

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВУЛКАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Валерий Николаевич Мартынов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-60-46, e-mail: vnm@nmsf.sccc.ru

Борис Михайлович Глинский

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-62-79, e-mail: gbm@sscc.ru

Дмитрий Алексеевич Караваев

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sccc.ru

Анна Федоровна Сапетина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, аспирант, тел. (913)756-97-88, e-mail: afsapetina@gmail.com

В статье обсуждается возможность мониторинга вулканических структур на основе математического моделирования грязевого вулкана Гора Карabetова и стратовулкана Эльбрус. Формулируются подходы к математическому моделированию вулканических структур грязевого и магматического типов. Приводится описание математических постановок динамической теории упругости, метод решения, основанный на конечно-разностных схемах на сдвинутых сетках и методе поглощающих границ вида PML. Разработаны программные комплексы для проведения численных экспериментов. Построены геофизические модели этих вулканов. Приводятся некоторые результаты численных экспериментов. На основании проведенных исследований делается вывод о возможности мониторинга вулканов этих типов с применением прецизионных вибросейсмических источников и сейсмических систем наблюдений.

Ключевые слова: мониторинг, 3D-моделирование, вулканические структуры, упругие волны, конечно-разностные схемы, гибридный кластер, GPU.

SIMULATION OF VOLCANIC STRUCTURES VIBROSEISMIC MONITORING

Valery N. Martynov

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-60-46, e-mail: vnm@nmsf.sccc.ru

Boris M. Glinsky

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-62-79, e-mail: gbm@sscc.ru

Dmitry A. Karavaev

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sccc.ru

Anna F. Sapetina

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, phone: (913)756-97-88, e-mail: afsapetina@gmail.com

In this paper, the possibility of volcanic structures monitoring based on mathematical modeling is discussed. This study deals with the Mt. Karabetov mud volcano and the Elbrus stratovolcano. Approaches to the mathematical modeling of the volcanic structures of mud and magmatic types are formulated. The mathematical description of the dynamic elasticity theory is described. The solution method is based on the use of finite-difference schemes designed with application of staggered grids and a method of absorbing boundaries. The software for carrying out numerical experiments has been developed. Geophysical models of such volcanoes has been designed. The results of numerical experiments of modeling full seismic field are presented. Based on the conducted studies, it may be concluded that monitoring of the presented types of volcanoes using vibroseismic sources and seismic observation systems is possible.

Key words: monitoring, 3D simulation, volcanic structures, elastic waves, finite-difference schemes, parallel algorithms, hybrid cluster, GPU.

Введение

Вулканы, в том числе и спящие, являются потенциальной угрозой внезапного возникновения мощных катастрофических явлений. Возможность предсказать заранее приближающееся извержение позволила бы сохранить жизни людей и их имущество. Для этого необходимо проводить мониторинг состояния вулкана, отслеживать изменения параметров внутренней среды, их вариации, и делать по ним прогноз извержений. Последнее требует предварительного тщательного комплексного исследования процессов, проходящих внутри вулканов и на их поверхности. Одним из инструментов для проведения такого исследования является активный вибросейсмический мониторинг [1,2]. Получаемая в его ходе информация сложна для интерпретации и требует проведения предварительного и сопутствующего математического моделирования процессов, происходящих внутри исследуемого геофизического объекта с учетом особенностей его строения [3-5]. Обычно рельеф исследуемого объекта достаточно сложен и не позволяет расположить на нем систему наблюдения, достаточную для сбора информации для решения обратной задачи. В связи с этим приходится многократно решать прямую задачу, варьируя параметры моделируемой среды так, чтобы результаты численного и натурного экспериментов качественно совпадали. Такой подход позволяет рассмотреть возможные типы строения магматических [6,7] и грязевых [8-10] вулканов и их различные состояния, чтобы выделить основные эффекты, возникающие в данных, фиксируемых системой наблюдения на поверхности вулкана (сейс-

мограммы), для облегчения их интерпретации при непосредственном мониторинге [11].

Таким образом, мы сталкиваемся с проблемой проведения крупномасштабного численного моделирования процессов распространения упругих волн для вулканических структур различного строения при вибросейсмическом мониторинге. Решение такой задачи требует использования новейших суперкомпьютерных технологий [12-14]. Особо следует отметить современные подходы, опирающиеся на понятие со-дизайна. Под этим в контексте математического моделирования физических процессов понимается построение физико-математической модели явления, численного метода, параллельного алгоритма и его программной реализации, эффективно использующей архитектуру суперкомпьютера [15].

Постановка задачи

Распространение сейсмических волн в упругих неоднородных средах описывается системой уравнений теории упругости с соответствующими начальными и граничными условиями. Постановку этой задачи можно представить в терминах вектора скоростей смещения $\vec{u} = (U, V, W)^T$ и тензора напряжения $\vec{\sigma} = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz})^T$ следующим образом:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = [A] \vec{\sigma} + \vec{F}(t, x, y, z), \quad \frac{\partial \vec{\sigma}}{\partial t} = [B] \vec{u}, \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial x} & \lambda \frac{\partial}{\partial y} & \lambda \frac{\partial}{\partial z} \\ \lambda \frac{\partial}{\partial x} & (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial y} & \lambda \frac{\partial}{\partial z} \\ \lambda \frac{\partial}{\partial x} & \lambda \frac{\partial}{\partial y} & (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial z} \\ \mu \frac{\partial}{\partial y} & \mu \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ \mu \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \mu \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \mu \frac{\partial}{\partial z} & \mu \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix},$$

где t — время, $\rho(x, y, z)$ — плотность, $\lambda(x, y, z)$, $\mu(x, y, z)$ — параметры Ламе.

Начальные и граничные условия на свободной поверхности условия имеют вид:

$$\vec{\sigma}|_{t=0} = 0, \quad \vec{u}|_{t=0} = 0, \quad \sigma_{xz}|_{z=0} = 0, \quad \sigma_{yz}|_{z=0} = 0, \quad \sigma_{zz}|_{z=0} = 0. \quad (2)$$

Рассматривается 3D изотропная неоднородная упругая среда со сложной геометрией. Расчетная область представляет собой параллелепипед. На плоскости $z=0$ реализуются граничные условия для свободной поверхности (2).

Для численного решения поставленной задачи (1)–(2) применяются известные конечно-разностные схемы на сдвинутых сетках [16], хорошо себя зарекомендовавшие для решения системы уравнений динамической теории упругости, записанной в терминах скоростей смещения и напряжений. Расчет упругих параметров, входящих в уравнения (1)–(2) осуществляется на основе интегральных законов сохранения. Используются схемы 2-го порядка аппроксимации по времени и 2-го и 4-го порядка аппроксимации по пространству. Подробное описание разностных схем для данной задачи приведено в статьях [17-20].

При реализации этого метода используется метод поглощающих границ. Для этого граница расчетной области, за исключением свободной поверхности, окружается поглощающими слоями. Поглощающие слои окружают все грани параллелепипеда за исключением свободной поверхности. В этих слоях в исходные конечно-разностные уравнения вводятся члены с демпфирующими параметрами. В точках, не попадающих в эти зоны, расчет производится по первоначальной схеме. Подробное представление предложенного метода организации поглощающих зон для численных экспериментов представлено в работе [21].

Программная реализация

Для построения математической модели структуры, характерной для грязевых и магматических вулканов, разработана программа, конструирующая 2D и 3D модели упругих сред, приближенные к реальным средам [18].

На основе описанных методов создан комплекс программ для разных вычислительных архитектур. А именно, разработаны:

- о программы численно решающие 3D задачу динамической теории упругости в скоростях смещения и напряжениях для кластера с классической массивно-параллельной архитектурой и для гибридного кластера, оснащенного графическими ускорителями;

- о программа численно решающая 3D задачу динамической теории упругости в смещениях для гибридного кластера, оснащенного графическими ускорителями;

- о программа численно решающая 2D задачу динамической теории упругости в скоростях смещения и напряжениях для одного узла гибридного кластера с тремя графическими ускорителями.

Последняя реализация позволяет одновременно проводить до 40 различных вариантов расчетов на кластере НКС-30Т+GPU всего за несколько минут. Это позволяет быстро подобрать кинематические характеристики изучаемой среды.

Результаты численных экспериментов

Данный подход применяется для моделирования грязевого вулкана Гора Карabetова [22-24] и магматического вулкана Эльбрус. Для сравнения динамических и кинематических характеристик расчетных и наблюдаемых сейсмических полей при вибросейсмическом мониторинге верхней части вулкана Карabetова гора, разработана его математическая 3D модель и проведены численные эксперименты [17,18].

В результате серии экспериментов при варьировании геометрии и значений упругих параметров была разработана 3D модель, наилучшим образом сопоставимая с результатами геофизического эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Значения упругих параметров грязевого вулкана Карabetова гора

	V_p , км/с	V_s , км/с	ρ , г/см ³		V_p , км/с	V_s , км/с	ρ , г/см ³
Слой 1	1.7	0.68	2.55	Слой 4	2.6	1.25	2.8
Слой 2	2.2	1.1	2.9	Слой 5	2.5	1.25	3.0
Слой 3	2.5	1.4	2.7	Цилиндр, Конус	1.3	0.81	1.2

Разработанная модель вулкана Карabetова гора состоит из пяти слоев с коническим и цилиндрическим включением, которые представляют собой антиклинальную структуру и соответствуют центральному флюидозаполненному каналу вулкана. При моделировании использовался, расположенный вблизи свободной поверхности, источник типа «центр давления» с несущей частотой 25 Гц. Сейсмоприемники располагались вдоль профиля А-А1 (рис. 1, слева), регистраторы с сейсмоприемниками располагаются на свободной поверхности. Такое расположение соответствует схеме проведенного натурального эксперимента [17]. Численное моделирование проведено на кластере НКС-30Т Сибирского суперкомпьютерного центра (ССКЦ СО РАН). Количество используемых ядер (MPI процессов) составляло 160. Время, затраченное на моделирование около 20 часов.

На мгновенных снимках волнового поля в последовательные моменты времени (рис. 2) показан процесс прохождения прямой волны через область вулкана. Волновая картина включает прямую волну и волны, отраженные от слоев и канала вулкана. Снимки иллюстрируют процесс резонансного возбуждения волн в канале и их медленного затухания после ухода из зоны канала прямых и отраженных волн. Геометрия и акустическая контрастность относительно вмещающих слоев определяют резонансный характер возбуждаемого в вулканическом канале волнового поля.

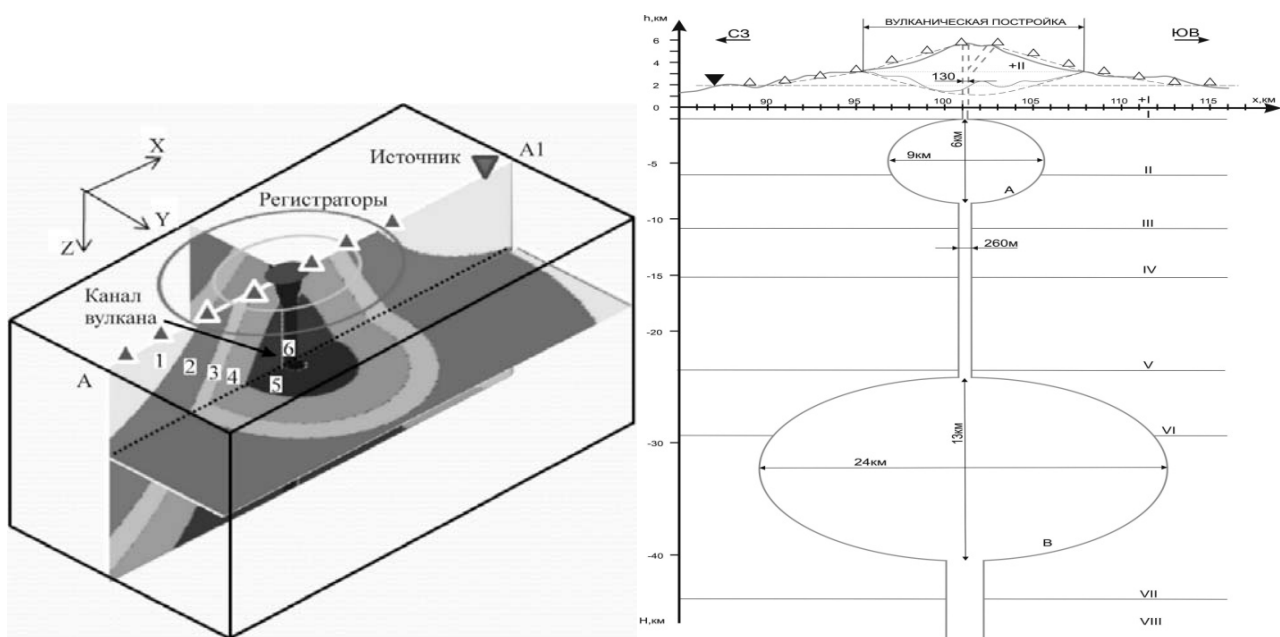


Рис. 1. Вид 3D модели верхней части грязевого вулкана Карабетова гора (слева), приближенная геофизическая модель вулкана Эльбрус (справа)



Рис. 2. Вертикальные компоненты волнового поля в последовательные моменты времени по профилю А-А1 (рис. 1). Линиями отмечены границы слоев антиклинальной структуры вулкана и центрального канала

Приближенная модель вулкана Эльбрус (рис. 1, справа) представлена многослойной средой с эллиптическими и цилиндрическими с параметрами, указанными в табл. 2. Подробное описание геофизической модели можно найти в [19]. Вулканическая постройка лежит на гранитном блоке +I; эффузивные породы, слагают вулканический конус +II; ниже нулевой отметки можно выделить 8 слоев. Магматические очаги представлены в виде эллипсоидов, верхний очаг с горизонтальными и вертикальными осям 9 и 6 км ($\rho=2.1 \text{ г/см}^3$; $Vp=2.2 \text{ км/с}$), материнский магматический очаг – 24 и 13 км ($\rho=1.8 \text{ г/см}^3$; $Vp=1.9 \text{ км/с}$). Каналы вулкана представляются в виде цилиндров с диаметрами 250 м, 160 м и 130 м для подпитывающего, среднего и бывшего каналов соответственно.

Значения упругих параметров вулкана Эльбрус

	V_p , км/с	V_s , км/с	ρ , г/см ³		V_p , км/с	V_s , км/с	ρ , г/см ³
Слой +II	2,85	1,65	2,4	Слой IV	5,82	3,37	2,7
Слой +I	3,1	1,79	2,66	Слой V	5,97	3,45	2,75
Слой I	3,2	1,82	2,7	Слой VI	6,43	3,72	2,78
Слой II	5,9	3,42	2,85	Слой VII	6,95	4,03	2,81
Слой III	6,22	3,59	2,62	Слой VIII	8,1	4,68	2,85

На основе предложенной модели вулкана Эльбрус проведен ряд вычислительных экспериментов. Каждый расчет проводился на 11 узлах кластера НКС-30Т+GPU, оснащенных графическими картами. Для моделирования процесса на 12000 шагов по времени тратится в среднем чуть больше полутора часов. Система возбуждения для всех расчетов состоит из точечного источника типа «центр давления» с частотой 8 Гц, располагающимся вблизи свободной поверхности в левой части расчетной области в одной плоскости с осью симметрии магматических каналов и камер. В качестве моделируемой среды взят фрагмент предложенной приближенной модели стратовулкана Эльбрус, включающий в себя только верхнюю магматическую камеру в форме эллипсоида и прилегающий к ней подпитывающий канал, расположенные в пятислойной среде. Разница между этими средами заключается в том, что в одном случае верхний канал заполнен магмой (момент извержения), а во втором случае он сливается с окружающими слоями (равновесное состояние), рис 3.

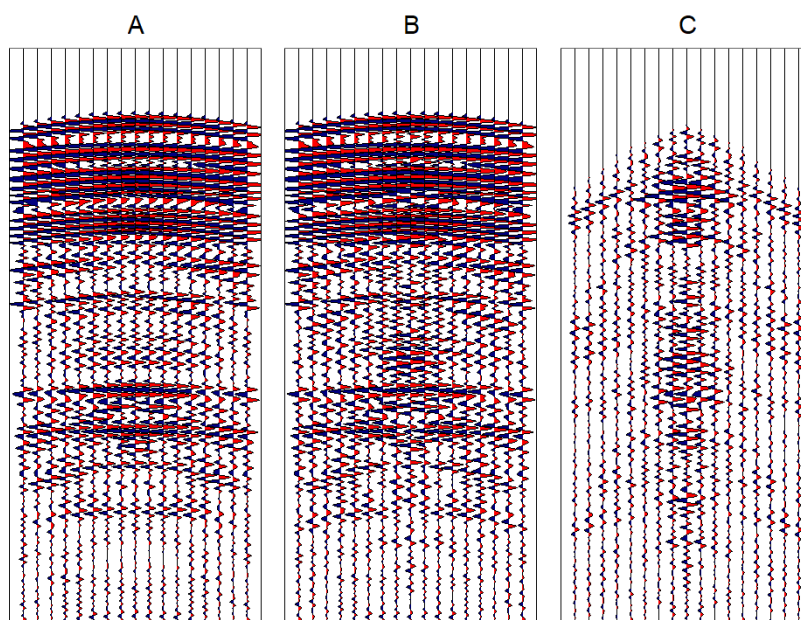


Рис. 3. Теоретические сейсмограммы для компоненты U:

A – среда без верхнего канала, B – среда, содержащая верхний канал, заполненный магмой (момент извержения), C – разница между сейсмограммами A и B

Обсуждение

Проведенные численное моделирование вулканических структур показывает, что сейсмическое поле вулканов имеет сложную структуру, зависящую от геометрии исследуемых объектов и их реологических характеристик и, именно, это обстоятельство позволяет проводить вибросейсмический мониторинг этих сейсмоопасных объектов. Проводя регулярные вибросейсмические зондирования и отслеживая в динамике поведение сейсмического поля по сейсмотрассам можно проследить существенные изменения напряженно-деформированного состояния исследуемого объекта, которые могут привести к катастрофическим явлениям. Насколько известно авторам, в такой постановке задача мониторинга решается впервые.

Заключение

Рассмотрен подход к созданию метода мониторинга вулканических структур на основе моделирования вулканических структур с применением динамической теории упругости. Рассмотрены два типа вулканов – грязевой и магматический. Разработаны алгоритмы и комплексы программ для проведения численных экспериментов. На основании модельных исследований сделан вывод о возможности вибросейсмического мониторинга вулканов этого типа.

Благодарности

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-07-00434, 16-07-01052, 17-07-00872, 16-01-00455 и государственного задания ФАНО России № 0315-2016-009. Работа была выполнена с использованием ресурсов ЦКП Сибирский Суперкомпьютерный Центр ИВМиМГ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alekseev A. S., Glinsky B. M., Kovalevsky V. V., Khairtdinov, M. S. Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results // Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration. – 2010. – Vol. 40. – P. 105–120.
2. Glinskiy B. M., Martynov V. N., Sapetina A. F. 3D modeling of seismic wave fields in a medium specific to volcanic structures // Yakutian Math. J. – 2015. – Vol. 22(3). – P. 84–98.
3. You, SH., Konstantinou K. I., Gung Y. et al. Three-dimensional shallow velocity structure beneath Taal Volcano, Philippines // Journal of Seismology. – 2017. – Vol. 21(6). – P. 1427–1438.
4. Tran A., Rudolph M. L., Manga M. Bubble mobility in mud and magmatic volcanoes. Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2015. – Vol. 294. – P. 11–24.
5. Burschil T., Beilecke T., Krawczyk C. M. Finite-difference modelling to evaluate seismic P-wave and shear-wave field data // Solid Earth. – 2015. – Vol. 6. – P. 33–47.
6. Ксатакина Е. В., Кулаков И. Ю., Василевский А. Н. Источники питания супервулкана Тоба по сейсмическим данным // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – № 2(2). – С. 197–201.
7. Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Верниковский В.А. Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и влк. Кизи-

- мен (Камчатка) по данным сейсмической томографии // Геология и геофизика. – 2016. – № 57(1). – С. 109–124.
8. Baghzendani H. R., Aghajani H., Solimani M. Subsurface modeling of mud volcanoes, using density model and analysis of seismic velocity // *Journal of Mining & Environment*. – 2015. – Vol. 6(1). – P. 31–39.
9. Hayakawa Y. S., Kusumoto S., Matta N. Seismic and inter-seismic ground surface deformations of the Muroto mud volcano (central Japan): a laser scanning approach // *Progress in Earth and Planetary Science*. – 2017. – Vol. 4:3.
10. Lupi M., Ricci B. S., Kenkel J., Ricci T., Fuchs F., Stephen A. Miller, Andreas Kemna. Subsurface fluid distribution and possible seismic precursory signal at the Salse di Nirano mud volcanic field // *Geophysical Journal International*. – 2016. – Vol. 204(2). – P. 907–917.
11. Koulakov I., Gladkov V., El Khrepy S., Al-Arifi N., Fathi I. H. Application of repeated passive source travel time tomography to reveal weak velocity changes related to the 2011 Tonoku-Oki MW 9.0 Earthquake // *JGR: Solid Earth*. – 2016. – Vol. 121(6). – P. 4408–4426.
12. Glinskiy B. M., Kulikov I. M., Chernykh I. G., Snytnikov A. V., Sapetina A. F., & Weins D.V. The integrated approach to solving large-size physical problems on supercomputers // *RuSCDays 2017 CCIS*. – 2017. – Vol. 793. – P. 278–289.
13. Glinskiy B. M., Sapetina A. F., Martynov V. N., Weins D. V., Chernykh I. G. The hybrid-cluster multilevel approach to solving the elastic wave propagation problem // *PCT 2017, CCIS*. – 2017. – Vol. 753. – P. 261–274.
14. Sapetina A. F. Supercomputer-aided comparison of the efficiency of using different mathematical statements of the 3D geophysical problem // *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Numerical Analysis*. – 2016. – Vol. 18. – P. 57–66.
15. Glinskiy B., Kulikov I., Chernykh I., Weins D., Snytnikov A., Nenashev V., Andreev A., Egunov V., Kharkov E. The Co-design of Astrophysical Code for Massively Parallel Supercomputers // *Proceedings of 16th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP) LNCS*. – 2016. – Vol. 10049. – P. 342–353.
16. Bihn M., Weiland T. A. Stable Discretization Scheme for the Simulation of Elastic Wave // *Proceedings of the 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics (IMACS 1997)*. – 1997. – Vol. 2. – P. 75–80.
17. Глинский Б. М., Караваев Д. А., Ковалевский В. В., Мартынов В. Н. Численное моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана «Гора Карабетова» вибросейсмическими методами // *Вычислительные методы и программирование*. – 2010. – № 11(1). – С.95-104.
18. Karavaev D. A., Glinsky B. M., Kovalevsky V. V. A technology of 3D elastic wave propagation simulation using hybrid supercomputers // *CEUR Workshop Proc. 1. "RuSCDays 2015 - Proceedings of the 1st Russian Conference on Supercomputing Days 2015"*. – 2015. – P. 26–33.
19. Глинский Б. М., Мартынов В. Н., Сапетина А. Ф. Технология суперкомпьютерного 3D моделирования сейсмических волновых полей в сложно построенных средах // *Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: Вычислительная математика и информатика*. – 2015. – №4(4). – С. 101–116.
20. Караваев Д.А. Моделирование сейсмических полей для сред с существенно неоднородным распределением упругих параметров // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2017. – №4(1). – С. 201–204.
21. Komatitsch, D., Martin R. An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation // *Geophysics*. – 2008. – Vol. 73(4). – P. T51–T61.
22. Ovsyuchenko A. N., Sobisevich A. L., Sysolin A. I. On the relationship between recent tectonic processes and mud volcanism by the example of Mt. Karabetov, Taman Peninsula // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2017. – Vol. 53(4). – P. 606–617.
23. Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Канониди Х. Д., Канониди К. Х., Лиходеев Д. В., Преснов Д.А. О дилатансных образованиях, участвующих в формировании корневых структур

тур и выводящих каналов грязевых вулканов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2015. – №3(187). – С. 53–59.

24. Тверитинова Т.Ю., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Лиходеев Д.В. Структурная позиция и особенности строения и формирования грязевого вулкана горы Карабетова // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2015. – № 2(40). – С. 106–122.

REFERENCES

1. Alekseev, A. S., Glinsky, B. M., Kovalevsky, V. V., & Khairtdinov, M. S. (2010) Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results. Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration, Vol. 40, 105–120. doi: 10.1016/s0950-1401(10)04011-5.

2. Glinskiy, B. M., Martynov, V. N., & Sapetina, A. F. (2015). 3D modeling of seismic wave fields in a medium specific to volcanic structures. Yakutian Math. J., 22(3), 84–98.

3. You, SH., Konstantinou, K. I., Gung, Y. et al. (2017). Three-dimensional shallow velocity structure beneath Taal Volcano, Philippines. Journal of Seismology, 21(6), 1427–1438.

4. Tran, A., Rudolph, M. L., & Manga, M. (2015). Bubble mobility in mud and magmatic volcanoes. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 294, 11–24.

5. Burschil, T., Beilecke, T., & Krawczyk, C. M. (2015). Finite-difference modelling to evaluate seismic P-wave and shear-wave field data. Solid Earth, 6, 33–47.

6. Kasatkina, E. V., Koulakov, I. Y., & Vasilevsky, A. N. (2016) Toba supervolcano feeding sources inferred by seismic data. Interekspo GEO-Sibir [Interexpo GEO-Siberia], 2(2), 197–201 [in Russian].

7. Koulakov, I. Y., Kukarina, E. V., Gordeev, E. I., Chebrov, V. N., & Vernikovskiy, V. A. (2016) Magma sources in the mantle wedge beneath the volcanoes of the Klyuchevskoy group and Kizimen based on seismic tomography modeling. Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics], 57(1), 109–124 [in Russian]. doi: 10.15372/GiG20160106.

8. Baghzendani, H. R., Aghajani, H., & Solimani, M. (2015). Subsurface modeling of mud volcanoes, using density model and analysis of seismic velocity. Journal of Mining & Environment, 6(1), 31–39.

9. Hayakawa, Y. S., Kusumoto, S. & Matta, N. (2017). Seismic and inter-seismic ground surface deformations of the Muroko mud volcano (central Japan): a laser scanning approach. Progress in Earth and Planetary Science, 4:3. doi: 10.1186/s40645-016-0116-3.

10. Lupi, M., Ricci, B. S., Kenkel, J., Ricci, T., Fuchs, F., Stephen, A. Miller & Andreas Kemna. (2016). Subsurface fluid distribution and possible seismic precursory signal at the Salse di Nirano mud volcanic field. Geophysical Journal International, 204(2), 907–917.

11. Koulakov, I., Gladkov, V., El Khrepy, S., Al-Arifi, N., & Fathi, I. H. (2016). Application of repeated passive source travel time tomography to reveal weak velocity changes related to the 2011 Tonoku-Oki MW 9.0 Earthquake. JGR: Solid Earth, 121(6), 4408–4426.

12. Glinskiy, B. M., Kulikov, I. M., Chernykh, I. G., Snytnikov, A. V., Sapetina, A. F., & Weins, D.V. (2017). The integrated approach to solving large-size physical problems on supercomputers. RuSCDays 2017. CCIS, Vol. 793, 278–289. doi: 10.1007/978-3-319-71255-0_22.

13. Glinskiy, B. M., Sapetina, A. F., Martynov, V. N., Weins, D. V., & Chernykh, I. G. (2017). The hybrid-cluster multilevel approach to solving the elastic wave propagation problem. PCT 2017, CCIS, Vol. 753, 261–274. doi: 10.1007/978-3-319-67035-5_19.

14. Sapetina, A. F. (2016). Supercomputer-aided comparison of the efficiency of using different mathematical statements of the 3D geophysical problem. Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Numerical Analysis. 18, 57–66.

15. Glinskiy, B., Kulikov, I., Chernykh, I., Weins, D., Snytnikov, A., Nenashev, V., Andreev, A., Egunov, V., & Kharkov, E. (2016). The Co-design of Astrophysical Code for Massively Parallel Supercomputers. Proceedings of 16th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP) LNCS, 10049, 342–353.

16. Bihn, M., & Weiland, T. A. (1997). Stable Discretization Scheme for the Simulation of Elastic Wave. Proceedings of the 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modeling and Applied Mathematics (IMACS 1997), Vol. 2, 75–80.
17. Glinskiy, B. M., Karavaev, D. A., Kovalevskiy, V. V., & Martynov, V. N. (2010). Numerical modeling and experimental research of the «Karabetov Mountain» mud volcano by vibroseismic methods. Numerical Methods and Programming, Vol. 11, 95–104 [in Russian].
18. Karavaev, D. A., Glinsky, B. M., & Kovalevsky, V. V. (2015). A technology of 3D elastic wave propagation simulation using hybrid supercomputers. CEUR Workshop Proc. 1. "RuSCDays 2015 - Proceedings of the 1st Russian Conference on Supercomputing Days 2015", 26–33.
19. Glinskiy, B. M., Martynov, V. N., & Sapetina, A. F. (2015). Technology of supercomputer simulation of seismic wave fields in complicated media. Vestnik IUzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika [Bulletin of the South Ural State University. Computational Mathematics and Software Engineering], 4(4), 101–116 [in Russian].
20. Karavaev, D. A. (2017) Simulation of seismic field for media with significantly inhomogeneous distribution of elastic parameters. Interekspo GEO-Sibir [Interexpo GEO-Siberia], 4(1), 201–204 [in Russian].
21. Komatitsch, D., & Martin, R. (2008) An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation. Geophysics, 73(4), T51–T61.
22. Ovsyuchenko, A. N., Sobisevich, A. L., & Sysolin, A. I. (2017). On the relationship between recent tectonic processes and mud volcanism by the example of Mt. Karabetov, Taman Peninsula. Izvestiya. Physics of the Solid Earth, 53(4), 606–617. doi: 10.1134/S1069351317040073.
23. Sobisevich, L. E., Sobisevich, A. L., Kanonidi, K. D., Kanonidi, K. K., Likhodeev, D. V., & Presnov, D. A. (2015). On a Dilatancy Structures Involved in the Formation of Roots and Feeding System of Mud Volcanoes. Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Estestvennye nauki [University News. North-Caucasian Region. Natural Sciences Series], 3(187), 53–59 [in Russian].
24. Tveritina, T. Y., Sobisevich, A. L., Sobisevich, L. E., & Likhodeev, D.V. (2015). Structural position and structure peculiarities of the mountain Karabetov mud volcano. Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana [Geology and Minerals of the World Ocean], 2(40), 106–122 [in Russian].

© В. Н. Мартынов, Б. М. Глинский, Д. А. Караваев, А. Ф. Сапетина, 2018