

*На правах рукописи*

Шаповалов Тарас Сергеевич

**ПЛАНИРОВАНИЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ  
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

05.13.11 — Математическое и программное обеспечение вычислительных  
машин, комплексов и компьютерных сетей

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иркутск — 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Вычислительном центре Дальневосточного отделения РАН (ВЦ ДВО РАН).

Научный руководитель: член-корреспондент РАН,  
профессор  
**Смагин Сергей Иванович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор  
**Массель Людмила Васильевна**

доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Нурминский Евгений Алексеевич**

Ведущая организация: **Новосибирский государственный университет**

Защита состоится **31 марта 2011 г.** в **13 ч. 00** мин. на заседании Диссертационного совета Д 003.021.01 в Учреждении Российской академии наук Институте динамики систем и теории управления Сибирского отделения РАН (ИДСТУ СО РАН) по адресу: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДСТУ СО РАН.

Автореферат разослан **28 февраля 2011 г.**

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н.

 А.А. Щеглова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В различных сферах человеческой деятельности можно встретить множество ресурсоемких задач, требующих интенсивных вычислений. Для их решения широко применяются *распределенные вычислительные системы* (РВС). Примерами РВС могут служить системы, построенные по технологии Grid; Clouds Computing; системы, использующие вычислительное время простаивающих рабочих станций. С 2000 года в мире введен в эксплуатацию ряд крупных Grid: EGEE, NorduGrid, Open Science Grid, TeraGrid и др. Проводятся исследования по распределению вычислительной работы между простаивающими рабочими станциями с использованием сети Интернет: проекты *Folder@Home*, *GIMPS*, *MilkyWay@Home* и др.

Основное назначение РВС — решение ресурсоемких вычислительных задач, для которых производительности имеющихся в распоряжении ЭВМ не достаточно. В результате распределения вычислительной работы между процессорами может уменьшаться время расчета и увеличиваться точность решения. Эффективность эксплуатации РВС как среды с коллективной формой обслуживания пользователей зависит в первую очередь от алгоритма распределения ресурсов между запускаемым прикладным программным обеспечением, т.е. от алгоритма составления расписания выполнения заданий. Существенный вклад в развитие таких алгоритмов для РВС и кластерных систем внесли Топорков В.В., Коваленко В.Н., Семячкин Д.А., Токарев А.Н., Foster I.T., Kesselman С. и др.

В диссертационной работе исследуется применение *генетических алгоритмов* (ГА) к решению задачи составления расписаний выполнения заданий в РВС. Идеи ГА, интенсивно разрабатываемые в последние десятилетия, успешно применяются при решении различных задач оптимизации. Данный класс алгоритмов исследуется с 70-х годов XX века как в России, так и за рубежом под руководством следующих исследователей: Курейчик В.М., Скобцов Ю.А., Иванов Д.Е., Емельянов В.В., Holland J.H., Jong A.D., Goldberg D.E. и др.

Алгоритмы данного типа, будучи по природе своей стохастическими, могут находить приближенные решения NP-полных задач составления расписаний за полиномиальное время. Данное свойство становится особо важным при построении расписания для РВС с большим числом процессоров и заданий. Для ускорения нахождения субоптимального решения ГА может быть распараллелен естественным образом и скомбинирован с другими алгоритмами.

К настоящему времени нетривиальная проблема использования ГА для составления расписаний выполнения заданий в РВС изучена не достаточно. Наиболее часто для решения данной задачи находят применение алгоритм FCFS, семейство списочных алгоритмов и алгоритм обратного заполнения (Backfill), которые при определенных условиях могут уступать в эффективности составленных расписаний генетическому алгоритму. Таким

образом, разработка эффективного ГА составления расписания выполнения заданий, а также алгоритма планирования непрерывно поступающих заданий в РВС на основе этого ГА является актуальной задачей.

**Целью** работы является разработка и исследование генетических алгоритмов составления расписания выполнения непараллельных и параллельных заданий в распределенных вычислительных системах, а также разработка и программная реализация алгоритма планирования непрерывно поступающих заданий на основе указанных генетических алгоритмов.

**Объектом исследования** являются теория и практика организации распределенных вычислений.

**Предметом исследования** являются методы планирования заданий в распределенных вычислительных системах.

**Методы исследования.** В процессе исследования использовались теория расписаний и методы эволюционного поиска. При решении поставленных задач применялись также методы системного и прикладного программирования; методы объектно-ориентированного программирования; технология построения вычислительных кластеров и Grid.

**Научная новизна** результатов диссертации заключается в разработке алгоритма составления расписания, позволяющего находить более эффективные по различным критериям расписания выполнения заданий в распределенной вычислительной системе по сравнению с широко используемыми в этой области алгоритмами. Разработанные генетические операторы позволяют учесть ресурсные ограничения на расписания, приоритеты и зависимости между заданиями и при этом ГА показывает линейный рост производительности от размерности задачи составления расписания и числа параллельных подпопуляций. Анализ влияния значений основных параметров ГА на скорость составления расписаний позволил выявить коридоры оптимальных значений параметров алгоритма.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретический результат диссертации (новый алгоритм составления расписания) может быть использован для решения других задач составления расписаний с ресурсными ограничениями. Разработанное программное обеспечение позволяет повысить эффективность использования ресурсов Grid. Полученные результаты являются основой для дальнейших исследований моделей эволюционных алгоритмов для планирования выполнения заданий в РВС.

Исследования по теме диссертации проводились в рамках проектов по программам ДВО РАН: “Численное моделирование физических полей в сложных средах” (№ гос. регистрации 0120.0 603766) с 2006 по 2008 гг.; “Распределенные генетические алгоритмы решения обратных задач электромагнитного зондирования”; “Распределенные информационные вычислительные системы для комплексных научных исследований” (№ гос. регистрации 0120.0 603769) с 2006 по 2008 гг.; “Организация работы вычислительного кластера в режиме удаленного доступа” и “Развитие системного программного обеспечения вычислительного кластера”, а также в рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кад-

ры инновационной России” (проект № 02.740.11.0626) и грантов ДВО РАН № 09-I-П1-01 и № 10-III-B-01И-009.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

В соответствии с паспортом специальности 05.13.11 в диссертации были разработаны алгоритмы для организации глобально распределенной обработки данных в РВС и проведено их исследование (п. 9 области исследований).

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научной конференции “Научный сервис в сети интернет: многоядерный компьютерный мир. 15 лет РФФИ” (Новороссийск, 24 сентября – 29 сентября 2007 г.), Межрегиональной научно-практической конференции “Информационные и коммуникационные технологии в образовании и научной деятельности” (Хабаровск, 21 мая – 23 мая 2008 г.), Международной научной конференции “Распределенные вычисления и Grid-технологии в науке и образовании” (Дубна, 30 июня – 4 июля 2008 г.), Региональной научной конференции “XXXIII Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова” (Владивосток, 29 августа – 4 сентября 2008 г.), Международной научной конференции “Параллельные вычислительные технологии” (Санкт-Петербург, 28 января – 1 февраля 2008 г.), Региональной научной конференции “XXXIV Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова” (Хабаровск, 25 июня – 30 июня 2009 г.), Межрегиональной научно-практической конференции “Информационные и коммуникационные технологии в образовании и научной деятельности” (Хабаровск, 21 сентября – 23 сентября 2009 г.), XI Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Иркутск, 15 марта – 21 марта 2010 г.), Международной научно-практической конференции “Суперкомпьютеры: вычислительные и информационные системы” (Хабаровск, 30 июня – 2 июля 2010 г.), Региональной научной конференции “XXXV Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова” (Владивосток, 31 августа – 5 сентября 2010 г.), Международной научной конференции “First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications” (Владивосток, 6 сентября – 9 сентября 2010 г.), а также неоднократно на семинарах Вычислительного центра ДВО РАН.

**Публикации и личный вклад.** По материалам диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе две статьи [1, 2] в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Автором сформулированы задачи составления расписаний и непрерывного планирования выполнения заданий в РВС, разработаны и реализованы алгоритмы планирования выполнения параллельных и непараллельных заданий в РВС, разработаны генетические операторы, учитывающие ограничения, налагаемые на расписания выполнения заданий в РВС. Из совместных работ с Пересветовым В.В., Сапроновым А.Ю., Смагиным С.И., Тарасовым А.Г. и Щербой С.И. на защиту выносятся только

результаты, полученные автором лично.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 170 наименований, глоссария и приложений. Общий объем диссертации составляет 146 страниц, из которых 126 страниц основного текста, включающего 36 рисунков и две таблицы. Результаты главы 1 опубликованы в работах [1, 7, 11, 15]. Результаты главы 2 опубликованы в [1, 2, 5, 14, 15, 18]. Результаты главы 3 опубликованы в [4, 6, 8–10, 12, 13, 16, 17, 19].

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, дается краткий обзор работ по методам составления расписаний и планированию выполнения заданий в РВС. Дается характеристика методам исследования, основным целям и способам их достижения.

**Первая глава** посвящена алгоритмам планирования выполнения заданий в распределенной вычислительной системе. В начале главы излагается основная терминология распределенных вычислительных систем. Вводятся такие понятия, как ресурсы, процессы, виртуальные узлы и т.п. Кратко описываются часто используемые программные инструментарию построения РВС.

Далее в первой главе вводятся такие понятия, как задание, политики планирования, целевая функция и т.п. Дается математическая формулировка задачи планирования выполнения заданий в РВС.

Разделим отрезок времени  $T$ , в течение которого поступают задания пользователей, на  $Q + 1$  последовательных отрезков (периодов) планирования:  $T = \bigcup T_q$ , где  $q$  — порядковый номер периода планирования,  $q = 0, 1, \dots, Q$ . В каждый из периодов  $T_q$  накапливается некоторое количество заданий. Каждое задание включает в себя запрос на выполнение одного или нескольких процессов.

Пусть  $U_q = \{u_{iq} : i = 1, 2, \dots, N_q\}$  — множество процессов, принадлежащих заданиям, планируемым в период  $T_q$ , где  $N_q$  — число процессов, принадлежащих всем заданиям, планируемым в период  $T_q$ .

Пусть  $\Phi = \{\phi_m : m \in M\}$  — неизменяемое в течение всего отрезка времени  $T$  множество всех виртуальных узлов в РВС, где  $M$  — множество номеров всех виртуальных узлов в РВС. Под вычислительным узлом (ВУ) понимается один вычислительный элемент (процессор или одно вычислительное ядро процессора), рассматриваемый в связке с соответствующими ему ресурсами. Тогда *расписание*  $S_q$  выполнения процессов  $u_{iq} \in U_q$ , планируемых в период  $T_q$  в РВС, определяется как множество отрезков времени (*слотов*)  $s_{imq}$ , зарезервированных для выполнения этих процессов на ВУ  $\phi_m \in \Phi$ :

$$S_q = \{s_{imq} : i \in I_q, m \in M_q\}, \quad (1)$$

где  $I_q$  — множество номеров процессов, которые будут выполняться в РВС

согласно расписанию  $S_q$ , а  $M_q$  — множество номеров ВУ, на которых данные процессы будут запущены.

Обозначим через  $r_{imq}^e$  величину, характеризующую ресурс с номером  $e$ , которую пользователь заказывает для выполнения процесса  $u_{iq}$  на некотором ВУ  $\phi_m$ . Например, величина  $r_{imq}^e$ , относящаяся к оперативной памяти, обозначает требуемый на ВУ  $\phi_m$  объем данной памяти, а величина, относящаяся к программному обеспечению, отражает наличие ( $r_{imq}^e = 1$ ) или отсутствие ( $r_{imq}^e = 0$ ) данного программного обеспечения на ВУ  $\phi_m$ .

Величину, характеризующую ресурс с номером  $e$ , который доступен ВУ  $\phi_m \in \Phi$  в момент времени  $t \in T$ , обозначим через  $R_m^e(t)$ . Тогда ресурсы, доступные для ВУ  $\phi_m$  в этот момент времени, характеризуются множеством  $\{R_m^e(t) : e = 1, 2, \dots, N_r\}$ , где  $e$  — номер ресурса,  $N_r$  — число различных видов ресурсов в РВС.

Расписание  $S_q$  заданий для РВС является *допустимым*, если выполняются условия достаточности имеющихся ресурсов для их выполнения:

$$r_{imq}^e \leq R_m^e(t) \quad \forall t \in s_{imq}, \quad \forall i \in I_q, \quad \forall m \in M_q, \quad e = 1, 2, \dots, N_r. \quad (2)$$

Под *непротиворечивостью* расписания  $S_q$  понимается выполнение следующих условий.

1. Каждому процессу из множества  $U_q$ , который может быть запущен в РВС, должен быть сопоставлен один слот в расписании  $S_q$ . Пусть  $N'_q$  — число слотов в расписании  $S_q$ , соответствующих планируемому в период  $T_q$  процессам,  $N_q$  — число процессов всех заданий, планируемых в период  $T_q$ , которые могут выполняться в РВС. Тогда должно быть справедливо равенство  $N'_q = N_q$ .
2. Никакие два слота  $s_{imq} \in S_q$  и  $s_{jmq} \in S_q$  ( $i \neq j$ ) не должны быть сопоставлены одному ВУ  $\phi_m$  одновременно:  $|s_{imq} \cap s_{jmq}| = 0$ , где  $|\cdot|$  — длина соответствующего отрезка времени.

Для составления расписания параллельных заданий также необходимо брать в расчет еще два условия непротиворечивости. Для описания данных условий дополнительно введем разбиение множества  $\Phi$  всех ВУ в РВС на непересекающиеся подмножества  $\Phi_g = \{\phi_m : m \in M_g\}$  — группы ВУ:

$$\Phi = \bigcup_{g=1}^{N_g} \Phi_g, \quad \Phi_g \cap \Phi_p = \emptyset, \quad g, p = 1, 2, \dots, N_g, \quad g \neq p, \quad (3)$$

где  $N_g$  — количество групп ВУ в РВС,  $M_g$  — множество номеров ВУ, принадлежащих группе  $\Phi_g$ .

Пусть  $U_{pq} = \{u_{iq} : i \in I_{pq}\}$  — множество процессов, принадлежащих  $p$ -му заданию, поступившему в период  $T_q$ , где  $I_{pq}$  — множество номеров

процессов этого задания. При этом

$$\bigcup_{p=1}^{P_q} U_{pq} = U_q, \quad U_{lq} \cap U_{pq} = \emptyset, \quad l, p = 1, 2, \dots, P_q, \quad l \neq p, \quad (4)$$

где  $P_q$  — количество заданий, поступивших в период планирования  $T_q$ .

Тогда *дополнительные* условия непротиворечивости расписания  $S_q$  выполнения процессов, принадлежащих параллельным заданиям следующие.

3. Все процессы параллельного задания должны быть спланированы на выполнение в пределах одной группы ВУ. Пусть  $M_g$  — множество ВУ  $g$ -й группы, тогда в расписании  $S_q$  для каждого слота  $s_{imq}$ , сопоставленного с  $i$ -м процессом из множества  $U_{pq}$ , должно выполняться условие  $m \in M_g$ .
4. Все процессы параллельного задания должны иметь одинаковый момент времени запуска и завершения. Для всех  $i, j \in N_{pq}$  в расписании  $S_q$  должно выполняться равенство  $s_{imq} = s_{jqk}$ ,  $m, k \in M_q$ . Слотам  $s_{imq}$  и  $s_{jqk}$  соответствуют процессы одного параллельного задания.

В большинстве случаев для одного множества процессов  $U_q$  можно составить множество расписаний  $\widehat{S}_q = \{S_{\alpha q} : \alpha \in A'_q\}$ , где  $A'_q$  — множество номеров всех возможных расписаний для процессов из множества  $U_q$ .

В процессе планирования для номера периода планирования  $q \neq 0$  расписания  $S_{\alpha q} \in \widehat{S}_q$  должны удовлетворять *условию сопряжения*. Пусть длина  $\tau_{\alpha\beta q}$  отрезка времени ожидания всех ВУ в РВС между завершением слотов расписания  $S_{\beta(q-1)}$  и началом слотов расписания  $S_{\alpha q}$  задается следующим образом:

$$\tau_{\alpha\beta q} = \sum_{\forall m \in M_q} (t_{m\alpha q} - t_{m\beta(q-1)}),$$

где  $t_{m\alpha q}$  — момент времени начала выполнения первого слота в расписании  $S_{\alpha q}$  на ВУ  $\phi_m$ , а  $t_{m\beta(q-1)}$  — момент времени завершения выполнения последнего слота в расписании  $S_{\beta(q-1)}$  на ВУ  $\phi_m$ ;  $\alpha \in A'_q$ ,  $\beta \in A'_{q-1}$ . Тогда расписание  $S_q^* \in \widehat{S}_q$  будет удовлетворять условию сопряжения с расписанием  $S_{\beta(q-1)}$ , если

$$\tau_{\beta q}^* = \min_{\alpha \in A'_q} \tau_{\alpha\beta q}. \quad (5)$$

Пусть  $\widetilde{S}_q \subseteq \widehat{S}_q$  — подмножество расписаний, удовлетворяющих условию сопряжения. Введем для расписаний  $S_{\alpha q} \in \widetilde{S}_q$  целевую функцию  $f : \widetilde{S}_q \rightarrow R_+$ , где  $R_+$  — множество действительных положительных чисел. Оптимальным будем считать расписание  $S_q^* \in \widetilde{S}_q$ , удовлетворяющее условию

$$f(S_q^*) = \min_{\alpha \in A'_q} f(S_{\alpha q}).$$



В связи с тем, что задача составления расписания в общем случае является NP-полной, на практике приходится ограничиваться поиском субоптимального решения.

*Задача планирования* состоит в нахождении для каждого периода планирования  $T_q$  субоптимального расписания  $S_q$  вида (1) выполнения процессов  $u_{iq} \in U_q$ . При этом  $S_q$  должно удовлетворять условиям ресурсных ограничений (2), условию сопряжения (5), а также условиям непротиворечивости 1–2 (для непараллельных заданий) или 1–4 (для параллельных заданий).

В численных экспериментах, проводимых в рамках диссертационной работы, использовалась целевая функция, основанная на среднегеометрическом значении длин подрасписаний на каждом из ВУ:

$$f_\alpha = \sqrt[G]{\prod_{m \in M_\alpha} \sum_{i \in I_{m\alpha}} \lambda_{im\alpha} |s_{im\alpha}|},$$

где  $M_\alpha$  — множество номеров ВУ, которым сопоставлены слоты из расписания  $S_\alpha$ ;  $I_{m\alpha}$  — множество номеров слотов, сопоставленных с ВУ  $\phi_m$ ;  $G$  — число всех виртуальных узлов в РВС;  $|s_{im\alpha}|$  — длина слота  $s_{im\alpha} \in S_\alpha$ ;  $\lambda_{im\alpha}$  — вес процесса  $u_i$  при запуске его на ВУ  $\phi_m$ . Вес  $\lambda_{im\alpha}$  процесса  $u_i$  на ВУ  $\phi_m$  необходим для учета его приоритета:  $\lambda_{im\alpha} = (p_{i\alpha})^{d_{im\alpha}}$ , где  $p_{i\alpha}$  — приоритет процесса  $u_i$ ,  $d_{im\alpha}$  — порядковый номер следования слота  $s_{im\alpha}$  на ВУ  $\phi_m$  согласно расписанию  $S_\alpha$ .

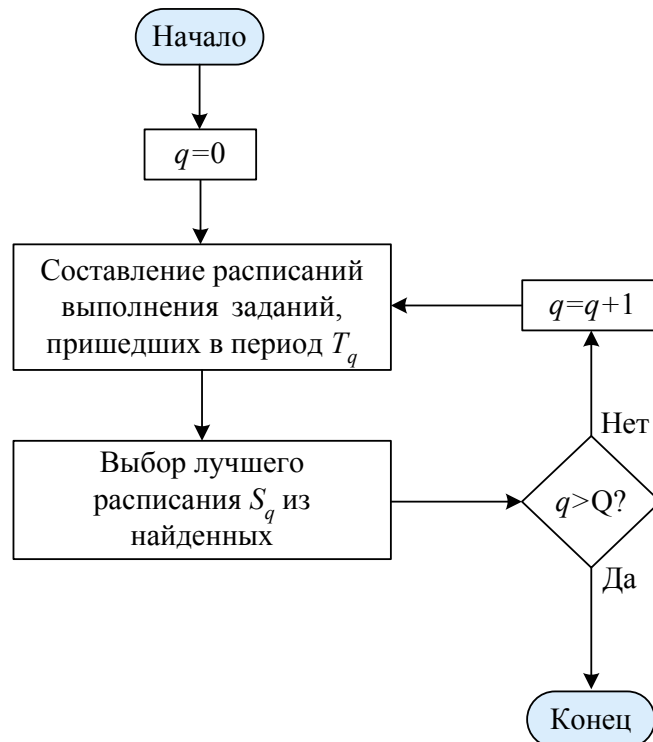


Рис. 1: Схема планирования заданий в распределенной вычислительной системе

Алгоритм планирования представлен на рис. 1. Задания, непрерывно поступающие от пользователей, накапливаются в течение периода планирования  $T_q$ . В конце каждого периода  $T_q$  множество неспланированных заданий фиксируется и для них составляется расписание. Все составленные расписания  $\{S_q\}$  помещаются в общий пул расписаний, образуя единый план выполнения заданий.

**Вторая глава** посвящена алгоритмам составления расписаний в распределенных вычислительных системах с применением генетических алгоритмов. Описываются принципы применения генетических алгоритмов для составления расписаний. Указываются основные проблемы, возникающие при использовании ГА в решении данной задачи. После этого детально излагаются разработанные автором генетические алгоритмы составления допустимых непротиворечивых субоптимальных расписаний выполнения параллельных и непараллельных заданий в РВС; описываются разработанные генетические операторы, механизм учета ресурсных ограничений, налагаемых на расписания, а также механизм учета в генетических операторах зависимостей между заданиями.

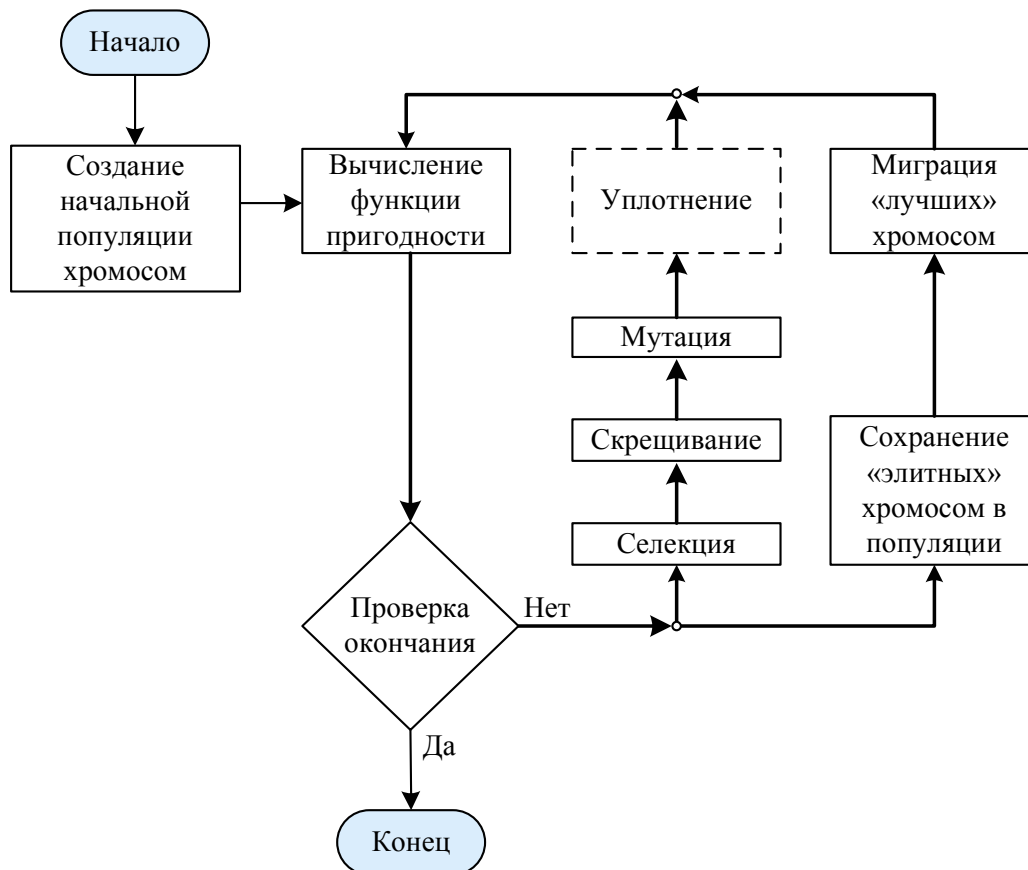


Рис. 2: Схема разработанных генетических алгоритмов составления расписаний выполнения заданий для РВС

На рис. 2 представлена объединенная схема разработанных генетических алгоритмов составления расписаний выполнения как непараллельных, так и параллельных заданий. Пунктиром обозначен оператор уплот-

нения, используемый только в случае с параллельными заданиями.

Каждое расписание  $S_\alpha$  в ГА должно быть закодировано в форме хромосомы  $X_\alpha \in X$ , где  $X$  — множество хромосом одной популяции. Автор предлагает выносить номера ВУ за пределы области кодирования слотов в отдельный вектор  $X'_\alpha$  (“заголовок” хромосомы). Каждый элемент данного вектора есть число  $N_{m\alpha}$  слотов на ВУ  $\phi_m$ . Тогда сами слоты будут описываться кортежами  $\langle i, |s_{im\alpha}| \rangle$  и храниться во второй части хромосомы — в векторе  $X''_\alpha$  (“тело” хромосомы). Таким образом,  $X'_\alpha = \{N_{m\alpha}\}$ ,  $X''_\alpha = \{\langle i, |s_{im\alpha}| \rangle\}$ , а вся хромосома  $X_\alpha = \langle X'_\alpha, X''_\alpha \rangle$ .

Автором разработан механизм учета зависимостей между заданиями. Если  $i$ -е задание зависит от  $j$ -го, то должно выполняться условие  $t_{im\alpha} \geq t_{jm\alpha} + |s_{jm\alpha}|$ , где  $t_{im\alpha}$  и  $t_{jm\alpha}$  — моменты времени запуска соответствующих заданий,  $|s_{jm\alpha}|$  — длительность выполнения процесса  $j$ -го задания на ВУ  $\phi_m \in \Phi$ ,  $m \in M_\alpha$ ,  $M_\alpha$  — множество номеров ВУ, которым соответствуют слоты в расписании, кодируемом хромосомой  $X_\alpha$ ,  $i, j \in I_\alpha$ ,  $I_\alpha$  — множество номеров слотов в хромосоме  $X_\alpha$ . Для учета зависимостей между заданиями при мутации необходимо соблюдать коридор допустимых значений для отрезка времени выполнения процессов  $i$ -го задания в расписании, кодируемом хромосомой  $X_\alpha$ :  $[t_{im\alpha}^{\min}, t_{im\alpha}^{\max}]$ .

Важной задачей при применении ГА к составлению расписания для РВС является разработка механизма учета ресурсных ограничений. Под ресурсными ограничениями понимаются правила, определяющие возможность процесса выполняться на данном ВУ. Автором предлагается использовать дополнительную структуру данных (маску ресурсов), представляющую собой булев вектор  $B_{i\alpha} = \{b_{im\alpha}\}$ . В результате создания маски ресурсов элементы  $b_{im\alpha} \in B_{i\alpha}$  устанавливают возможность запуска процесса  $u_i \in U$ , которому соответствует слот  $s_{im\alpha}$ , на ВУ  $\phi_m \in \Phi$ . Маска ресурсов генерируется для каждого задания перед началом новой итерации ГА и не меняется на всем протяжении этой итерации.

Алгоритм создания хромосомы  $X_\alpha$  начальной популяции при поиске расписания непараллельных заданий совпадает с алгоритмом FCFS с одним отличием: при выборе очередного ВУ необходимо использовать маску ресурсов. Для поиска расписания параллельных заданий в начальную популяцию включаются расписания, составленные модифицированным автором алгоритмом обратного заполнения (Backfill).

Для сохранения непротиворечивости при скрещивании слоты исключаются из обеих родительских хромосом, чтобы не попасть в дочернюю хромосому повторно. На рис. 3 схематически показан процесс “сборки” дочерней хромосомы из двух родительских.

Оператор мутации осуществляет обмен слотов, что позволяет сохранять неизменным набор слотов в хромосоме. В диссертации разработаны два варианта оператора мутации: для составления расписания непараллельных и параллельных заданий. В первом случае при однократной мутации два слота в хромосоме меняются местами. При этом длины слотов

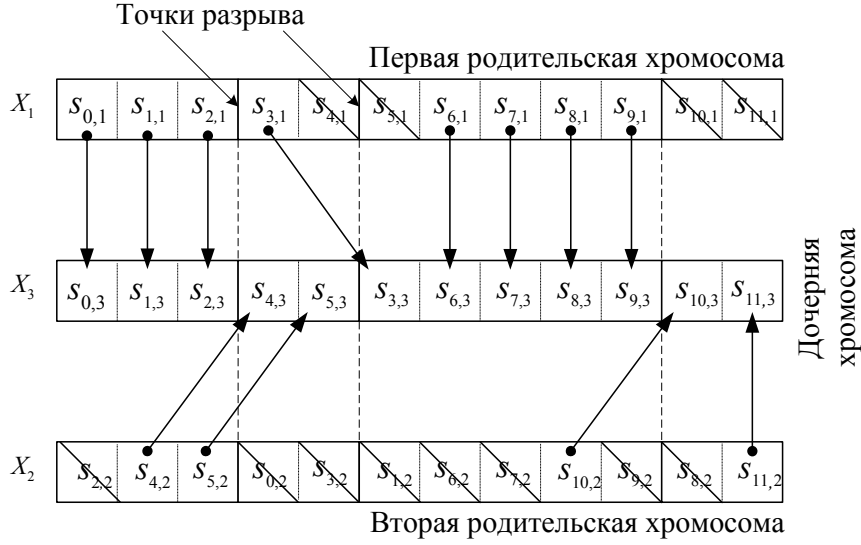


Рис. 3: Схема скрещивания двух хромосом

масштабируются в соответствии с формулой

$$|s_{im\alpha}| = |s_{ih\alpha}| \frac{\kappa_h}{\kappa_m},$$

где  $\kappa_h$  и  $\kappa_m$  — коэффициенты производительности процессоров, которые соответствуют ВУ  $\phi_h$  и  $\phi_m$ . Такой вариант вычисления длины слота имеет смысл, если все процессоры в Grid принадлежат одному семейству (например, все — Хеоп серий 5xxx). В противном случае более точные значения длин слотов можно получить заранее, производя запуск прикладного программного обеспечения при согласованных в пределах Grid “стандартных” параметрах на тех сайтах, где оно установлено, вычисляя коэффициенты ускорения для алгоритма заранее.

Для составления расписания параллельных заданий в операторе мутации для обмена выбираются не отдельные слоты, а множества слотов двух заданий. В случае, когда новое расположение слота занято другим слотом и время начала выполнения процессов, соответствующих данным слотам, совпадает, происходит смещение расписания, как показано на рис. 4. Здесь  $t'$  — время начала слота  $s_{24\alpha}$  на ВУ  $\phi_4$ .

При этом в хромосоме могут появляться множества слотов холостых процессов, не загружающих ВУ. Часть хромосом в популяции после мутации можно сжимать. В связи с этим был предложен оператор уплотнения, учитывающий зависимости между заданиями.

Проведены численные эксперименты с целью настройки основных параметров: вероятности применения оператора мутации  $p_m$ , вероятности применения оператора скрещивания  $p_c$ , размера популяции  $Z$  и процента элитных хромосом  $E$ . Установлено, что при составлении расписания непараллельных заданий ГА достигал максимального ускорения при следую-

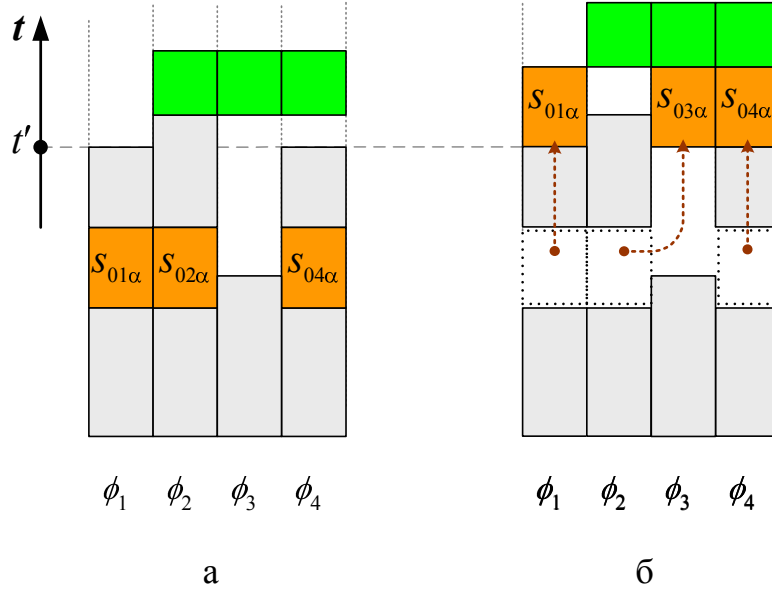


Рис. 4: Схема сдвига части расписания до (а) и после (б) перемещения слота оператором мутации

щих параметрах:  $p_m \approx 0.032\%$ ,  $p_c \approx 30\%$ ,  $E \approx 10\%$ ,  $Z \approx 40 - 60$ , а в случае с параллельными заданиями  $p_m \approx 0.065\%$ ,  $p_c \approx 30\%$ ,  $E \approx 10\%$ ,  $Z \approx 20 - 30$ .

**В третьей главе** кратко описываются существующие системы планирования выполнения заданий для РВС типа Grid, а также программная реализация разработанных в диссертации алгоритмов и приводятся результаты численных экспериментов.

Разработанная система планирования предназначена для планирования заданий в Grid с отчуждаемыми ресурсами, где задания поступают в единый центр управления ресурсами и затем распределяются по сайтам Grid. Сайтами являются вычислительные кластеры или многопроцессорные высокопроизводительные комплексы с общей памятью.

Система планирования имеет клиент-серверную архитектуру. Grid-инструментарий Globus Toolkit предоставляет программный интерфейс к своим компонентам, что позволило интегрировать разработанную систему планирования в инфраструктуру Grid. На рис. 5 показана схема взаимодействия системы планирования с Grid-службами в процессе поиска и выполнения расписаний.

Проведены испытания системы планирования на кластерах Вычислительного центра ДВО РАН, которые показали, что использование генетического алгоритма составления расписания вместо алгоритма обратного заполнения целесообразно при числе процессов в расписании больше 128. Также эксперименты показали, что для РВС, состоящей из вычислительных кластеров ВЦ ДВО РАН, ГА имеет полиномиальную сложность от размерности задачи составления расписания  $D$  первой степени. Здесь

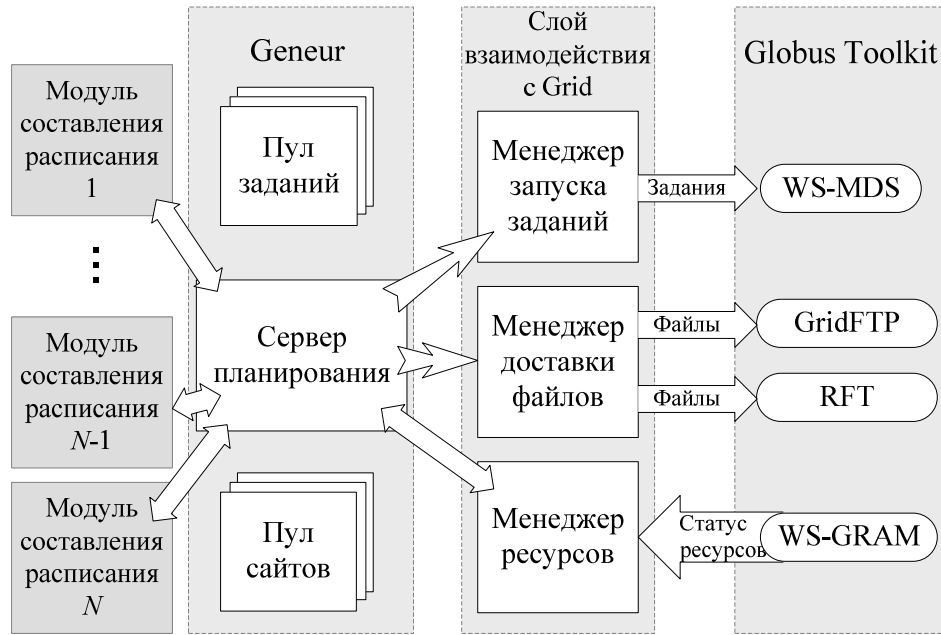


Рис. 5: Схема взаимодействия разработанной системы планирования и Grid через промежуточный программный слой

$D = N/G$ , где  $N$  — число вычислительных процессов всех заданий в расписании, а  $G$  — число доступных для планирования ВУ.

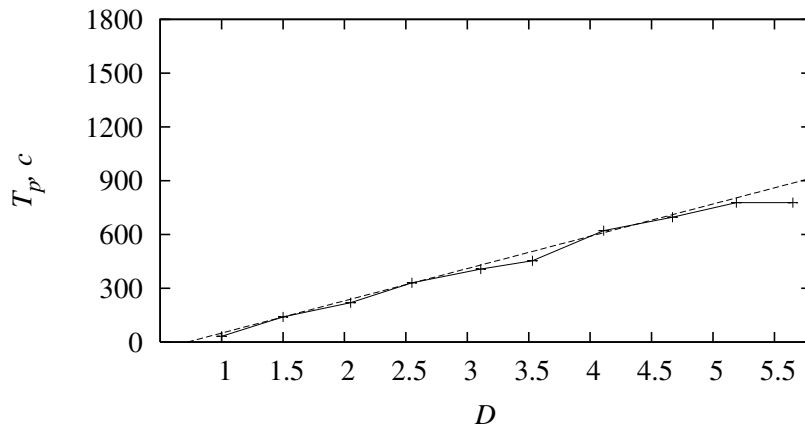


Рис. 6: Время  $T_p$  решения задачи составления расписания в зависимости от размерности  $D$  для генетического алгоритма составления расписания непараллельных заданий

Сплошной линией на рис. 6 обозначена зависимость времени решения  $T_p$  от размерности  $D$  задачи составления расписания непараллельных заданий, а пунктирной — аппроксимирующая линейная функция  $T_p = 180D - 130$ , по которой видно, что сложность алгоритма является линейной функцией от размерности задачи —  $O(D)$ . Аналогичная зависимость показана для генетического алгоритма составления расписания параллельных заданий на рис. 7.

На рис. 8 представлена зависимость коэффициента ускорения  $k_p$  от

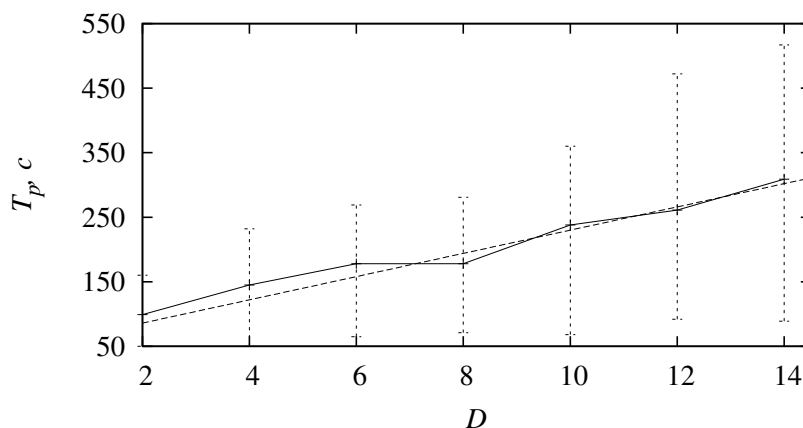


Рис. 7: Время  $T_p$  решения задачи составления расписания в зависимости от размерности  $D$  для генетического алгоритма составления расписания параллельных заданий

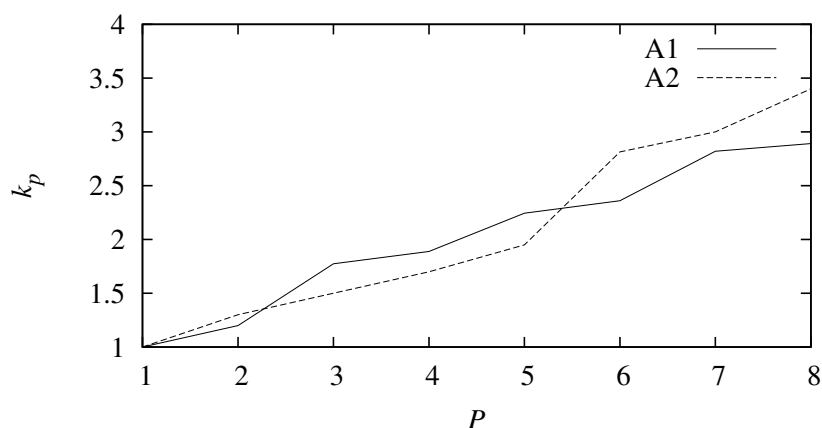


Рис. 8: Коэффициент ускорения  $k_p$  решения задачи в зависимости от числа  $P$  параллельных подпопуляций

числа  $P$  параллельных подпопуляций в случае с непараллельными (A1) и параллельными (A2) заданиями. Коэффициент ускорения в данном случае вычисляется по формуле  $k_p = T_1/T_p$ , где  $T_1$  — время непараллельного поиска расписания, а  $T_p$  — время поиска для  $P$  вычислительных модулей в системе. Число  $I_m$  поколений изоляции — это число поколений ГА, проходящее до обмена найденными решениями между подпопуляциями.

По зависимостям на рис. 9 можно судить о том, что очень частые синхронизации (как и очень редкие) не способствуют нахождению решения алгоритмами.

**В заключении** диссертации формулируются основные результаты работы, намечаются направления дальнейших исследований.

**Приложения** включают основные понятия теории генетических алгоритмов, примеры конфигурационных файлов разработанной системы планирования, а также описание программного обеспечения, используемого на ресурсах Вычислительного центра ДВО РАН.

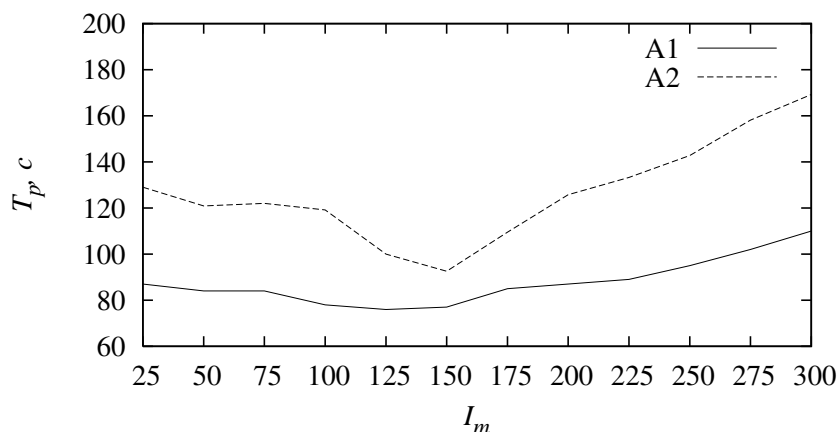


Рис. 9: Время  $T_p$  решения задачи составления расписания в зависимости от числа поколений изоляции  $I_m$

## РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработаны генетические алгоритмы для составления расписаний выполнения непараллельных и параллельных заданий в распределенной вычислительной системе. Алгоритмы позволяют сохранять непротиворечивость расписаний и учитывать одиночные зависимости между заданиями.
2. Предложен алгоритм непрерывного планирования выполнения заданий в РВС, основанный на составлении расписаний с помощью ГА. Для плотной стыковки двух последовательно составленных расписаний предложено использовать в ГА гены холостых слотов, не подвергающиеся влиянию генетических операторов.
3. Разработана и программно реализована система планирования выполнения заданий в РВС типа Grid, основанная на разработанных автором алгоритмах. Проведены численные эксперименты, подтвердившие эффективность алгоритмов, используемых в данной системе планирования.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Смагин С.И., Шаповалов Т.С. Генетический алгоритм составления расписания выполнения параллельных заданий в распределенной вычислительной системе // Выч. технологии. — 2010. — Т. 15, № 5. — С. 41–59.
2. Шаповалов Т.С. Генетический алгоритм составления расписания запуска параллельных заданий в Grid // Информатика и системы управления. — 2010. — Т. 4, № 26. — С. 115–126.
3. Шаповалов Т.С., Пересветов В.В. Генетический алгоритм составления расписаний для распределенных гетерогенных вычислительных



- систем // Выч. методы и программирование. — 2009. — Т. 10, № 1. — С. 159–167.
4. Пересветов В.В., Сапронов А.Ю., Тарасов А.Г., Шаповалов Т.С. Удаленный доступ к вычислительному кластеру ВЦ ДВО РАН // Выч. технологии. — 2006. — Т. 11, спец. вып. — С. 45–51.
  5. Shapovalov T.S., Tarasov A.G. Genetic Algorithm Based Parallel Jobs Scheduling // Proc. of First Russia and Pacific Conf. on Computer Technology and Applications (Vladivostok, from 6th to 9th of September, 2010). — Vladivostok: IACP FEB RAS, 2010. — P. 211–216.
  6. Шаповалов Т.С. Эффективность системы планирования, основанной на генетическом алгоритме, для распределенных гетерогенных вычислительных систем // Материалы Межрегион. науч.-практ. конф. “Информационные и коммуникационные технологии в образовании и научной деятельности” (Хабаровск, 21–23 сентября 2009 г.). — Хабаровск: ТОГУ, 2009. — С. 352–358.
  7. Шаповалов Т.С. О диспетчеризации заданий в распределенных вычислительных средах // Материалы Межрегион. конф. “Информационные и коммуникационные технологии в образовании и научной деятельности” (Хабаровск, 21–23 мая 2008 г.). — Хабаровск: ТОГУ, 2008. — С. 356–362.
  8. Шаповалов Т.С. Об интеграции диспетчера заданий в Grid-инструментарий Globus Toolkit. // Материалы XXXV Дальневосточной мат. школы-семинара им. акад. Е.В. Золотова (Владивосток, 31 августа – 5 сентября 2010 г.). — Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2010. — С. 904–907.
  9. Тарасов А.Г., Шаповалов Т.С., Мальковский С.И. Интеграция вычислительных ресурсов ТОГУ и ВЦ ДВО РАН с применением Grid-технологий // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. “Суперкомпьютеры: вычислительные и информационные технологии” (Хабаровск, 30 июня – 2 июля 2010 г.). — Хабаровск: ТОГУ, 2010. — С. 133–138.
  10. Шаповалов Т.С. Система планирования выполнения заданий в Grid, основанная на составлении расписаний генетическим алгоритмом // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. “Суперкомпьютеры: вычислительные и информационные технологии” (Хабаровск, 30 июня – 2 июля 2010 г.). — Хабаровск: ТОГУ, 2010. — С. 151–153.
  11. Шаповалов Т.С., Сапронов А.Ю. О методах планирования заданий в Grid // Тр. Третьей междунар. конф. “Распределенные вычисления и Grid-технологии в науке и образовании” (Дубна, 30 июня – 4 июля 2008 г.). — Дубна: ОИЯИ, 2008. — С. 307–309.
  12. Шаповалов Т.С., Пересветов В.В., Сапронов А.Ю., Смагин С.И., Тарасов А.Г. Web и Grid технологии обеспечения доступа к ресурсам вычислительного кластера ВЦ ДВО РАН // Материалы Межрегион.

- конф. “Информационные и коммуникационные технологии в образовании и научной деятельности” (Хабаровск, 21–23 мая 2008 г.). — Хабаровск: ТОГУ, 2008. — С. 69–76.
13. Шаповалов Т.С. Проект метапланировщика в Grid для Globus Toolkit на базе генетических алгоритмов // Материалы Всерос. конф. “Современные информационные технологии для научных исследований” (Магадан, 20–24 апреля 2008 г.). — Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2008. — С. 86–87.
  14. Шаповалов Т.С. Применение генетических алгоритмов для поиска оптимального расписания заданий в Grid // Тр. Междунар. конф. “Параллельные вычислительные технологии” (Санкт-Петербург, 28 января – 1 февраля 2008 г.). — Челябинск: ЮУрГУ, 2008. — С. 500–505.
  15. Шаповалов Т.С. Параллельный алгоритм планирования заданий для распределенных гетерогенных вычислительных систем. — Хабаровск, 2006. — 31 с. — (Препринт / ВЦ ДВО РАН; № 134).
  16. Пересветов В.В., Сапронов А.Ю., Тарасов А.Г., Шаповалов Т.С. Организация работы вычислительного кластера в режиме удаленного доступа. — Хабаровск, 2007. — 34 с. — (Препринт / ВЦ ДВО РАН; № 110).
  17. Шаповалов Т.С., Тарасов А.Г., Щерба С.И. Организация Grid-сети ДВО РАН // Всерос. науч. конф. “Научный сервис в сети интернет: многоядерный компьютерный мир. 15 лет РФФИ” (Новороссийск, 24–29 сентября 2007 г.). — М.: МГУ, 2007. — С. 94.
  18. Шаповалов Т.С. Об учете ограничений на составление расписания заданий в Grid с использованием генетических алгоритмов // Тр. IX Всерос. конф. молодых ученых по мат. моделированию и информ. технологиям (Кемерово, 28–30 октября 2008 г.). — Кемерово: ИВТ СО РАН, 2008. — С. 97–98.
  19. Шаповалов Т.С. Параллельный алгоритм планирования заданий для распределенных гетерогенных вычислительных систем. Geneva: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009612081. — М.: ФГУ ФИПС, 2009.

Редакционно-издательский отдел  
Учреждения Российской академии наук  
Института динамики систем и теории управления СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134  
Подписано к печати 25.02.2011 г.  
Формат бумаги 60×84 1/16, объем 1,2 п.л.  
Заказ № 2. Тираж 100 экз.

---

Отпечатано в ИДСТУ СО РАН