ВЕСТНИК ЮЖНОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН, Том 2, № 2, 2006, стр. 42–45

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 539.3 + 550.34

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМЛИ В АРИДНЫХ ЗОНАХ ЮГА РОССИИ

© 2006 г. Академик В.А. Бабешко[1], В.В. Лозовой[2], С.В. Ратнер[2], П.В. Сыромятников[2], А.Г. Федоренко[3]

Представлены результаты разработки новых математических методов, позволяющих моделировать динамические процессы в реальных геофизических средах, характеризующихся сложным строением. Основное внимание уделено методу факторизации. Описаны результаты серии натурных экспериментов на территории Краснодарского края, содержащей уникальные геологические объекты.

Как показывают экспериментальные данные [1, 2], земная кора находится в трещиноватом и предельно энергонасыщенном состоянии, является существенно дискретной средой на разных масштабных уровнях. В связи с этим механико-математические модели геофизической среды достаточно многообразны, обладают различной степенью сложности и общности в зависимости от круга решаемых задач. Многие задачи механики для неоднородных упругих сред с трещинами и разрезами, часто применяемые в мировой практике для моделирования динамических процессов в реальных геофизических средах, оказываются как по постановке, так и по результатам далекими от реальности, даже приближенной [3, 4].

В течение последних лет учеными Кубанского государственного университета и отдела проблем математики и механики Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) развивается так называемая теория вирусов вибропрочности. Данный термин введен для описания совокупностей неоднородностей, традиционно свойственных сплошным средам – трещин, включений, полостей. Благодаря совокупности свойства таких объектов сильно отличаются от поведения одной неоднородности. При динамических воздействиях на механический объект такого рода на определенных частотах его поведение может резко меняться, тогда как на других частотах остается практически незаметным. Новейшие исследования в области геологии подтверждают, что большое количество реальных объектов, таких, как трансхронные структуры, расположенные на территории Южного федерального округа (например, Донецкий бассейн), может моделироваться при помощи теории вирусов вибропрочности. Ранее было выявлено, что вирусы вибропрочности способны локализовать волновой процесс, создавать условия, при которых воздействие на неоднородность является максимальным [5].

Для решения задач теории вирусов вибропрочности в ходе выполнения проекта “Проведение теоретических и экспериментальных исследований по изучению глубинного строения Земли в аридных зонах юга России” по программе отделения наук о Земле РАН “Развитие технологий мониторинга, экосистемное моделирование и прогнозирование при изучении природных ресурсов в условиях аридного климата” был разработан метод двойной факторизации, упрощенным фрагментом которого является традиционно используемый в теории вирусов вибропрочности метод интегральных преобразований [6, 7].

Приведем кратко его содержательную часть. Рассмотрим следующую, достаточно общую, записанную в операторном виде, краевую задачу для системы P дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами в частных производных произвольного порядка дифференцирования в трехмерной выпуклой области Ω

$$\mathbf{K}(\partial x_1,\ \partial x_2,\ \partial x_3)\varphi = \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K}\sum_{p=1}^{P} A_{spmnk}\varphi_{p,x_1\ x_2\ x_3}^{(m)(n)(k)} = 0,$$

$$s = 1,\ 2,\ldots,\ P,$$

$$A_{sqmnk} = \text{const},\quad \varphi = \{\varphi_1,\ \varphi_2,\ldots,\ \varphi_P\}.$$

$$\boldsymbol{\varphi} = \{\varphi_S\},\quad \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\varphi}(x_1, x_2,\ x_3),$$

$$\mathbf{x} = \{x_1,\ x_2,\ x_3\},\quad \mathbf{x}\in\Omega. \qquad (1)$$

[1] Кубанский государственный университет, Краснодар.

[2] Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону.

[3] Ростовский государственный университет, Ростов-на-Дону.

На границе $\partial\Omega$ задаются следующие граничные условия:

$$\mathbf{R}(\partial x_1,\ \partial x_2,\ \partial x_3)\varphi =$$
$$= \sum_{m=1}^{M_1} \sum_{n=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{K_1} \sum_{p=1}^{P} B_{spmnk}\varphi_{p,x_1\ x_2\ x_3}^{(m)(n)(k)} = f_s,$$
$$s = 1,\ 2,\ldots,\ s_0 < P, \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega,$$
$$M_1 < M, \quad N_1 < N, \quad K_1 < K. \tag{2}$$

Заметим, что подобно изложенному выше интегральному методу факторизации в дифференциальном методе факторизации краевая задача решается точно, если Ω является полупространством. В случае, если область Ω выпуклая, задача сводится к решению системы нормально разрешимых псевдодифференциальных уравнений. Трехмерным преобразованием Фурье вида

$$\mathbf{\Phi}_n(\boldsymbol{\alpha}) = \iiint_{\Omega} \varphi_n(x)e^{i\langle \alpha x\rangle}d\mathbf{x} \equiv F\varphi_n, \quad \mathbf{\Phi}_m = F\varphi_m$$

она сводится к функциональному уравнению вида

$$\mathbf{K}(\boldsymbol{\alpha})\mathbf{\Phi} = \iint_{\partial\Omega} \boldsymbol{\omega},$$

$$\mathbf{K}(\boldsymbol{\alpha}) \equiv -\mathbf{K}(-i\alpha_1,\ -i\alpha_2,\ -i\alpha_3) = \left\| k_{nm}(\boldsymbol{\alpha}) \right\|, \tag{3}$$

Вектор внешних форм $\boldsymbol{\omega}$ имеет в качестве компонент двумерные функции вида

$$\boldsymbol{\omega} = \{\boldsymbol{\omega}_s\}, \quad s = 1,\ 2,\ldots,\ P, \tag{4}$$
$$\boldsymbol{\omega}_s = P_{12s}dx_1 \wedge dx_2 + P_{13s}dx_1 \wedge dx_3 + P_{23s}dx_2 \wedge dx_3.$$

Операции внешней формы обозначаются как

$$dx_1 \wedge dx_2 = dx_1^1 dx_2^2 - dx_1^2 dx_2^1,$$
$$dx_1 \wedge dx_3 = dx_1^1 dx_2^3 - dx_1^3 dx_2^1,$$
$$dx_2 \wedge dx_3 = dx_1^2 dx_2^3 - dx_1^3 dx_2^2.$$

Здесь введены векторы произвольной системы координат из покрытий касательного расслоения поверхности тела. В декартовой системе координат для касательных векторов произвольного элемента покрытия приняты обозначения

$$x_1 = \{x_1^1,\ x_1^2,\ x_1^3\}, \quad x_2 = \{x_2^1,\ x_2^2,\ x_2^3\}.$$

Коэффициенты внешней формы имеют достаточно сложный вид, их выражения можно найти в [7]. В случаях выпуклого тела общее представление решения имеет интегральное представление

$$\varphi(x^{\nu}) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} e^{-i(\alpha_1^{\nu}x_1^{\nu} + \alpha_2^{\nu}x_2^{\nu})} \times$$
$$\times \left[\mathbf{K}_r^{-1}\left(i\frac{\partial}{\partial x_3^{\nu}}\right) \mathbf{T}_+(\alpha_1^{\nu},\ \alpha_2^{\nu},\ z_{s+}^{\nu})\mathbf{K}^{-1}(z_{s+}^{\nu},+)e^{-iz_{s+}^{\nu}x_3^{\nu}} - \right.$$
$$-\mathbf{K}_r^{-1}\left(i\frac{\partial}{\partial x_3^{\nu}}\right)\times$$
$$\left. \times \mathbf{K}^{-1}(z_{s-}^{\nu},-)\mathbf{T}_-(\alpha_1^{\nu},\ \alpha_2^{\nu},\ z_{s-}^{\nu})e^{-iz_{s-}^{\nu}x_3^{\nu}} \right] d\alpha_1^{\nu}\, d\alpha_2^{\nu}, \tag{5}$$

$$\left[\iint \omega\right] = L_+ + L_-, \quad L_{\pm}(\alpha_1^{\nu},\ \alpha_2^{\nu},\ \alpha_3^{\nu})e^{-i\alpha_3^{\nu}x_3^{\nu}} \to 0,$$
$$\operatorname{Im}\alpha_3^{\nu} \to \pm\infty.$$
$$\mathbf{T}_{\pm}(\alpha_1^{\nu},\alpha_2^{\nu},z_{s\pm}^{\nu}) = 2\pi i \lim \mathbf{K}^{-1}(\alpha_3^{\nu},\mp)L_{\pm}(\alpha_1^{\nu},\alpha_2^{\nu},\alpha_3^{\nu})\times$$
$$\times(\alpha_3^{\nu} \pm z_{s\pm}^{\nu}), \quad \alpha_3^{\nu} \to z_{s\pm}^{\nu}$$

Здесь z_{s+}^{ν}, z_{s-}^{ν} – нули из верхней и нижней полуплоскостей определителей матриц-функций $\mathbf{K}(\alpha_n^{\nu},\ -)$, $\mathbf{K}(\alpha_n^{\nu},\ +)$ соответственно.

Входящие в него функции описаны в работах [5–7] и здесь не повторяются. Заметим, что изложенные выше краевые задачи позволяют описывать поведение деформируемой среды, подверженной воздействию физических полей различной природы – электромагнитных, радиационных, тепловых и т.д., что позволяет получить разнообразные данные о свойствах изучаемых объектов.

Кроме того, был решен ряд модельных задач, имеющих важное практическое применение. Так, получены интегральные уравнения динамической теории упругости для анизотропного тела, содержащего совокупность неоднородностей. Напомним, что анизотропия является одним из характерных признаков реальной геологической среды. Свойства символов ядер интегральных уравнений исследованы численно для частного случая плоскопараллельного расположения плоских трещин в пакете четырех разнородных анизотропных слоев, имеющих упругие свойства арсенида галлия, α-кварца, тетрабората лития и оксида цинка. Кристаллофизические координаты всех кристаллов соответствуют стандартным установкам для своих сингоний и классов. Выведены условия возникновения резонансов в указанных системах.

Исследована модельная задача об установившихся (с частотой ω) колебаниях однородного упругого полупространства, содержащего полубесконечную трещину, расположенную в плоскости, параллельной дневной поверхности полупространства [8]. Это одна из простых моделей, позволяющих ответить на некоторые вопросы распространения упругих колебаний в слоисто-неоднородной среде, которая может служить составной частью более сложных моделей, например, при моделировании динамических процессов в вулканических постройках грязевых вулканов, традиционно приуроченных к антиклиналям.

Использование адекватных математических моделей при изучении такого сложного и уникального природного явления, как грязевой вулканизм, приобретает все большую актуальность. Краснодарский край является единственным регионом в Европейской части России, где существует грязевой вулканизм. В России подобное явление наблюдается лишь на Сахалине, но в гораздо более скромных масштабах. На территории Таманского полуострова Краснодарского края установлено около 100 вулканов, находящихся в разной степени активности; встречаются все известные формы грязевулканических проявлений (континентальные и морские, погребенные и открытые, потухшие и активные) [9].

Грязевулканическая деятельность несет в себе потенциальную инженерно-геологическую и экологическую опасность. По каналам грязевых вулканов поднимаются с глубин 1–2,5 км агрессивные высокоминерализованные воды с вредными компонентами и различные газы: метан, сероводород, сернистый газ, углекислый газ, угарный газ и даже радиоактивный газ радон, – которые существенно ухудшают экологическую обстановку в районе грязевых вулканов. Периодические извержения грязевых вулканов представляют большую опасность для техногенных объектов и объектов инфраструктуры.

В ходе выполнения проекта совместными усилиями ученых Кубанского государственного университета, Южного научного центра Российской академии наук, Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН была проведена комплексная эколого-геофизическая экспедиция. Внимание исследователей было сосредоточено на двух грязевых вулканах – Ахтанизовском и Шуго. Здесь впервые в практике изучения грязевых вулканов были применены методы активной сейсмологии, которые позволяют изучить внутреннюю структуру флюидонасыщенных образований в теле вулканической постройки, включая грязевулканическую камеру и глубинные флюидогенерирующие области.

Методика проведения работ сводилась к следующему. Прежде всего предусматривалось прохождение продольных профилей на траверсах вибратор–сейсмостанция – грязевой вулкан и вибратор–вулкан–сейсмостанция. Зондирование среды повторялось в трех удаленных повторяющихся точках. Последние располагались вдоль указанных траверсов. Кроме перемещения вибратора предусматривалось перемещение сейсмических групп вдоль выбранных траверсов, а также расстановка групп на поперечном профиле (регистрация с помощью креста). Зондирование среды осуществлялось свип-сигналами в диапазоне частот 10–64 Гц и длительностью 60 с. Количество зондирований менялось в пределах 5–10, что позволило поднять помехоустойчивость вибрационных сейсмограмм в условиях регистрации при повышенных сейсмических шумах путем синхронного суммирования сейсмограмм по множеству сеансов зондирования. Цели использования данной методики состояли в оценивании скоростного строения основания вулкана на глубину до 3–4 км; изучении особенностей волновых полей, в том числе нелинейных, вносимых структурой вулкана; анализе характера сейсмических и акустических шумов, вносимых вулканом.

Экспериментальные работы проводились в период с 31.07 по 06.09. 2005 г. и охватывали районы грязевых вулканов Ахтанизовский и Шуго. В районе первого были проложены два сейсмических профиля. Один располагался до подножия вулкана и зондирование осуществлялось в направлении профиля вибратор–сейсмостанция–вулкан, другой профиль был проложен в направлении вибратор–вулкан–сейсмостанция. Работы на обоих профилях выполнялись в период 31.08–01.09.2005. В общей сложности было выполнено 45 сеансов зондирований широкополосными свип-сигналами в полосе частот 10–64 Гц при длительности каждого из сеансов 60 с и монохроматическими сигналами частотой 10 Гц и длительностью 100 с. Удаления вибратора от сейсмостанции менялись в пределах 5–3500 м с шагом 500 м.

В районе вулкана Шуго работы выполнялись в период 03.09–06.09.2005. Было выполнено 77 сеансов зондирования на четырех сейсмических профилях, проложенных через вулкан Шуго. Расстояния вибратор–сейсмостанция менялись в пределах 500–5500 м. По отношению к каждому пункту зондирования и пункту регистрации была выполнена предварительная обработка сейсмических записей сигналов от вибратора СВ-10/100. В основе обработки лежит взаимно корреляционная свертка зарегистрированных сейсмических сигналов с опорным сигналом. В качестве такового был использован сигнал, записанный в непосредственной близости от вибратора (на расстоянии 5 м). По результатам обработки получены сейсмотрассы, каждая из которых соответствует определенному сейсмическому профилю. Из анализа полученных сейсмотрасс можно привести некоторые выводы, относящиеся к скоростным характеристикам среды в районе грязевого вулкана Шуго:

– На первом профиле (профиль вулкана) на дальностях 1,7; 3,5 км головные волны регистрируются на временах вступлений 0,85 и 1,8 с и характеризуются кажущимися скоростями 1800 и 2680 м/с соответственно. На профилях, проходящих через вулкан, на дальностях регистрации 3,6; 4,1; 5,2 км зарегистрированы времена вступлений головных соответственно 1,26; 1,3; 1,7 с. Вычисленные кажущиеся скорости меняются в пределах 3270–3640 м/с. Отмечено явное преобладание скоростей на втором профиле в сравнении с первым.
– Наблюдается существенно более сложная структура волнового поля, регистрируемого за вулканом, в сравнении с картиной волнового поля, регистрируемого на сейсмограммах до вулкана. Очевидно, что это обусловлено геофизическими процессами и сложной геологической структурой вулканической среды. Здесь потребуются дополнительные исследования для изучения этой особенности волнового поля. В формировании высокоамплитудных головных волн на сейсмограммах основная роль принадлежит низкочастотному диапазону свип-сигналов – в пределах 10–25 Гц.

В процессе проведения активного мониторинга тела вулканической постройки и окружающей геологической среды обнаружен эффект реакции грязевыводящих каналов и других флюидонасыщенных структур на вибрационное воздействие. Грязепроявления в центре вулкана и на периферии при длительном активном сейсмическом воздействии обнаруживают пространственную анизотропию. Происходит перераспределение грязепроявлений на всех грифонах вулкана Шуго. Данное явление представляется очень интересным и требует постановки специальных дополнительных экспериментов на грязевых вулканах. Это тем более важно, поскольку подобного рода явления, по-видимому, являются индикаторами подготовки сейсмических событий регионального масштаба. Есть все основания полагать, что их основой являются резонансные образования в структуре питающих систем грязевых вулканов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Crampin S.* Arguments for EDA // Can. J. Expl. Geophys. 1993. № 29. P. 18–30.
2. *Rasolofosaon, P.N.J., Yin, H.* Simultaneous characterization of anisotropy and nonlinearity in arbitrary elastic media – reflections on experimental data // In: Seismic Anisotropy / Eds. Fjær E., Holt R.M., and Rathore J.S.: Soc. Expl. Geophys., 1996. P. 141–179.
3. *Александров В.М., Мхитарян С.М.* Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. М.: Наука. 1983. 488 с.
4. *Сметанин Б.И.* Две щели в полосе конечной толщины // ПММ. 1968. Т. 32. № 6.
5. *Бабешко В.А., Бабешко О.М.* Метод факторизации в теории вирусов вибропрочности // ДАН. 2003. Т. 393. № 4. С. 473–477.
6. *Бабешко В.А., Бабешко О.М.* Метод факторизации решения некоторых краевых задач // ДАН. 2003. Т. 392. № 6. С. 767–770.
7. *Бабешко В.А., Бабешко О.М.* Интегральные преобразования и метод факторизации в краевых задачах // ДАН. 2005. Т. 403. № 1. С. 163–167.
8. *Павлова А.В., Ратнер С.В., Рубцов С.Е.* К решению динамической задачи для упругого полупространства трещиной // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества (ЧЭС). № 4. 2005. С. 30–34.
9. Сейсмоактивные флюидно-магматические системы Северного Кавказа. М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 2005. 225 с.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES ON THE STUDY OF THE DEEP COMPOSITION OF EARTH IN THE ARID ZONES OF THE SOUTH OF RUSSIA

Academician of RAS V.A. Babeshko, V.V. Lozovoy, S.V. Ratner, P.V. Syromyatnikov, A.G. Fedorenko

The results of elaboration of new mathematical methods that allow to construct dynamical models of real geophysical media with complicated structure are presented in the article. The main emphasis is made on method of factorization. The results of full-scale experiments on the territory of Krasnodar region with unique geological objects are given.

REFERENCES

1. Crampin S. 1993. Arguments for EDA. *Can. J. Expl. Geophys.* (29): 18–30.
2. Rasolofosaon P.N.J., Yin H. 1996. Simultaneous characterization of anisotropy and nonlinearity in arbitrary elastic media – reflections on experimental data. In: *Seismic Anisotropy*. (Eds. E. Fjær, R.M. Holt, J.S. Rathore). *Soc. Expl. Geophys*. P. 141–179.
3. Aleksandrov V.M., Mkhitaryan S.M. 1983. *Kontaktnye zadachi dlya tel s tonkimi pokrytiyami i prosloykami*. [*Contact problems for bodies with thin coatings and interlayers*]. Moscow, Nauka Publ.: 488 p. (In Russian).
4. Smetanin B.I. 1968. [Two gaps in the strip of finite thickness]. *Prikladnaya matematika i mekhanika.* (*Journal of Applied Mathematics and Mechanics*). 32(6). (In Russian).
5. Babeshko V.A., Babeshko O.M. 2003. Factorization method in the theory of vibration-strength viruses. *Doklady Physics*. 48(12): 669–673.
6. Babeshko V.A., Babeshko O.M. 2003. Method of factorizing a solution to some boundary-value problems. *Doklady Physics*. 48(3): 134–137.
7. Babeshko V.A., Babeshko O.M. 2005. Integral transformations and the factorization method in boundary value problems. *Doklady Mathematics*. 72(1): 630–633.
8. Pavlova A.V., Ratner S.V., Rubcov S.E. 2005. [On the solution of the dynamic problem for an elastic half-space with a crack]. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva.* (4): 30–34. (In Russian).
9. *Seysmoaktivnye flyuidno-magmaticheskie sistemy Severnogo Kavkaza*. [*Seismically active fluid-magmatic systems of the North Caucasus*]. 2005. Moscow, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences: 225 p. (In Russian).