

УДК 539.3

К МЕТОДАМ ИССЛЕДОВАНИЯ БЛОЧНЫХ ЛИТОСФЕРНЫХ СТРУКТУР

Мухин А. С., Павлова А. В., Телятников И. С.

TO THE RESEARCH METHODS OF BLOCK LITHOSPHERIC STRUCTURES

Mukhin A.S. *, Pavlova A.V. *, Telyatnikov S.I. **

* Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia

** Southern Scientific Center RAS, Rostov-on-Don, 344006, Russia

e-mail: kmm@fpm.kubsu.ru

Abstract. The Kuban State University and the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences are developing a new mechanical concept of seismic prediction, based on the analysis of possible mechanisms of lithospheric plate destruction in the contact zones or near fault boundaries. The differential factorization method and the block element method in combination with topological methods, made it possible to considerably simplify the algorithm for solving boundary problems for block structures.

However, the development of a mathematical apparatus for studying the stress-strain state of lithospheric structures, taking into account the complex structure of the geological environment, requires the development of reliable methods for fault diagnostics (locating them and, if possible, determining the type of contact between lithospheric structures in the areas of their interface), and this problem can only be solved with the involvement of experimental methods.

The paper describes one of the experimental methods, as well as the analysis of the geophysical data obtained as a result of using this method, which can serve to create a block structure model of the lithospheric plates in the region, taking into account the real conditions. The purpose of the experiments was to measure the inclination of the earth's surface and to detect patterns linking the inclination of individual sections of the earth's surface and changes in the structure of the earth's crust at distances exceeding the dimensions of individual blocks (i.e., in the far zone). The zones of the structure change were determined by the coordinates of seismic events at the block boundaries in the far zone from the location of the tiltmeter.

The results of the study allow us to conclude that a decrease in the rate of change of the inclination of the Earth's surface in the far zone from seismic regions is accompanied by an increase in the likelihood of an earthquake in these areas. Thus, the tiltmeter, being in the far zone from the boundaries of the block, is able to react to the interactions between conjugated blocks and the change in the stress-strain state at its boundaries. On the basis of the revealed regularity, a model of the corresponding block structure of the Earth's crust for the region can be proposed, linking the presence of structural boundaries with the change in the inclination of the lithospheric plate section in the far zone.

Keywords: block element method, fault diagnostics, block structure of the Earth's crust, experimental studies with a tiltmeter.

Введение

Бурное развитие технических средств наблюдательной сейсмологии, разработка инструментальной базы измерения показате-

лей динамики геологических структур (высокоточные наклонометры, GPS/GLONAS приемники, высокопроизводительные станции обработки цифровой информации) позволяет существенно увеличить объем регистри-

Мухин Алексей Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра прогнозирования и предупреждения геоэкологических и техногенных катастроф Кубанского государственного университета; e-mail: muhin@mail.kubsu.ru.

Павлова Алла Владимировна, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: pavlova@math.kubsu.ru.

Телятников Илья Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник лаборатории прикладной математики и механики ЮНЦ РАН; e-mail: ilux_t@list.ru.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Администрации Краснодарского края 16-41-230184р_а.

руемых данных о происходящих сейсмических событиях. Однако для прогнозирования развития сейсмической ситуации необходимо учитывать множественные внешние факторы, оказывающие влияние на напряжённо-деформированное состояние литосферных плит, что значительно затрудняет решение данной проблемы.

В Кубанском госуниверситете и Южном научном центре РАН развивается новая механическая концепция прогноза сейсмической активности, основанная на анализе возможных механизмов разрушения литосферных плит в зонах контакта или у границ разломов. Положения этой концепции, опубликованные в многочисленных работах, представленные на научных мероприятиях, а также на сайте программы Еврокомиссии «EPOS» [1], требуют для своей реализации глубокого математического анализа сложных механических процессов взаимодействия литосферных плит. Однако развитие математического аппарата для исследования напряженно-деформированного состояния структур литосферы с учетом сложного строения геологической среды нуждается в разработке надежных методов диагностики разломов (определения местонахождения и, по возможности, типа контакта литосферных структур в областях их сопряжения).

В настоящей работе описан один из экспериментальных методов (с использованием наклономера) исследования коровых структур, а также анализ полученных в результате использования этого метода геофизических данных, которые могут служить для создания модели блочных структур литосферных плит региона с учетом реальных условий.

1. Метод блочного элемента

Метод блочного элемента и факторизационные методы в совокупности с топологическим подходом существенно упрощают алгоритм решения краевых задач для блочных структур. В соответствии с идеей метода блочного элемента система составляющих блочной структуры рассматривается в качестве покрытия топологического пространства. При этом метод позволяет осуществлять сопряжение самих блоков и вектор-функций на блоках-носителях путем топологической склейки [2–4].

Пусть Ω — область, занимаемая всей блочной структурой, разбита на выпуклые подоб-

ласти Ω_l с границами $\partial\Omega_l$ ($l = \overline{1, L}$). Применительно к общей граничной задаче, описывающей взаимодействие L фрагментов разнотипных блоков [2–5], алгоритм метода включает следующие шаги. Первый шаг состоит в построении системы функциональных уравнений

$$\mathbf{K}_l(\alpha^\nu) \varphi_l(\alpha^\nu) = \iint_{\partial\Omega_l} \omega_l^\nu - \mathbf{G}_l(\alpha^\nu),$$

$$\varphi_l(\alpha^\nu) = \mathbf{V}_3 \mathbf{u}_l^\nu,$$

где полиномиальная матрица-функция $\mathbf{K}_l(\alpha^\nu) = \|k_{lmn}(\alpha^\nu)\|$, $\alpha^\nu = \{\alpha_i^\nu\}$, $i = \overline{1, 3}$, имеет порядок P в ν -й локальной системе координат, $\varphi_l = \mathbf{V}_3 \varphi_l$, $\mathbf{G}_l = \mathbf{V}_3 \mathbf{g}_l$, \mathbf{V}_3 — оператор трехмерного интегрального преобразования Фурье, отыскиваемое решение $\varphi_l(\mathbf{x}) = \{\varphi_{il}\}$, заданные вектор-функции \mathbf{g}_l , принадлежащие некоторому пространству медленно растущих функций $\mathbf{H}_s(\Omega)$.

Здесь компонентами вектора внешних форм ω_l^ν являются значения на границе $\partial\Omega_l$ искомого решения φ , а также его нормальных производных (как неизвестных, так и описываемых граничными условиями) на внешних границах и границах контакта блоков

$$\partial\Omega_{lm} = \partial\Omega_l \cap \partial\Omega_m, \quad l, m = \overline{1, L}.$$

Затем производится факторизация коэффициентов функциональных уравнений по параметру α_3^ν

$$\mathbf{K}_l = \mathbf{K}_{l+}(\alpha_3^\nu) \mathbf{K}_{l-}(\alpha_3^\nu),$$

$$\mathbf{K}_{l-}(\alpha_3^\nu) \varphi_l = \mathbf{K}_{l+}^{-1}(\alpha_3^\nu) \left[\iint_{\partial\Omega_l} \omega_l^\nu - \mathbf{G}_l \right].$$

Вычисление формы-вычета Лере позволяет построить систему псевдодифференциальных уравнений

$$\lim_{\alpha_3^\nu \rightarrow z_{lj-}^\nu} \mathbf{K}_{l+}^{-1}(\alpha_3^\nu) \left[\iint_{\partial\Omega_l} \omega_l^\nu - \mathbf{G}_l(\alpha_3^\nu) \right] \times (\alpha_3^\nu - z_{lj-}^\nu) = 0,$$

$$lj- = \overline{1, \tilde{N}_-},$$

z_{lj-}^ν — нули $\det \mathbf{K}_l(\alpha_3^\nu)$, ($\text{Im } z_{lj-}^\nu < 0$), из которой выводится система интегральных уравнений граничной задачи. Общее решение по-

следней можно представить в следующем виде:

$$\varphi_l^\nu \approx V_3^{-1} \left(\mathbf{K}_l^{-1}(\alpha^\nu) \iint_{\partial\Omega_l} \omega_l^\nu \right), \quad l = n, p,$$

где $l = p$, если $(x_1^\nu, x_2^\nu) \in \partial\Omega_{p\nu}$, $l = n$ при $(x_1^\nu, x_2^\nu) \in \partial\Omega_{n\nu}$. Причем, для неконтактирующих участков границ $0 \leq \nu \leq P_{\Omega, n}$, для контактирующих — $1 \leq \nu \leq P_1 + P_2$, P_1 , P_2 — числа разбиений единицы соответственно для неконтактирующего и контактирующего участков границы $\partial\Omega_{p\nu}$ [2].

Самостоятельный интерес представляет случай разноразмерной блочной структуры, описывающей, например, двумерные пластины с разломами на поверхности трехмерного основания [5]. В работах [6–8] с помощью метода блочного элемента изучались задачи для упругих сред с покрытиями, на основе теории скрытых дефектов исследовалась возможность возникновения стартовых землетрясений при воздействии на лежащие на деформируемом основании литосферные плиты. В [9] описан подход к моделированию взаимодействия разнотипных литосферных структур, имеющих прямолинейные разломы, на базе модификации метода собственных функций с применением метода блочного элемента.

Однако для практического применения указанных методов необходимо определить истинные параметры блоковой структуры, т. е. размеры ее составляющих и их физико-механические свойства, а эта проблема может быть решена только с привлечением экспериментальных методов.

2. Экспериментальные исследования литосферных структур с использованием наклономера

По современным представлениям очаговая зона подготовки землетрясения формируется в области сопряжения блоков литосферной структуры, так называемого зацепления. При деформации блоков в этой зоне без существенных смещений накапливается потенциальная энергия. Таким образом, в зоне контакта блоков велика вероятность магистрального разрыва, т. е. землетрясения [10].

На сегодняшний день высокоточные GPS приемники могут регистрировать разнонаправленные движения поверхностей лито-

сферных плит (как отдельной литосферной плиты, так и одной из плит относительно другой) с точностью до миллиметров [11], такого рода наблюдения ведутся и в России, и за рубежом. Результаты проводимых с помощью геодезического оборудования измерений горизонтальных и вертикальных движений земной поверхности, связанных с тектоническими деформациями коры, указывают на изменение наклона земной поверхности [10, 12]. В Кубанском государственном университете измерения наклона поверхности земли проводятся с 2003 г.

Цель проведенных экспериментов заключалась в измерении наклона поверхности земли и обнаружении закономерностей, связывающих наклон отдельных участков земной поверхности и изменение структуры земной коры на превышающих размеры отдельных блоков расстояниях (т. е. в дальней зоне). Зоны изменения структуры определялись по координатам имевших место на границах блока сейсмических событий в дальней зоне от места установки наклономера.

При проведении экспериментов использовались аналоговый наклономер системы Гріднева, точность измерения которого составляет 0,001 угловой секунды, и регистратор сейсмических сигналов SDAS [13] (произведен в г. Обнинск, Россия). Наклономер установлен на постаменте сейсмической лаборатории КубГУ и используется для измерения наклона поверхности земли в двух направлениях: север–юг и восток–запад. При начальной установке показания наклономера приняты равными нулю. С выхода наклономера аналоговый сигнал поступает на вход регистратора сейсмических сигналов, где подвергается оцифровке и сохраняется в памяти прибора. Оцифрованные данные из памяти регистратора поступают на компьютер обработки в реальном режиме времени, где они очищаются от явных помех. Частота оцифровки регистратором показаний наклономера соответствует 1 Гц.

Кроме того, в сейсмической лаборатории КубГУ осуществляется регистрация сейсмических событий при помощи широкополосной цифровой сейсмостанции SDAS v. 3.0, а также определяются их основные характеристики. Цифровая сейсмостанция имеет следующую комплектацию: блок сбора и выделения сейсмического сигнала; система точного времени GPS; система архивации и обработ-

число землетрясений за время работы наклономера в период 2003–2007 гг. и 2010 г. составило 83. Даты землетрясений, магнитуда которых превышала 2,2 по шкале Рихтера, произошедших в рассматриваемый период, вынесены на векторную диаграмму (рис. 1).

В качестве характерной особенности наклона земной поверхности в направлении восток–запад (в сторону запада) можно отметить постепенное уменьшение размаха годовых колебаний при сохранении величины линейного тренда. Поскольку изменение наклона поверхности земли отражает тектонические перемещения, то можно предположить, что замедление этого процесса говорит о переходе энергии движения блоков Земной коры из кинетической в потенциальную или в энергию разрушения породы, соответствующую увеличению напряжения в зонах разломов.

Особого внимания заслуживает участок векторной диаграммы, отражающий данные измерений за 2003–2004 гг. В сравнении с последующим периодом амплитуды изменения наклона за этот промежуток были достаточно велики. В 2003–2004 гг. сейсмические события имели место в те временные промежутки, когда процесс изменения наклона резко замедлялся. Образно говоря, изменение наклона как бы «буксует» вокруг небольшой области на диаграмме.

На векторной диаграмме (рис. 1) явно прослеживается закономерность: увеличение вероятности возникновения землетрясения сопровождается уменьшением скорости изменения наклона поверхности земли.

Следует заметить, что вызванное изменениями структуры очаговой области изменение наклона поверхности земли может регистрироваться в зоне, превышающей размеры дилатантной неоднородности более, чем в 50 раз [15]. Зависимость радиуса зоны возможной регистрации изменения наклона поверхности земли, вызванного изменениями в дилатантной области, от магнитуды (M) будущего сейсмического события может быть представлена [15] в виде

$$R_{\varepsilon} = 10^{0,414M} \text{ км.}$$

Эпицентры всех землетрясений, проанализированных в данной работе, находились на расстояниях, превышающих R_{ε} , от точки измерения наклона земной поверхности, что исключает влияние дилатантной области на

изменение наклона поверхности земли. Т.е. можно говорить о проведении измерений в дальней зоне. При этом обнаруживается, что зарегистрированные в дальней зоне от сейсмоопасных областей уменьшения скорости изменения наклона сопровождаются землетрясениями в этих областях. В данном случае можно предположить, что действующие на совокупность литосферных блоков усилия расходятся на разрушение зоны их сопряжения (дилатантной зоны), как следствие — наклон участка литосферной плиты в дальней зоне будет изменяться незначительно. А затраченная на разуплотнение (разрушение) породы энергия приведет с течением времени к образованию магистрального разрыва в этой зоне, сопровождающемуся землетрясением. После сейсмического события скорости изменения наклона поверхности земли возвращаются к прежним значениям.

В среде MATLAB реализована программа, отражающая обнаруженную закономерность, позволяющую диагностировать области сопряжения литосферных структур в дальней зоне. В процессе обработки данных, полученных за период 2003–2007 гг. и 2010 г., программой анализировалась скорость изменения наклона поверхности земли и в случае уменьшения ее ниже некоторого уровня выдавалось прогностическое предупреждение в виде изменения цвета на векторной диаграмме. Предельные значения скорости (предельный уровень) определялись по данным диаграммы (рис. 1) экспериментально. Выбор предельного уровня диктовался выполнением следующего условия: при достижении скоростью изменения наклона данного уровня (и ниже), вероятность возникновения сейсмического события была наибольшей. Исходя из анализа имеющихся данных (рис. 1), в качестве предельной была определена скорость 0,005 угловой секунды в час. Наибольшая же скорость изменения наклона поверхности земли за период с 24.01.2003 г. по 28.02.2007 г. и далее с 26.03.2010 по 05.10.2010 г. равнялась 0,0274 угловой секунды в час.

Векторная диаграмма наклона поверхности земли после ее обработки приведена на рис. 2. Замедление скорости на диаграмме отражено утолщением линии, звездочки указывают на произошедшие сейсмические события. Рис. 2 иллюстрирует тот факт, что замедление изменения наклона за период 2003–2004 гг. сопровождается землетрясениями.

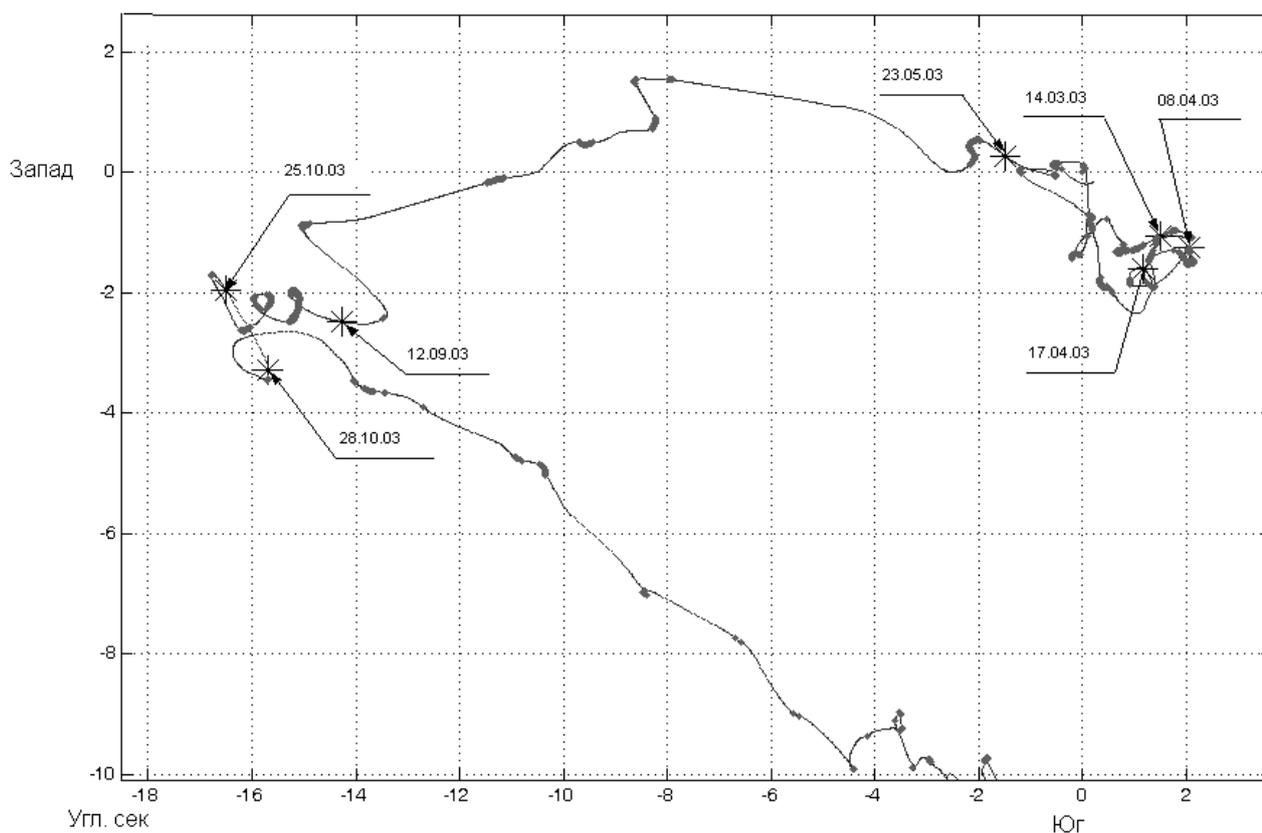


Рис. 2. Векторная диаграмма наклона поверхности земли (указаны интервалы уменьшения скорости ниже предельного уровня) по данным 2003 г.

Начиная с 2005 г., отмечалось общее замедление изменения наклона поверхности земли, сопровождающееся увеличением числа сейсмических событий, что нашло отражение на диаграмме за период 2005–2007 гг. (рис. 3). Та же тенденция характерна для 2010 г.

Поскольку исходная векторная диаграмма (рис. 1) характеризуется большой изрезанностью, при анализе на скорость изменения наклона данные подверглись усреднению скользящим окном длительностью 5 суток. Однако при рассмотрении медленных сейсмических движений, совершающихся относительно необратимых деформаций, необходимы дополнительные исследования, в этом случае окно усреднения не должно превышать нескольких часов. Кроме того, поскольку вероятность возникновения сейсмического события по любому известному прогностическому признаку не превышает 0,5 [16], можно говорить об использовании данных наклона земной поверхности для определения блоковых границ литосферных структур как сейсмогенерирующих элементов только в

комплексном использовании с другими экспериментальными диагностическими методами.

Заключение

Таким образом, в работе представлен подход к моделированию протекающих в коре Земли механических процессов, базирующийся на исследовании механизмов разрушения литосферных структур в зонах контакта или у границ разломов, теоретическую основу которого составляет метод блочного элемента. Описан один из экспериментальных методов диагностики разломов.

Результаты экспериментального исследования позволяют сделать вывод, что уменьшение скорости изменения наклона поверхности Земли в дальней зоне от сейсмоопасных областей сопровождается увеличением вероятности возникновения землетрясения в указанных областях. Таким образом, наклонномер, установленный в дальней зоне от границ блока, способен реагировать на изменение напряженно-деформированного состояния на границах сопряженных блоков. На ос-

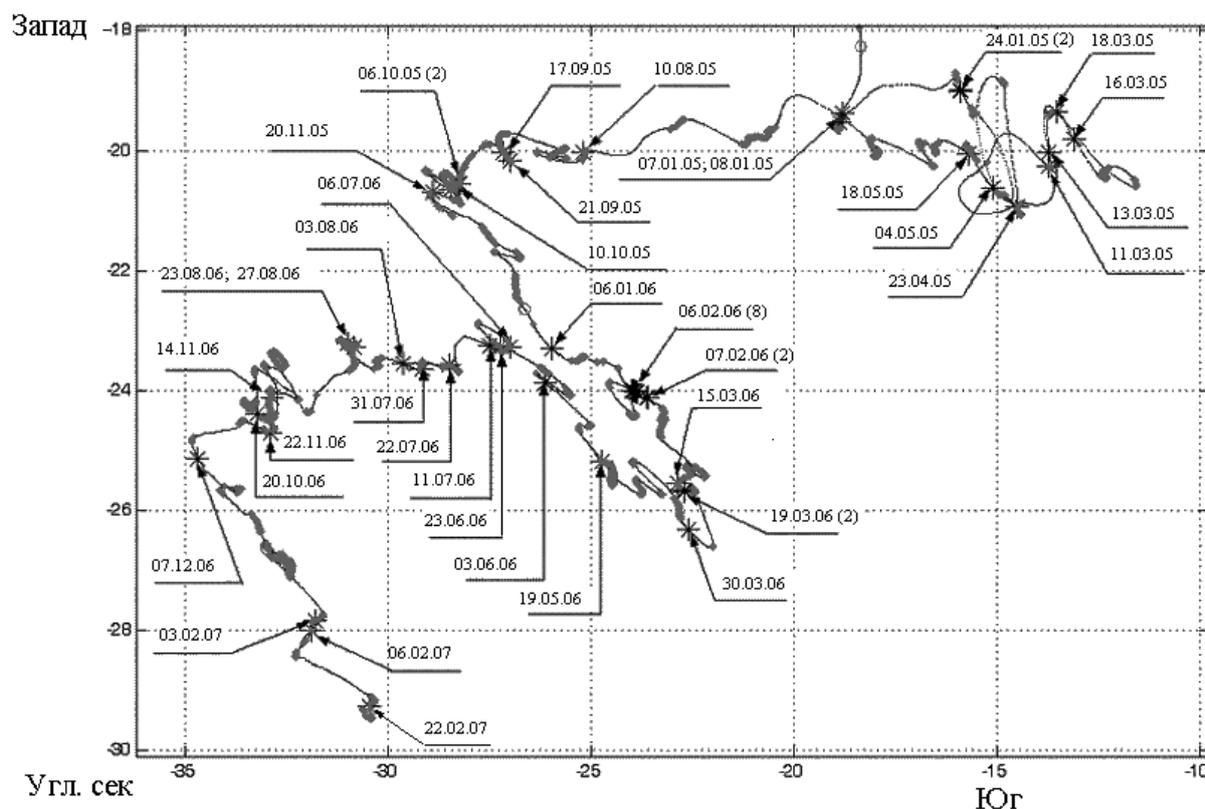


Рис. 3. Векторная диаграмма наклона поверхности земли (указаны интервалы уменьшения скорости ниже предельного уровня) по данным 2005–2007 гг.

новании выявленной закономерности может быть предложена модель соответствующей блочной структуры коры Земли для региона, связывающая наличие структурных границ с изменением наклона участка литосферной плиты в дальней зоне.

Литература

1. Babeshko V. Joint use center for vibroseismic sources // Proc. of 7th Framework Programme of the European Community for research, technological development and demonstration activities. URL: http://rp7.ffg.at/eu-russian_opendays (дата обращения 10.03.2017).
2. Бабешко В.А., Бабешко О.М., Евдокимова О.В., Зарецкая М.В., Павлова А.В. Дифференциальный метод факторизации для блочной структуры // ДАН. 2009. Т. 424, № 1. С. 36–39.
3. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Некоторые общие свойства блочных элементов // ДАН. 2012. Т. 442, № 1. С. 37–40.
4. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Топологический метод решения граничных задач и блочные элементы // ДАН. 2013. Т. 449, № 6. С. 657–660.
5. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Об особенностях скрытых дефектов в разнотипных тонкостенных покрытиях // ДАН. 2015. Т. 460, № 4. С. 403–407.
6. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. К проблеме физико-механического предвестника стартового землетрясения: место, время, интенсивность // ДАН. 2016. Т. 466, № 6. С. 664–669.
7. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. О свойствах стартовых землетрясений // ДАН. 2016. Т. 467, № 5. С. 530–533.
8. Бабешко В.А., Бабешко О.М., Евдокимова О.В. Скрытые дефекты и теория стартовых землетрясений при горизонтальных воздействиях // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2016. № 3. С. 7–11.
9. Телятников И.С. К моделям и методам изучения взаимодействия литосферных структур в области разломов // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2016. № 2. С. 78–89.
10. Никонов А.А. Землетрясения. Прошлое, современность, прогноз. М.: Знание, 1984. 192 с.
11. Илюхин С.Р., Шестопалов В.Л. Исследования

- ние геодинамики региона Крым – Западный Кавказ методами GPS-измерений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2007. № 3. С. 9–17.
12. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 104 с.
 13. Бабешко В.А., Александров Б.Л., Гортинская В.В., Мухин А.С. Патент на изобретение № 2184842. Способ разработки нефтяной залежи. Приоритет от 08.06.2000 г.
 14. Мухин А.С., Чмышалов С.П. Исследование сейсмических данных, регистрируемых сейсмологической лабораторией Кубанского государственного университета // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2005. Прил. № 1. С. 56–63.
 15. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 224 с.
 16. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основа, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
- ### References
1. Babeshko V. Joint use center for vibroseismic sources. *Proc. of 7th Framework Programme of the European Community for research, technological development and demonstration activities*. URL: http://rp7.ffg.at/eu-russian_opendays (Access date 10.03.2017).
 2. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Zaretskaya M.V., Pavlova A.V. Differential'nyj metod faktorizacii dlja blochnoj struktury [The differential factorization method for a block structure]. *Doklady Akdemii nauk* [Rep. of Academy of Sciences], 2009, vol. 424, no. 1, pp. 36–39. (In Russian).
 3. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Nekotorye obshhie svoystva blochnyh jelementov [Certain general properties of block elements]. *Doklady Akdemii nauk* [Rep. of Academy of Sciences], 2012, vol. 442, no. 1, pp. 37–40. (In Russian).
 4. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Topologicheskii metod pesheniya granichnykh zadach i blochnye element [A topological method for solving boundary value problems and block elements]. *Doklady Akdemii nauk* [Rep. of Academy of Sciences], 2013, vol. 449, no. 6, pp. 657–660. (In Russian)
 5. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Ob osobennostyah skrytyh defektov v raznotipnykh tonkostennykh pokrytijah [On the features of hidden defects in various types of thin-walled coatings]. *Doklady Akdemii nauk* [Rep. of Academy of Sciences], 2015, vol. 460, no. 4, pp. 403–407. (In Russian)
 6. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. K probleme fiziko-mehaničeskogo predvestnika startovogo zemletrjasenija: mesto, vremja, intensivnost' [To the problem of the physico-mechanical forerunner of the initial earthquake: place, time, intensity]. *Doklady Akdemii nauk* [Rep. of Academy of Sciences], 2016, vol. 466, no. 6, pp. 664–669. (In Russian)
 7. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. O svoystvah startovyh zemletrjasenij [About properties of starting earthquakes]. *Doklady Akdemii nauk* [Rep. of Academy of Sciences], 2016, vol. 467, no. 5, pp. 530–533. (In Russian)
 8. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Skrytye defekty i teorija startovyh zemletrjasenij pri gorizontaľnyh vozdeistvijah [Hidden defects and the theory of the starting earthquakes for the horizontal actions]. *Ecologičeskii vestnik nauchnykh centrov Chernomorskogo ekonomičeskogo sotrudničestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2016, no. 3, pp. 7–11. (In Russian)
 9. Telyatnikov I.S. K modeljam i metodam izuchenija vzaimodejstviya litosfernyh struktur v oblasti razlomov [To models and methods of studying the interactions of lithospheric structures in the area of the faults]. *Ecologičeskii vestnik nauchnykh centrov Chernomorskogo ekonomičeskogo sotrudničestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2016, no. 2, pp. 78–89. (In Russian)
 10. Nikonov A.A. *Zemletrjasenija. Proshloe, sovremennoost', prognoz* [Earthquakes. Past, Present, Forecast]. Moscow, Knowledge Pub, 1984. 192 p. (In Russian)
 11. Iljuhin S.R., Shestopalov V.L. Issledovanie geodinamiki regiona Krym – Zapadnyj Kavkaz metodami GPS-izmerenij [Study of geodynamics of the Crimea-Western Caucasus region using GPS measurements]. *Izvestija vysshih učebnyh zavedenij. Geodezija i ajerofotos#emka* [News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography], 2007, no. 3, pp. 9–17. (In Russian)
 12. Sadovskij M.A., Bolhovitinov L.G., Pisarenko V.F. *Deformirovanie geofizičeskoi sredy i sejsmičeskij process* [Deformation of the geophysical environment and seismic process]. Moscow, Nauka Pub., 1987, 104 p. (In Russian)
 13. Babeshko V.A., Aleksandrov B.L., Gortinskaja V.V., Mulin A.S. *Patent № 2184842. Sposob razrabotki neftjanov zalezhi* [Method of developing the oil deposit]. Prioritet 08.06.2000.
 14. Mulin A.S., Chmyhalov S.P. Issledovanie sejsmičeskikh dannyh, registriruemyh sejs-

- mologicheskoy laboratoriej Kubanskogo gosudarstvennogo universiteta [Investigation of seismic data recorded by the seismological laboratory of the Kuban State University]. *Ecologicheskii vestnik nauchnykh centrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2005, addendum no. 1, pp. 56–63. (In Russian)
15. Dobrovol'skij I.P. *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletrjasenija* [The theory of preparation of a tectonic earthquake]. Moscow. IFZ AN SSSR. 1991. 224 p. (In Russian)
16. Zav'jalov A.D. *Srednesrochnyj prognoz zemletrjasenij: osnova, metodika, realizacija* [Medium-term earthquake prediction: basis, methodology, implementation]. Moscow, Nauka Pub., 2006, 254 p. (In Russian)

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2017

© Мухин А. С., Павлова А. В., Телятников И. С., 2017

Статья поступила 27 марта 2017 г.