hazards of the Greater Caucasus]*. Moscow, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences: 256 p. (In Russian).

Поступила 08.12.2022