

УДК 550.34; 539.3

DOI: 10.46698/VNC.2025.25.10.001

Оригинальная статья

О зоне пониженной сейсмической опасности при переходе горной территории в равнинную

В.А. Бабешко¹, О.В. Евдокимова², О.М. Бабешко¹,
В.С. Евдокимов¹

¹ Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар,
ул. Ставропольская, 149, e-mail: rector@kubsu.ru;

² Южный научный центр РАН, Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону,
пр. Чехова, 41, e-mail: ras@ssc-ras.ru, babeshko41@mail.ru

Статья поступила: 02.04.2025, доработана: 30.04.2025, принята к публикации: 05.05.2025

Резюме: Актуальность работы состоит в необходимости поиска зон менее подверженных сейсмической опасности в территориях, в которых горные массивы переходят в равнины. Строгих механико-математических подходов исследования сейсмичности в таких территориях мало, в связи с тем, что они требуют решения некоторых проблем в теории интегральных уравнений. **Целью проведенных исследований** явилось выявление зоны пониженной сейсмичности в области перехода горной территории в равнинную.

Методы работы. Для исследования использовано решение контактной задачи о концентрации контактных напряжений в зоне перехода горного массива в равнинную территорию. Предполагается, что возвышающийся над равниной горный массив моделируется деформируемым штампом, который расположен на анизотропном полупространстве, свойственном строению гранитного слоя литосферной плиты. В работе учитываются приливные Лунные воздействия, описываемые временной функцией. Выполнение поставленной задачи потребовало построения решения двумерного интегрального уравнения Винера-Хопфа с анизотропным символом ядра интегрального уравнения. Для описания деформируемого штампа принято разложение решения граничной задачи для штампа сложной реологии по решениям граничных задач для штампов упрощенной реологии, даваемых уравнениями Гельмгольца. **Результаты исследования.** В процессе исследования, получено представление распределения контактных напряжений под деформируемым штампом. Установлено, что в приграничных зонах деформируемого штампа происходит, при приближении к прямолинейной границе, нарастание контактных напряжений. Для выявления зоны понижения концентрации контактных напряжений, изучен случай штампа с внутренним углом. Он содержит сектор, в который входят на плоскости два первых квадранта и часть третьего. Зона излома границы штампа, называемая внутренним углом, является наименее опасной. Безопасность увеличивается по мере увеличения раствора сектора штампа, что представлено в таблице. Дальнейшее увеличение сектора раствора штампа может привести к встречному расположению границ ущелья, приближающемуся к параллельным, что может привести к резонансам И.И. Воровича.

Ключевые слова: контактная задача, деформируемые штампы, пониженная сейсмичность, концентрация напряжений, горные территории.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, Кубанского научного фонда, региональный проект № 24-11-20006.

Для цитирования: Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Евдокимов В.С. О зоне пониженной сейсмической опасности при переходе горной территории в равнинную. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 63-72. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.10.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.25.10.001

Original paper

About the zone of reduced seismic hazard in the transition from mountainous to flat terrain

V.A. Babeshko¹, O.V. Evdokimova², O.M. Babeshko¹, V.S. Evdokimov¹

¹ Kuban State University, 149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040,
Russian Federation, e-mail: rector@kubsu.ru;

² Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don
344006, Russian Federation, e-mail: ras@ssc-ras.ru,
babeshko41@mail.ru

Received: 02.04.2025, revised: 30.04.2025, accepted: 05.05.2025

Abstract: The relevance of the work lies in the need to search for areas with reduced seismic hazards in areas where mountain ranges turn into plains. There are few rigorous mechanical and mathematical approaches to studying seismicity in such areas, due to the fact that they require solving some problems in the theory of integral equations. **The aim** of the research was to identify a reduced seismicity zone in the area of transition from a mountainous territory to a flat one. **Methods.** The solution of the contact problem on the concentration of contact stresses in the transition zone of a mountain range to a flat terrain was used for the study. It is assumed that the mountain range towering above the plain is modeled by a deformable stamp, which is located on an anisotropic half-space characteristic of granite layer structure in the lithospheric plate. The work takes into account tidal lunar impacts described by the time function. The task required constructing a solution to the two-dimensional Wiener-Hopf integral equation with an anisotropic symbol for the kernel of the integral equation. To describe a deformable stamp, the solution of the boundary value problem for a stamp of complex rheology is decomposed into solutions of boundary value problems for stamps of simplified rheology given by the Helmholtz equations. **Results.** In the process of study, a representation of the distribution of contact stresses under a deformable die was obtained. It is established that in the boundary zones of the deformable stamp, an increase in contact stresses occurs as it approaches the rectilinear boundary. To identify the zone of decreasing contact stress concentration, the case of a stamp with an internal angle was studied. It contains a sector that includes the first two quadrants and part of the third quadrant on the plane. The fracture zone of the stamp boundary, called the inner corner, is the least dangerous, and safety increases as the stamp sector solution increases, as shown in the table. A further increase in the mortar sector of the stamp may lead to the opposite location of the gorge boundaries approaching parallel ones, which may lead to I.I. Vorovich resonances.

Keywords: contact problem, deformable stamps, reduced seismicity, stress concentration, mountainous territories.

Acknowledgements: The research was carried out with financial support of Russian Science Foundation, Kuban Science Foundation, regional project No. 24-11-20006.

For citation: Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Evdokimov V.S. About the zone of reduced seismic hazard in the transition from mountainous to flat terrain. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 63-72. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.10.001

Введение

Так же, как и в предыдущей статье [Бабешко и др., 2025], в настоящей работе проводится исследование состояния сейсмичности в области перехода горной территории в равнинную на основе механического подхода.

В выполняемых исследованиях авторы пытаются полнее изучить возможности механики деформируемого твердого тела, теории прочности и разрушения для выявления зон повышенной сейсмичности, отслеживая, уровни концентрации напряжений, возникающих в горных территориях. Это делается, следуя научным рекомендациям выдающихся ученых академиков Г.А. Гамбурцева [Гамбурцев, 1982] и М.А. Садовского [Садовский и др., 1987]. В данной работе, как и в указанной статье, применяется механико-математический подход, рекомендованный ими. Шаги, направленные на рассмотрение горных территорий, как штампов, лежащих на деформируемых основаниях, на базальтовой границе Конрада, предпринимались в ряде работ. Однако рассматривались простейшие случаи прямолинейных границ между грядой и равниной. Задачи в такой постановке сводятся к одномерным и решаются достаточно просто методом Винера-Хопфа. Они дают на границе, под горной грядой, концентрацию контактных напряжений вида $x^{-1/2}$. В механике – это зона ослабленной прочности. Авторы статьи, разработали метод решения двумерных интегральных уравнений Винера-Хопфа, который применили в работе [Бабешко и др., 2025] (рис. 1). Он позволил выявить зону повышенной сейсмичности в угловой точке штампа. Учитывая, что конфигурации расположения горных территорий обладают большим разнообразием, авторы применили метод к решению задачи, когда горный массив окаймляет равнинную территорию, оставляя нетронутой зону в виде тупого угла (рис. 2).

В результате изучения концентрации контактных напряжений вдоль границы штампа выяснилось, что на прямолинейных участках она описывается функцией $x^{-1/2}$, а в угловой точке имеет меньший показатель, снижающийся по мере роста раствора угла штампа. Если граница штампа перейдет из третьего квадранта системы координат в четвертый и продолжит увеличение раствора, то в угловой точке контактные напряжения снизятся.

Однако границы штампа приблизятся к параллельным, образуя ущелье. Этот вопрос изучен в статье [Бабешко и др., 2024], где показано, что при наличии периодических приливных колебаний, такое расположение горных массивов может побудить возникновение резонансов И.И. Воровича, то есть зона угла окажется сейсмоопасной. Этот результат установлен в работе.

Излагаемое исследование, по возможности, учитывает богатый спектр методов и подходов замечательных работ известных исследователей [Заалишвили и др., 2021; Чернов, 1989; Lu et al., 2007; Chernov et al., 2020; Xia et al., 2004, 2005; Scholz et al., 1973; Mitchell et al., 2013, 2015; Di Toro et al., 2011], успешно применявших глубокие механико-математические методы в геофизике и науках о Земле.

В частности, в работе [Заалишвили и др., 2021] впервые выявлены важные особенности поведения среды в нелинейной постановке. В настоящей работе развивается метод решения и исследования двумерного интегрального уравнения Винера-Хопфа, возникающего в анизотропной контактной задаче теории упругости [Ворович, Бабешко, 1979]. Этот подход основан на открывшейся возможности рассмотрения контактных задач с деформируемым штампом, что достигается применением блочных элементов, являющихся объектами дискретного топологического пространства. В настоящее время топологические методы проникают в разные направления науки и инженерной практики [Awrejcewicz et al., 2021; Athore et al., 2021; Fernandez et al., 2021; Gonçalves et al., 2020; Huang et al., 2020; Pena, Rapun, 2020; Xavier et al., 2020]. С учетом подхода в этой работе оказалось возможным

выявить в одном из типов зон горных территорий зоны пониженной сейсмичности на фоне общей, существующей достаточно высокой, связанные с приливными колебаниями.

Постановка задачи

Будем рассматривать линейно-упругую многослойную среду конечной толщины, на верхней границе которой расположен деформируемый штамп, занимающий область первого квадранта. Для учета приливного воздействия Луны, считается, что штамп гармонически вертикально колеблется с частотой ω по закону, описываемому функцией $e^{-i\omega t}$, которая, в дальнейшем, исключается из линейной системы, оставляя амплитудные функции. На верхней границе многослойной среды располагается декартова система координат с осью oz , направленной по нормали наружу, и остальными осями ox, oy , расположенными в касательной плоскости. Принимая во внимание возможность применения универсального метода моделирования, позволяющего представлять решения граничной задачи для деформируемого штампа из материала сложной реологии разложенными по решениям граничных задач для уравнений простых реологий, применим в дальнейшем этот подход. Опираясь на этот подход, будем считать, что материал деформируемого штампа, имитирующего горную гряду, описывается уравнением Гельмгольца, рассматриваемым в первом квадранте, а штамп действует на среду без трения. Для решения контактной задачи с деформируемым штампом, предварительно требуется построить решения граничной задачи для деформируемого штампа, а уже потом обращаться к построению интегрального уравнения контактной задачи.

Метод решения

Опуская решение граничной задачи для деформируемого штампа, достаточно подробно изложенное в [Бабешко и др., 2025], приходим к решению двумерного интегрального уравнения Винера-Хопфа вида:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}q &= \int_0^\infty \int_0^\infty k(x-\xi, y-\eta) q(\xi, \eta) d\xi d\eta = f(x, y), \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad 0 \leq y \leq \infty \\ k(x, y) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} K(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta, \quad Q(\alpha, \beta) = \int_0^\infty \int_0^\infty q(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta \\ F(\alpha, \beta) &= \int_0^\infty \int_0^\infty f(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta \end{aligned} \quad (1)$$

Решение уравнения (1), построенное в четверти плоскости, то есть для раствора сектора штампа $\nu = 90^\circ$, где ν – угол, измеряемый от оси ox против часовой стрелки, имеет вид (рис. 1):

$$\begin{aligned} q(x, y) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} Q(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta \\ Q(\alpha, \beta) &= K^{-1}F - \frac{1}{2} \left[K_{+\alpha}^{-1} \left\{ K_{-\alpha}^{-1} F \right\}_{-\alpha} + K_{+\beta}^{-1} \left\{ K_{-\beta}^{-1} F \right\}_{-\beta} + \right. \\ &\quad \left. + K_{+\alpha+\beta}^{-1} \left\{ K_{+\alpha-\beta}^{-1} \left\{ K_{-\alpha}^{-1} F \right\}_{+\alpha} \right\}_{-\beta} + K_{+\beta+\alpha}^{-1} \left\{ K_{+\beta-\alpha}^{-1} \left\{ K_{-\beta}^{-1} F \right\}_{+\beta} \right\}_{-\alpha} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

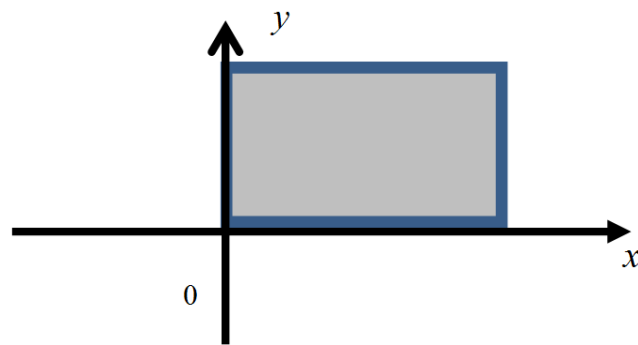


Рис. 1. Двумерное интегральное уравнение Винера-Хопфа описывает контактную задачу для штампа в форме первого квадранта /

Fig. 1. The two-dimensional Wiener-Hopf integral equation describes a contact problem for a stamp in the form of the first quadrant

Анализ построенного решения (2), после изучения, позволяет объяснить роль и свойство каждого его члена:

1). В решении, представленном формулой (2), первый справа член, после вычисления интеграла, формирует вырожденную составляющую решения, описывающую его поведение в зоне, дальней от границ четверти плоскости. Поэтому оно не содержит концентраций напряжений;

2). Второй и третий члены содержат граничные концентрации напряжений, возникающие на прямолинейных границах штампа, то есть на осях ox и oy . Они дают на прямолинейных границах штампа концентрации напряжений, описываемые функциями вида $x^{-1/2}$ и $y^{-1/2}$, хорошо известными в теории контактных задач;

3). Четвертый и пятый члены описывают концентрацию напряжений в угловой точке штампа. В работе [Бабешко и др., 2025] дан ее вид $q(x, y) = O(r^{-4})$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, то есть самая высокая концентрация напряжений.

В том случае, если сектор штампа увеличить, приняв $\nu = 180^\circ$, то границей штампа станет вся прямая ось ox и четвертый и пятый члены в формуле (2) исчезают. Возникает вопрос, имеются ли такие растворы секторов штампов, которые имеют концентрации контактных напряжений меньше, чем $x^{-1/2}$?

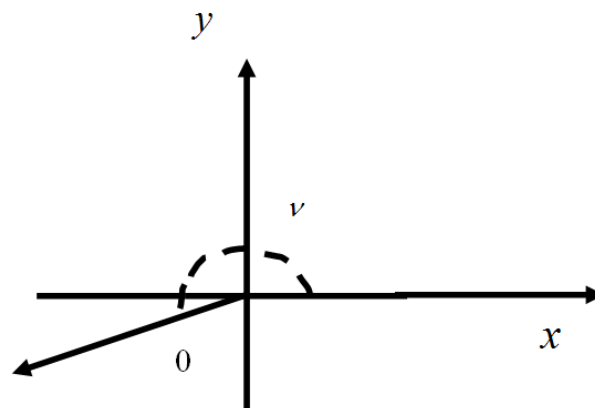


Рис. 2. Область, занятая штампом, с сектором тупого угла ν /

Fig. 2. The area occupied by the stamp, with a sector of an obtuse angle ν

В качестве пробных в работе рассматривались растворы секторов из диапазона $180^\circ \leq \nu \leq 270^\circ$ (рис. 2). Для исследования, рассматривались интегральные уравнения Винера-Хопфа в секторе раствора $\nu = 90^\circ$ (рис. 1) и взятые из сектора растворов с шагом $\nu = 10^\circ$ (рис. 2). Если было известно точное решение интегрального уравнения в первом секторе, то оно топологически гомеоморфно [Awrejcewicz et al., 2021; Athore et al., 2021; Fernandez et al., 2021; Goncalves et al., 2020; Huang et al., 2020; Pena, Rapun, 2020; Xavier et al., 2020] отображалось на секторы растворов $180^\circ \leq \nu \leq 270^\circ$. Это позволило построить точные решения интегрального уравнения в этих секторах $180^\circ \leq \nu \leq 270^\circ$ и вычислить концентрации напряжений по всей границе штампа. В результате исследования установлено, что на прямолинейных границах концентрация контактных напряжений описывается функциями $x^{-1/2}$ и $y^{-1/2}$, а в угловой точке для указанных значений параметра ν имеет значения, $q(x, y) = O(r^{-\lambda})$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, представленные в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Значения показателя концентрации контактных напряжений
в угловой точке штампа для растворов сектора штампа в градусах
с шагом $\nu = 10^\circ$ /**
**The values of the contact stress concentration index at the angular point
of the stamp for solutions of the stamp sector in degrees
increments**

ν°	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°
λ	0.5	0.46	0.422	0.385	0.349	0.317	0.290	0.268	0.254	0.25

Результат исследования

В процессе исследования, получено представление распределения контактных напряжений под деформируемым штампом для растворов сектора штампа $180^\circ \leq \nu \leq 270^\circ$. Установлено, что в приграничных зонах деформируемого штампа происходит, при приближении к прямолинейной границе, нарастание контактных напряжений до уровня, описываемого функциями $x^{-1/2}$ и $y^{-1/2}$. Для выявления зоны понижения концентрации контактных напряжений, изучен случай штампа с указанным внутренним тупым углом. Штамп имеет раствор сектора, в который входят на плоскости два первых квадранта и часть третьего. В зоне излома границы штампа контактные напряжения имеют концентрацию контактных напряжений, описываемую функцией $q(x, y) = O(r^{-\lambda})$, $\lambda < 1/2$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, то есть наименьшей на всей границе перехода горной территории в равнинную. Вычисленные данные параметра λ представлены в таблице. Таким образом, эта зона является наименее опасной (рис. 3).

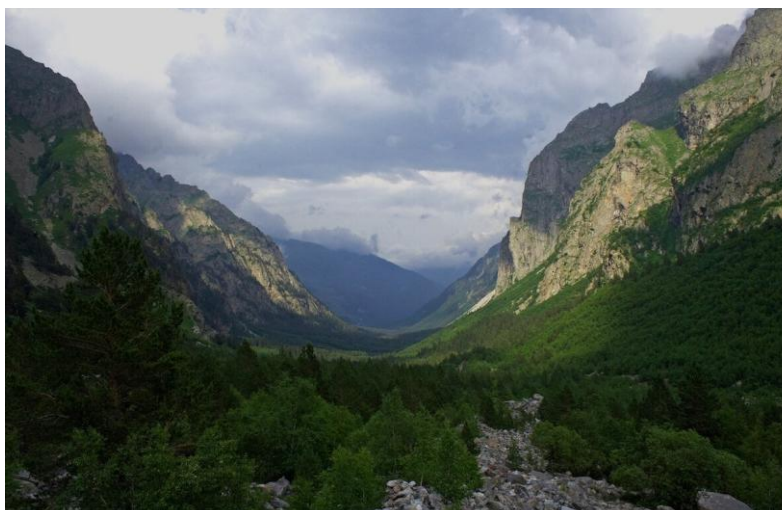


Рис. 3. Осетия. Цейское ущелье /

Fig. 3. Ossetia. Tsey'skoe Gorge

Безопасность увеличивается по мере увеличения раствора сектора штампа, как представлено в таблице. Дальнейшее увеличение раствора сектора штампа может привести к встречному расположению границ ущелья, приближающемуся к параллельному [Бабешко и др., 2024]. Это может привести к резонансам И.И. Воровича и усугубить ситуацию.

Выводы

Разработанный метод решения двумерных интегральных уравнений Винера-Хопфа позволяет выявлять, при переходе горной территории в равнинную, как зоны повышенной сейсмической опасности, так и зоны пониженной. Они находятся в концах ущелий, берега которых формируют тупой угол (рис. 3).

Литература

1. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Евдокимов В.С., Зарецкая М.В., Хрипков Д.В. О предвестнике повышенной сейсмичности в области перехода горной территории в равнинную. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 1. – С. 45–55. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.51.004.
2. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Уафа С.Б., Лозовой В.В., Евдокимов В.С. О предвестнике землетрясения в сейсмоопасной горной территории. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 33–44. DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003.
3. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. – 320 с.
4. Гамбурцев Г.А. Перспективный план исследований по проблеме «Изыскание и развитие прогноза землетрясений». // В сборнике: Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике. М.: Наука, 1982. – С. 304–311.
5. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 4. – С. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006.
6. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. – 104 с.
7. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической оценки территории. Ташкент: Фан, 1989. – 296 с.

8. Arhore E.G., Yasaei M., Dayyani I. Comparison of GA and topology optimization of adherend for adhesively bonded metal composite joints. // *International Journal of Solids and Structures*. – 2021. – Vols. 226–227. Art. No. 11107. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111078.
9. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Mitskievich S.A., Zhigalov M.V., Krysko A.V. Nonlinear dynamics of heterogeneous shells. Part 1: Statics and dynamics of heterogeneous variable stiffness shells. // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2021. – Vol. 130. Art. No. 103669. DOI: 10.1016/j.jnlnonlinmec.2021.103669.
10. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Yu. 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*. – 2020. – Vol. 56. No. 5. – pp. 644–655. DOI: 10.1134/S1069351320050018.
11. Di Toro G., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M., Shimamoto T. Fault lubrication during earthquake. // *Nature*. – 2011. – Vol. 471. Issue 7339. – pp. 494–498. DOI: 10.1038/nature09838.
12. Fernandez L., Novotny A.A., Prakash R., Sokołowski J. Pollution sources reconstruction based on the topological derivative method. // *Applied Mathematics and Optimization*. – 2021. – Vol. 84. – pp. 1493–152. DOI: 10.1007/s00245-020-09685-0.
13. Gonçalves J.F., Moreira J.B.D., Salas R.A. et al. Identification problem of acoustic media in the frequency domain based on the topology optimization method. // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2020. – Vol. 62. – pp. 1041–1059. DOI: 10.1007/s00158-020-02638-9.
14. Huang M., Lim X., Lei Y., Gu J. Structural damage identification based on modal frequency strain energy assurance criterion and flexibility using enhanced Moth-Flame optimization. // *Structures*. – 2020. – Vol. 28. – pp. 1119–1136. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.085.
15. Lu X., Lapusta N., Rosakis A.J. Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes. // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2007. – Vol. 104. Issue 48. – pp. 18931–18936.
16. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Frictional properties of gabbro at conditions corresponding to slow slip events in subduction zones. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2015. – Vol. 16. – pp. 4006–4020.
17. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Temperature dependence of frictional healing of westerly granite: Experimental observations and numerical Simulations. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2013. – Vol. 14. – pp. 567–582.
18. Pena M., Rapun M.L. Application of the topological derivation to post-processing infrared time-harmonic thermograms for defect detection. // *Journal of Mathematics in Industry*. – 2020. – Vol. 10. DOI: 10.1186/s13362-020-0072-9.
19. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis. // *Science*. – 1973. – Vol. 181. No. 4102. – pp. 803–810.
20. Xavier M., Van Goethem N., Novotny A.A. Hydro-mechanical fracture modeling governed by the topological derivatives. // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2020. – Vol. 365. Art. No. 112974. DOI: 10.1016/j.cma.2020.112974.
21. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H. Laboratory Earthquakes: The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition. // *Science*. – 2004. – Vol. 303. – pp. 1859–1861.
22. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H., Rice J.R. Laboratory Earthquakes along Inhomogeneous Faults: Directionality and Supershear. // *Science*. – 2005. – Vol. 308. – pp. 681–684.

References

1. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Evdokimov V.S., Zaretskaya M.V., Khripkov D.V. About the precursor of increased seismicity in the area of transition of the mountainous territory to the plain. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 54–55. DOI: 10.46698/VNC.2025.25.51.004. (In Russ.)

2. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Uafa S.B., Lozovoy V.V., Evdokimov V.S. About earthquake precursors in an earthquake-prone mountainous area. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024 Vol. 14. No. 2. pp. 33–44 DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003. (In Russ.)
3. Vorovich I.I., Babeshko V.A. Dynamic mixed problems of elasticity theory for non-classical domains. Moscow. Nauka. 1979. 320 p. (In Russ.)
4. Gamburtsev G.A. Perspective plan of research on the problem Research and Development of Earthquake Forecast. In: Development of G.A. Gamburtsev's ideas in geophysics. Moscow. Nauka. 1982. pp. 304–311. (In Russ.)
5. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I. Nonlinear vibrations of the ground layer according to instrumental and numerical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 70–82. DOI: 9.46698/VNC.2021.77.59.006. (In Russ.)
6. Sadovsky M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. Deformation of the geophysical environment and the seismic process. Moscow. Nauka. 1987. 104 p. (In Russ.)
7. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantitative seismic assessment of the territory. Tashkent. Fan. 1989. 296 p. (In Russ.)
8. Arhore E.G., Yasaee M., Dayyani I. Comparison of GA and topology optimization of adherend for adhesively bonded metal composite joints. *International Journal of Solids and Structures*. 2021. Vols. 226–227. Art. No. 11107. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111078.
9. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Mitskievich S.A., Zhigalov M.V., Krysko A.V. Nonlinear dynamics of heterogeneous shells. Part 1: Statics and dynamics of heterogeneous variable stiffness shells. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2021. Vol. 130. Art. No. 103669. DOI: 10.1016/j.nonlinmec.2021.103669.
10. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Yu. 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*. 2020. Vol. 56. No. 5. pp. 644–655. DOI: 10.1134/S1069351320050018.
11. Di Toro G., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M., Shimamoto T. Fault lubrication during earthquake. *Nature*. 2011. Vol. 471. Issue 7339. pp. 494–498. DOI: 10.1038/nature09838.
12. Fernandez L., Novotny A.A., Prakash R., Sokołowski J. Pollution sources reconstruction based on the topological derivative method. *Applied Mathematics and Optimization*. 2021. Vol. 84. pp. 1493–152. DOI: 10.1007/s00245-020-09685-0.
13. Gonçalves J.F., Moreira J.B.D., Salas R.A. et al. Identification problem of acoustic media in the frequency domain based on the topology optimization method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020. Vol. 62. pp. 1041–1059. DOI: 10.1007/s00158-020-02638-9.
14. Huang M., Lim X., Lei Y., Gu J. Structural damage identification based on modal frequency strain energy assurance criterion and flexibility using enhanced Moth-Flame optimization. *Structures*. 2020. Vol. 28. pp. 1119–1136. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.085.
15. Lu X., Lapusta N., Rosakis A.J. Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2007. Vol. 104. Issue 48. pp. 18931–18936.
16. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Frictional properties of gabbro at conditions corresponding to slow slip events in subduction zones. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2015. Vol. 16. pp. 4006–4020.
17. Mitchell E., Fialko Y., Brown K. Temperature dependence of frictional healing of westerly granite: Experimental observations and numerical Simulations. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2013. Vol. 14. pp. 567–582.
18. Pena M., Rapun M.L. Application of the topological derivation to post-processing infrared time-harmonic thermograms for defect detection. *Journal of Mathematics in Industry*. 2020. Vol. 10. DOI: 10.1186/s13362-020-0072-9.

19. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: a physical basis. *Science*. 1973. Vol. 181. No. 4102. pp. 803–810.
20. Xavier M., Van Goethem N., Novotny A.A. Hydro-mechanical fracture modeling governed by the topological derivatives. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020. Vol. 365. Art. No. 112974. DOI: 10.1016/j.cma.2020.112974.
21. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H. Laboratory Earthquakes: The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition. *Science*. 2004. Vol. 303. pp. 1859–1861.
22. Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H., Rice J.R. Laboratory Earthquakes along Inhomogeneous Faults: Directionality and Supershear. *Science*. 2005. Vol. 308. pp. 681–684.