

## Численное моделирование конвекции в мантии Земли с использованием облачных технологий

А. В. ЧУВАЕВ<sup>1</sup>, А. А. БАРАНОВ<sup>2,3</sup>, А. М. БОБРОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский технологический университет — МИРЭА, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

Контактный автор: Баранов Алексей А., e-mail: [baranov@ifz.ru](mailto:baranov@ifz.ru)

Поступила 21 октября 2019 г., доработана 25 февраля 2020 г., принята в печать 11 марта 2020 г.

Приведен пример реализации опытного фрагмента кластера обработки геофизических данных в модели облачных технологий. Предложенная архитектура позволила уменьшить время на проведение научных исследований и численное моделирование за счет сокращения сроков реконfigurирования вычислительных ресурсов в соответствии с требованиями экспериментов. В качестве примера апробации решения выбрана задача численного моделирования сферической мантийной конвекции на основе данных сейсмической томографии. Уравнение Стокса решается методом конечных элементов с помощью программного кода CitcomS. Представлены результаты трехмерного моделирования глобальной мантийной конвекции. Расчеты демонстрируют структуру мантийных течений в современной Земле. Под континентами, кроме Восточной Африки, Юго-Восточной и Восточной Азии и Западной Антарктиды, находятся нисходящие мантийные потоки и отрицательные аномалии температуры. Нисходящий мантийный поток под Евразией и восходящий поток под Арктикой толкают Северную Евразию на юг, порождая напряжения в коре и процессы горообразования внутри Евразии. Еще один мощный нисходящий мантийный поток возникает между Америками в Карибской зоне субдукции. Древние кратоны характеризуются холодными областями мантии под ними. Под Восточной Африкой находятся положительная температурная аномалия и восходящий мантийный поток, ответственный за систему рифтов на поверхности африканского континента. Похожая аномалия обнаруживается и в районе Байкальской рифтовой зоны. Глобальный восходящий поток находится под Тихим океаном.

*Ключевые слова:* обработка геофизических данных, трехмерное численное моделирование, мантийная конвекция, виртуализация, сейсмическая томография.

*Цитирование:* Чуваев А.В., Баранов А.А., Бобров А.М. Численное моделирование конвекции в мантии Земли с использованием облачных технологий. Вычислительные технологии. 2020. 25(2):103–117.

### Введение

Одной из важнейших задач геофизики является изучение структуры конвекции в мантии Земли, влияния на нее реологии мантии, фазовых переходов и химических неоднородностей. Сложность теоретических моделей и уравнений для описания процессов

конвекции не позволяет решать их аналитическим способом [1, 2], поэтому необходимы соответствующие численные инструменты (программы для численного моделирования) решения задач. Численное моделирование становится важнейшим инструментом исследований в геофизике.

Пример применения численного моделирования в изучении конвекции в мантии Земли — моделирование сферической [3–5] и двумерной мантийной конвекции [6–8]. Основную трудность данной задачи представляет собой решение уравнения Стокса для произвольного поля температуры и вязкости. В общем случае это уравнение очень сложное и решается только численно [1].

Ранее программные модули для проведения численных экспериментов разрабатывались самостоятельно силами конкретной лаборатории научного института, в едином интерфейсе и с едиными требованиями к операционному окружению. Моделирование отдельных задач могло потребовать использования высокопроизводительных вычислительных ресурсов, в связи с чем программы разрабатывались и запускались на вычислительных ресурсах Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН, суперкомпьютеров Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в заранее определенном ими интерфейсе. Однако развитие вычислительных технологий и существенный рост производительности персональных компьютеров позволили решать данные задачи силами лабораторий на доступных в научном институте ресурсах. С одной стороны, это дает возможность уходить от вопросов с оформлением доступа к суперкомпьютерным ресурсам, с другой — требует от ученых-исследователей наличия специфических навыков по настройке операционных систем и решения проблемы переносимости бинарного кода ранее разработанных программ. Кроме того, мировой опыт решения задач геодинамики не стоит на месте, и исследователи могут использовать различное программное обеспечение других институтов с произвольными требованиями к системному окружению.

На текущий момент библиотека применяемых программных модулей представлена программами, собранными под различные версии операционных систем Windows и Unix. Изменения в составе выполняемых расчетов сотрудниками лаборатории приводят к постоянному реконфигурированию вычислительных средств в соответствии с текущими потребностями.

Таким образом, к основным проблемам в использовании вычислительных средств можно отнести:

- сложность реконфигурирования ресурсов лаборатории в соответствии с изменениями в составе экспериментов и проводимых расчетов;
- необходимость решать ученым-геофизикам вопросы бинарной переносимости кода программ.

Для устранения вышеизложенных недостатков предлагается воспользоваться технологиями облачных вычислений, которые позволяют повысить эффективность использования вычислительной инфраструктуры за счет ее виртуализации и эластичности [9–12].

В работах [13, 14] проведена оценка накладных расходов на гипервизорную и контейнерную виртуализацию, которая позволяет сделать вывод о применимости этих технологий в высокопроизводительных вычислениях и научных исследованиях. Одна из первых попыток использования виртуализации вычислительных ресурсов для сокращения времени реконфигурирования на уровне ГРИД-среды института рассмотрена в [15]. Виртуализация вычислительных ресурсов, с одной стороны, позволит гиб-

ко перераспределять их между исследовательскими задачами обработки геоданных, а с другой — обеспечит исполнение программных модулей на виртуальных вычислителях требуемой конфигурации.

Предлагается для каждого программного модуля с определенными требованиями к операционному окружению заводить шаблон виртуальной машины, содержащий в себе предустановленные и готовые к запуску операционную систему и вспомогательные библиотеки. Шаблон виртуальной машины будет использоваться для последующего развертывания из него экземпляра виртуальной машины с заданными характеристиками. Развертывание экземпляра виртуальной машины будет осуществляться платформой виртуализации, включающей гипервизор и предоставляющей программный интерфейс автоматизации операций с виртуальными машинами.

Для организации выполнения программных модулей на имеющихся технических ресурсах следует:

- определить доступность необходимых вычислительных ресурсов;
- развернуть экземпляр виртуальной машины из шаблона;
- выполнить настройку файлового окружения для программного модуля;
- запустить программный модуль на виртуальной машине;
- в случае отсутствия заданий для дальнейших расчетов свернуть экземпляр виртуальной машины, тем самым высвободив задействованные ресурсы.

Такой подход к использованию вычислительных ресурсов предоставит возможность получать виртуальную вычислительную инфраструктуру, автоматически конфигурируемую в соответствии с текущими потребностями ученых для расчетов. Для создания опытного образца облачного кластера были сформулированы следующие требования:

- обеспечение автоматического реконфигурирования вычислительных ресурсов;
- организация и управление виртуальными ресурсами с помощью программного обеспечения, способного осуществить функционирование вычислительных ресурсов лаборатории в круглосуточном режиме.

## 1. Архитектура облачного кластера обработки геофизических данных

Архитектура облачного кластера базируется на модели облачных вычислений IaaS (Infrastructure as a service, инфраструктура как сервис) [16]. Вычислительная инфраструктура в облачном кластере представлена виртуальными машинами с заданными характеристиками, такими как число процессоров, объем оперативной памяти, размер жесткого диска и установленная операционная система.

Для каждого модуля с определенными требованиями к операционной среде в облачном кластере заводится шаблон виртуальной машины с заданной конфигурацией. Входная очередь кластера представлена множеством заявок на исполнение различных программных модулей. Изменение содержимого входной очереди приводит к изменению вычислительной конфигурации облачного кластера. Основные компоненты облачного кластера и их взаимосвязи представлены на рис. 1. Архитектуру облачного кластера можно разделить на три уровня.

1. Пользовательский уровень. Отвечает за предоставление интерфейсов доступа к облачному кластеру и обеспечивает:

- прием заданий на исполнение в облачном кластере;

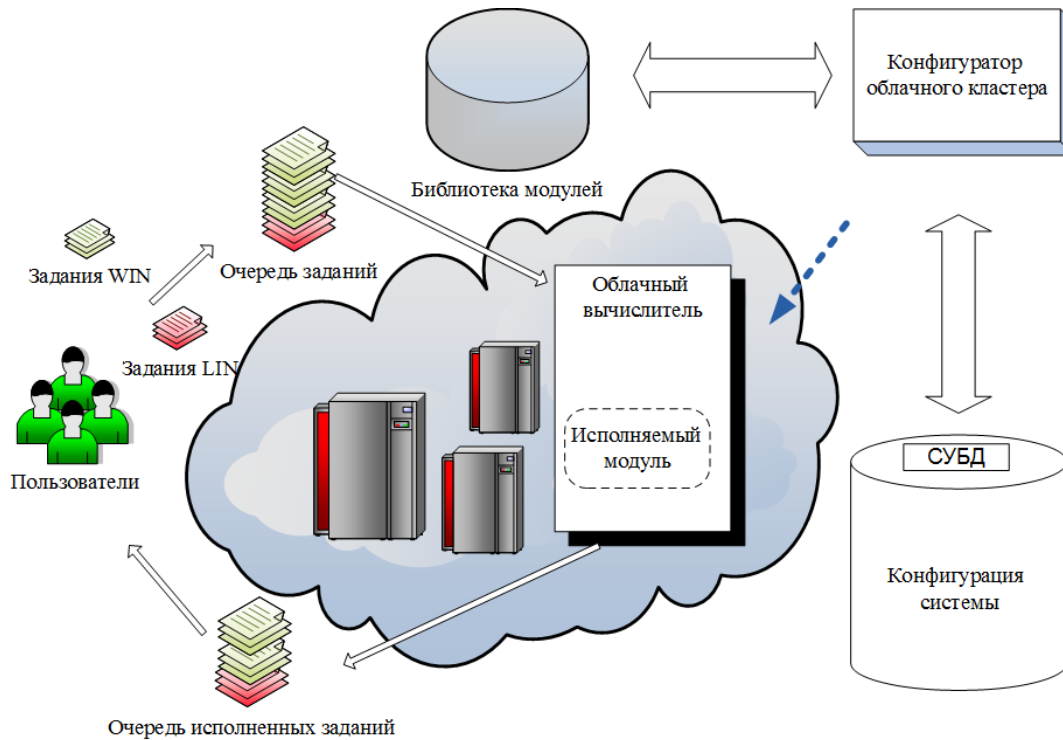


Рис. 1. Облачный кластер / Fig. 1. Cloud cluster

- регистрацию и настройку программных модулей;
  - создание и модификацию шаблонов виртуальных машин.
2. Уровень приложений. Отвечает за исполнение программных модулей и обеспечивает:
- обработку заявок на вычислительные ресурсы с использованием определенной дисциплины обслуживания;
  - выполнение программных модулей на вычислительных ресурсах;
  - информационное обеспечение функционирования облачного кластера (хранение программных модулей и параметров исполнения, мониторинг исполнения прикладных модулей).
3. Уровень управления виртуальными ресурсами обеспечивает:
- динамическое масштабирование виртуальных вычислителей в соответствии с потребностями пользователей и доступными в текущий момент вычислительными ресурсами.

*Пользовательский уровень* облачного кластера лаборатории представлен следующими компонентами: очереди заданий, компонент подготовки шаблона вычислителя, компонент регистрации программных модулей. Очереди заданий облачного кластера состоят из заявок на исполнение, завершенных заявок и текущих активных заявок. Компонент подготовки шаблона облачного вычислителя обеспечивает создание образа виртуальной машины с заданными характеристиками, установку и настройку операционной системы в соответствии с требованиями программных модулей. Компонент регистрации программных модулей отвечает за загрузку исполняемого модуля и системных библиотек в библиотеку программных модулей. Позволяет пользователю описать входные и выходные параметры модулей и обеспечивает загрузку или модификацию файла исполнения программного модуля.

*Уровень приложений* состоит из таких компонентов, как облачный вычислитель, агент облачного вычислителя, библиотека программных модулей, информационная подсистема. Облачный вычислитель представляет собой шаблон виртуальной машины требуемой конфигурации с предустановленным агентом. Каждый облачный вычислитель предназначен для исполнения программных модулей с соответствующими требованиями к операционному окружению: число ядер процессора, объем оперативной памяти, операционная система. Агент облачного вычислителя — это программный компонент, функционирующий на облачном вычислителе и обеспечивающий контролируемое исполнение программных модулей. Библиотека программных модулей содержит исполняемые модули и профили их исполнения. Профиль исполнения представляет собой XML-файл (eXtensible Markup Language), описывающий параметры вызова программного модуля. Информационная подсистема содержит список доступных ресурсов, список занятых ресурсов, конфигурацию системы, историю обработки заявок в облачном кластере.

*Уровень управления* виртуальными ресурсами реализуется конфигуратором облачного кластера, обеспечивающим выработку управляющего воздействия с целью автоматической реконфигурации виртуальной вычислительной среды. При выработке воздействия анализируется очередь заявок на исполнение, список исполняемых заявок, список активных программных вычислителей и список доступных ресурсов. Подробно один из вариантов управления очередью заданий и подход к интеграции конфигуратора облачного кластера в ГРИД-среду (GRID) рассмотрены в [17].

## **2. Моделирование мантийной конвекции со сложной реологией на фрагменте облачного кластера обработки геофизических данных**

На основе разработанной архитектуры реализован опытный фрагмент облачного кластера для проведения численного моделирования и последующей обработки геофизических данных. Для построения инфраструктуры облачного кластера выбран пакет программных продуктов от компании VMware, в основе которых лежит аппаратный гипервизор VMware ESXi. На рынке представлены как различные решения для построения виртуальных сред для коммерческого использования на предприятиях, так и инструменты в формате свободно распространяемого программного обеспечения: решения Microsoft на основе гипервизора Hyper-V, комплекс проектов OpenStack и гипервизор KVM, а также решения на базе гипервизора Xen [18–20]. Для реализации собственных средств управления облачной инфраструктурой все перечисленные решения предоставляют различные API (Application Programming Interface, программный интерфейс приложения), позволяющие настраивать и автоматизировать различные операции с виртуальными машинами и сервисами.

Выбор базового программного обеспечения построения облачной инфраструктуры обусловлен накопленным опытом использования средств виртуализации от компании VMware, их широким распространением на рынке и наличием программного интерфейса для Java — часто используемого языка программирования для построения высоконагруженных информационных систем, в том числе для организации научных исследований [11].

Конфигуратор облачного кластера разработан с использованием Java API и реализован процессом службы расписания, вырабатывающим управляющие воздействия

на облачный кластер: включение и выключение виртуальной машины и т. д. В качестве унификации предложенного решения для управления гипервизором в дальнейшем планируется переход к использованию библиотеки libvirt, предоставляющей методы для работы с основными распространенными гипервизорами (<https://libvirt.org/>)

Агент облачного вычислителя представляет собой процесс, запускаемый службой расписания через установленный интервал времени на облачном вычислителе и обеспечивающий запуск программного модуля в круглосуточном режиме. Библиотека программных модулей реализована в виде файлового хранилища на основе файлового сервера, доступного для каждого облачного вычислителя, в ней хранятся исполняемые файлы и прикладные библиотеки. Информационная система облачного кластера и очереди реализованы в виде набора таблиц базы данных под управлением системы управления базой данных MySQL.

Апробация использования облачной виртуальной среды проводилась на задаче моделирования сферической мантийной конвекции с одновременным продолжением расчетов для моделирования двумерной мантийной конвекции со сложной реологией и суперконтинентальным циклом [8, 21]. В этих работах в двумерную модель добавлены континенты, представленные активными маркерами с дополнительной вязкостью и плавучестью.

Для геофизиков заманчиво посчитать численные модели, близкие к реальной Земле. На протяжении последних лет проводилось множество научных исследований как по изучению процессов, протекающих в мантии, с учетом фазовых переходов (см., например, [22]), так и численному моделированию конвекции для отдельных регионов — под кратонами Евразии [23, 24], что свидетельствует об актуальности данной задачи.

В общем случае написание программного кода для двумерной и особенно для сферической модели, да еще со сложной реологией, представляет собой большую сложность, поэтому для решения текущих задач моделирования выбрано программное решение, доступное в сети Интернет — CitcomS [25–27].

В ходе исследования в облачном кластере были созданы три шаблона виртуальных машин со следующими характеристиками:

- операционная система CentOS (процессор 8 ядер, 3 ГГц) для проведения расчетов на основе решения уравнения Стокса и запуска программы Citcom 3S для численного моделирования сферической конвекции;
- операционная система Windows XP (процессор 4 ядра, 3 ГГц) для численного моделирования двумерной конвекции с использованием программы Citcom 2D;
- операционная система Windows 2008 (процессор 4 ядра, 3 ГГц) для интерпретации и визуализации результатов моделирования.

Наиболее интересна реальная модель Земли, полученная на основе данных сейсмической томографии. Используемая авторами модель сейсмической томографии состоит из вариаций сейсмических скоростей в мантии [28]. На ее основе в облачном кластере рассчитывается трехмерная мгновенная модель современной Земли.

Система уравнений тепловой конвекции в мантии включает в себя три проекции уравнения Стокса, уравнение переноса тепла и уравнение неразрывности [1, 2]:

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g \delta_{i3} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left( V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \partial \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) / \partial x_i + H, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial V_i \rho}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

(предполагается суммирование по повторяющимся индексам). Здесь  $\rho(T)$  — плотность мантии;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $T$  — температура, отсчитываемая от адиабатического распределения;  $\kappa$  — коэффициент тепловой диффузии;  $H$  — термометрическая плотность тепловых источников;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера, равный 1 при  $i = j$  и равный 0 при  $i \neq j$ .

Девиаторный тензор вязких напряжений:

$$\tau_{ij} = \eta \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right),$$

где  $\eta(\rho, T)$  — вязкость. Уравнения (1)–(3) содержат неизвестные функции: вектор скорости  $V_i(x_i, t)$ , температуру  $T(x_i, t)$ , давление  $p(x_i, t)$  и тензор вязких напряжений  $\tau_{ij}$ . Мгновенная структура глобальных вязких течений в мантии может быть рассчитана по уравнению Стокса.

Наиболее интересна мгновенная модель современной Земли, полученная на основе данных сейсмической томографии. Используемая авторами модель сейсмической томографии SMEAN2 состоит из вариаций сейсмических скоростей в мантии [28]. Эта модель является одной из лучших и содержит вариации поперечных сейсмических скоростей во всем объеме мантии. На ее основе в облачном кластере рассчитывается трехмерная мгновенная модель современной Земли. Для того чтобы ввести данные этой модели в программу CitcomS, необходимо перевести вариации скоростей поперечных волн в мантии в температурные аномалии. Вариации сейсмических скоростей в мантии пересчитываются в вариации плотности вещества по соотношению  $d\rho = 0.3 dv_s$ , исходя из геофизических соображений [29]. В свою очередь, по вариациям плотности определяется поле вариаций температур в мантии по формуле теплового расширения:  $dT = -(1/\alpha) \cdot (d\rho/\rho)$  с учетом зависимости коэффициента теплового расширения  $\alpha$  от глубины. Данный метод широко распространен в литературе.

Коэффициент теплового расширения  $\alpha$  меняется с глубиной по зависимости  $\alpha = (3 - 4.44(1 - r)) \cdot 10^{-5}$ , где  $r$  — безразмерный радиус Земли от 0 в ядре до 1 на поверхности [29]. Таким образом, коэффициент теплового расширения  $\alpha$  меняется от  $3 \cdot 10^{-5}$  на поверхности Земли до  $1 \cdot 10^{-5}$  на дне мантии на границе с ядром. Более тонкие эффекты сжимаемости вещества, а также эффекты химических вариаций состава вещества мантии, в том числе имеющие место в континентах, в настоящей работе не учитываются. Данные вариации, а также фазовые переходы в мантии были учтены авторами для двумерной модели мантийной конвекции [21, 22]. Для сферической модели планируется сделать это в будущем. В настоящих расчетах используется модель с упрощенной зависимостью вязкости от температуры (закон Аррениуса):

$$\eta_T = \exp(2E/(T + T_{bot}) - 2E/(T_{ref} + T_{bot})),$$

где  $E$  — безразмерный параметр, определяющий перепад вязкости в модели;  $T$  — безразмерная наадиабатическая температура;  $T_{ref} = 0.5$ ,  $T_{bot} = 1$  (температура на дне мантии).

В настоящей работе  $E = \ln 10^{4.5} = 10.36$ , что примерно соответствует энергии активации влажного оливина (431 кДж/моль) [30, 31]. В рассматриваемой модели скачок

вязкости на границе между верхней и нижней мантией принят равным 30. Таким образом, для верхней и нижней мантии зависимость вязкости от температуры приобретает вид

$$\eta_T = \exp(20.72/(T + 1) - 20.72/(0.5 + 1)),$$

$$\eta_T = 30 \exp(20.72/(T + 1) - 20.72/(0.5 + 1)).$$

Для численного моделирования используется сетка  $114 \times 114 \times 58$  узлов по углам и глубине соответственно с равномерным шагом по глубине в 50 км. На входе программа CitcomS считывает 57 файлов, содержащих вариации сейсмических скоростей в Земле, и переводит их в вариации температуры в каждой точке сетки. Затем для каждого момента времени решаются уравнение переноса импульса (Стокса) для скоростей течений и уравнение переноса тепла для поля температуры. Уравнение переноса импульса решается в естественных переменных скорость — давление конечно-элементным методом с помощью алгоритма Узавы [32–34], что позволяет получить решение даже тогда, когда вязкость вещества меняется на много порядков. Уравнение теплопереноса решается методом Петрова — Галёркина. После расчета получается мгновенная цифровая модель мантии Земли, включающая скорости, температуру, вязкость и давление в каждой точке сетки. Далее для интерпретации результатов и их графического представления с помощью программы Surfer построены сечения мантии с фиксированной глубиной и через полюса.

### 3. Результаты численного моделирования

На рис. 2 приведено поле вариаций температуры, пересчитанных из вариаций сейсмических скоростей в модели SMEAN2 в сечении мантии Земли на глубине 100 км с наложенными контурами континентов. Видны океанические хребты — горячие области и под большей частью континентов — холодные области. Исключения составляют Восточная Африка и район Красного моря — так называемый Африканский суперплюм, часть Центральной Азии (Байкальский рифт), часть Восточной Азии и окраинных морей, а также Западная Антарктика. Северная Америка в процессе движения на запад “наехала” на океанический хребет западным побережьем, и поэтому там также находится положительная аномалия температуры в подкоровой мантии. Для Западной Антарктики наблюдается положительная температурная аномалия, которая на поверхности проявляется обширной зоной растяжения и вулканизма. Под остальными континентами на глубинах около 100 км находятся области пониженной температуры, что согласуется с теорией плавающих континентов — континенты находятся на нисходящих мантийных потоках (см., например [4, 5]). На этом рисунке четко видно, что горячее вещество на хребтах всплывает и погружается в холодных областях под континентами.

На рис. 3 приведено поле вариаций температуры, пересчитанных из вариаций сейсмических скоростей в модели SMEAN2 в сечении мантии Земли на глубине 2750 км. Данное сечение находится в пограничной к ядру зоне на дне мантии, в так называемом D'' слое. Видны основания двух восходящих потоков: под Африкой (смещен в сторону южной части) и под центральной частью Тихого океана. Предполагается, что эти два потока поднимаются с областей первичного вещества, лежащих на дне мантии (так называемая primordial mantle). Холодные синие области — это, по-видимому, остатки субдуцировавших слэбов.



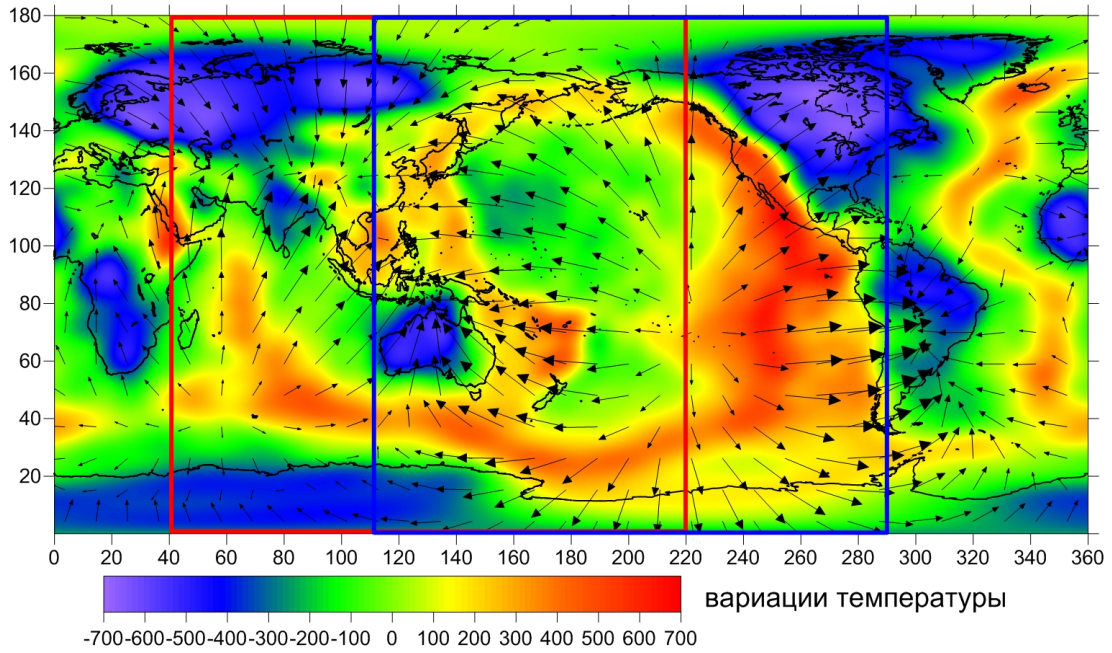


Рис. 2. Распределение температуры и скоростей течений в мантии для сечения на глубине 100 км. Черной линией показаны контуры континентов. Красная линия — сечение Земли по 40 и 220 град. в. д. Синяя линия — сечение Земли по 110 и 290 град. в. д.

Fig. 2. Spatial distributions of the temperature and the flow velocities in the mantle at 100 km depth. The contours of the continents are shown in black. The red line is the cross section of the Earth at the longitude of 40 degrees east and 220 degrees east, respectively. The blue line is the cross section at the longitude of 110 degrees east and 290 degrees east, respectively

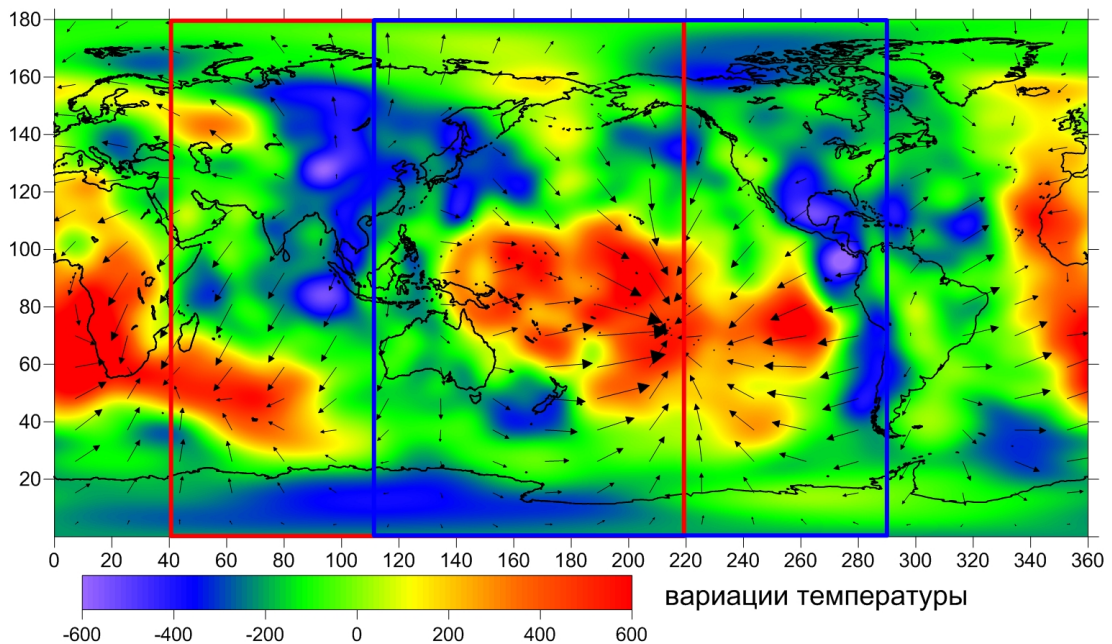


Рис. 3. Распределение температуры и скоростей течений в мантии для сечения на глубине 2750 км. Обозначения те же, что и для рис. 2.

Fig. 3. The temperature and flow velocity distributions at 2750 km depth. See Fig. 2 for the legend

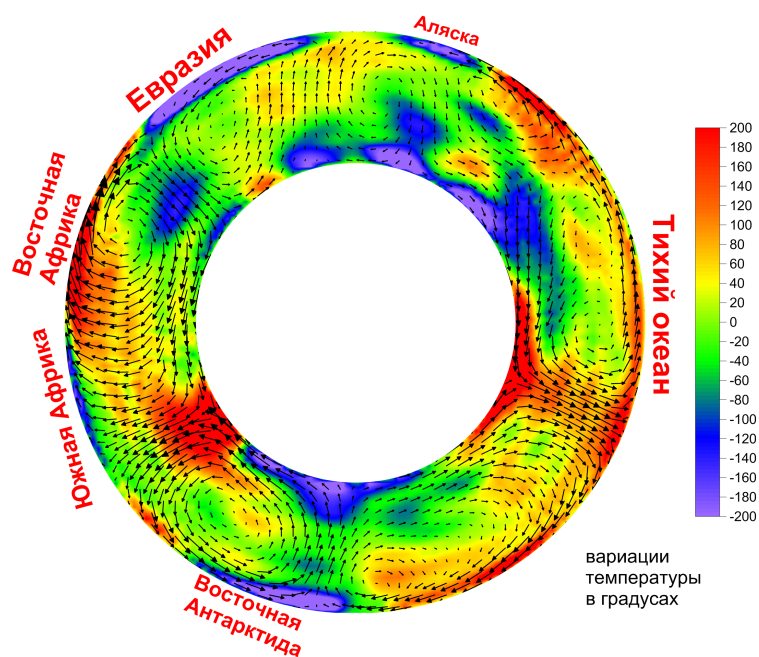


Рис. 4. Распределение температуры и скоростей течений в мантии для сечения Земли по 40 и 220 град. в. д.

Fig. 4. The mantle temperature and flow velocity distributions in the section of the Earth at the longitude of 40 degrees east and 220 degrees east, respectively

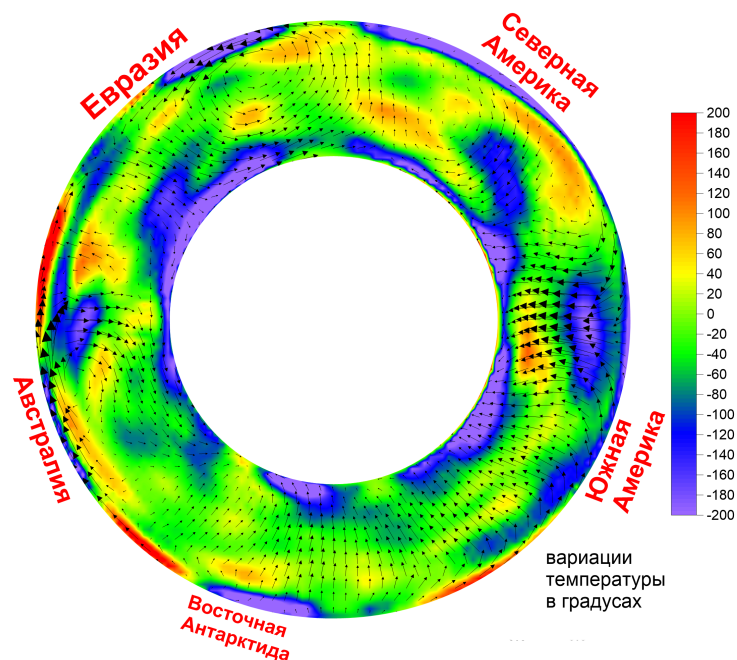


Рис. 5. Распределение температуры и скоростей течений в мантии для сечения Земли по 110 и 290 град. в. д.

Fig. 5. The temperature and flow velocity distributions in the section of the Earth at the longitude of 110 degrees east and 290 degrees east, respectively

Далее были выбраны два характерных меридиональных сечения между полюсами, проходящих через Восточную Африку и центральную часть Тихого океана (40, 220 град. в. д., рис. 4) и через юго-восточную часть Евразии и обе Америки (110, 290 град. в. д., рис. 5). На рис. 4 под всеми континентами, кроме Восточной Африки, находятся нисходящие мантийные потоки и отрицательные аномалии температуры. Глобальный горячий восходящий поток поднимается от ядра под Тихим океаном, восходящий поток также имеется под Восточной Африкой. Нисходящий поток между Африкой и Евразией (см. рис. 4) — это система зон субдукции в Средиземном море.

Как видно из рис. 5, под всеми континентами также находятся отрицательные аномалии температуры. Нисходящие потоки присутствуют под Северной и Южной Америкой, тогда как положительные аномалии имеются на поверхности между Австралией и Антарктикой. Нисходящий мантийный поток находится под Евразией и восходящий поток — под Арктикой, толкающий Северную Евразию на юг, тогда как южная ее часть относительно неподвижна. Это может порождать большие напряжения и горообразование внутри Евразии, что и наблюдается в действительности.

## Заключение

Рассмотрен подход к применению концепции облачных вычислений в модели IaaS в решении задач геодинамики. Данный подход дает возможность сократить время вычислительных экспериментов за счет автоматизации реконfigurирования вычислительных ресурсов в соответствии с требованиями ученых-исследователей.

Для апробации предложенного решения проведено численное моделирование мантийной конвекции с решением уравнения Стокса с помощью программного кода Citcom. Как показывает рассчитанная структура мантийных течений и скорости на поверхности для мгновенной реальной модели Земли, перевод вариаций сейсмических скоростей из модели сейсмической томографии в вариации температуры представляется удовлетворительным. Рассчитанные для реальной Земли мантийные течения качественно согласуются с геофизическими данными и теорией тектоники плит. Под большинством континентов находятся нисходящие мантийные потоки и отрицательные аномалии температуры.

Предлагаемый подход к организации управления вычислительными ресурсами в научной лаборатории позволил:

- обеспечить проведение экспериментов вследствие предоставления виртуальных вычислителей с требуемой конфигурацией для программных модулей;
- сократить время на реконfigurирование вычислительных ресурсов лаборатории;
- провести численное моделирование сферической мантийной конвекции.

В рамках дальнейших исследований планируется расширить функциональность предложенного решения и обеспечить:

- эффективное планирование и распределение разнородных вычислительных ресурсов в условиях их ограниченности;
- интерактивный интерфейс доступа к облачному кластеру для пользователей;
- перейти к модели SaaS (Software as a Service, программное обеспечение как услуга) предоставления программных инструментов для проведения научных экспериментов;
- провести численное моделирование эволюции реальной Земли от современного состояния в будущее на основе сейсмической томографии с использованием разработанных сервисов.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН. Авторы благодарят рецензента, чьи замечания помогли значительно улучшить рукопись, профессора Т. Беккера за модель сейсмической томографии и коллектив разработчиков программного комплекса CitcomS за отличную программу, позволяющую посчитать самые сложные эффекты в мантии Земли.

## Список литературы

- [1] Трубицын В.П., Баранов А.А., Евсеев А.Н., Трубицын А.П. Точные аналитические решения уравнения Стокса для тестирования уравнений мантийной конвекции с переменной вязкостью. *Физика Земли*. 2006; 42(7):3–11.
- [2] Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. *Mantle Convection in the Earth and Planets*. New York: Cambridge Univ. Press; 2001: 940.
- [3] Lobkovsky L., Kotelkin V. The history of supercontinents and oceans from the standpoint of thermochemical mantle convection. *Precambrian Research*. 2015; (259):262–277.
- [4] Phillips B.R., Bunge H.-P. Heterogeneity and time dependence in 3D spherical mantle convection models with continental drift. *Earth Planetary Science Letters*. 2005; 233(1-2): 121–135.
- [5] Yoshida M., Santosh M. Mantle convection modeling of the supercontinent cycle: Introversion, extroversion, or a combination? *Geoscience Frontiers*. 2014; 5(1):77–81.
- [6] Bobrov A.M., Baranov A.A. Modeling of moving deformable continents by active tracers: closing and opening of oceans, recirculation of oceanic crust. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2018; 9(1):287–307.
- [7] Lobkovskii L.I., Inyukhin A.V., Kotelkin V.D. Subduction and cyclic processes in the upper mantle. *Doklady Earth Sciences*. 2014; 459(1):1348–1352.
- [8] Magni V., Faccenna C., van Hunen J., Funicello F. Delamination vs. break-off: the fate of continental collision. *Geophysical Research Letters*. 2013; 40(2):285–289.
- [9] Самоваров О.И., Гайсарян С.С. Архитектура и особенности реализации платформы UniHUB в модели облачных вычислений на базе открытого пакета OpenStack. *Труды Института системного программирования РАН*. 2012; (26):403–420.
- [10] Сухорослов О.В. Интеграция вычислительных приложений и распределенных ресурсов на базе облачной программной платформы. *Программные системы: теория и приложения*. 2014; 5(4):171–182.
- [11] Кудрявцев А.О., Кошелев В.К., Избышев А.О., Дудина И.А., Курмангалеев Ш.Ф., Аветисян А.И., Иванников В.П., Велихов В.Е., Рябинкин Е.А. Разработка и реализация облачной системы для решения высокопроизводительных задач. *Труды Института системного программирования РАН*. 2013; (24):403–420.
- [12] Бухановский А.В., Васильев В.Н., Виноградов В.Н., Смирнов Д.Ю., Сухорук С.А., Яппаров Т.Г. CLAVIRE: перспективная технология облачных вычислений второго поколения. *Известия вузов. Приборостроение*. 2011; (10):7–14.
- [13] Аладышев О.С., Баранов А.В., Ионин Р.П., Киселев Е.А., Орлов В.А. Сравнительный анализ вариантов развертывания программных платформ для высокопроизводительных вычислений. *Вестник УГАТУ*. 2014; 18(3(64)):295–300.
- [14] Баранов А.В., Николаев Д.С. Использование контейнерной виртуализации в организации высокопроизводительных вычислений. *Программные системы: теория и приложения*. 2016; 7(1):117–134.
- [15] Алешин И.М., Холодков К.И. Применение распределенных вычислительных систем к расчету апостериорных распределений. *Геофизические исследования*. 2014; 15(4):73–80.

- 
- [16] **Mell P., Grance T.** The NIST definition of cloud computing. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. Available at: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-145/final> (accessed 10.10.2019).
- [17] **Шабанов Б.М., Телегин П.Н., Баранов А.В., Семенов Д.В., Чуваев А.В.** Динамический конфигуратор виртуальной распределенной вычислительной среды. Программные продукты, системы и алгоритмы. 2017; (4):1–9.
- [18] The Definitive KVM (Kernel-based Virtual Machine) API Documentation. Available at: <https://www.kernel.org/doc/Documentation/virtual/kvm/api.txt> (accessed 10.10.2019).
- [19] VMware API and SDK Documentation. Available at: [https://www.vmware.com/support/pubs/sdk\\_pubs.html](https://www.vmware.com/support/pubs/sdk_pubs.html) (accessed 10.10.2019).
- [20] Windows previous versions documentation. Available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/desktop/virtual/windows-virtualization-portal?redirectedfrom=MSDN> (accessed 10.10.2019).
- [21] **Bobrov A.M., Varanov A.A.** Thermochemical mantle convection with drifting deformable continents: Main features of supercontinent cycle. *Pure and Applied Geophysics*. 2019; 176(8):3545–3565.
- [22] **Бобров А.М., Баранов А.А.** Модель мантийной конвекции с неньютоновской реологией и фазовыми переходами: структура течений и поля напряжений. *Физика Земли*. 2016; 52(1):133–148.
- [23] **Червов В.В., Черных Г.Г., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю.** Численное моделирование трехмерной конвекции в верхней мантии Земли под литосферой Евразии. *Вычислительные технологии*. 2014; 19(5):101–114.
- [24] **Червов В.В., Черных Г.Г., Червов А.В.** Численное моделирование трехмерной конвекции под кратонами Центральной Азии. *Вычислительные технологии*. 2009; 14(5):114–121.
- [25] **Zhong S., Zuber M.T., Moresi L.N., Gurnis M.** Role of temperature-dependent viscosity and surface plates in spherical shell models of mantle convection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2000; 105(B5):11063–11082.
- [26] **Moresi L.N., Gurnis M.** Constraints on the lateral strength of slabs from three dimensional dynamic flow models. *Earth Planetary Science Letters*. 1996; 138(1-4):15–28.
- [27] Computational infrastructure for geodynamics. Available at: <https://geodynamics.org/cig/software/citcoms/> (accessed 10.11.2019).
- [28] **Becker T.W.** On recent seismic tomography for the western United States. *Geochem., Geophys., Geosys.* 2012; (13):Q01W10.
- [29] **Paulson A., Zhong Sh., Wahr J.** Modelling post-glacial rebound with lateral viscosity variations. *Geophysical Journal International*. 2005; (163):357–371.
- [30] **Yoshida M.** Temporal evolution of stress state in a supercontinent during mantle reorganization. *Geophysical Journal International*. 2010; 180(1):1–22.
- [31] **Karato S., Wu P.** Rheology of the upper mantle: a synthesis. *Science*. 1993; (260):771–778.
- [32] **Hughes T.J.R.** The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs; 1987: 825.
- [33] **Ramage A., Wathen A.J.** Iterative solution techniques for the Stokes and Navier—Stokes equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 1994; 19(1):67–83.
- [34] **Гобыш А.В., Шокина Н.Ю.** Анализ вычислительных схем методов конечных элементов и конечных разностей для моделирования течений несжимаемой жидкости. *Вычислительные технологии*. 2006; 11(6):22–30.
-

## COMPUTATIONAL TECHNOLOGIES

DOI:10.25743/ICT.2020.25.2.009

**Numerical modelling of mantle convection in the Earth using cloud technologies**CHUVAEV ANDREY V.<sup>1</sup>, BARANOV ALEXEY A.<sup>2,3</sup>, BOBROV ALEKSANDR M.<sup>2</sup><sup>1</sup>Russian University of Technology — MIREA, 119454, Moscow, Russia<sup>2</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, 123242, Moscow, Russia<sup>3</sup>Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, 117997, Moscow, RussiaCorresponding author: Baranov Alexey A., e-mail: [baranov@ifz.ru](mailto:baranov@ifz.ru)*Received October 21, 2019, revised February 25, 2020, accepted March 11, 2020***Abstract**

We present an example of the realization of a geophysical data processing cluster in a cloud technology model. Cloud technologies can increase the efficiency of computing resources due to their virtualization and ensuring elasticity. The proposed architecture allows reducing the time of numerical modelling by decreasing the time on reconfiguring computing resources in accordance with research requirements. As an example of testing the solution, the problem of numerical modelling of spherical mantle convection based on seismic tomography data was taken. The Stokes equation is solved by the finite element method using CitcomS code. The results of three-dimensional modelling of global mantle convection are presented. Calculations demonstrate the structure of mantle flows in modern Earth. Under the continents, with the exception of East Africa, Southeast and East Asia and West Antarctica, there are downward mantle flows and negative temperature anomalies. The descending mantle flow under Eurasia and the ascending flow under the Arctic push North Eurasia to the south, is causing stresses in the crust and orogenic processes within Eurasia. Another powerful downward mantle flow occurs between North and South America in the Caribbean subduction zone. Ancient cratons are characterized by cold regions in the mantle beneath them. Under East Africa, there is a positive temperature anomaly and an upward mantle flow, responsible for the East African Rift System. A similar anomaly is also found in the Baikal rift zone. A global ascending mantle flow forms under the Pacific Ocean.

*Keywords:* processing of geophysical data, three-dimensional numerical modelling, mantle convection, virtualization, seismic tomography.

*Citation:* Chuvaev A.V., Baranov A.A., Bobrov A.M. Numerical modelling of mantle convection in the Earth using cloud technologies. Computational Technologies. 2020; 25(2): 103–118. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The work is carried out within the framework of the state assignment of the IPE RAS. The authors thank the reviewer, whose comments helped significantly improve the manuscript, Professor T. Becker for the seismic tomography model and the team of developers of the CitcomS software package for an excellent program that allows calculating the most complex effects in the Earth's mantle.

**References**

1. Trubitsyn V.P., Baranov A.A., Evseev A.N., Trubitsyn A.P. Exact analytical solutions of the Stokes equation for testing the equations of mantle convection with a variable viscosity. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2006; 42(7):537–545.
2. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. *Mantle convection in the Earth and planets*. New York: Cambridge Univ. Press; 2001: 940.



3. Lobkovsky L., Kotelkin V. The history of supercontinents and oceans from the standpoint of thermochemical mantle convection. *Precambrian Research*. 2015; (259):262–277.
4. Phillips B.R., Bunge H.-P. Heterogeneity and time dependence in 3D spherical mantle convection models with continental drift. *Earth Planetary Science Letters*. 2005; 233(1-2):121–135.
5. Yoshida M., Santosh M. Mantle convection modeling of the supercontinent cycle: Introversion, extroversion, or a combination? *Geoscience Frontiers*. 2014; 5(1):77–81.
6. Bobrov A.M., Baranov A.A., Modeling of moving deformable continents by active tracers: closing and opening of oceans, recirculation of oceanic crust. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2018; 9(1): 287–307.
7. Lobkovskii L.I., Inyukhin A.V., Kotelkin V.D. Subduction and cyclic processes in the upper mantle. *Doklady Earth Sciences*. 2014; 459(1):1348–1352.
8. Magni V., Faccenna C., van Hunen J., Funicello F. Delamination vs. break-off: the fate of continental collision. *Geophysical Research Letters*. 2013; 40(2):285–289.
9. Samovarov O.I., Gaysaryan S.S. The web-laboratory architecture based on the cloud and the UniHUB implementation as an extension of the OpenStack platform. *Trudy Instituta Sistemnogo Programirovaniya RAN*. 2012; (26):403–420. (In Russ.)
10. Sukhoroslov O.V. Integration of distributed computing applications and resources on the base of cloud platform. *Program Systems: Theory and Applications*. 2014; 5(4):171–182. (In Russ.)
11. Kudryavtsev A.O., Koshelev V.K., Izbyshchikov A.O., Dudina I.A., Kurmangaleev Sh.F., Avetisyan A.I., Ivannikov V.P., Velikhov V.E., Ryabinkin E.A. Development and implementation of a cloud system for solving high-performance tasks. *Trudy Instituta Sistemnogo Programirovaniya RAN*. 2013; (24):403–420. (In Russ.)
12. Boukhanovsky A.V., Vasiliev V.N., Vinogradov V.N., Smirnov D.Yu., Sukhorukov S.A., Yapparov T.G. CLAVIRE: Perspective technology for second generation cloud computing. *Journal of Instrument Engineering*. 2011; (10):7–14. (In Russ.)
13. Aladyshev O.S., Baranov A.V., Ionin R.P., Kiselev E.A., Orlov V.A. Comparative analysis of variants of deployment of program platforms for high performance computing. *Vestnik USATU*. 2014; 18(3(64)):295–300. (In Russ.)
14. Baranov A.V., Nikolaev D.S. The use of container virtualization in the organization of high-performance computing. *Program Systems: Theory and Applications*. 2016; 7(1):117–134. (In Russ.)
15. Aleshin I.M., Kholodkov K.I. Using distributed computing systems for a posteriori distribution computation. *Geophysical Research*. 2014; 15(4):73–80. (In Russ.)
16. Mell P., Grance T. The NIST definition of cloud computing. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. Available at: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-145/final> (accessed 10.10.2019)
17. Shabanov B.M., Telegin P.N., Baranov A.V., Semenov D.V., Chuvaev A.V. Dynamic configurator of a virtual distributed computing environment. *Software Journal: Theory and Applications*. 2017; (4):1–9. (In Russ.)
18. The Definitive KVM (Kernel-based Virtual Machine) API Documentation. Available at: <https://www.kernel.org/doc/Documentation/virtual/kvm/api.txt> (accessed 10.10.2019).
19. VMware API and SDK Documentation. Available at: [https://www.vmware.com/support/pubs/sdk\\_pubs.html](https://www.vmware.com/support/pubs/sdk_pubs.html) (accessed 10.10.2019).
20. Windows previous versions documentation. Available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/desktop/virtual/windows-virtualization-portal?redirectedfrom=MSDN> (accessed 10.10.2019).
21. Bobrov A.M., Baranov A.A. Thermochemical mantle convection with drifting deformable continents: Main features of supercontinent cycle. *Pure and Applied Geophysics*. 2019; 176(8):3545–3565.
22. Bobrov A.M., Baranov A.A. The mantle convection model with non-Newtonian rheology and phase transitions: The flow structure and stress fields. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016; 52(1): 129–143.
23. Chervov V.V., Chernykh G.G., Bushenkova N.A., Kulakov I.Yu. Numerical modelling of 3D convection in the upper Earth mantle under lithosphere of Eurasia. *Computational Technologies*. 2014; 19(5):101–114. (In Russ.)
24. Chervov V.V., Chernykh G.G., Chervov A.V. Numerical modelling of convection under cratons of Central Asia. *Computational Technologies*. 2009; 14(5):114–121. (In Russ.)

25. Zhong S., Zuber M.T., Moresi L.N., Gurnis M. Role of temperature-dependent viscosity and surface plates in spherical shell models of mantle convection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth Journal*. 2000; 105(B5):11063–11082.
26. Moresi L.N., Gurnis M. Constraints on the lateral strength of slabs from three dimensional dynamic flow models. *Earth Planetary Science Letters*. 1996; 138(1-4):15–28.
27. Computational infrastructure for geodynamics.  
Available at: <https://geodynamics.org/cig/software/citcoms/> (accessed 10.11.2019).
28. Becker T.W. On recent seismic tomography for the western United States. *Geochem., Geophys., Geosys.* 2012; (13):Q01W10.
29. Paulson A., Zhong Sh., Wahr J. Modelling post-glacial rebound with lateral viscosity variations. *Geophysical Journal International*. 2005; (163):357–371.
30. Yoshida M. Temporal evolution of stress state in a supercontinent during mantle reorganization. *Geophysical Journal International*. 2010; 180(1):1–22.
31. Karato S., Wu P. Rheology of the upper mantle: a synthesis. *Science*. 1993; (260):771–778.
32. Hughes T.J.R. *The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs; 1987: 825.
33. Ramage A., Wathen A.J. Iterative solution techniques for the Stokes and Navier — Stokes equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 1994; 19(1):67–83.
34. Gobysh A.V., Shokina N.Y. Analysis of finite element and finite difference approximations for the numerical modelling of fluid flows. *Computational Technologies*. 2006; 11(6):22–30. (In Russ.)