

УДК 004.421+004.4'2+004.771

СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БУЛЕВОЙ ВЫПОЛНИМОСТИ

Богданова В.Г., Горский С.А., Пашинин А.А.

*Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
Иркутск, e-mail: idstu@icc.ru*

В статье рассматривается мультиагентный подход к параллельному решению булевых уравнений в распределенной гетерогенной вычислительной среде. Описывается мультиагентная система, управляющая этим процессом, особенностью которой является реализация агентов в виде сервисов. Мультиагентная система декомпозирует исходную задачу на подзадачи, формирует очередь заданий для подзадач, осуществляет подбор подходящего кластера, постановку в очередь заданий, запуск решателя булевых уравнений, контроль выполнения заданий, объединение полученных результатов, информирование пользователя о ходе решения. Приводится гибридный алгоритм решения булевых уравнений, использующий параллельные технологии обмена сообщениями и работы с общей памятью. Рассматриваются примеры использования мультиагентной системы для решения ряда задач булевой выполнимости, являющейся фундаментальной в математической логике и теории вычислений. Решение этих задач осуществляется путем проведения многовариантных распределенных вычислений, что позволяет существенно сократить время их решения. В качестве распределенной вычислительной среды используются вычислительные кластеры суперкомпьютерного центра коллективного пользования при ИДСТУ СО РАН. Принципы работы рассмотренного инструментария обеспечивают широкий спектр использования его функциональных возможностей для управления параллельным выполнением приложения пользователя в распределенной вычислительной среде при проведении вычислительных экспериментов в разнообразных предметных областях, где естественным образом возникают дискретные модели в виде систем булевых уравнений.

Ключевые слова: мультиагентная система, сервисы, инструментальные средства, булевы уравнения

SERVICE-ORIENTED TOOLS FOR SOLVING OF BOOLEAN SATISFIABILITY PROBLEM

Bogdanova V.G., Gorskiy S.A., Pashinin A.A.

*Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, e-mail: idstu@icc.ru*

In this paper we consider a multiagent approach to the parallel solving of Boolean equations in a distributed heterogeneous computing environment. We propose the multiagent system based on service-oriented technology for management of this solving. This system decomposes the original task into subtasks, forms queue of subtasks, selects the appropriate cluster, enqueues this tasks, starts the solver of Boolean equations, controls the execution of tasks, unites the results, informs the user about the progress. New hybrid algorithm of this solver that uses parallel technology of message passing and shared memory is presented. The experimental results of applications of the multiagent system with such solver demonstrates the effectiveness and scalability of our proposal for solving a number of boolean satisfiability problems. This problem are fundamental in mathematical logic and the theory of computation. Solving these problems is carried out by represented multiagent system through multivariant distributed computing, which can significantly reduce execution time. The supercomputer center of ISDCT SB RAS is used as a distributed computing environment. Tools based on our approach allows to use their features in different subject areas where discrete models arise in the form in the form of system of Boolean equations.

Keywords: multi-agent system, services, tools, Boolean equations

В настоящее время представляется актуальным создание инструментальных средств, обеспечивающих разработку программных сред для доступа предметных специалистов к высокопроизводительным вычислительным ресурсам и использования этих ресурсов без необходимости углубленного знания вычислительных архитектур и низкоуровневых средств разработки приложений [6, 7, 8, 10]. Одновременно прослеживаются тенденции, с одной стороны, использования сервис-ориентированного подхода, подразумевающего организацию сервисов доступа к вычислительным ресурсам посредством сети интернет, с другой

стороны, применения мультиагентных технологий для управления вычислениями [3, 5, 11]. Также в последние годы активно ведутся исследования, связанные с привлечением высокопроизводительных вычислений для решения задачи выполнимости булевых ограничений (SAT) – одной из фундаментальных проблем математической логики и теории вычислений. Эта задача состоит в том, чтобы определить, выполнима ли данная булева формула, представленная в конъюнктивной нормальной форме (КНФ), то есть существует ли набор булевых значений переменных формулы, при котором ее значение становится истинным. Известно,

что многие практически важные задачи могут быть сформулированы как задачи булевой выполнимости (решения системы булевых уравнений). Высокая вычислительная сложность SAT-задач актуализирует разработку новых эффективных методов и параллельных программных средств их решения, в частности SAT-решателей. В зависимости от реализуемого подхода современные параллельные SAT-решатели делятся на два семейства – решатели, использующие кооперацию и конкуренцию. При первом подходе поисковое пространство делится на части, затем организуется поиск параллельно в каждой части пространства отдельным решателем. При втором подходе каждый решатель работает с одной и той же формулой, но использует альтернативные пути поиска.

Целью данного исследования является разработка алгоритма параллельного решения SAT-задач специального вида в гетерогенной распределенной вычислительной системе (РВС), позволяющего, в отличие от известных (см., например, [13, 14]), учитывать вычислительные характеристики узлов этой системы при динамическом распределении подзадач, полученных в результате расщепления исходной задачи. Новизной предложенного подхода является использование мультиагентных технологий для организации трехуровневого параллелизма процесса решения задачи на основе гибридного подхода с применением MPI и OpenMP. В статье рассматривается мультиагентная система (МАС) HpcSoMas [2, 4], управляющая распределенным решением SAT-задачи на уровне РВС, и гибридный решатель hpcsat [1], предназначенный для решения SAT-задач на вычислительных кластерах с SMP-узлами и использующий на уровне кластера первый подход, с возможностью применения второго подхода на нижнем уровне, в узле кластера.

Мультиагентная система. МАС HpcSoMas предназначена для организации вычислительных экспериментов в предметных областях, где используются дискретные модели в виде систем булевых уравнений. HpcSoMas была разработана на основе сервис-ориентированной технологии, использование которой позволяет реализовать агентов в виде web-сервисов. При дальнейшем изложении материала будем называть сервисы, реализованные на основе архитектурного стиля REST, rest-сервисами, на основе стандарта SOAP – soap-сервисами. В МАС можно выделить три уровня иерархии агентов: уровень пользовательских агентов, представленный клиентами в браузере; уровень агентов-менеджеров (rest-сервисов); уровень

реактивных агентов выполнения заданий (soap-сервисов). Многоуровневая архитектура позволяет реализовывать функциональные части МАС по отдельности и при необходимости повторно использовать эти части в других приложениях.

Пользователь может подключаться к агенту-менеджеру через web-интерфейс пользовательского агента, доступный для компьютеров и мобильных устройств, подключенных к сети Интернет, при наличии соответствующей учетной записи пользователя на вычислительном кластере. Все основные функции агента-менеджера вынесены в отдельные soap-сервисы, что позволяет производить замену отдельных компонентов системы либо подключение новых без ее полного обновления. Soap-сервисы могут выполнять следующие функции: расчета ставок на выполнение задания, уведомления пользователей, постановки задания в очередь системы управления заданиями (СУПЗ) вычислительного кластера (ВК), получения информации о состоянии ВК, декомпозиции заданий, расчета оценки состояния ВК, аутентификации пользователей и др. Sat-решатель так же представлен, как soap-сервис, с помощью разработанных авторами средств оформления приложения пользователя в виде сервиса [2].

С помощью web-интерфейса пользователь формулирует постановку задачи (передает файл с исходной КНФ) и инициирует процесс решения задачи. На основе полученных исходных данных пользовательский агент генерирует множество подзадач и передает их агенту планирования вычислений, который, в свою очередь, формирует задание для каждой подзадачи. Сформированный пул заданий направляется агенту-менеджеру. Агент-менеджер, получив задание, при помощи сервисов мониторинга состояния системы, параметров, заданных пользователем, а также полученных из самого задания, оценивает дальнейшие возможности по его обработке, отправляя запросы другим агентам-менеджерам для проведения тендера. Агенты взаимодействуют на основе координированного сотрудничества, достигаемого в процессе торгов за выполнение задания, которое не смог самостоятельно выполнить получивший его агент. Агент, получивший задание, ставит его в очередь СУПЗ ВК. На этапе выполнения задания запускается решатель hpcsat. Агенты мониторинга отслеживают состояние каждого задания. В случае появления в РВС дополнительных свободных вычислительных ресурсов и пустого пула заданий у агента-менеджера процесс вычислений приостанавливается, одна из активных подзадач снимается с решения,

для нее производится дальнейшая декомпозиция, после чего формируются дополнительные задания и процесс вычислений возобновляется. Если решение найдено, задания снимаются с решения или удаляются из очереди (в зависимости от текущего статуса). Если в результате выполнения всех заданий решение не найдено, пользователь получает уведомление о завершении процесса решения с ответом «UNSAT» (функция невыполнима).

Применение HpcSoMas совместно с решателем hpcsat позволяет организовать трехуровневый параллелизм: на уровне РВС (агент-менеджер MAC, rest-сервис), на уровне узла РВС (главный процесс hpcsat, технология MPI, soap-сервис) и на уровне узла кластера (дочерние процессы hpcsat, технология OpenMP). Реализация такого многоуровневого параллелизма показана на рис. 1.

Решатель hpcsat. Решатель hpcsat [1, 4] представляет собой MPI-приложение на языке C++. Главный процесс приложения организует динамическую очередь подзадач, получаемых в результате декомпозиции исходной булевой модели. В дочернем процессе может выполняться как многопоточное, так и однопоточное приложение. В качестве такого приложения может использоваться программа, осуществляющая декомпозицию булевой модели методом расщепления либо SAT-решатель (собственный или сторонней разработки). При использовании последовательного решателя в hpcsat реализуется одноуровневый параллелизм по данным, при использовании многопоточного – двухуровневый параллелизм на основе гибридного подхода. Для распараллеливания на уровне узла кластера применяется технология работы с общей памятью.

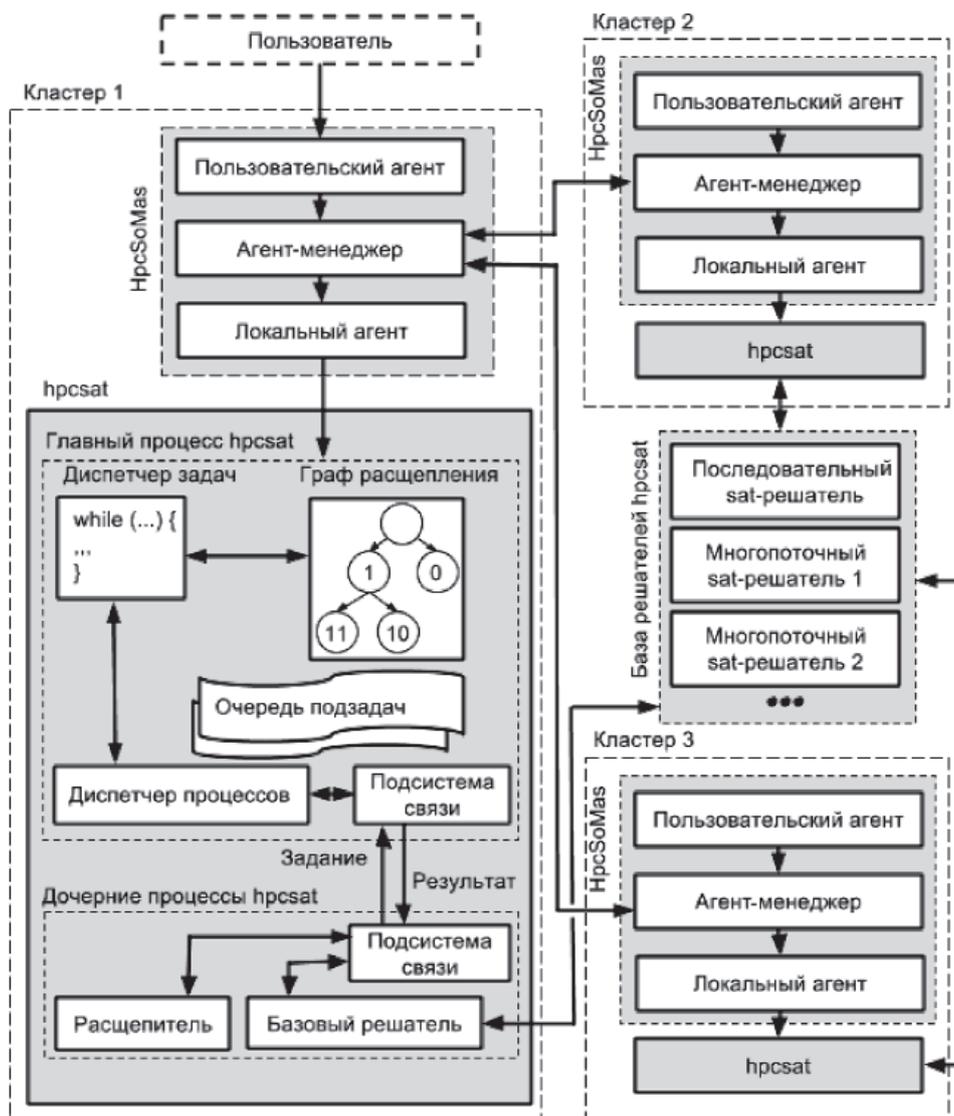


Рис. 1. Схема организации работы MAC HpcSoMas и hpcsat

Для представления узла дерева разработан ряд методов, в том числе рекурсивных, для работы с деревом. Управление состоянием дерева диспетчером подзадач осуществляется с помощью этих методов. Следует отметить, что ветви дерева, для которых в процессе расщепления на этапе упрощения остаточной функции получено значение «UNSAT», отсекаются. Узел дерева становится готовым для формирования подзадачи базовому решателю, когда количество переменных остаточной функции принимает граничные значения, заданные в начале работы hrcsat. Однако в процессе работы может возникнуть ситуация, когда из очереди первыми попадают на выполнение подзадачи, не имеющие решения. Поэтому в разработанном решателе применены механизмы квантования времени и отложенных подзадач. Под квантованием времени понимается прерывание процесса выполнения базового решателя при достижении определенного лимита по времени.

Вычислительные эксперименты. Для проверки работоспособности и эффективности разработанных средств были прове-

дены вычислительные эксперименты [4]. В качестве РВС использована интегрированная кластерная среда, объединяющая вычислительные кластеры суперкомпьютерного центра ИДСТУ СО РАН [9].

Эксперименты проводились на ряде булевых моделей: для классической тестовой задачи о голубях и клетках (оценивались ускорение и эффективность), для четырех задач с соревнований SAT Competition13 [15] (эти задачи не были решены ни одним из участвовавших SAT-решателей за 5000 секунд), для задачи Эйлера о ходе шахматного коня (сформулированной как задача булевой выполнимости).

Результаты тестирования решателя hrcsat при решении задачи о голубях и клетках на вычислительном кластере «Академик В.М. Матросов» [9] (рис. 2, 3) не уступают по эффективности результатам, полученным с помощью ASP-солвера claspar на IBM Blue Gene/P (см. [12], рис. 1). При этом решатель hrcsat достигает более высокой размерности, имея относительное преимущество над claspar по времени решения (табл. 1).

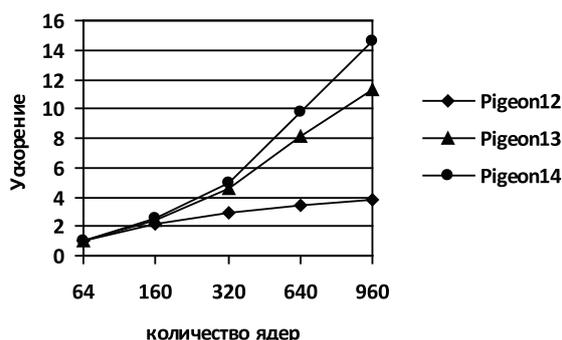


Рис. 2. Ускорение решателя hrcsat на задаче о голубях и клетках

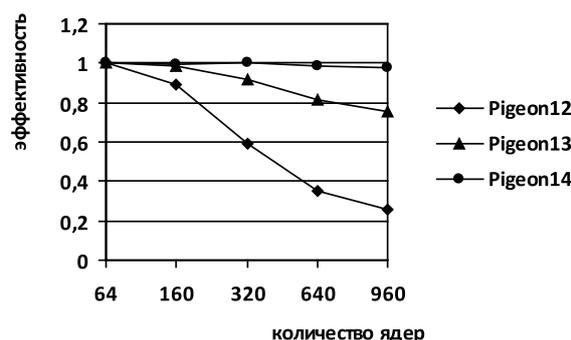


Рис. 3. Эффективность решателя hrcsat на задаче о голубях и клетках

Таблица 1

Время решения (в секундах) задачи о голубях и клетках для размерности 12 и 13

Число ядер	hrcsat		claspar	
	640	960	2048	4096
pigeon12	56	52	111	330
pigeon13	368	256	813	573
pigeon14	10434	7013	–	–

Таблица 2

Время решения (в секундах) задач с соревнований SAT Competition13

КНФ	Переменных/ дизъюнктов	HrcSoMas + hrcsat	
		256 ядер	1024 ядер
rbsat-v1150c84314gyes7.cnf	1150/84314	1316	514
toughsat_factoring_inf.cnf	2878/15516	2147	553
gss-25-s100.cnf	31931/96111	1985	126
b04_s_2_unknown_pre.cnf	123133/801488	2988	1640

Таблица 3

Время решения задачи о ходе шахматного коня различными решателями

КНФ	Количество переменных/дизъюнктов	Время решения (в секундах)			
		minisat	manysat	penelope	HrcSoMas+hpcsat
knight10	10000/1913276	–	–	7137	245
knight11	14641/3456362	–	–	976	554
knight12	20736/5784352	–	–	–	1700

Результаты, приведенные на рис. 2 и 3, показывают, что с увеличением размерности ускорение приближается к линейному и эффективность становится стабильно высокой.

Для тестирования задач, не решенных в рамках соревнований SAT Competition13, решатель hpcsat успешно получил решение, приведены результаты для 256 и 1024 ядер (табл. 2).

Задача Эйлера о ходе шахматного коня является частным случаем задачи о нахождении гамильтонова пути в графе. Данная задача имеет много решений, но при этом тяжела для SAT-решателей в силу высокой размерности. В табл. 3 приведены результаты решения задачи о ходе шахматного коня, полученные с помощью решателя hpcsat в автономном режиме и в режиме интеграции с MAC HrcSoMas. В табл. 3 для сравнения сведены результаты работы сторонних SAT-решателей (minisat, manysat, penelope) и разработанного решателя hpcsat. Прочерк в графе таблицы присутствует, если решение задачи не было получено (задача заканчивалась аварийно или время ожидания завершения превышало 5 часов).

Приведенные эксперименты позволяют сделать вывод о работоспособности и эффективности разработанных методов и инструментальных средств.

Заключение

В статье рассмотрен сервис-ориентированный подход к организации проблемно-ориентированных распределенных вычислений в РВС. В рамках данного подхода выработана общая концепция реализации многоуровневого параллелизма в РВС, для решения булевых уравнений разработан sat-решатель на основе гибридного метода полного поиска с интеллектуальным возвратом, сочетающий технологии MPI и OpenMP, разработаны мультиагентные средства управления вычислениями, новые высокоуровневые инструментальные средства построения интерфейсов сервис-ориентированных приложений. Предложенный подход позволяет существенно сократить время решения задачи под управлением мультиагентной системы по сравнению со

стандартизированными менеджерами ресурсов за счет средств динамической декомпозиции заданий и возможности миграции заданий по узлам вычислительной среды.

Список литературы

1. Богданова В.Г., Горский С.А. Технология параллельного решения систем булевых уравнений на вычислительном кластере // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 1 (37). – С. 54–60.
2. Бычков И.В., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Богданова В.Г., Пашинин А.А. Мультиагентные методы и инструментальные средства управления в сервис-ориентированной распределенной вычислительной среде // Труды ИСП РАН. – 2014. – т. 26. – Вып. 5. – С. 65–82.
3. Бычков И.В., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Корсуков А.С. Децентрализованное управление потоками заданий в интегрированной кластерной системе // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2011. – Т. 9. – Вып. 2. – С. 42–54.
4. Бычков И.В., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Богданова В.Г., Пашинин А.А. Сервис-ориентированный подход к мультиагентному управлению распределенными вычислениями // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления «ВСПУ-2014» (Москва, 16–19 июня 2014 г.). – М.: ИПУ РАН, 2014. ISBN 978-5-91450-151-5. С. 8942–8953.
5. Бычков И.В., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Богданова В.Г., Корсуков А.С. Сервис-ориентированный подход к организации распределенных вычислений с помощью инструментального комплекса DISCENT // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2014. – № 2. – С. 7–15.
6. Валуев И.А., Морозов И.В. Библиотека для управления заданиями на удаленных вычислительных ресурсах и распределенных системах // Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма: Тр. XV Междунар. суперкомпьютерной конф. (Новороссийск, 22–27 сентября 2013 г.). – М.: Изд-во МГУ, 2013. – С. 57–64.
7. Гергель В.П., Сенин А.В. Разработка системы управления интегрированной средой высокопроизводительных вычислений «мегаcluster» // Вестник НГУ. – 2010. – № 6. – С. 186–194.
8. Жуматий С.А., Соболев С.И., Стефанов К.С. Решение оптимизационных гидродинамических задач в распределенной среде на основе вычислительных ресурсов МГУ // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2010. – Т. 11, № 2. – С. 66–68.
9. Иркутский суперкомпьютерный центр Сибирского отделения РАН // URL: <http://hpc.icc.ru> (дата обращения 12.12.2014).
10. Опарин Г.А., Феоктистов А.Г. Инструментальная распределенная вычислительная САТУРН-среда // Программные продукты и системы. – 2002. – № 2. – С. 27–30.
11. Bogdanova V.G., Bychkov I.V., Korsukov A.S., Oparin G.A., and Feoktistov A.G. Multiagent Approach to Controlling Distributed Computing in a Cluster Grid System // Journal

of Computer and Systems Sciences International, 2014. – Vol. 53. – № 5. – P. 713–722. DOI: 10.1134/S1064230714040030.

12. Experiences Running a Parallel Answer Set Solver on Blue Gene / L. Schneiderbach and al. // URL: <http://www.cs.uni-potsdam.de/wv/pdfformat/scscgekakasc09a.pdf> (дата обращения: 12.12.2014).

13. Hamadi Y., Wintersteiger C. Seven Challenges in Parallel SAT Solving // AI Magazine: AAAI. – 2013. – Vol. 34. – № 2. – P. 99–106.

14. Martins R., Manquinho V., Lynce I. An Overview of Parallel SAT Solving // Constraints. – 2012. – Vol. 17. – № 3. – P. 304–347.

15. The international SAT Competitions web page // URL: <http://www.satcompetition.org> (дата обращения: 12.12.2014).

References

1. Bogdanova V.G., Gorskiy S.A. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2013, no. 1 (37), pp. 54–60.

2. Bychkov I.V., Oparin G.A., Feoktistov A.G., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Trudy ISP RAN [The Proceedings of ISP RAS], vol. 26, issue 5, 2014, pp. 65–82.

3. Bychkov I.V., Oparin G.A., Feoktistov A.G., Korsukov A.S. *Vestnik NGU Serija: Informacionnye tehnologii*, 2011, Vol. 9, no. 2, pp. 42–54.

4. Bychkov I.V., Oparin G.A., Feoktistov A.G., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. *Trudy XII Vserossijskogo soveshchaniya po problemam upravleniya «VSPU-2014»* (Moscow, 16-19 June 2014), IPU RAN, 2014, ISBN 978-5-91450-151-5, pp. 8942–8953.

5. Bychkov I.V., Oparin G.A., Feoktistov A.G., Bogdanova V.G., Korsukov A.S. *Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy*, 2014, no. 2, pp. 7–15.

6. Valuev I.A., Morozov *Nauchnyj servis v seti Internet: vse grani paralelizma: Trudy XV Mezhdunarodnoj superkomp'juternoj konferencii* (Novorossiysk, 22-27 september 2014), 2013, pp. 57–64.

7. Gergel V.P., Senin A.V. *Vestnik NGU*, 2010, no. 6, pp. 186–194.

8. Zhumatij S.A., Sobolev S.I., Stefanov K.S. *Vychislitel'nye metody i programirovanie: novye vychislitel'nye tehnologii*, 2010, Vol. 11, no. 2, pp. 66–68.

9. Irkutskij superkomp'juternyj centr Sibirskogo otdelenija RAN. Available at: <http://hpc.icc.ru> (accessed 12.12.2014)

10. Oparin G.A., Feoktistov A.G. *Programmnye produkty i sistemy*, 2002, no. 2, pp. 27–30.

11. Bogdanova V.G., Bychkov I.V., Korsukov A.S., Oparin G.A. and Feoktistov A.G. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2014, vol. 53, no. 5, pp. 713–722, DOI: 10.1134/S1064230714040030.

12. Experiences Running a Parallel Answer Set Solver on Blue Gene / L. Schneiderbach and al. Available at: <http://www.cs.uni-potsdam.de/wv/pdfformat/scscgekakasc09a.pdf> (accessed 12.12.2014).

13. Hamadi Y., Wintersteiger C., *AI Magazine: AAAI*, 2013, vol. 34, no. 2, pp. 99–106.

14. Martins R., Manquinho V., Lynce I. *Constraints*, 2012, vol.17, no. 3, pp. 304–347.

15. The international SAT Competitions web. Available at: <http://www.satcompetition> (12.12.2014).

Рецензенты:

Ружников Г.М., д.т.н., старший научный сотрудник, зав. отделением информационных технологий и систем, Институт динамики систем и теории управления СО РАН имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск;

Данеев А.В., д.т.н., профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск.

Работа поступила в редакцию 06.03.2015.