

УДК 523.165

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКОНВЕЙЕРНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

С. В. Мизин, В. С. Махмутов, О. С. Максумов, А. Н. Квашнин

*В работе обсуждается необходимость использования элементов многопоточного (многоконвейерного, *multithreading*) программирования при создании программ управления сложными и быстродействующими физическими приборами. Приведены результаты применения программного обеспечения, разработанного на этих принципах, для наземных экспериментальных установок по регистрации космических лучей и потока заряженных частиц от ускорителя.*

Ключевые слова: приборы регистрации заряженных частиц, космические лучи, многоконвейерные вычисления, многопоточное программирование.

1. *Введение.* Необходимость реализации механизма многопоточных вычислений в больших или быстрых физических приборах ощущалась давно в силу необходимости увязывания ресурсоемких задач своевременной обработки и записи поступающей с приборов информации в режиме реального времени, отображения её для оператора и параллельной передачи по сети в центр сбора и обработки информации.

Для демонстрации важности и необходимости применения многопоточного программирования (МП) при создании современных эффективных приборов регистрации космических лучей (КЛ) и элементарных частиц, необходимо отметить следующее. Большинство современных физических электронных приборов имеют прямое подключение к компьютеру для прямого управления прибором, оперативного сбора и предварительной обработки данных с него на высокой скорости, и визуально-графического отображения хода эксперимента в режиме реального времени. Здесь мы имеем 3 вычислительные задачи: 1) управление прибором (и экспериментом) с компьютера, 2) отбор и сохранение получаемых данных и 3) оперативное отображение хода эксперимента. К ним

Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: svmizin@pochta.ru

добавляется 4-я возможная, сравнительно независимая, но важная задача, решаемая компьютером прибора, – обеспечение постоянной синхронной передачи данных эксперимента в локальную или глобальную компьютерную сеть. Ясно, что каждая из этих задач требует синхронного выполнения достаточно больших вычислений по разветвленным алгоритмам. При этом ни одна из вышеуказанных задач не должна замедлять или приостанавливать выполнение остальных альтернативных, не менее важных задач. Для обеспечения таких независимых цепочек вычислений и применяются существующие методы МП. Эти методы изначально разрабатывались для иных задач, например, для вычислений модельных методов аппроксимаций и численного решения сложных систем уравнений. Однако современные методы эксперимента требуют применения преимуществ метода МП уже к программам прямого управления приборами и ходом эксперимента, что хорошо иллюстрировано в монографии [1].

Долгопрудненская научная станция ФИАН им. П. Н. Лебедева на протяжении многих лет проводит работу по созданию комплексных приборов, управляемых персональными компьютерами. Одним из них являлся прибор по измерению потоков заряженной компоненты и нейтронов в аэростатном эксперименте 1992 года. Тогда были использованы программы, написанные под однозадачной операционной системой MS-DOS.

Нынешние системы регистрации заряженных частиц и управляющие ими программы принципиально отличаются от систем 15-летней давности. Это качественное изменение обусловлено тем, что более чем на 2-2.5 порядка выросла вычислительная мощность персональных компьютеров. Поэтому стало возможным создание управляющих приборами программ ПК реального времени на качественно более высоком уровне, чем это было ранее, что и показывает успешная эксплуатация различных приборов в течение длительного времени в автоматическом режиме.

На основе анализа экспериментальных данных, полученных с помощью обсуждаемых ниже установок, подтверждено, что программы обеспечивают надёжное поддержание точной работы схем приборов, в частности, стабильное удержание точности малых (порядка десятков миллисекунд) интервалов накопления данных на приборе, и считывания их. Не обнаружено никаких признаков “уплывания” интервалов времени и нарушения синхронизации, которые иногда случались на ранних ПК из-за недостатка их производительности и несовершенства пользовательских ОС.

Программы, разработанные нами для управления наземными приборами по регистрации КЛ и заряженных частиц от ускорителя, выполнены и успешно работают в среде операционной системы Майкрософт Windows (XP или выше) и используются

на стандартных современных однопроцессорных персональных компьютерах. Эти программы написаны на языке программирования Борланд Си и Си++. Отметим, что определяющим является сам язык программирования, поскольку в системе Майкрософт Windows успешно и эффективно реализован механизм управления МП на уровне стандартных функций, вызываемых из ядра операционной системы.

Надёжность и эффективность разработанных программ проверена на наземных установках во время их эксплуатации в период 2006–2010 гг. Один из них – прибор наземной регистрации КЛ “Ковёр”, который непрерывно работает в полностью автоматическом режиме в обсерватории Аргентины (<http://www.casleo.gov.ar>). С середины 2009 г. запущены в эксплуатацию два других прибора, которые установлены в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН). Оба они являются составной частью оборудования для проведения экспериментальных работ международного проекта CLOUD (<http://public.web.cern.ch/public/en/Research/CLOUD-en.html>). Этими приборами являются модификация детектора КЛ “Ковёр” и “Сцинтилляционный годоскоп” для регистрации заряженных частиц от ускорителя.

2. Краткое описание наземных установок “Ковёр” и “Сцинтилляционный годоскоп” и их программного обеспечения. Установка “Ковёр”, предназначенная для регистрации КЛ, состоит из 24 блоков газоразрядных счётчиков ТС-6, расположенных на площадке размером $\sim 1.5 \text{ м}^2$. Каждый блок состоит из двух горизонтальных слоёв счётчиков, разделённых слоем алюминия толщиной 7 мм. В каждом горизонтальном слое блока находится по 5 счётчиков ТС-6 (левая панель рис. 1). Этот прибор обеспечивает непрерывную регистрацию заряженных частиц в месте расположения установки.

Схема регистрации объединяет сигналы с горизонтальных слоёв детекторов в 3 счётных канала: а) суммарный счёт верхних счётчиков, б) суммарный счёт нижних счётчиков и в) суммарный счёт совпадений – одновременных срабатываний верхнего и нижнего детектора – канал телескопа. Первые 2 канала обеспечивают счёт мягкой электронно-фотонной компоненты КЛ, а счёт телескопа относится к регистрации более жесткой, проникающей компоненты КЛ (в основном, мюоны).

Наземная установка “Ковёр” состоит из собственно детекторного модуля, описанного выше, модуля счётной и интерфейсной электроники и компьютера. Всё взаимодействие с прибором программа персонального компьютера осуществляет через один стандартный последовательный коммуникационный порт типа RS-232. Программа прибора осуществляет полное управление ходом длительного полностью автоматического эксперимента, включая визуализацию хода эксперимента на экране управляющего при-

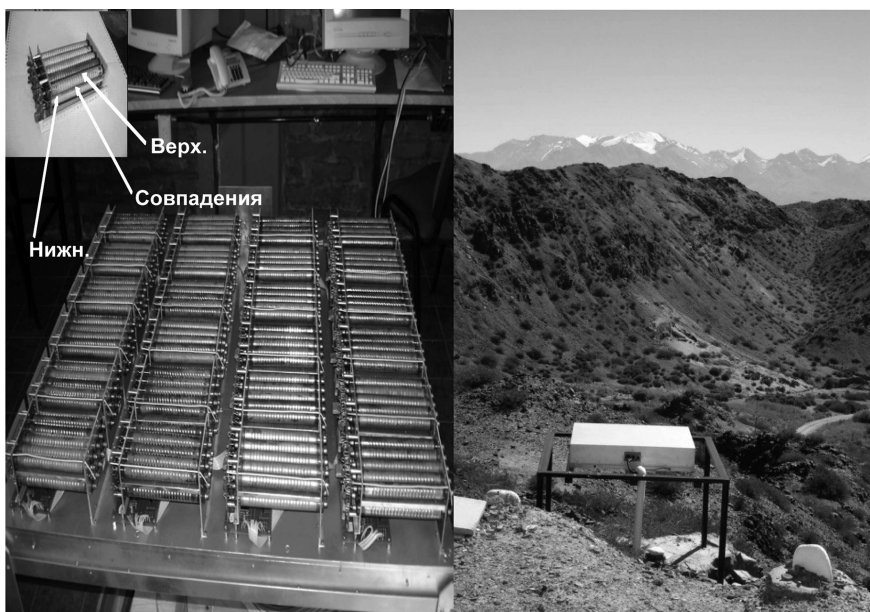


Рис. 1: Установка “Ковёр”. Слева – внутренний вид детекторного модуля. Справа – местоположение прибора в обсерватории CASLEO (Аргентинские Анды; высота 2650 м).

бором ПК. Запросы и получение данных с прибора, их сохранение на жестком диске ПК и удалённый доступ к данным по сети Интернет также осуществляются разработанной единой программой управления прибором.

Разработка программы управления установкой “Ковёр” была связана с необходимостью создания и точной реализацией 3-х вычислительных потоков.

Первый поток является главным вычислительным потоком программы управления прибором “Ковёр”. Он же обеспечивает процесс визуализации графиков хода эксперимента в главном окне программы на дисплее ПК. Второй поток, создаваемый при включении прибора, отвечает за процесс получения и первичной обработки данных, сохранение их в файле и конвертацию для построения графиков. Третий поток, создаваемый программным кодом одновременно со вторым, является обособленным потоком обслуживания высокоточного таймера периода накопления данных прибора. Данный таймер, создаваемый операционной системой по запросу программы, обеспечивает точность измерения малых интервалов времени – десятки миллисекунд, с относительной погрешностью не хуже 10^{-5} . Эта точность контролируется периодическими записями в пакетах данных отметок абсолютного времени. В таком виде программа управления установкой “Ковёр”, построенная на основе реализации принципов МП, подтвердила

правильность принятых решений. Установка “Ковёр” на протяжении ~ 4 лет непрерывно работает в автоматическом режиме под управлением этой программы.

Внешний вид графического окна программы прибора “Ковёр”, находящегося в рабочем режиме, показан на рис. 2. На данном рисунке приведено изображение окна программы, в котором отображается временной профиль темпа счёта прибора по всем трём каналам прибора. Две верхние частично наложенные друг на друга кривые, демонстрируют временную зависимость темпа счёта по каналам верхних и нижних счётчиков.

Нижняя кривая отображает темп счёта в третьем канале – число совпадений сигналов верхнего и нижнего счётчиков. В правом нижнем углу рисунка обозначен текущий интервал накопления данных прибора (время выборки) – 2 с, которому соответствует каждая точка отсчёта на графике.

Наземная установка “Годоскоп”, изготовленная на Долгопрудненской научной станции ФИАН им. П. Н. Лебедева, запущена в эксплуатацию в ЦЕРНе в середине 2009 г. для работы по программе международного эксперимента CLOUD. Ее основная задача состоит в мониторинговании пучка высокоэнергичных частиц, выходящих из ускорителя и проникающих в аэрозольную камеру эксперимента CLOUD. С помощью этой камеры будет исследоваться физический механизм влияния ионизирующих частиц на электродинамические свойства атмосферы [2, 3].

“Годоскоп” собран из 18 плоских сцинтилляционных счетчиков, размер каждого счетчика $1800 \times 20 \times 200$ мм³ (рис. 3, слева). Девять горизонтально расположенных сцинтилляционных счётчиков и девять вертикальных образуют в пересечении 81 канал пространственных данных. Такая совокупность каналов позволяет определить пространственное распределение пучка частиц на площади 1.8×1.8 м², проходящих через “Годоскоп”. Считывание данных всех 81 пространственных каналов происходит периодически, по истечении фиксированного периода времени, например, 500 мс, синхронно с инъекцией частиц от ускорителя. В дополнение к пространственным каналам, установка “Годоскоп” реализует также постоянный сбор данных о проходящем через установку полном потоке частиц по высокоскоростному временному каналу, с временем разрешения, равным $1/25$ времени разрешения пространственных каналов, 20 мс. Здесь происходит фиксация суммарных отсчётов данных по всем 81 каналам. Совокупность 25 таких временных отсчётов определяет полный временной профиль потока частиц, прошедших “Годоскоп” за время накопления, соответствующее характерному времени циклического сброса частиц от ускорителя (0.5 с).

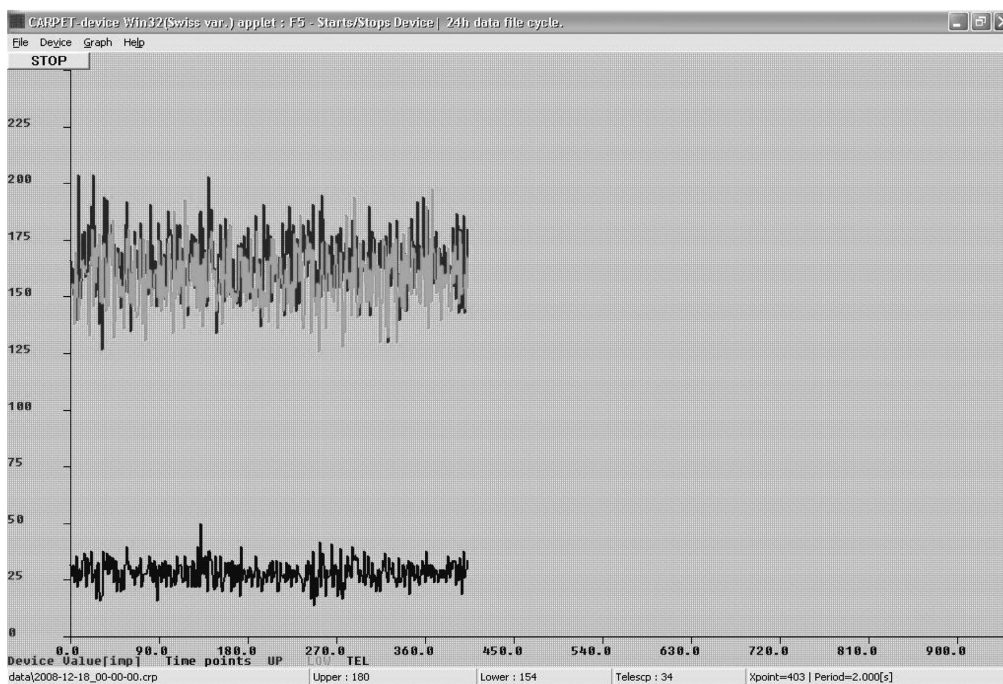


Рис. 2: Графическое рабочее окно интерфейсной части программы “Ковёр”. По вертикальной оси – темп счёта по трём каналам прибора за 2 с (см. текст).

Таким образом, сцинтилляционный детектор регистрирует временной и пространственный профили потока частиц от ускорителя, проходящие в камеру эксперимента CLOUD.

Программа, разработанная для управления установкой “Годоскоп”, значительно сложнее программы управления прибором “Ковёр”. Общий вид рабочего окна программы управления установкой “Годоскоп” в основном рабочем режиме представлен на рис. 3, справа. Базовый период накопления исходных данных, отсчитываемый высокоточным программным таймером, как упоминалось ранее, составляет 20 миллисекунд. При этом программа управления установкой реализует двухуровневый цикл периодов считывания данных с прибора: 1) обеспечивает измерение временного профиля проходящего потока заряженных частиц с временным разрешением 20 мс и 2) накапливает данные о пространственном распределении потока этих же частиц, проходящих через “Годоскоп” за время 500 мс (25 интервалов по 20 мс). Для этого были решены задачи по созданию и оптимизации вычислительных потоков внутри программы управления “Годоскопом”.

Программа управления установкой “Годоскоп” содержит в себе 5 отдельных программных потоков, реализованных в соответствии с принципами МП программирова-

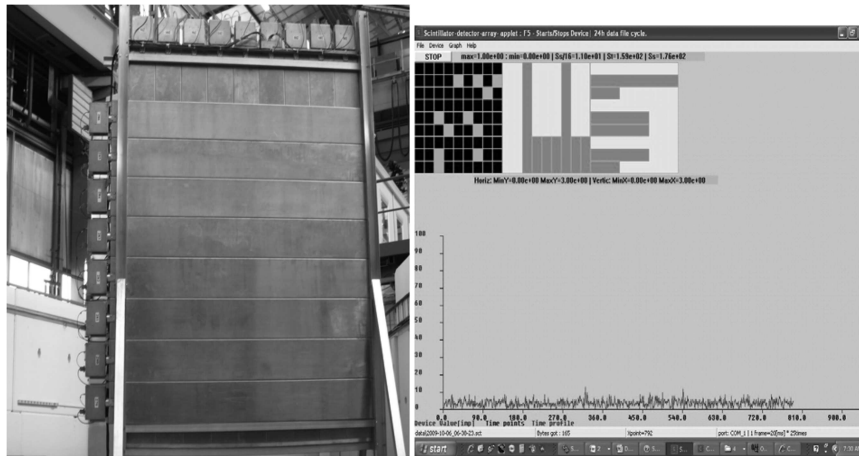


Рис. 3: Левая панель – регистрирующая часть прибора “Сцинтилляционный годоскоп” для регистрации пучка заряженных частиц от ускорителя ЦЕРН. Правая панель – вид окна программы управления прибором. Здесь нижний график представляет временную зависимость потока заряженных частиц, проходящих через прибор, за каждые 20 мс. Верхние 3 графические диаграммы отображают в реальном времени пространственное распределение потока частиц, проходящего через установку. На левой квадратной диаграмме каждый квадратик соответствует темпу счёта в одном из 81 каналов, правые две гистограммы представляют темп счёта в каждом из 9 горизонтальных и 9 вертикальных счётчиков, за 500 мс.

ния и интенсивно взаимодействующих между собой. Эти программные потоки служат для разделения процессорного времени в операционной системе. Малая величина запрашиваемого периода ожидания и обработки данных, а также большой объём данных о пространственном распределении потока частиц требуют, например, $\sim 20\text{-}25\%$ вычислительной мощности компьютера с процессором 2.5 ГГц частоты.

Разделение на вычислительные потоки в данной программе выполнено по следующей схеме. Первый поток, который также является главным потоком приложения, обеспечивает визуализацию 4-х основных графических полей отображения оперативной информации в реальном времени в главном окне программы. Второй и третий потоки, создаваемые одновременно в начале измерений, отвечают за организацию цикла запроса данных с прибора, обработки и сортировки получаемых данных, сохранения их в файл и функционирование главного прецизионного таймера программы с заданным периодом 20 миллисекунд. Четвёртый поток обеспечивает обслуживание ресурсоёмкого текстографического элемента визуализации информации, каковым является оператив-

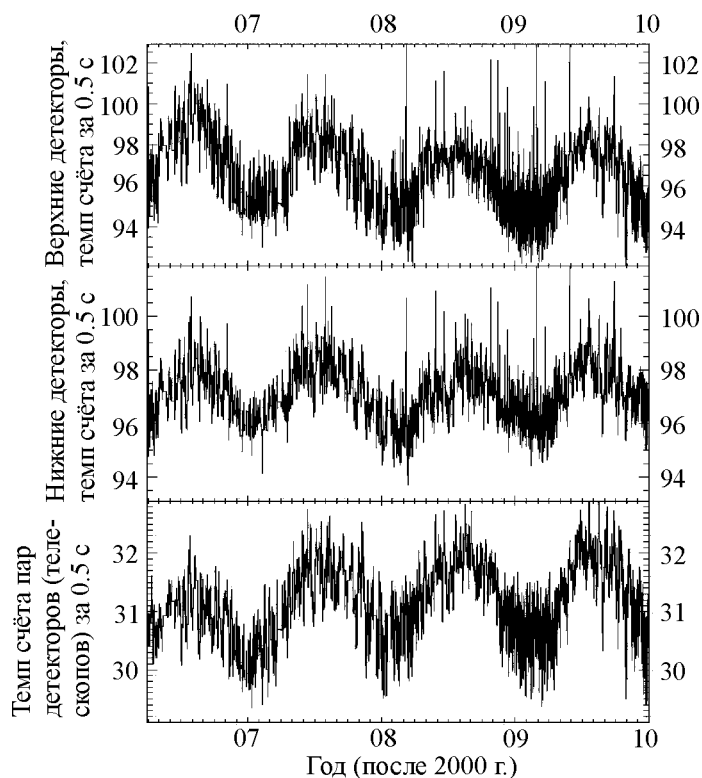


Рис. 4: Вариации интенсивности космических лучей по данным установки “Ковёр” в обсерватории CASLEO в Аргентине в период 01.04.2006 – 31.12.2009. По оси ординат – темп счёта “Ковра” в каждом из 3-х каналов.

ная таблица отображения темпа счёта прибора по всем 81 пространственным каналам в левом верхнем окне (рис. 3, правая панель). Наконец, 5-й отдельный поток необходим для монтажа, тестирования, отладки и проверки всей электроники экспериментальной установки “Годоскоп”. Его реализация обеспечивается выбором соответствующего пункта главного меню программы.

3. Результаты, полученные при использовании программ управления на приборах “Ковёр” и “Сцинтилляционный годоскоп” с применением методов МП. В настоящее время 2 установки “Ковёр” работают в непрерывном режиме в обсерватории CASLEO (Аргентина) и в ЦЕРНе. Первая из них была установлена в середине 2006 г. За это время получены экспериментальные данные о вариациях интенсивности космических лучей, вызванных солнечной активностью и процессами в приземном слое атмосферы. Эти данные обсуждаются в работе [4]. На рис. 4 в качестве примера представлены результаты измерений на установке “Ковёр”, полученные в обсерватории CASLEO в период 01.04.2006–31.12.2009. Видно, что отчётливо прослеживается сезонная “волна”

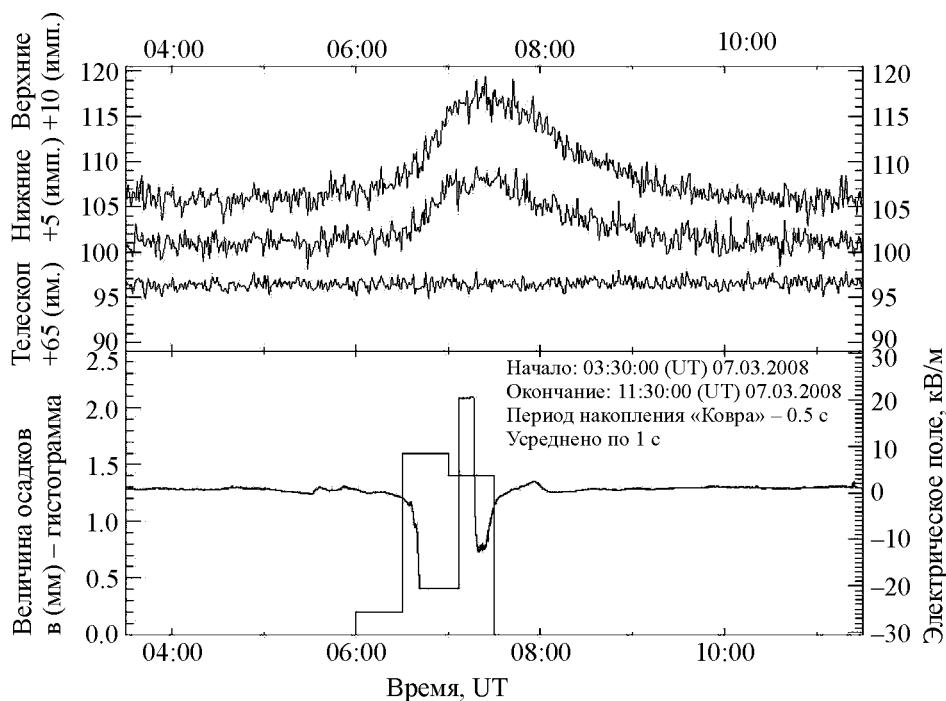


Рис. 5: Всплески космических лучей, регистрируемые прибором “Ковёр” в Аргентине. Верхние 3 кривые – темп счёта верхних, нижних счётчиков и телескопов. Внизу показаны данные по атмосферным осадкам (гистограмма) и напряжённости электромагнитного поля вблизи прибора “Ковёр” (кривая линия – результаты измерений прибора EFM-100). Время мировое (UT).

в изменении интенсивности космических лучей на фазе спада 23-го 11-летнего цикла солнечной активности. На рис. 5 показаны результаты измерений на установке “Ковёр” во время грозовой активности в приземной атмосфере, наблюдавшейся 7 марта 2008 г.

На верхней панели представлен темп счёта за 0.5 с по 3-м каналам “Ковра”. На нижней панели – данные измерений прибором EFM-100 приземного электрического поля, и уровня осадков по данным обсерватории CASLEO.

Для иллюстрации данных, полученных в ЦЕРН на установках “Годоскоп” и “Ковёр”, приведен рис. 6. На его левой панели показан временной профиль пучка частиц от ускорителя, проходящих в камеру CLOUD через “Сцинтилляционный годоскоп”: полное число частиц, проходящих через установку за 20 мс [5]. Повышенный счёт частиц в течение 500 мс (25 точек временных отсчётов) связан с прохождением частиц от ускорителя.

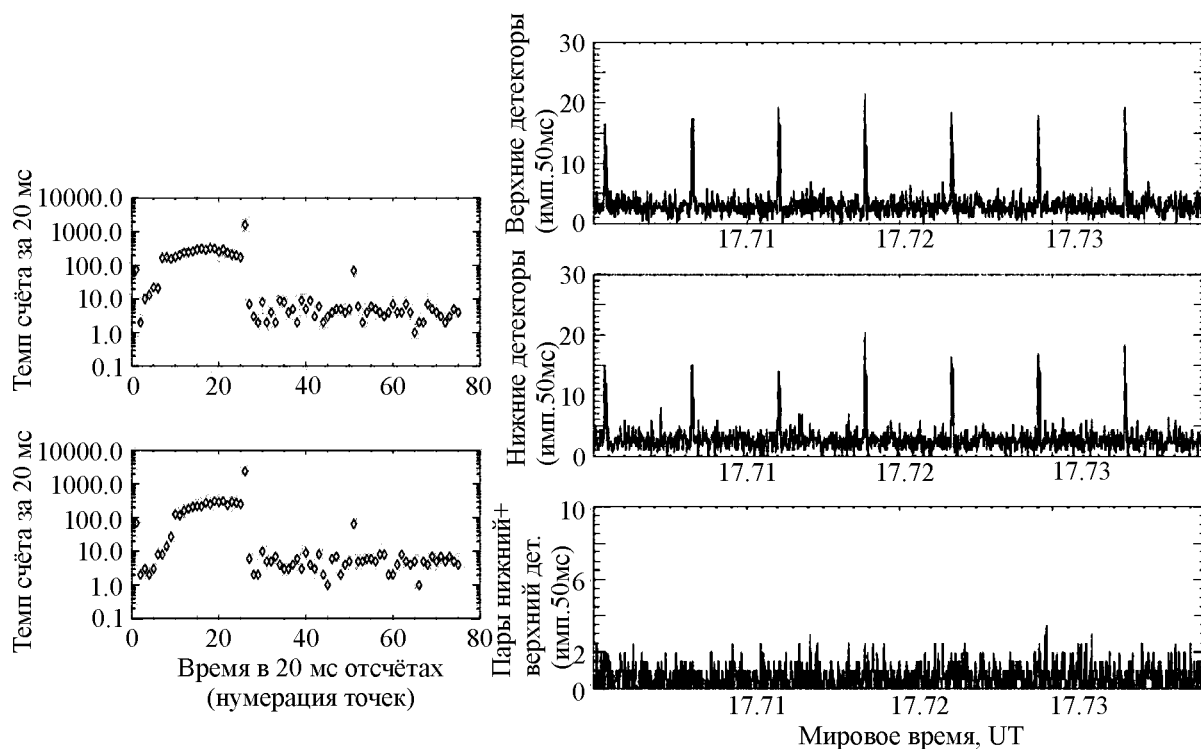


Рис. 6: Слева – временной профиль пучка заряженных частиц от ускорителя в ЦЕРНе, измеренный установкой “Годоскоп” 14 ноября 2009 г. По вертикальной оси – количество зарегистрированных частиц за 20 миллисекундный интервал, по горизонтальной оси порядковая нумерация последовательных 20 мс отсчётов на интервале времени 1.6 с. Справа – данные “Ковра”, полученные в период прохождения частиц от ускорителя 25 ноября 2009 г. с 17 : 42 : 00 по 17 : 44 : 24 UT (время мировое).

В их отсутствие установка регистрирует фоновый поток заряженных частиц, обусловленный вторичной компонентой космических лучей. На правой панели рис. 6 показаны измерения установки “Ковёр” в ЦЕРНе, проведенные 25 ноября 2009 г. в период 17:42:00–17:44:24 UT. Верхние 2 панели представляют измерения каналов 1 и 2 “Ковра”, а нижняя панель – канала совпадений счётчиков (телескопов), как описано выше. Время интегрирования (накопления) исходных данных, установленное программой управления “Ковра”, составляет 50 мс. Периодические всплески счёта в каналах 1 и 2 по времени совпадают с выбросами частиц из окна ускорителя. В это время в месте проведения эксперимента образуется дополнительная мягкая компонента (в основном, электроны и фотоны) заряженных частиц.

Эта компонента регистрируется верхними и нижними счётчиками, но она не даёт никакого вклада в 3-й канал совпадений вследствие поглощения. Измерения в период между выбросами частиц из ускорителя, как и данные в 3-м канале (телескопа), относятся к регистрации фоновых потоков космических лучей.

4. *Выводы.* В работе показана, на примерах созданных и реально работающих в международных экспериментах программ управления приборами, эффективность методов и средств многопоточного (МП) программирования. Результатом применения методов МП стала успешная работа в течение нескольких лет приборов “Ковёр” и “Сцинтилляционный годоскоп”. Результаты длительных и непрерывных экспериментов на вышеуказанных установках в обсерватории CASLEO (Аргентина) и в ЦЕРНе показали на практике эффективность и надёжность разработанных программ управления приборами.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по грантам РФФИ N 08-02-91006, 08-02-00054, 10-02-10022-к, 10-02-00326 и по программе Президиума РАН “Физика нейтрино и нейтринная астрофизика”.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] К. Г. Финогенов, *Win32. Основы программирования* (Изд-во ДИАЛОГ-МИФИ, М., 2006).
- [2] Jeff Kanipe, *Nature* **443**, 141 (2006).
- [3] Jasper Kirkby, *Cloud Experiment*, CERN Bulletin (No. 47-48/2009 - Monday 16 November 2009), <http://cdsweb.cern.ch/record/1221293>
- [4] Р. Р. Мендонса, Ж.-П. Ролан, В. С. Махмутов, С. В. Мизин и др., *Известия РАН, сер. физ.*, **73**(3), 423 (2009).
- [5] V. S. Makhmutov, Y. I. Stozhkov, A. N. Kvashnin et al., *Preliminary results on the GCR counter and particle beam hodoscope records during first CLOUD run on Nov.-Dec. 2009*. CLOUD collaboration meeting, Villigen/PSI, Switzerland, 25-28 Jan. 2010, <http://indico.cern.ch/categoryDisplay.py?categId=1455>

Поступила в редакцию 13 мая 2010 г.