

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМЫ РЕШЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО СЛОЖНЫХ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРАХ

Глинский Борис Михайлович

д.т.н., г.н.с., e-mail: gbm@sscc.ru

Сапетина Анна Федоровна

м.н.с., e-mail: sapetina@sscc.ru

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090 г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6.

Снытников Алексей Владимирович

д.т.н., ведущий инженер-программист, e-mail: snytav@gmail.com

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,

630090 г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1

Загорулько Галина Борисовна

к.т.н., н.с., e-mail: gal@iis.nsk.su

Загорулько Юрий Алексеевич

к.т.н., зав. лабораторией искусственного интеллекта, e-mail: zagor@iis.nsk.su

Шестаков Владимир Константинович

м.н.с., e-mail: shestakov@iis.nsk.su

Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН,
630090 г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6.

Аннотация. В статье представлен подход к разработке информационно-аналитической системы, помогающей исследователю решать вычислительно сложные задачи математической физики на суперкомпьютерах. Система автоматически строит схему решения задачи по спецификации пользователя, введенной им в режиме диалога. Схема включает наиболее подходящие математические модели для решения задачи, численные методы, алгоритмы и параллельные архитектуры, ссылки на доступные фрагменты параллельного кода, которые пользователь может использовать при разработке собственного кода. Построение схемы осуществляется на основе онтологии проблемной области «Решение вычислительно сложных задач математической физики», онтологии заданной предметной области и экспертных правил, построенных с использованием технологии Semantic Web.

Ключевые слова: решение вычислительно сложных задач на суперкомпьютерах, информационно-аналитическая система, схема решения задачи, экспертная система, база знаний, онтология, экспертные правила.

Цитирование: Глинский Б.М., Сапетина А.Ф., Снытников А.В., Загорулько Г.Б., Загорулько Ю.А., Шестаков В.К. Автоматизация построения схемы решения вычислительно сложных задач математической физики на суперкомпьютерах // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 4 (24). С. 50-59. DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.005.

Введение. Решение вычислительно сложных задач на суперкомпьютерах – актуальная задача, предъявляющая исследователям высокие квалификационные требования как в области их основных научных и практических интересов, так и в области параллельных вычислений, суперкомпьютерных технологий и архитектур. Для решения этой задачи разрабатываются различные средства, предназначенные для поддержки взаимодействия пользователей с суперкомпьютерами – информационно-справочные системы, системы генерации параллельного кода, системы поддержки распараллеливания программного кода, системы решения ограниченного (определенного) класса задач на суперкомпьютерах.

В статье описываются программные и методические средства, предназначенные для оказания помощи исследователям при разработке параллельного кода. Данные средства разрабатываются в рамках информационно-аналитической системы (ИАС) [1], предназначенной для поддержки решения вычислительно сложных задач математической физики на суперкомпьютерах. Основным результатом работы этой системы является схема решения задачи математической физики на суперкомпьютере, построенная по предоставленной пользователем спецификации задачи. Схема включает наиболее подходящие для решения задачи математические модели, численные методы, алгоритмы, параллельные технологии и архитектуры, ссылки на доступные фрагменты параллельного кода, которые пользователь может использовать при разработке собственного кода. Построение схемы осуществляется на основе онтологии проблемной области «Решение вычислительно сложных задач математической физики», онтологии заданной предметной области и экспертных правил. Для разработки онтологий и экспертных правил использовались технологии Semantic Web.

1. Близкие работы. Рассмотрим работы, имеющие сходство по общей постановке задачи (упрощение или автоматизация разработки параллельных программ), по основному используемому методу (использование набора экспертных компетенций для поддержки пользователя при разработке параллельной программы), либо по реализации действий, выполняемых на одном из уровней онтологического подхода (архитектурном, программном, уровне математической модели).

Система фрагментированного программирования LuNA [2] основана на концепции активных знаний, т.е. автоматического или полуавтоматического конвертирования набора экспертных знаний о предметной области в корректно работающую программу для суперЭВМ. Именно концепция активных знаний позволяет считать систему LuNA на концептуальном уровне аналогом подхода на основе онтологий, представленного в данной статье.

Проект LuNA направлен на исключение параллельного программирования из процесса разработки крупномасштабных численных моделей, и с этой точки зрения проект LuNA решает лишь часть задач, которые ставятся и решаются в рамках предлагаемого онтологического подхода, а именно: система LuNA работает на уровне программной реализации, и отчасти – на уровне привязки к архитектуре суперЭВМ [3], но не затрагивает уровень построения математической модели, что является особенностью и основным преимуществом предлагаемого подхода.

Аналогом онтологического подхода не с концептуальной точки зрения, а по наличию согласованного подхода к реализации основных этапов крупномасштабного вычислительно-эксперимента, является методология базовой системы моделирования (БСМ [4, 5, 6]). Вычислительный эксперимент с использованием методологии БСМ состоит из следующих этапов: геометрическое и функциональное моделирование, построение сеток, аппроксимация исходных уравнений, решение алгебраических задач. Некоторые из перечисленных этапов реализуются с помощью внешнего программного обеспечения (генерация сеток, решение систем алгебраических уравнений), но все это выполняется на основе единого подхода, обеспечивающего качество итогового решения.

Задачу повышения надежности параллельных программ также решает система DVM [7,8], которая позволяет естественным образом реализовывать различные виды параллелизма и позволяет создавать легко переносимые программы в силу того, что системно-зависимые особенности программы генерируются автоматически. В основе пользовательского интерфейса системы находится язык разметки, подобный OpenMP, но в значительно большей степени адаптированный к решению научных задач. Система поддерживает все основные коммуникационные библиотеки, позволяет работать как на однородных, так и на гетерогенных вычислительных системах, в том числе с графическими ускорителями. Также реализована

возможность динамической балансировки нагрузки. Сравняя подход, реализованный в системе DVM с онтологическим подходом, следует отметить, что DVM выходит за пределы исключительно программной реализации, затрагивая также уровень математических моделей, но никак не включает вопросы построения математических моделей. Более того, в силу определенным образом реализованного интерфейса, DVM позволяет реализовывать только сеточные модели с детерминированным и постоянным объемом вычислений.

Приведенный краткий список инструментов, нацеленных на упрощение разработки приложений для решения больших вычислительных задач и повышение надежности параллельных программ, является дополнительным подтверждением актуальности разрабатываемого онтологического подхода к созданию программ для математического моделирования на суперЭВМ.

2. Концептуальная схема интеллектуальной поддержки решения вычислительно сложных задач. Основная идея интеллектуальной поддержки решения вычислительно сложных задач математической физики на суперкомпьютерах заключается в использовании знаний о данной проблемной области, представленных в форме онтологий [9], и опыте решения таких задач, овеществленном в виде методик (учебных пособий, мануалов), экспертных правил и реализованных программных компонентов (фрагментов параллельного кода).

На рис.1 показана концептуальная схема интеллектуальной поддержки решения вычислительно сложных задач, ориентированная на архитектуру «клиент-сервер».

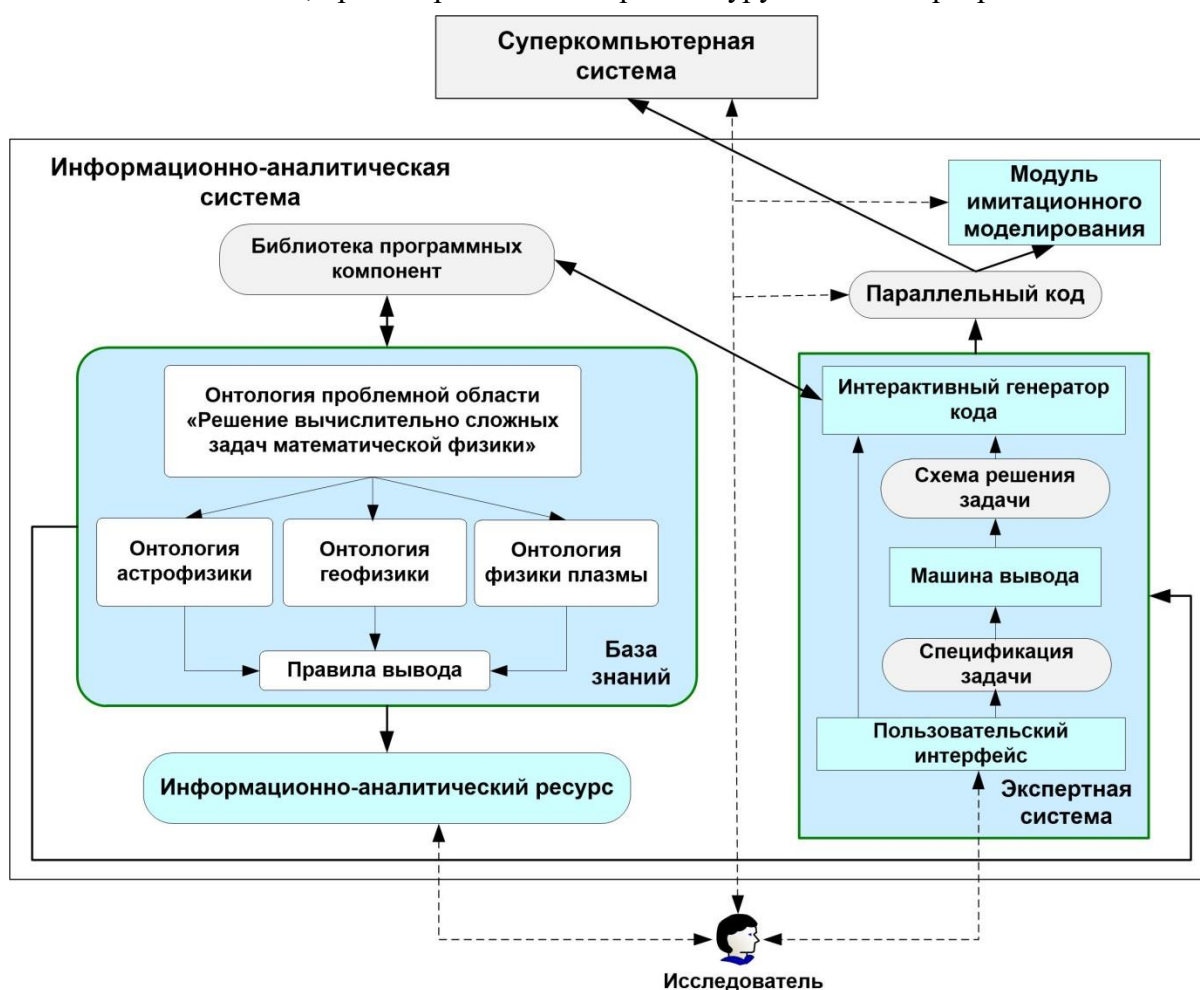


Рис.1. Архитектура информационно-аналитической системы.

В нижней части рисунка представлена информационно-аналитическая система, реализованная в клиентской части, в верхней – выполняющая роль сервера суперкомпьютерная

система, в которой решается задача. (Заметим, что в качестве клиента в этой схеме могут использоваться обычные персональные компьютеры.)

Информационно-аналитическая система (ИАС) включает следующие компоненты (см. рис.1): базу знаний (БЗ), информационно-аналитический интернет-ресурс (ИАИР) по поддержке решения вычислительно сложных задач на суперкомпьютерах (ПРВСЗС) и экспертную систему (ЭС), помогающую пользователю строить параллельный код, решающий его задачу на суперкомпьютере.

База знаний включает онтологию проблемной области «Решение вычислительно сложных задач математической физики», содержащую, в частности, описания вычислительных методов, параллельных алгоритмов, параллельных архитектур и технологий, а также онтологии следующих предметных областей: Астрофизика, Геофизика и Физики плазмы. Предметные онтологии построены на основе онтологии проблемной области и дополняют ее специфичными для них сущностями. Помимо онтологий, база знаний содержит набор правил вывода, отражающих опыт экспертов, полученный при решении задач на суперкомпьютерах.

Все онтологии формализованы на языке OWL (Web Ontology Language) [10], а правила вывода – на языке SWRL [11]. Для построения онтологий и правил вывода (экспертных правил) использовался редактор онтологий Protégé 5.2 [12]. Логический вывод в онтологиях OWL осуществляется на основе аксиом, представленных в онтологии, и правил вывода с помощью одной из доступных машин вывода (Pellet, FaCT ++, HermiT).

База знаний является центральным компонентом ИАС, поскольку ее используют информационно-аналитический интернет-ресурс и экспертная система.

ИАИР ПРВСЗС, базирующийся на онтологии, предназначен для оказания пользователю информационной поддержки при решении вычислительно сложных задач. Он предоставляет полную информацию об имеющихся методах и алгоритмах, о возможностях и ограничениях каждого из них, о характеристиках их реализаций. Этот ресурс снабжен развитым пользовательским web-интерфейсом, предоставляющим содержательный доступ к такого рода информации.

Пользователь ресурса имеет возможность получить всю необходимую для решения его задачи информацию: список доступных методов и алгоритмов, описание особенностей их численной реализации; описание доступных средств для создания параллельного кода; описание доступных архитектур суперкомпьютеров и особенностей программирования для этих архитектур. Благодаря таким возможностям ИАИР ПРВСЗС пользователь может существенно сократить время, требуемое для глубокого ознакомления с проблемной областью, поскольку вся необходимая информация структурирована и собрана в одном месте.

Экспертная система предназначена для оказания помощи пользователю в построении параллельного кода, решающего его задачу на суперкомпьютере. В состав экспертной системы, кроме базы знаний, входят машина вывода (решатель), модуль интерактивной генерации кода и пользовательский интерфейс, обеспечивающий взаимодействие пользователя с перечисленными выше компонентами ЭС.

Машина вывода, используя базу знаний и спецификацию вычислительно сложной задачи, составленную пользователем в ходе диалога, поддержанного пользовательским интерфейсом ЭС, строит оптимальную схему решения задачи.

Модуль интерактивной генерации кода поддерживает создание параллельного кода, решающего поставленную задачу. Данный модуль подставляет в схему решения задачи соответствующие фрагменты кода из библиотеки программных компонентов (ПК). Если в библиотеке ПК нет подходящего компонента, пользователь может подставить необходимый компонент сам, взяв ее из стандартной библиотеки или написав новый.

Библиотека программных компонент и модуль имитационного моделирования реализуются в рамках суперкомпьютерной системы.

Библиотека программных компонентов включает фрагменты кода, реализующие необходимые алгоритмы, исполняемые на суперкомпьютере. Программные компоненты снабжены унифицированными спецификациями, на основе которых может выполняться их интеграция в общий код.

Модуль имитационного моделирования [13] выполняет оценку масштабируемости полученного кода, т.е. оценивает зависимость производительности кода от выбранной параллельной архитектуры. В частности, этот модуль позволяет выбрать оптимальное количество вычислительных ядер для реализации кода, исходя из результатов исследования его поведения при различных количествах ядер в модельном времени.

3. Построение схемы решения задачи. Схема решения задачи (СРЗ) является одним из основных результатов работы ИАС ПРВСЗС. Рассмотрим процесс её построения, исходя из стандартного подхода, принятого в области математической физики.



Рис. 2. Схема взаимосвязей между основными блоками пользовательского интерфейса, элементами схемы решения задачи и группами правил.

Для начала важно определить свойства задачи, которую хочет решить исследователь. Поэтому пользователь ИАС в общем случае должен указать, какой Объект исследования (Физический объект, процесс или явление) он хочет промоделировать, интересующую его размерность задачи и точность решения, статическую или динамическую задачу он будет рассматривать, и какие геометрия и тип расчетной области его интересуют. Эти параметры являются наиболее важными для построения СРЗ. Они могут быть дополнены параметрами, зависящими от конкретного раздела математической физики. Например, для физики плазмы важно понимать, возможно ли излучение плазмы за пределами расчетной области. На этом этапе необходимо также задать свойства моделируемого Объекта исследования. Для спецификации свойств Задачи и Объекта пользовательский интерфейс автоматически строит форму, в которой пользователь может задать значения их свойств и указать их связи. Эта ин-

формация записывается в онтологию. На рис. 2 основные элементы онтологии, которые будут задаваться в редактируемой интернет-форме, выделены голубым цветом. Далее в проблемной онтологии автоматически создаются объекты, соответствующие элементам схемы. На рис. 2 синим цветом выделены классы, объектами которых являются эти элементы. Они будут определяться в процессе логического вывода на основе экспертных правил (представлены на рис. 2 серыми прямоугольниками).

Таким образом, в результате работы ИАС ПРВСЗС пользователь получит СРЗ, которая будет включать Систему уравнений и граничные условия, описывающие решаемую Задачу и моделируемый Объект исследования; Численные методы, с помощью которых будут решаться эти уравнения; Параллельные алгоритмы, реализующие Численные методы; Элементы архитектуры и Технологии параллельного программирования, которые будут учитывать особенности определенных ранее элементов схемы. Если в онтологии будут описаны фрагменты программного кода, реализующие необходимые алгоритмы, то они также будут включены в СРЗ.

4. Правила вывода. Правила вывода разрабатывались в тесном взаимодействии экспертов в предметной области и специалистов по представлению знаний. База знаний рассматриваемой ИАС ПРВСЗС содержит правила двух типов – правила общего вида, служащие для пополнения базы знаний системы, и правила, предназначенные для построения схемы решения конкретной задачи по её спецификации, предоставленной пользователем.

Общие правила позволяют представить в системе знания экспертов о предметной области в целом. Например, правило (1) говорит о том, что для низкотемпературной плазмы с низкой плотностью требуется кинетическая модель.

Плазма(?р), Плазма_Температура(?р, низкая), Плазма_Плотность(?р, низкая) -> моделируется_ОбъектИсследования_ФизическаяМодель(?р, КинетическаяМодель) (1)

Правила для построения схемы решения задачи учитывают особенности конкретной задачи и позволяют выбрать наиболее подходящие для её решения физические и математические модели, численные методы, алгоритмы, параллельные технологии и архитектуры с учетом особенностей параллельной реализации. Так, правило (2) указывает, что для задачи моделирования плазмы с неизвестным видом функции распределения должно использоваться уравнение Власова, а правило (3) предписывает использовать в случае плазмы с одномерной динамикой уравнение Пуассона.

имеетСхему_Задача_Схема(?t, ?s), связанаС_Задача_ОбъектИсследования(?t, ?р), Плазма_ВидФункцииРаспределения(?р, неизвестен), включает_Схема_МатематическуюМодель(?s, ?mm) -> является_Thing_Thing(?mm, УравнениеВласова) (2)

имеетСхему_Задача_Схема(?t, ?s), связанаС_Задача_ОбъектИсследования(?t, ?р), Плазма_Динамика(?р, одномерная), включает_Схема_МатематическуюМодель(?s, ?mm) -> является_Thing_Thing(?mm, УравнениеПуассона) (3)

Правило (4) выражает экспертное знание о том, что для решения уравнения Власова должен применяться конечно-разностный метод, который может быть эффективно реализован на графических ускорителях GPU с применением технологии параллельного программирования CUDA.

имеетСхему_Задача_Схема(?t, ?s),
 включает_Схема_МатематическуюМодель(?s, ?mm),
 является_Thing_Thing(?mm, УравнениеВласова),
 включает_Схема_Технология(?s, ?tech),
 включает_Схема_ЭлементАрхитектуры(?s, ?arel) ->
 является_Thing_Thing(?tech, CUDA), является_Thing_Thing(?arel, GPU_объект) (4)

На рис. 3 показан скриншот окна редактора Protégé, в левой области которого показаны экспертные правила, а в правой области представлен результат работы этих правил: элемент схемы решения упомянутой выше задачи («Система уравнений»), включающий Уравнение Власова и Уравнение Пуассона.

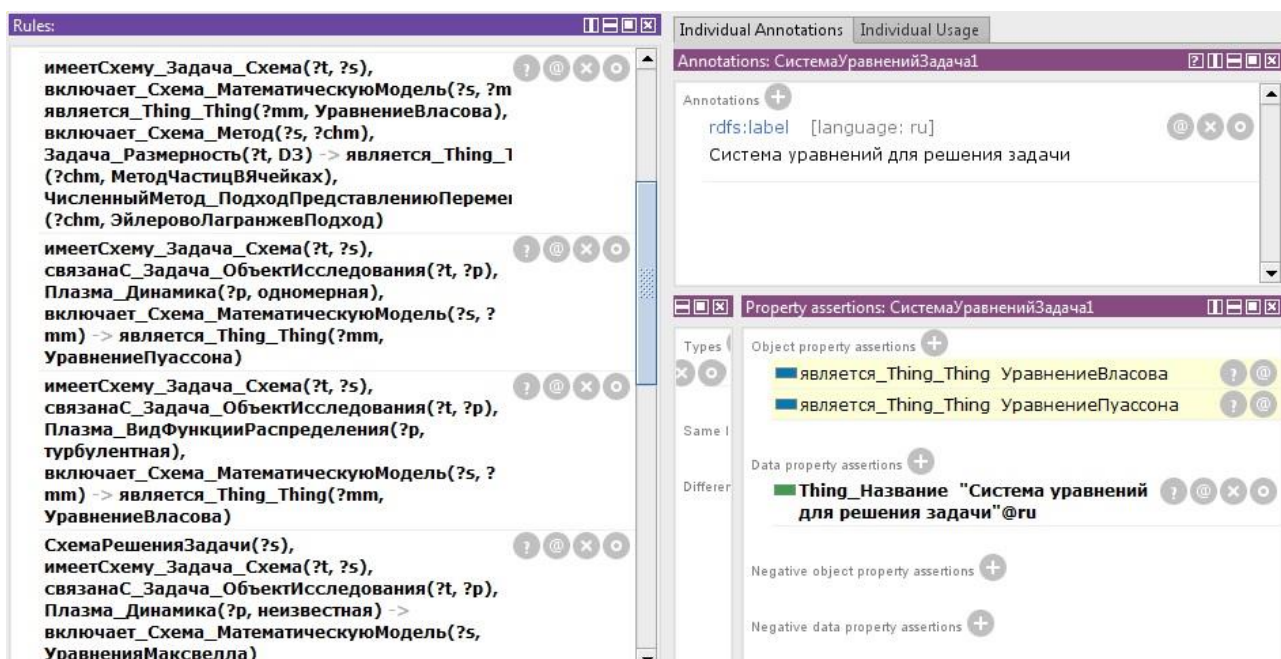


Рис. 3. Правила вывода и результат их работы в окне редактора Protégé.

Заключение. В статье рассмотрена информационно-аналитическая система, предназначенная для поддержки исследователей, разрабатывающих параллельный код. В основе предоставляемых системой средств лежит онтология проблемной области «Поддержка решения вычислительно сложных задач математической физики на суперкомпьютерах». Основным результатом работы системы является схема решения задачи, построенная по спецификации пользователя. Схема включает наиболее подходящие для решения задачи математические модели, численные методы, алгоритмы и параллельные архитектуры, ссылки на доступные фрагменты параллельного кода, которые пользователь может использовать при разработке собственного кода. Построение схемы выполняется на основе онтологий и экспертных правил, построенных с использованием технологии Semantic Web.

В качестве предмета дальнейших исследований планируется автоматизация процесса сборки параллельного кода по построенной схеме решения задачи.

Отличительными особенностями рассматриваемой системы в сравнении с близкими по назначению системами/пакетами являются следующие:

- Доступ к хорошо структурированной информации по решению задач моделирования физических процессов.
- Открытость доступа: возможность посмотреть, что находится «под капотом» предлагаемого решения и при необходимости заменить тот или иной компонент.

- Возможность рассматривать задачи/методы/архитектуры, не представленные в существующих пакетах.
- Возможность использования системы для обучения пользователей.
- Бесплатный доступ и отсутствие специфических условий лицензии по сравнению с платными пакетами.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-07-00085).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zagorulko G., Zagorulko Y., Glinskiy B., Sapetina A. Ontological Approach to Providing Intelligent Support for Solving Compute-Intensive Problems on Supercomputers // Kuznetsov S., Panov A. (eds) Artificial Intelligence. RCAI 2019. Communications in Computer and Information Science. Vol. 1093. 2019. Pp. 363-375. DOI: 10.1007/978-3-030-30763-9_30.
2. Malyshkin V. Active Knowledge, LuNA and Literacy for Oncoming Centuries. // Springer, LNCS. Vol. 9465. 2015. Pp. 292-303. DOI: 10.1007/978-3-319-25527-9_19.
3. Malyshkin V.E., Perepelkin V.A. LuNA Fragmented Programming System, Main Functions and Peculiarities of Run-Time Subsystem. In: Malyshkin V. (eds) Parallel Computing Technologies. PaCT 2011. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6873. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-23178-0_5.
4. Ильин В.П. О производительности и интеллектуальности суперкомпьютерного моделирования // Программирование. № 1. 2016. С. 10-25.
5. Ильин В.П. Фундаментальные вопросы математического моделирования // Вестник РАН. Том 86. № 4. 2016. С. 26-36.
6. П'ин V.P. The Conception, Requirements and Structure of the Integrated Computational Environment. In: Voevodin V., Sobolev S. (eds) Supercomputing. RuSCDays 2018. Communications in Computer and Information Science. Vol. 965. Springer, Cham. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-05807-4_56.
7. Коновалов Н.А., Крюков В.А., Михайлов С.Н., Погребцов А.А. FORTRAN DVM – язык разработки мобильных параллельных программ // Программирование. №1. 1995. С. 49-54.
8. Бахтин В.А., Клинов М.С., Крюков В.А. и др. Расширение DVM-модели параллельного программирования для кластеров с гетерогенными узлами // Доклады академии наук. Том 441. № 6. 2011. С. 734-736.
9. Glinskiy B.M., Zagorulko Yu.A., Zagorulko G.B., Kulikov I.M., Sapetina A.F., Titov P.A., Zhernyak G.F. Building ontologies for solving compute-intensive problems // MSR2020. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1715. 2021. P. 012071. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012071.
10. Antoniou G., Harmelen F. Web Ontology Language: OWL // Handbook on Ontologies. Berlin: Springer Verlag. 2004. Pp. 67-92.
11. SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML. W3C Member Submission 21 May 2004. Available at: <http://www.w3.org/Submission/SWRL/> (accessed 11.11.2021).
12. Protégé. Available at: <https://protege.stanford.edu> (last accessed 11.11.2021).
13. Podkorytov D., Rodionov A., Choo H. Agent-based simulation system AGNES for networks modeling: review and researching // Proceedings of the 6th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ACM ICUIMC 2012). Paper 115. ACM, New York. 2012. DOI: 10.1145/2184751.2184883.

UDC 004.822:004.89:519.63

AUTOMATION OF CONSTRUCTION OF A SCHEME FOR SOLVING COMPUTE-INTENSIVE PROBLEMS OF MATHEMATICAL PHYSICS ON SUPERCOMPUTERS

Boris V. Glinskiy

Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, e-mail: gbm@sscc.ru

Anna F. Sapetina

Junior Researcher, e-mail: sapetina@sscc.ru

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS,
630090 Novosibirsk, Russia, Acad. Lavrentjev pr., 6.

Alexey V. Snytnikov

Doctor of Technical Sciences, Lead Software Engineer, e-mail: snytav@gmail.com

Institute of Automation and Electrometry of SB RAS,
630090 Novosibirsk, Russia, Acad. Koptyug pr., 1

Galina B. Zagorulko

Ph.D., Researcher, e-mail: gal@iis.nsk.su

Yury A. Zagorulko

Ph.D., Head of Laboratory "Artificial Intelligence", e-mail: zagor@iis.nsk.su

Vladimir K. Shestakov

Junior Researcher, e-mail: shestakov@iis.nsk.su

A.P. Ershov Institute of Informatics Systems of SB RAS,
630090 Novosibirsk, Russia, Acad. Lavrentjev pr., 6.

Abstract. The paper presents an approach to the development of an information-analytical system that helps a researcher to solve compute-intensive problems of mathematical physics on supercomputers. The system automatically builds a scheme for solving the problem according to the user's specification entered by him in the dialogue mode. The scheme includes the most suitable mathematical models for solving the problem, numerical methods, algorithms and parallel architectures, links to available fragments of parallel code that the user can use when developing their own code. The construction of the scheme is carried out on the basis of the ontology of the problem area "Solving compute-intensive problems of mathematical physics", the ontology of a given subject area and expert rules built using the Semantic Web technology.

Keywords: solving compute-intensive problems on supercomputers, information-analytical system, scheme for solving the problem, expert system, knowledge base, ontology, expert rules

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 19-07-00085).

REFERENCES

1. Zagorulko G., Zagorulko Y., Glinskiy B., Sapetina A. Ontological Approach to Providing Intelligent Support for Solving Compute-Intensive Problems on Supercomputers // Kuznetsov S., Panov A. (eds) Artificial Intelligence. RCAI 2019. Communications in Computer and Information Science. Vol. 1093. 2019. Pp. 363-375. DOI: 10.1007/978-3-030-30763-9_30.
2. Malyshkin V. Active Knowledge, LuNA and Literacy for Oncoming Centuries // Springer, LNCS. Vol. 9465. 2015. Pp. 292-303. DOI: 10.1007/978-3-319-25527-9_19.
3. Malyshkin V.E., Perepelkin V.A. LuNA Fragmented Programming System, Main Functions and Peculiarities of Run-Time Subsystem. In: Malyshkin V. (eds) Parallel Computing Technologies. PaCT 2011. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6873. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-23178-0_5.

4. Il'in V.P. O proizvoditel'nosti i intellektual'nosti superkomp'yuternogo modelirovaniya [On the performance and intelligence of supercomputer modeling] // Programmirovaniye = Programming and Computer Software. No. 1. 2016. Pp. 10-25. (in Russian).
5. Il'in V.P. Fundamental'nye voprosy matematicheskogo modelirovaniya [Fundamental questions of mathematical modeling] // Vestnik RAN=RAS Bulletin. Vol. 86. No. 4. 2016. Pp. 26-36. (in Russian).
6. Il'in V.P. The Conception, Requirements and Structure of the Integrated Computational Environment. In: Voevodin V., Sobolev S. (eds) Supercomputing. RuSCDays 2018. Communications in Computer and Information Science. Vol. 965. Springer, Cham. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-05807-4_56.
7. Konovalov N.A., Kryukov V.A., Mihajlov S.N., Pogrebcev A.A. FORTRAN DVM – yazyk razrabotki mobil'nyh parallel'nyh programm [FORTRAN DVM - a language for the development of mobile parallel programs] // Programmirovaniye = Programming and Computer Software. No. 1. 1995. Pp. 49-54. (in Russian).
8. Bahtin V.A., Klinov M.S., Kryukov V.A. i dr. Rasshirenie DVM-modeli parallel'nogo programmirovaniya dlya klasterov s geterogennymi uzlami [Extension of the DVM parallel programming model for clusters with heterogeneous nodes] // Doklady akademii nauk = Academy of Sciences reports. Vol. 441. No. 6. 2011. Pp. 734-736. (in Russian).
9. Glinskiy B.M., Zagorulko Yu.A., Zagorulko G.B., Kulikov I.M., Sapetina A.F., Titov P.A., Zhernyak G.F. Building ontologies for solving compute-intensive problems // MSR2020. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1715. 2021. P. 012071. DOI:10.1088/1742-6596/1715/1/012071.
10. Antoniou G., Harmelen F. Web Ontology Language: OWL // Handbook on Ontologies. Berlin: Springer Verlag. 2004. Pp. 67-92.
11. SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML. W3C Member Submission 21 May 2004. Available at: <http://www.w3.org/Submission/SWRL/> (accessed 11.11.2021).
12. Protégé. Available at: <https://protege.stanford.edu> (accessed 11.11.2021).
13. Podkorytov D., Rodionov A., Choo H. Agent-based simulation system AGNES for networks modeling: review and researching // Proceedings of the 6th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ACM ICUIMC 2012). Paper 115. ACM, New York. 2012. DOI: 10.1145/2184751.2184883.

Статья поступила в редакцию 04.12.2021; одобрена после рецензирования 21.12.2021; принята к публикации 23.12.2021.

The article was submitted 04.12.2021; approved after reviewing 21.12.2021; accepted for publication 23.12.2021.