

УДК 004.93

## КРОССПЛАТФОРМЕННАЯ ВЕРСИЯ Т-СИСТЕМЫ С ОТКРЫТОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

С. М. Абрамов<sup>1</sup>, А. А. Кузнецов<sup>1</sup>, В. А. Роганов<sup>1</sup>

Рассматривается разработка кроссплатформенной исследовательской версии системы автоматического динамического распараллеливания OpenTS. Данная версия построена на переносимых исходных кодах и может работать как в ОС Linux, так и на платформе Windows CCS. Статья подготовлена по материалам доклада авторов на международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ-2007; <http://agora.guru.ru/pavt>).

**1. Введение.** За последние годы в мире значительно вырос интерес к высокопроизводительным вычислениям, которые получают все более широкое распространение в приложениях. Следует отметить, что с ростом производительности микропроцессоров падает удельная стоимость кластерных решений (цена/производительность). Это делает доступным применение высокопроизводительных вычислений (HPC — High Performance Computing) не только в крупных компаниях, но и в небольших рабочих группах. Более того, современные процессоры являются многоядерными, и средства распараллеливания программ оказываются полезными и даже необходимыми на обычном персональном компьютере.

Таким образом, вопрос широкой применимости высокопроизводительных вычислений сегодня все более становится зависимым от решения проблем в области программного обеспечения, а не аппаратуры. На первый план выходят проблемы удобства разработки и отладки параллельных приложений, сокращения сроков и совершенствования инструментариев их разработки.

В настоящее время большая часть рынка программного обеспечения (ПО) для высокопроизводительных систем занята решениями, основанными на ОС Linux и других UNIX-системах. Однако в IT-отрасли (IT — Information Technology) значительное количество разработчиков используют (или хотят использовать) систему Windows в качестве начальной среды разработки и отладки своих программ. Корпорация Microsoft, лидер на рынке операционных систем, в 2004 г. открыла новое подразделение по направлению высокопроизводительных вычислений. Это была реакция Microsoft на тот факт, что рынок HPC становится все более массовым. Последовавшие за этим реальные шаги корпорации Microsoft не оставляют никаких сомнений в ее решимости воплотить свою идею повсеместного внедрения параллельных и высокопроизводительных вычислений на платформе Microsoft Windows Compute Cluster Server 2003 (WCCS) — новой ветви в линии ОС Windows, специально разрабатываемой для кластерных архитектур (выпуск официальной версии состоялся летом 2006 г.). Тем самым следует ожидать появления большого числа кластерных решений для Windows-платформ. Это должно составить значимую конкуренцию Linux-решениям (как по цене, так и по производительности) и приведет к востребованности систем распараллеливания программ для Windows-кластеров.

Корпорация Microsoft стимулирует создание таких технологий распараллеливания. Она передала в Институт программных систем РАН (ИПС РАН) аппаратные средства и программное обеспечение Microsoft WCCS с последующим заключением контракта на разработку версии OpenTS (Т-системы с открытой архитектурой [1–3]) для платформы WCCS.

**2. Платформа Windows Compute Cluster Server.** Платформа WCCS состоит из двух компонентов:

- операционная система Windows Compute Cluster Server 2003, которая базируется на ядре ОС Windows Server 2003 Standard x64 Edition и поддерживает только 64-разрядные аппаратные платформы (но некоторые компоненты, например MS-MPI, способны работать и в 32-разрядных ОС Windows);

- набор кластерных решений Compute Cluster Pack (CCP), содержащий все необходимые программные компоненты для создания, использования и управления кластерной инфраструктурой.

Стоимость ОС Windows CCS 2003 ниже, чем у любого другого издания Windows Server 2003.

<sup>1</sup> Исследовательский центр мультипроцессорных систем Института программных систем РАН, 152020, г. Переславль-Залесский, Ярославская область; e-mail: [abram@botik.ru](mailto:abram@botik.ru), [tonic@pereslavl.ru](mailto:tonic@pereslavl.ru)

© Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М. В. Ломоносова

Кластер под управлением WCCS состоит из одного главного вычислительного узла и некоторого множества подчиненных ему вычислительных узлов, связанных высокоскоростной сетью. Вычислительные задачи можно передавать на кластер через приложение Compute Cluster Job Manager, а мониторинг и управление кластером осуществляются с помощью инструмента Compute Cluster Administrator. Оба инструмента поставляются вместе с CCP. Для подачи заданий можно также использовать интерфейс командной строки (Command-Line Interface, CLI). Для развертывания узлов можно использовать службу удаленной установки (Remote Installation Services, RIS), которая поставляется вместе с ОС Windows CCS 2003.

Для разработки параллельных приложений корпорация Microsoft выпустила собственную реализацию стандарта MPI — MS-MPI. Она основана на MPICH2, открытой реализации стандарта MPI 2.0. Это дает возможность независимым производителям ПО легко портировать свои продукты на WCCS.

**3. Проекты, предшествующие переносу.** Как уже было сказано выше, в 2006 г. корпорация Microsoft заключила с ИПС РАН контракт на перенос средств параллельного программирования OpenTS на платформу WCCS. Этому контракту предшествовала исследовательская работа сравнения эффективности разработки параллельных приложений с использованием двух различных средств: MPI и OpenTS.

Сравнение выполнялось в следующем порядке:

1) были выбраны две прикладные системы, ранее написанные на C++, Fortran-77 и MPI большой группой разработчиков в течение длительного периода времени. В качестве таких систем корпорация Microsoft отобрала приложения POVRay и ALCMD: POVRay — приложение для построения реалистичных изображений методом трассировки лучей и ALCMD — приложение для моделирования молекулярной динамики;

2) сотрудникам ИПС РАН (4–6 человек) предстояло в сжатые сроки (2–3 месяца) переписать MPI-зависимую часть кода этих приложений на OpenTS;

3) главная цель — получение более компактного и более читабельного кода, сокращение трудозатрат (меньше людей, сжатые сроки). При этом эффективность результирующей программы не должна была сильно пострадать: считалось допустимым пожертвовать 30 % производительности за преимущества в процессе программирования.

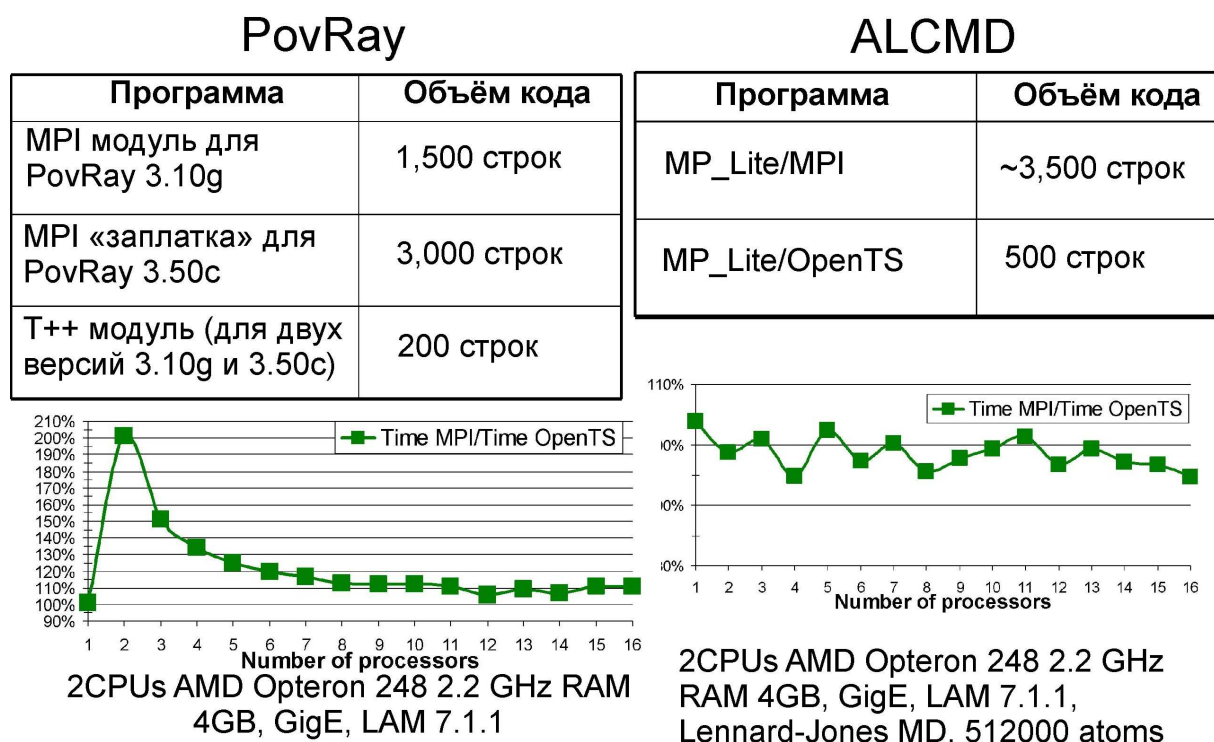


Рис. 1. Результаты проектов переноса MPI-приложений на OpenTS

Исследования показали, что, наряду с существенным сокращением объема и сложности кода (в 7–15 раз), OpenTS-версии приложений иногда превосходят, а иногда сравнимы по производительности с их MPI-аналогами (рис. 1). Этот факт, а также существенное уменьшение накладных расходов на разработку параллельных T-приложений позволят разрабатывать эффективные параллельные научные прило-

жения, не отвлекаясь на изучение сложных технологий распараллеливания (таких, как MPI).

**4. Перенос OpenTS под Windows.** Портинг основных компонент OpenTS (конвертера и микроядра) осуществлялся в среде разработки Microsoft Visual Studio 2005 с использованием компилятора Visual C++.

T-конвертер представляет собой транслятор с языка T++ (параллельный диалект C++) на язык C++. Он базируется на известном программном продукте OpenC++, предназначенном для создания языковых трансляторов. Конвертер производит синтаксический разбор T-программы и преобразует языковые расширения T++ в код на языке C++. Специфика языка Visual C++ состоит в добавлении в него ряда новых синтаксических конструкций (например, “\_stdcall”, “\_declspec”, “\_int64” и др.). T-конвертер был доработан таким образом, чтобы правильно обрабатывать эти конструкции.

Микроядро OpenTS — это среда поддержки исполнения T-приложений. При портировании микроядра преследовалась цель создать его кроссплатформенную версию. Было принято решение создать отдельный компонент исходного кода (Platform Abstraction Layer (PAL)), в который были вынесены все платформенно-зависимые функции ядра:

- функции обеспечения многопоточности T-приложений и поддержки SMP-режима;
- определение свободных ресурсов на узле;
- прочие функции системных API (например, запрос числа процессоров или размера страницы памяти, подсветка консольного текста и др.).

Быстрое переключение контекста (легковесные потоки) в оригинальной версии OpenTS было реализовано в виде ассемблерной вставки в код микроядра. Встроенный ассемблер в Visual C++ имеет ограничение, не позволяющее использовать ассемблерные вставки для сборки 64-разрядных приложений. В связи с этим функция реализации переключения контекста была написана в виде статической библиотеки, которая компонуется с T-приложением во время его сборки.

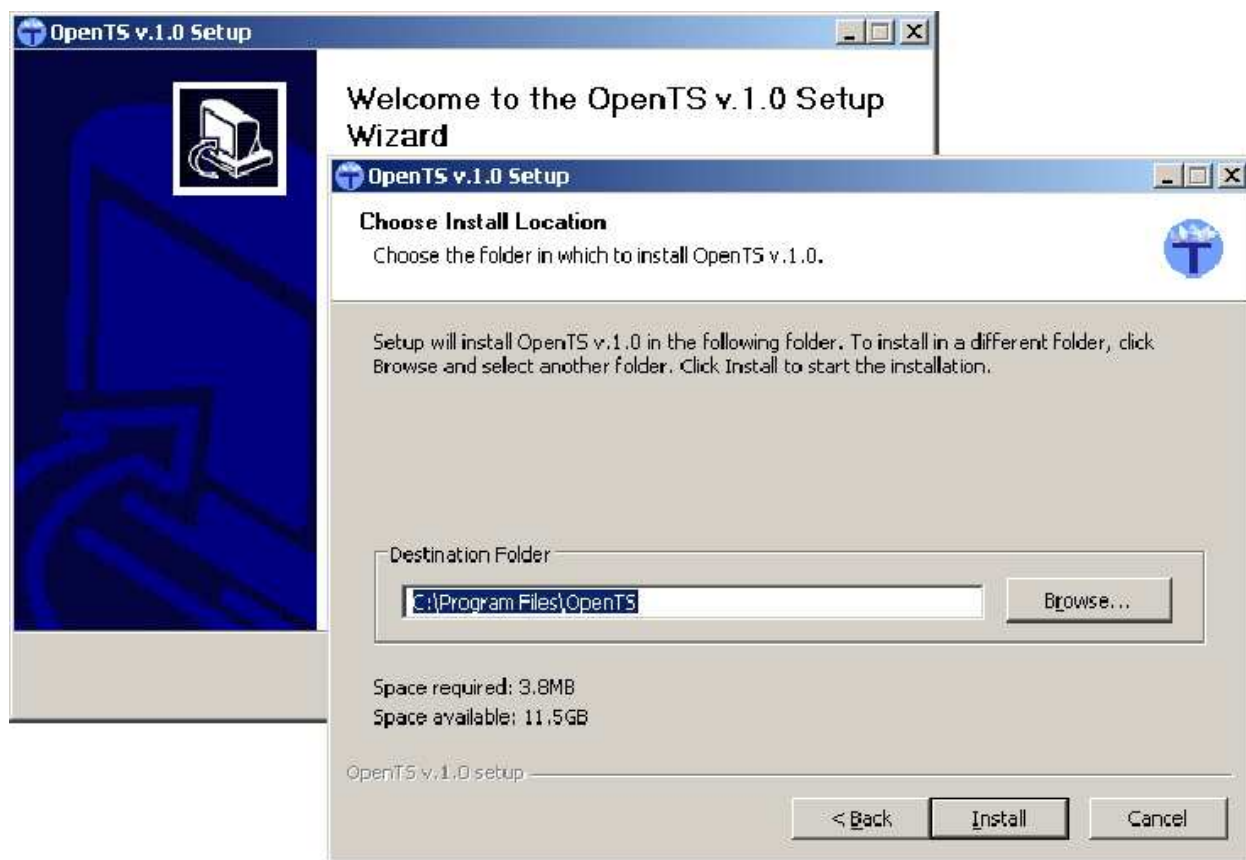


Рис. 2. Установка OpenTS под Windows

## 5. Итоговые решения.

**5.1. Инсталлятор.** Для установки OpenTS на ОС Windows разработан инсталлятор (рис. 2), который поддерживает платформы x86 и AMD64. Для установки и работы OpenTS требуются:

- Microsoft Compute Cluster Pack Software Development Kit (CCP SDK), содержащий программное

окружение для разработки и запуска параллельных программ;

— компилятор Visual C++ 2005, который поставляется как отдельно (Visual C++ 2005 Express Edition, свободно доступный на сайте Microsoft), так и с любым изданием Microsoft Visual Studio 2005.

Нужная версия CCP SDK может быть установлена непосредственно при установке OpenTS в том случае, если инсталлятор не обнаружит SDK, ранее установленный на компьютере пользователя.

В том случае, если не установлен Visual C++ 2005, либо в случае отказа от установки CCP SDK установка OpenTS отменяется.

```

C:\Program Files\OpenTS>mpiexec -n 2 EP
Open T-System Runtime v3.0, 2003-2006, PSI RAS, Russia.
Running under MS-MPI on 2-rank cluster:
([3.6Gf,1000BM,1.50GiB]*2) ~= [7.2Gf,2000BM,3.00GiB]
Starting tfun main, good luck!

Tasks activated:      [1013/1024/1035]
Tasks exported:      [1/1/2]
Msgs sent:           [58/58/59]
Async Msgs:          [0/0/0]
Msgs size:           [7256/7368/7480]
Taskboard visits:    [2389/2950/3512]
Scheduler time:      [0.017/0.020/0.024]
MPI time:             [0.001/0.001/0.001]
Idle time:           [0.031/0.043/0.055]
Tasks time:          [15.769/15.804/15.840]
Total time:          [15.974/15.988/16.002]

C:\Program Files\OpenTS>_

```

Рис. 3. Запуск Т-приложения в параллельном режиме

В силу многообразия системных конфигураций в инсталлятор включены средства автоматического тестирования работоспособности OpenTS. Процедура тестирования проходит в несколько этапов:

- сборка простой Т-программы fib, вычисляющей заданное номером число Фибоначчи;
- если при сборке fib возникли ошибки, разработчикам OpenTS автоматически отсылается письмо с описанием ошибок;
- производится запуск приложения fib; если результат его работы не соответствует ожидаемому, установка OpenTS отменяется.

**5.2. Инструменты сборки Т-приложений.** Для сборки Т-приложений создан командный сценарий t++.bat, принимающий следующие аргументы:

— /auto-c-call: эта опция сборки позволит Т-приложению вызывать Си-версии Т-функций, что может в некоторых случаях существенно ускорить работу Т-приложения;

— /c: компиляция исходных файлов без компоновки, в результате чего создаются объектные модули программ;

— /dbg: режим отладочной сборки, который позволяет программе-отладчику в случае сбоя в работе Т-программы получать символьную информацию о программе;

— /do dir: опция, позволяющая указывать расположение объектных модулей;

— /not: сборка программы для запуска в скалярном режиме, при котором все специальные ключевые слова удаляются из Т-программы;

```

1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  tfun int fib (int n)
5  {
6      return (n < 2) ? n :
7          fib(n-1) + fib(n-2);
8  }
9  tfun int main (int argc, char *argv[])
10 {
11     int n = atoi(argv[1]);
12     printf("Fib(%d) == %d\n", n, (int) fib(n));
13     return 0;
14 }

```

Рис. 4. Пример Т-программы

— `/o out.exe`: эта опция позволяет указывать имя исполняемого файла, получаемого в результате сборки; если эта опция отсутствует, то в качестве имени исполняемого модуля будет использовано имя первого исходного файла;

— `/p opt`: передача опции “opt” используемому компилятору C/C++;

— `/v`: печать команд и всего программного вывода;

— все остальные аргументы принимаются за исходные файлы на языках C++/T++.

T-приложения можно запускать в скалярном и в параллельном режимах как из командной строки (рис. 3), так и на Windows-кластере с использованием инструмента Compute Cluster Job Manager, который поставляется вместе с Microsoft Compute Cluster Pack.

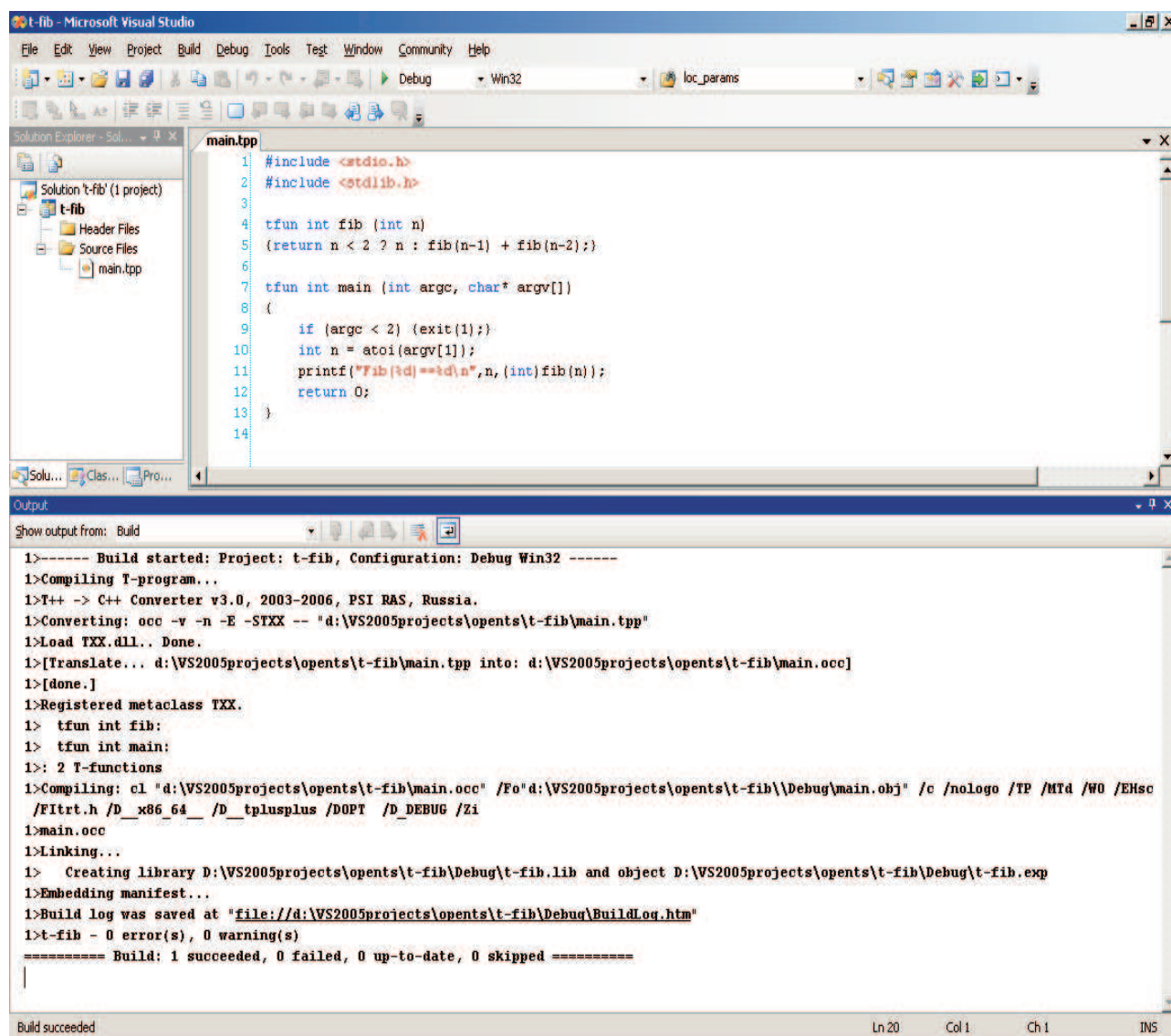


Рис. 5. Сборка T-приложения в среде разработки Microsoft Visual Studio 2005

**5.3. Набор для разработчика (SDK).** Набор для разработчика системы OpenTS предоставляет следующие возможности:

— сборка микроядра: возможность делать правки и пересобирать микроядро из его исходных кодов;

— сборка расширений для микроядра: это позволит совершенствовать OpenTS добавлением в нее расширений; примеры уже имеющихся расширений — DMPI (Dynamic MPI), WAD (Wide Area Debugger) и VisTrace (журналирование работы T-программы);

— сборка T-приложений: инструменты из стандартного дистрибутива OpenTS; кроме того, в набор включены примеры простых T-программ.

Для использования каждой возможности в дистрибутив OpenTS SDK (Software Development Kit)

включены проекты формата Visual Studio 2005 (файлы .vcproj), которые можно использовать в среде разработки Visual Studio 2005.

**5.4. Интеграция с Visual Studio 2005.** Сборка Т-программ возможна в среде разработки Visual Studio 2005 (рис. 4 и 5). Реализована возможность добавления проекта создания консольного Т-приложения в существующее решение, а также добавления нового исходного файла Т-программы в существующий проект.

Сборкой Т-приложений в среде Visual Studio 2005 управляет особое правило сборки, которое во время сборки применяется к каждому исходному файлу Т-программы. Затем редактор связей компоует вместе объектные модули Т-программ, микроядра и нескольких статических библиотек.

**6. Заключение.** В ходе работы над проектом была разработана кроссплатформенная версия системы автоматического динамического распараллеливания программ (OpenTS), содержащая следующие базовые компоненты:

- Т-конвертер, предназначенный для трансляции программ на языке Т++ в программы на языке С++;

- Т-микроядро, которое представляет собой среду поддержки исполнения языка Т++.

Кроме стандартных средств разработки Т-приложений из командной строки, обеспечена возможность разработки Т-приложений в среде Microsoft Visual Studio 2005.

Создан комплект программ для разработчика OpenTS, позволяющий вносить изменения в микроядро и разрабатывать расширения для него.

Для тестирования отдельных функциональных характеристик Т-системы с открытой архитектурой на платформе Windows был адаптирован комплект простых тестов, использовавшийся ранее для этих целей на платформе Linux.

Авторы надеются, что система OpenTS позволит упростить создание параллельных приложений в среде Windows, что будет способствовать широкому распространению методов и технологий параллельного программирования.

В дальнейшем планируется реализация поддержки некоторых других аппаратных платформ. Кроме того, планируется более тесная интеграция OpenTS и Windows для увеличения производительности Т-приложений на платформе WCCS.

**7. Благодарности.** Настоящая работа выполнена в рамках НИР “Сравнительное исследование эффективности технологии параллельного программирования OpenTS с технологией MPI” и НИР “Перенос средств параллельного программирования OpenTS на платформу Windows Compute Cluster Server” (выполнено в ИПС РАН по контракту с корпорацией Microsoft), а также в рамках проекта 1.3 “Разработка и реализация языков Т# и Т++ и соответствующих им средств для эффективной поддержки высокопроизводительного параллельного счета” при поддержке Программы фундаментальных научных исследований ОИТВС РАН “Оптимизация вычислительных архитектур под конкретные классы задач, информационная безопасность сетевых технологий”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов С.М., Адамович А.И., Инюхин А.В., Московский А.А., Роганов В.А., Шевчук Ю.В., Шевчук Е.В.* Т-система с открытой архитектурой // Суперкомпьютерные системы и их применение (SSA'2004). Тр. Международной научной конференции. Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2004.
2. *Abramov S., Adamovich A., Inyukhin A., Moskovsky A., Roganov V., Shevchuk E., Shevchuk Yu., Vodomerov A.* OpenTS: An outline of dynamic parallelization approach // 8th Int. Conf. on Parallel Computing Technologies (РАСТТ2005). Красноярск, сентябрь 2005. Berlin: Springer, 2005. 303–312.
3. *Абрамов С.М., Загоровский И.М., Коваленко М.Р., Кузнецов А.А., Осипов В.И., Роганов В.А.* Перенос средств параллельного программирования OpenTS на платформу Windows Compute Cluster Server // Тр. Международной научной конференции “Программные системы: теория и приложения”. Т. 1. Переславль-Залесский, октябрь 2006. М.: Наука, 2007. 233–243.

Поступила в редакцию  
21.02.2007