

УДК 528.91:539.3

EDN: GGKSQM DOI: 10.31429/vestnik-20-4-25-36

Модели литосферных структур с разломами, подверженных периодическим воздействиям, и возможности использования ГИС для мониторинга сейсмической ситуации

Е. М. Горшкова¹, И. С. Телятников², А. В. Павлова¹✉

¹ Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040, Россия

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, пр-кт Чехова, 41, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

✉ Павлова Алла Владимировна; ORCID 0000-0002-7729-2860; SPIN 3700-3682; e-mail: pavlova@math.kubsu.ru

Аннотация. Теоретические исследования нарастания сейсмичности в рамках механико-математического подхода позволяют получить общее представление о реальных геофизических процессах, проявляющихся при развитии таких катастрофических явлений как землетрясения. Однако путем изучения параметров модельных колебательных систем может быть получена значительная часть полезной информации, которая затем поможет правильно трактовать результаты полевых наблюдений. В работе представлен подход к решению интегрального уравнения задачи для деформируемого штампа конечной ширины на упругом основании, моделирующего литосферную структуру. Данный подход позволил выявить наличие резонансных режимов и концентрации напряжений, способных инициировать перестройки горных пород. Анализ результатов моделирования в сопоставлении с данными натурных наблюдений и геофизических исследований позволит оценить возможности использования полученных результатов для решения задач оценки сейсмической ситуации, в частности определения уязвимых зон. Для этого рассмотрены возможности использования разработанной в КубГУ цифровой модели рельефа Краснодарского края для решения задач мониторинга сейсмической ситуации.

Ключевые слова: деформируемый штамп, интегральное уравнение, метод фиктивного поглощения, сейсмический мониторинг, ГИС, цифровая модель рельефа.

Финансирование. Фрагменты работы выполнены при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/6.

Цитирование: Горшкова Е. М., Телятников И. С., Павлова А. В. Модели литосферных структур с разломами, подверженных периодическим воздействиям, и возможности использования ГИС для мониторинга сейсмической ситуации // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2023. Т. 20, № 4. С. 25–36. EDN: GGKSQM. DOI: 10.31429/vestnik-20-4-25-36

Поступила 1 декабря 2023 г. После доработки 10 декабря 2023 г. Принято 12 декабря 2023 г. Публикация 31 декабря 2023 г.

Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2023. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY).

Models of Lithospheric Structures with Faults Subject to Periodic Impacts, and the Possibility of Using GIS for Monitoring the Seismic Situation

E. M. Gorshkova¹, I. S. Telyatnikov², A. V. Pavlova¹✉

¹ Kuban State University, Stavropolskaya str., 149, Krasnodar, 350040, Russia

² Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Prospekt Chekhova, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia

✉ Alla V. Pavlova; ORCID 0000-0002-7729-2860; e-mail: pavlova@math.kubsu.ru

Abstract. Theoretical studies of the increase in seismicity within the framework of the mechanical-mathematical approach allow us to obtain a general understanding of the real geophysical processes that manifest themselves during the development of such catastrophic phenomena as earthquakes. However, by studying the parameters of model oscillatory systems, a significant amount of useful information can

be obtained, which will then help to correctly interpret the results of field observations. In this paper, we present an approach to solving the integral equation of the problem for a deformable stamp of finite width on an elastic foundation, modeling the lithospheric structure. This approach made it possible to identify the presence of resonant regimes and stress concentrations capable of initiating rearrangements of rocks (in geological structures). Subsequent analysis of the modeling results in comparison with data from field observations and geophysical studies will allow us to assess the possibilities of using the obtained results to solve problems of the seismic situation assessment, in particular, the vulnerable zones identification. For this purpose, we examined the possibilities of using the digital relief model of the Krasnodar Territory developed at KubSU to solve problems of the seismic situation monitoring. Subsequent analysis of the geological structures in the region will allow us to assess the possibilities of using the results obtained to solve geophysical problems, mapping potential sources of stress concentration for the purpose of the targeted placement of means for the seismic situation monitoring, setting up experimental work, etc. Comprehensive theoretical studies for the mechanisms of development of seismic phenomena in conjunction with representation technologies and processing of geospatial data will allow for the construction of physical and geological models as well as the organization of a regional monitoring network.

Keywords: deformable stamp, integral equation, fictitious absorption method, seismic monitoring, GIS, digital elevation model.

Funding. Some fragments of the work were carried out with the financial support of the Kuban Scientific Research Institute fund within the framework of scientific project No. MFI-20.1/6.

Cite as: Gorshkova, E. M., Telyatnikov, I. S., Pavlova, A. V., Models of lithospheric structures with faults subject to periodic impacts, and the possibility of using GIS for monitoring the seismic situation. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 25–36. DOI: 10.31429/vestnik-20-4-25-36

Received 1 December 2023. Revised 10 December 2023. Accepted 12 December 2023. Published 31 December 2023.

The authors contributed equally. The authors declare no competing interests.

© The Author(s), 2023. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CCBY\) license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Введение

Территория Краснодарского края характеризуется разнообразием природных условий и имеет развитый хозяйственный комплекс. В то же время Северный Кавказ, являясь составной частью Крым–Кавказ–Копетдагской зоны Иран–Кавказ–Анатолийского сейсмоактивного региона, характеризуется самой высокой сейсмичностью в европейской части страны [1]. Для сейсмоопасных регионов моделирование геологических процессов с целью понимания их природы и тенденций развития – одна из приоритетных задач настоящего времени.

Для объектов капитального строительства и транспортных магистралей в горной и низкогорной части территории Краснодарского края наибольшую опасность для населения и экономики представляют сейсмические и эрозионные процессы. В этот район попадает большая часть побережья [2]. Многочисленные сильные и ощутимые землетрясения отмечены в районах Новороссийска, Сочи и на других участках Черноморского побережья [1]. Сейсмические события могут сопровождаться огромным ущербом: как человеческими жертвами, так и материальными потерями. Отсутствие детального анализа динамических процессов в прибрежных структурах вызывает опасения в связи с большим числом землетрясений, эпицентры которых расположены в акватории Черного моря. Кроме того, в настоящее время все еще не до конца изучены причины возникновения крупных землетрясений в областях перехода от горных сооружений к платформам [1]. Особенно актуальны исследования этой проблемы для густонаселенного юга европейской части России, включающего Краснодарский край.

При изучении причин нарастания сейсмичности в рамках механико-математического подхода учеными Кубанского государственного университета и Южного научного центра РАН развивается концепция, основанная на анализе механизмов концентрации напряжений у границ литосферных отдельных и возможных сценариев резонансных явлений в зонах их контакта.

Теоретические исследования этих проблем позволяют получить общее представление о реальных геофизических процессах, проявляющихся при развитии таких катастрофических явлений как землетрясения. Однако путем изучения параметров модельных колебательных систем может быть получена значительная часть полезной информации, которая затем поможет правильно трактовать результаты полевых наблюдений [3].

В работе представлен подход к решению интегрального уравнения задачи для деформируемого штампа конечной ширины на упругом основании, моделирующего литосферную структуру. Данный подход позволил выявить наличие резонансных режимов и концентрации напряжений, способных инициировать перестройки горных пород.

Последующий анализ результатов моделирования в сопоставлении с данными природных наблюдений и геофизических исследований позволит оценить перспективы их применения для решения задач оценки сейсмической ситуации, в частности определения уязвимых зон. Для этого рассмотрены возможности использования разработанной в КубГУ цифровой модели рельефа (ЦМР) Краснодарского края [4] для решения задач мониторинга сейсмической ситуации. В дальнейшем анализ расчетных характеристик напряженно-деформированного состояния структур региона с учетом их пространственной привязки послужит развитию предлагаемых моделей и эффективному использованию информационных ресурсов ГИС.

1. Модели геофизических структур с разломами, подверженных периодическим воздействиям

Одна из связанных с землетрясениями проблем — решение задач по определению роли разномасштабных резонансных структур в его подготовке [3]. В работах [5, 6] представлены результаты исследования контактных задач для деформируемого штампа, в работе [6] описан механический эффект — возникновение резонансов в контактных задачах с деформируемым штампом конечной ширины, указывающий на сейсмическую уязвимость территории, соответствующей такого рода модели. Развивая теоретические исследования в рамках затронутой проблемы поиска предвестника сейсмического события и нарастания сейсмической опасности, исследуется математическая модель контактного взаимодействия геофизических структур, приводящего к концентрации напряжений.

1.1. Задача для полосового деформируемого штампа

В работе [6] рассмотрена задача, где в качестве модели литосферной отдельности принят полосовой деформируемый штамп на упругом многослойном основании. В декартовой системе координат, где горизонтальная плоскость x_1Ox_2 совпадает с поверхностью, а ось Ox_3 направлена по нормали вверх, деформируемый штамп, моделирующий литосферную структуру, занимает область $\Omega = \{(x_1, x_2) : -B \leq x_1 \leq B, -\infty < x_2 < \infty\}$. Штамп подвержен гармоническому нагружению с заданной частотой ω . Применяя подход, описанный в работе [7], оказалось возможным обнаружить новые свойства сложных процессов путем изучения простых задач, описываемых, например, уравнением Гельмгольца. Считая, что штамп в зоне контакта воздействует на упругое основание без трения, задачу можно свести к интегральному уравнению (ИУ) вида

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-B}^B k(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) q(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = f(x_1, x_2), \quad -B \leq x_1 \leq B, -\infty < x_2 < \infty, \quad (1.1)$$

$$k(x_1, x_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\gamma_1} \int_{\gamma_2} K(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha, \mathbf{x})} d\alpha_1 d\alpha_2, \quad (\alpha, \mathbf{x}) = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2, \quad (1.2)$$

где $k(x_1, x_2)$ — функция Грина упругого основания, $K(\alpha_1, \alpha_2)$ — Фурье-символ $k(x_1, x_2)$, $q(x_1, x_2)$ — контактные напряжения, а $f(x_1, x_2)$ — смещения под штампом, γ_1, γ_2 — контуры, выбираемые в соответствии с принципом предельного поглощения [8].

Свойства символа ядра интегрального уравнения (1.1) $K(\alpha_1, \alpha_2)$, представленного формулой (1.2), для различных контактных задач описаны в монографии [8].

Рассмотрим в области Ω двумерное уравнение Гельмгольца для деформируемого штампа

$$\begin{aligned} (\Delta + k^2) \psi(x_1, x_2) &= g(x_1, x_2), \quad k = c\omega, \quad c = \text{const}, \\ g(x_1, x_2) &= q(x_1, x_2) - t(x_1, x_2), \end{aligned} \quad (1.3)$$

где Δ — двумерный оператор Лапласа, $\psi(x_1, x_2)$ — вертикальное перемещение в области контакта штампа со средой, $q(x_1, x_2)$ — контактные напряжения под штампом, $t(x_1, x_2)$ — давление на штамп сверху.

При этом

$$\psi(x_1, x_2) \rightarrow \psi(-B, x_2), \quad x_1 \rightarrow -B, \quad \psi(x_1, x_2) \rightarrow \psi(B, x_2), \quad x_1 \rightarrow B. \quad (1.4)$$

Применением преобразования Фурье по переменной x_2 задача (1.3), (1.4) для деформируемого штампа сводится к одномерной задаче, интегральное уравнение которой принимает вид

$$\int_{-B}^B \bar{k}(x_1 - \xi_1, \alpha_2) \bar{q}(\xi_1, \alpha_2) d\xi_1 = \bar{f}(x_1, \alpha_2), \quad -B \leq x_1 \leq B, \quad (1.5)$$

$$\bar{k}(x_1, \alpha_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_1} K(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1. \quad (1.6)$$

Здесь и далее чертой отмечены трансформанты Фурье соответствующих функций. Для удобства опустим в записи (1.5), (1.6) вещественный параметр преобразования Фурье α_2 , обозначив через $K_1(\alpha_1) = K(\alpha_1, \alpha_2)$. Далее будем считать, что $K_1(\alpha_1)$ — четная мероморфная, имеющая асимптотику $K_1(\alpha_1) \sim O(\alpha_1^{-1})$ при $|\alpha_1| \rightarrow \infty$, $\text{Im} \alpha_1 = 0$, представима в виде отношения двух целых функций $P_1(\alpha_1), R_1(\alpha_1)$, т.е. $K_1(\alpha_1) = R_1(\alpha_1) P_1^{-1}(\alpha_1)$.

Для полосы в случае $B \gg 1$ применим к задаче для деформируемого штампа метод блочного элемента [5]. Внешняя форма будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \omega_1(\alpha_1) &= \Delta_0^{-1} \left\{ \left[2ik e^{-i\alpha_1 B} \left(e^{i2B(\alpha_1 - k)} - 1 \right) + i(\alpha_1 - k) e^{i\alpha_1 B} \right] \bar{\psi}(B) + \right. \\ &\quad \left. + \left[2ik e^{i\alpha_1 B} \left(1 - e^{-i2B(\alpha_1 - k)} \right) + i(\alpha_1 - k) e^{-i\alpha_1 B} \right] \bar{\psi}(-B) - \right. \\ &\quad \left. - 2i [G(k) \sin(\alpha_1 + k) B - G(-k) \sin(\alpha_1 - k) B] \right\} - G(\alpha_1), \quad \Delta_0 = -2i \sin(2kB). \end{aligned}$$

Здесь заглавные буквы использованы для обозначения двумерных преобразований Фурье, например,

$$G(\alpha_1) = \int_{-B}^B \bar{g}(x_1) e^{i\alpha_1 x_1} dx_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-B}^B g(x_1, x_2) e^{i(\alpha_1, \mathbf{x})} dx_1 dx_2, \quad \omega(\pm k) = 0.$$

Интегральное представление для упакованного блочного элемента примет вид

$$\bar{\psi}(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\omega_1(\alpha_1)}{\alpha_1^2 - k^2} e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1. \quad (1.7)$$

Приравнявая (1.7) перемещениям под штампом (1.5) и применяя преобразование Фурье по переменной x_1 , получим

$$K_1(\alpha_1) Q(\alpha_1) + E(\alpha_1) = -Q(\alpha_1) (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} + S(\alpha_1),$$

$$S(\alpha_1) = (\omega_1(\alpha_1) + Q(\alpha_1))(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}.$$

Здесь $E(\alpha_1)$ — интегральная характеристика смещений среды вне области контакта со штампом,

$$Q(\alpha_1) = \int_{-B}^B q_1(x_1) e^{i\alpha_1 x_1} dx_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-B}^B q(x_1, x_2) e^{i(\alpha, \mathbf{x})} dx_1 dx_2.$$

После применения обращения преобразования Фурье по параметру α_1 приходим к ИУ Винера–Хопфа на отрезке

$$\int_{-B}^B k_2(x_1 - \xi_1) \bar{q}(\xi_1) d\xi_1 = \bar{s}(x_1), \quad -B \leq x_1 \leq B, \quad (1.8)$$

$$k_2(x_1, \alpha_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_1} K_2(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad K_2(\alpha_1) = K_1(\alpha_1) + (\alpha_1^2 - k^2)^{-1},$$

$$\bar{s}(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1.$$

Особенностью задач для деформируемых штампов является присутствие в правой части (1.8) неизвестных функционалов от решения, зависящих от частоты ω . Определение значений этих функционалов привело к получению соотношения, определяющего резонансные частоты в контактных задачах с деформируемым штампом

$$\Delta_* = D_1(k) D_2(-k) - C_1(k) C_2(-k) = 0. \quad (1.9)$$

Здесь $D_j, C_j, j = 1, 2$, выражаются через введенные в работе [6] функции

$$M_1(\alpha_1) = \frac{P_0(\alpha_1)}{R_1(\alpha_1)}, \quad M_2(\alpha_1) = \frac{P_1^-(\alpha_1) e^{i\alpha_1 B}}{R_1^-(\alpha_1)}, \quad M_3(\alpha_1) = \frac{P_0^+(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 B}}{R_1^+(\alpha_1)(\alpha_1 - k)},$$

$$M_4(\alpha_1) = \frac{P_1^+(\alpha_1) e^{-i\alpha_1 B}}{R_1^+(\alpha_1)}, \quad M_5(\alpha_1) = \frac{P_0^-(\alpha_1) e^{i\alpha_1 B}}{R_1^-(\alpha_1)(\alpha_1 + k)}.$$

1.2. Метод решения интегрального уравнения

ИУ вида (1.8) могут быть решены с использованием метода фиктивного поглощения (МФП) [9], обеспечивающего построение решений интегральных уравнений с ядрами, преобразования Фурье которых отличаются от статических множителем, представляющим собой рациональную функцию.

Рассмотрим ИУ на отрезке вида (1.8)

$$\int_{-B}^B k(x - \xi) q(\xi) d\xi = f(x), \quad -B \leq x \leq B, \quad (1.10)$$

$$k(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma} K(\alpha) e^{-i\alpha x} d\alpha, \quad (1.11)$$

$$K(\alpha) \sim \alpha^{-1} (1 + O(\alpha^{-\tau})), \quad |\alpha| \rightarrow \infty, \quad \tau > 0,$$

расположение контура интегрирования γ в комплексной плоскости обусловлено принципом предельного поглощения [8].

Будем считать, что для символа ядра, обладающего свойствами, описанными выше, ИУ (1.10) однозначно разрешимо в некотором банаховом пространстве. Согласно теореме, сформулированной в монографии [9], если для символов ядер двух ИУ вида (1.10) с представлением ядра (1.11) справедливо условие

$$|K(\alpha) - K_0(\alpha)| |1 + \alpha^2|^{0,5(1+\delta)} \leq \frac{4\varepsilon}{2(\delta_1 - \delta)r - 1},$$

$$\alpha \in \gamma, \quad \delta_1 > \delta > 0,5, \quad r > r_0 = 2(\delta_1 - \delta), \quad r_0 > 1,$$

то решения этих ИУ близки, т.е.

$$\max |q(x) - q_0(x)| \sqrt{B^2 - x^2} < C\varepsilon, \quad |x| \leq B,$$

где $C = \text{const}$ не зависит от ε [9].

Для построения приближенного решения интегрального уравнения (1.10) с ядром (1.11) введем в рассмотрение ИУ

$$\mathbf{K}_0 q_0 = \int_{-B}^B k_0(x - \xi) q_0(\xi, B) d\xi = f(x), \quad -B \leq x \leq B, \quad (1.12)$$

$$k_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K_0(\alpha) e^{-i\alpha x} d\alpha, \quad K_0(\alpha) = \frac{\text{sh } \alpha}{\alpha \text{ ch } \alpha}. \quad (1.13)$$

Точное решение этого ИУ построено в работе [10]. Для $B < \infty$ и $f(x) \equiv 1$ оно имеет вид [10]

$$q_0(x, B) = \frac{1}{\pi \sqrt{2} Q_{-\frac{1}{2}}(\text{ch } B) (\text{ch } B - \text{ch } x)},$$

где $Q_{-1/2}(x)$ — функция Лежандра [11].

Для произвольной правой части $f(x) \in C^1([-B, B])$ решение (1.12) с ядром (1.13) представляется следующим соотношением [10]:

$$q_1(x, B) = \frac{1}{2\pi M'(B)} \left[\frac{d}{dB} \int_{-B}^B q_0(\xi, B) f(\xi) d\xi \right] q_0(x, B) -$$

$$- \frac{1}{2} \int_{|x|}^B q_0(x, \xi) \frac{d}{d\xi} \left[(M'(\xi))^{-1} \frac{d}{d\xi} \int_{-\xi}^{\xi} q_0(s, \xi) f(s) ds \right] d\xi -$$

$$- \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \int_{|x|}^B \frac{q_0(x, \xi)}{M'(\xi)} \left[\int_{-\xi}^{\xi} q_0(s, \xi) df(s) \right] d\xi,$$

$$M(\xi) = P_{-1/2}(\text{ch } \xi) (Q_{-1/2}(\text{ch } \xi))^{-1}, \quad |x| < B,$$

$P_{-1/2}, Q_{-1/2}$ — функции Лежандра.

Таким образом, для построения решения ИУ (1.10) рассмотрим функцию символа ядра

$$K(\alpha) = K_0(\alpha) \Pi(\alpha).$$

Здесь $\Pi(\alpha)$ — рациональная функция, имеющая конечное вещественных число нулей и полюсов, совпадающих с нулями и полюсами $K(\alpha)$,

$$\Pi(\alpha) = \prod_{k=1}^N \frac{(\alpha^2 - z_k^2)}{(\alpha^2 - p_k^2)}, \quad N < \infty,$$

где z_k — вещественные нули, а p_k — вещественные полюсы $K(\alpha)$.

Воспользуемся далее МФП, алгоритм которого изложен в работе [9]. Согласно схеме метода, если известен обратный оператор \mathbf{K}_0^{-1} интегрального уравнения (1.12), решение ИУ вида (1.10) с символом ядра $K(\alpha)$ представляется в виде

$$q = V^{-1}\Pi^{-1}V [\mathbf{K}_0^{-1}f - \phi - \mathbf{K}_0^{-1}S_0\phi] + \phi.$$

Здесь через V и V^{-1} обозначены операторы прямого и обратного преобразования Фурье соответственно. При этом введенная функция ϕ содержит неизвестные константы и имеет носитель на отрезке $[-B, B]$. Последнее соотношение может быть преобразовано к виду

$$q = \mathbf{K}_0^{-1}f - \mathbf{K}_0^{-1}S_0\phi + V^{-1} [\Pi^{-1} - 1] V [\mathbf{K}_0^{-1}f - \phi - \mathbf{K}_0^{-1}S_0\phi],$$

где

$$S_0\phi = \frac{1}{2\pi} \int_{-B}^B \phi(\xi) \int_{\gamma} K_0(\alpha) [\Pi(\alpha) - 1] e^{-i\alpha(x-\xi)} d\alpha d\xi.$$

Так как вспомогательная функция $\phi(x)$ входит в окончательное представление решения только под знаком операторов, в качестве такой системы можно взять производные от δ -функций Дирака с носителями на границах области интегрирования $|x| \leq B$, например,

$$\phi(x) = \sum_{k=1}^N G_k \left(-\frac{d^2}{dx^2} \right) [C_k \delta(x-B) + D_k \delta(x+B)],$$

$$G_k(\alpha^2) = (\alpha^2 - p_1^2) \dots (\alpha^2 - p_{k-1}^2) (\alpha^2 - p_{k+1}^2) \dots (\alpha^2 - p_N^2),$$

C_k, D_k некоторые константы, нуждающиеся в определении, p_k ($k = \overline{1, N}$) образуют вещественное полярное множество $K(\alpha)$.

При этом неизвестные определяются из условия

$$V [\mathbf{K}_0^{-1}f - \phi - \mathbf{K}_0^{-1}S_0\phi] = 0, \quad \alpha^2 = z_k^2, \quad k = \overline{1, N}. \quad (1.14)$$

МФП позволяет путем решения конечной системы линейных алгебраических уравнений (1.14) для определения неизвестных постоянных строить точные решения ИУ, символы ядер которых отличаются рациональным множителем $\Pi(\alpha)$ [9].

2. Возможности использования цифровой модели территории региона для решения задач сейсмологии

Растущий интерес к ГИС и огромные возможности этой технологии определяют широкие приложения геопространственного подхода в различных сферах деятельности [12–18 и др.]. Имеющиеся на сегодняшний день инструменты ГИС обеспечивают возможность получения геофизических данных, необходимых для постановок задач изучения волновых и деформационных процессов в геологических структурах. В свою очередь, расчетные результаты характеристик напряженно-деформированного состояния моделируемых структур могут быть инсталлированы в ГИС-карты с использованием возможности наглядного отображения и оперативного анализа складывающейся ситуации и ее пространственно-временной динамики.

Для решения задач сейсмологии с использованием геоинформационных технологий стандартного набора инструментов моделирования и анализа из арсенала универсальных ГИС оказывается недостаточно. При этом можно объединить мощные средства для формирования и сопровождения больших объемов пространственных данных ГИС с оригинальными подходами, допускающими реализацию в виде совместно используемых программных модулей, ориентированных на решение определенного класса нестандартных задач. Один из способов

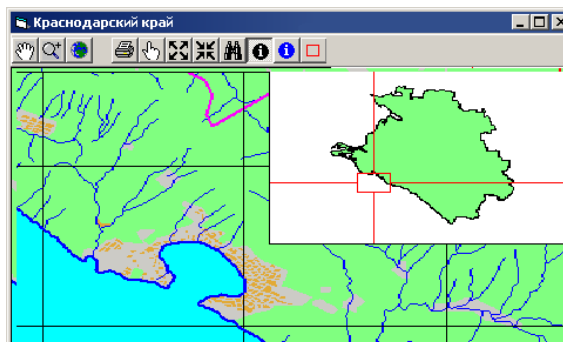


Рис. 1. Картографический модуль. Геленджикская бухта

Fig. 1. Cartographic module. Gelendzhik Bay

повышения функциональности состоит в подключении специализированных модулей расширения, определяющих содержательную функцию системы. Технология использования таких модулей допускает их независимую разработку в дополнение к семейству модулей расширения, поставляемых производителем системы.

На сегодняшний день при решении задач природопользования применяются различные геоинформационные технологии, особое место среди которых занимает система ГИС ИНТЕГРО, позволяющая решать многие задачи геоэкологии, мониторинга природных систем и т.д. [16].

Как средство цифрового представления ландшафтных данных для мониторинга территории края построена ЦМР [4]. В качестве инструмента для визуализации, анализа и преобразования моделей рельефа разработан прототип программного приложения. При разработке ГИС-приложения для анализа данных сейсмологического мониторинга Краснодарского края использован следующий подход: формирование пространственно распределенных данных и их предварительная подготовка к анализу производится средствами универсальной ГИС-системы, а проблемно-ориентированная обработка данных выполняется уже в специализированном ГИС-приложении.

Цифровая картографическая основа системы создана на базе топографических карт масштаба 1 : 200 000, охватывающих всю территорию Краснодарского края [4], и содержит несколько десятков тематических групп объектов в формате shp-файлов, включая такие тематические слои как рельеф суши (отметки высот, горизонтали, формы рельефа), гидрография (гидрографическая сеть, гидротехнические сооружения и переправы, бариметрия), населенные пункты и др. Реализовано два режима работы приложения: картографический и 3D визуализации. На рис. 1 представлен вид окна приложения в картографическом режиме с картой Геленджикской бухты.

Выполнено редактирование TIN-поверхностей, интерполяция высот, построение изолиний, вычисление уклонов поверхностей и экспозиции склонов. Два типа моделей поверхностей — растровый и TIN используются для построения уточненной ЦМР, которая наряду с другой информацией является источником входных данных для оригинальных расчетных модулей, выполняющих их проблемно-ориентированную обработку [4]. Рис. 2 иллюстрирует работу модуля визуализации автоматизированной системы анализа данных сейсмомониторинга.

Функционал приложения обеспечивает переход между режимами работы приложения, позволяя изменять способ отображения поверхности визуализации выбранного участка и анализ его поверхности (рис. 3).

При решении конкретных задач моделирования ЦМР региона может служить географически координированной основой для описания реальных расчетных областей, в таких случаях характеристики исследуемого процесса как результаты моделирования будут агрегированы в ГИС, так как предусмотрена возможность визуализации полученных результатов в специализированном графическом модуле и средствами инструментальных ГИС в виде наборов

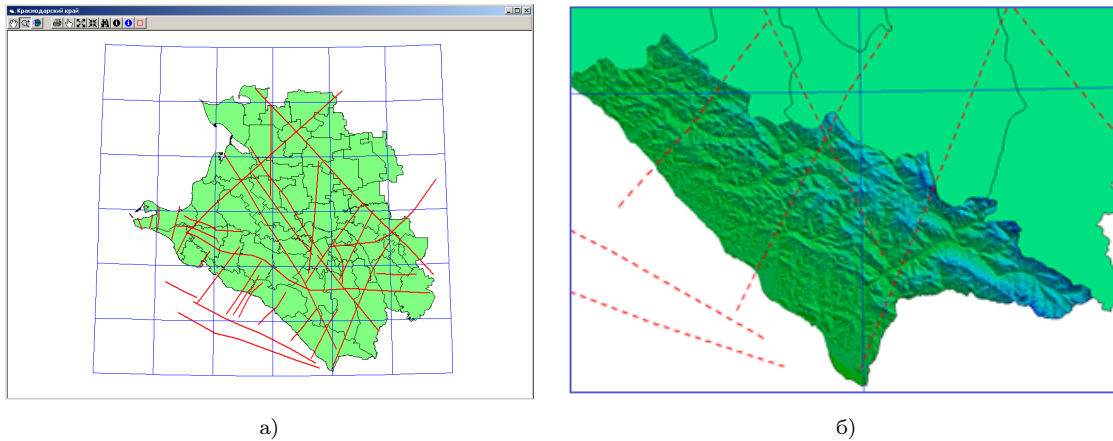


Рис. 2. Модуль визуализации автоматизированной системы анализа данных (а).
Детализация литосферных структуры Краснодарского края, разделенных разломами.
Фрагмент ЦМР Краснодарского края (район г. Сочи) (б)

Fig. 2. Visualization module for an automated data analysis system (a).
Detailing of the lithospheric structures of the Krasnodar region, separated faults.
Fragment DEM of the Krasnodar region (region of the city Sochi) (b)

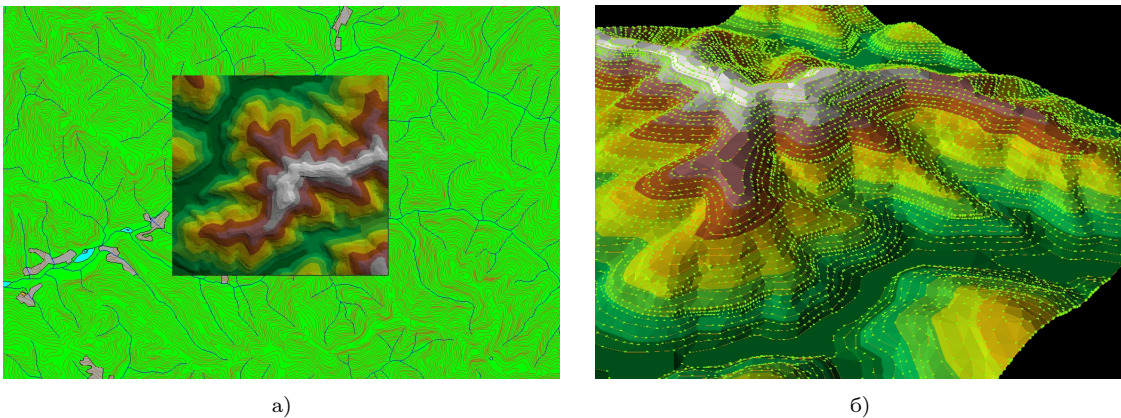


Рис. 3. Различные способы отображения поверхности визуализации выбранного участка:
а) картографический, б) режим 3D моделирования

Fig. 3. Various ways of displaying the visualization surface of the selected area: a) cartographic,
b) 3D modeling mode

двумерных и трехмерных данных. На рис. 4 представлены фрагменты интерактивной 3D модели для выбранного участка территории.

Реализованные в ЦМР специальные аппроксимации и встраиваемые модули при моделировании горных массивов блочной структурой дают возможность изменять точность цифровой модели с целью уменьшения объема данных [4].

Заключение

В перспективе полученные теоретические результаты могут быть применены для анализа сейсмической обстановки на территории Краснодарского края с целью выявления наиболее уязвимых зон. Последующий анализ геологических структур региона позволит оценить возможности использования полученных результатов для решения задач геофизики, картирования потенциальных очагов концентрации напряжений с целью адресного расположения средств наблюдения за сейсмической обстановкой, постановке экспериментальных работ и пр.

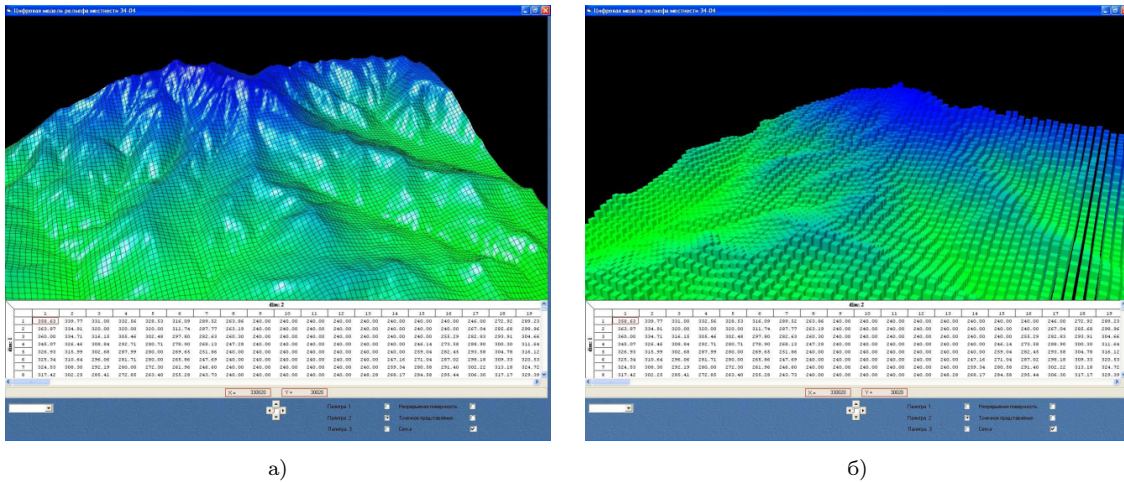


Рис. 4. Интерактивная 3D модель для выбранного участка: а — с сеткой [4], б — с блочной аппроксимацией

Fig. 4. Interactive 3D model for a selected area: a — with a grid [4], b — with a block approximation

Для изучения деформационных процессов в литосферных структурах как сложных деформируемых объектах и сейсмического мониторинга региона предлагается использовать ЦМР территории Краснодарского края. Кроме того, использование цифровых карт как эффективного инструмента для принятия решений способствует информационному обеспечению природоохранной деятельности, совместному планированию мероприятий различных служб при ликвидации чрезвычайных ситуаций и разработке стратегии их предупреждения, в том числе в целях повышения ситуационной осведомленности об угрозах.

В работах [2, 19] приводится опыт инженерно-геологического районирования по установлению закономерностей пространственной изменчивости инженерно-геологических условий территории Краснодарского края и предлагается методика оценочного инженерно-геологического районирования. В частности построены карты-схемы, отражающие влияние таких факторов как интенсивность неотектонических движений и сейсмичность. Последние могут быть уточнены на основе результатов моделирования характеристик напряженно-деформируемого состояния геологических отдельностей территории с последующей обработкой комплекса формальных признаков на основе классификационных алгоритмов.

Технологии ГИС продолжают развиваться, в последние несколько лет информационный ресурс ArcGIS пополнился наборами высококачественных открытых данных в виде векторных слоев ArcGIS, доступных для редактирования. И в дальнейшем разрабатываемое приложение может использоваться не только для решения описанных выше задач, но в качестве основы для наращивания функциональных возможностей путем подключения дополнительных модулей для выполнения других задач. Комплексные теоретические исследования механизмов развития сейсмических явлений в совокупности с технологиями представления и обработки геопространственных данных позволит обеспечить построение физико-геологических моделей и организацию сети регионального мониторинга.

Литература [References]

1. Лаверов, Н.П. (ред.), *Изменение окружающей среды и климата. Т. 1: Сейсмические процессы и катастрофы*. Москва, ИФЗ РАН, 2008. [Laverov, N.P. (ed.), *Izmenenie okruzhayushchey sredy i klimata. T. 1: Seysmicheskie protsessy i katastrofy = Environmental and climate change. Vol. 1: Seismic processes and disasters*. Moscow, IPE RAS, 2008. (in Russian)]
2. Любимова, Т.В., Бондаренко, Н.А., Стогний, В.В., Погорелов, А.В., Новые методы инженерно-геологического районирования территории Краснодарского края и республики Адыгея. *Научный*

- журнал КубГАУ, 2017, № 132(08). [Lyubimova, T.V., Bondarenko, N.A., Stogniy, V.V., Pogorelov, A.V., New methods of engineering-geological zoning of the territory of the Krasnodar Territory and the Republic of Adygea. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific journal of Kuban State Agrarian University*, 2017, no. 132(08). (in Russian)]
3. Собисевич, Л.Е., Собисевич, А.Л., Фатьянов, А.Г., *Длиннопериодные сейсмогравитационные процессы в литосфере*. Москва, ИФЗ РАН, 2020. [Sobisevich, L.E., Sobisevich, A.L., Fatyanov, A.G., *Dlinnoperiodnyye seysmogravitatsionnyye protsessy v litosfere = Long-period seismogravitational processes in the lithosphere*. Moscow, IFZ RAN, 2020. (in Russian)]
 4. Гладской, И.Б., Павлова, А.В., Телятников, И.С., Использование ГИС-технологий и цифровой модели рельефа для исследования процессов в геологических структурах региона. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2020, т. 17, № 2, с. 29–35. [Gladskoy, I.B., Pavlova, A.V., Telyatnikov, I.S., Using GIS technologies and digital elevation models to study processes in the geological structures of the region. *Ekologicheskiiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 29–35. (in Russian)] EDN: QTBABZP DOI: 10.31429/vestnik-17-2-29-35
 5. Бабешко, В.А., Евдокимова, О.В., Бабешко, О.М., О контактных задачах с деформируемым штампом. *Проблемы прочности и пластичности*, 2022, т. 84, № 1, с. 25–34. [Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M., On contact problems with a deformable die. *Problemy prochnosti i plastichnosti = Problems of strength and plasticity*, 2022, vol. 84, No. 1, pp. 25–34. (in Russian)] DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-25-34
 6. Евдокимова, О.В., Бабешко, В.А., Павлова, А.В., Евдокимов, В.С., Бабешко, О.М., Об одном новом предвестнике повышенной сейсмичности. *Геология и геофизика Юга России*, 2022, т. 12, № 4, с. 47–58. [Evdokimova, O.V., Babeshko, V.A., Pavlova, A.V., Evdokimov, V.S., Babeshko, O.M., About one new precursor of increased seismicity. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and geophysics of the South of Russia*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 47–58. (in Russian)] DOI: 10.46698/VNC.2022.80.98.004
 7. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M., Fractal properties of block elements and a new universal modeling method. *Doklady Physics*, 2021, vol. 66, no. 8, pp. 218–222. DOI: 10.1134/S1028335821080012
 8. Ворович, И.И., Бабешко, В.А., *Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей*. Москва, Наука, 1979. [Vorovich, I.I., Babeshko, V.A., *Dinamicheskie smeshannyye zadachi teorii uprugosti dlya neklassicheskikh oblastey = Dynamic mixed problems of the theory of elasticity for non-classical domains*. Moscow, Nauka, 1979. (in Russian)]
 9. Бабешко, В.А., *Обобщенный метод факторизации в пространственных динамических смешанных задачах теории упругости*. Москва, Наука, 1984. [Babeshko, V.A., *Obobshchennyy metod faktorizatsii v prostranstvennykh dinamicheskikh smeshannykh zadachakh teorii uprugosti = Generalized factorization method in spatial dynamic mixed problems of elasticity theory*. Moscow, Nauka, 1984. (in Russian)]
 10. Гохберг, И.Ц., Крейн, М.Г., *Теория вольтерровых операторов в гильбертовом пространстве и ее приложения*. Москва, Наука, 1967. [Gokhberg, I.Ts., Kerin, M.G., *Teoriya vol'tterrovyykh operatorov v gil'bertovom prostranstve i ee prilozheniya = Theory of Volterra operators in Hilbert space and its applications*. Moscow, Nauka, 1967. (in Russian)]
 11. Абрамовиц, М., Стиган, И. (ред.), *Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами*. Москва, Наука, 1979. [Abramowitz, M., Stigan, I. (eds.), *Spravochnik po spetsial'nyim funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami = Handbook of Special Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*. Moscow, Nauka, 1979. (in Russian)]
 12. Clarke, K.C., Brad, O.P., Crane, M.P., *Geographic Information Systems and Environmental Modeling*. London, Pearson, 2001.
 13. Keller, R., Baru, Ch., *Geoinformatics: Cyberinfrastructure for the Solid Earth Sciences*. Cambridge, University Press, 2011.
 14. Панин, А.В., Гельман, Р.Н., Опыт применения GPS-технологии для построения крупномасштабных цифровых моделей рельефа. *Геодезия и картография*, 1997, № 10, с. 22–27. [Panin, A.V., Gelman, R.N., Experience in using GPS technology for constructing large-scale digital terrain models. *Geodeziya i kartografiya = Geodesy and cartography*, 1997, no. 10, pp. 22–27. (in Russian)]
 15. Долгова, М.П., Методика обоснования модели рельефа для решения прикладных задач. *Информация и космос*, 2010, № 2, с. 39–49. [Dolgova, M.P., Methodology for substantiating a relief model

- for solving applied problems. *Informatsiya i kosmos = Information and space*, 2010, no. 2, pp. 39–49. (in Russian)]
16. Чесалов, Л.Е., Единая информационная среда для интеграции информационных ресурсов при решении задач природопользования. *Геоинформатика*, 2003, № 2, с. 11–14. [Chesalov, L.E., Unified information environment for integrating information resources when solving environmental management problems. *Geoinformatika = Geoinformatics*, 2003, no. 2, pp. 11–14. (in Russian)]
 17. Митракова, О.В., Создание информационно-аналитических систем для обеспечения рационального природопользования и устойчивого развития регионов. *Геоинформатика*, 2003, № 2, с. 15–18. [Mitrakova, O.V., Creation of information and analytical systems to ensure rational environmental management and sustainable development of regions. *Geoinformatika = Geoinformatics*, 2003, no. 2, pp. 15–18. (in Russian)]
 18. Жебровский, С.И., Кузин, Д.А., Стрельцова, М.М., Обзор проблем и перспектив развития геоинформационных систем в эпоху всеобъемлющего интернета. *Современные наукоемкие технологии*, 2018, № 12-1, с. 237–241. [Zhebrovsky, S.I., Kuzin, D.A., Streltsova, M.M., Review of problems and prospects for the development of geographic information systems in the era of the comprehensive Internet. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern science-intensive technologies*, 2018, no. 12-1, pp. 237–241. (in Russian)]
 19. Любимова, Т.В., Бондаренко, Н.А., Погорелов, А.В., Интегральная оценка сложности инженерно-геологических условий территории Краснодарского края. *Научный журнал КубГАУ*, 2016, № 121(07). [Lyubimova, T.V., Bondarenko, N.A., Pogorelov, A.V., Integral assessment of the complexity of engineering-geological conditions of the territory of the Krasnodar region. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific journal of Kuban State Agrarian University*, 2016, no. 121(07). (in Russian)]