

6. Montgomery G. K., Howland E. W., Cleeland C. S. e. a. Versatility in computer automation for biofeedback: The behavioral assesment and rehabilitative training system (BARTS).— Biofeedback and Self-Regulation, 1984, v. 9, N 3, p. 325—338.
7. Pope A. T., Gersten C. D. Computer automation of biofeedback training.— Behavioral Research Methods and Instrumentation, 1977, v. 9, p. 164—168.
8. Астафьев С. В., Третьяков В. П., Штарк М. Б., Яновский Г. Я. Аппаратное и программное обеспечение унифицированного измерительного тракта для микроэлектродных исследований.— Автометрия, 1984, № 4, с. 44—52.
9. Яновский Г. Я., Астафьев С. В., Дерий Б. Н. и др. HUMAN — комплекс программных и аппаратных средств автоматизации исследований физиологических систем человека.— Новосибирск, 1985. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЛиЭ; 269).
10. Яновский Г. Я. Модульная инструментальная система программирования экспериментов САНПО-3.— Новосибирск, 1985. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЛиЭ; 267).
11. Шульман Е. И., Гельцель М. Ю., Штарк М. Б. Об одном подходе к определению рефлекторных реакций сердечного ритма.— Физиология человека, 1982, № 2, с. 270—274.
12. Steptoe A. Blood pressure control with pulse wave velocity feedback: Methods of analysis and training.— In: Biofeedback and Behavior/Eds J. Beatty, H. Legewie. N. Y.: Plenum press, 1977, p. 355—367.
13. Сохадзе Э. М., Штарк М. Б., Шульман Е. И. Биологическая обратная связь в научных исследованиях и клинической практике.— Бюллетень СО АМН СССР, 1985, № 5, с. 78—85.
14. BIOLAB — Computer Based Biofeedback System.— Autogenics/Cyborg, Chicago, IL, USA, 1985.

*Поступила в редакцию 6 ноября 1985 г.*

УДК 681.3 : 578.088.78

**А. А. ЗУБКОВ, Е. И. ШУЛЬМАН, Г. Я. ЯНОВСКИЙ**

*(Новосибирск)*

### **ЦИФРОВОЕ СИНХРОННОЕ НАКОПЛЕНИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

В физиологических исследованиях, связанных с анализом сигналов, отражающих функционирование систем организма и возникающих в ответ на экспериментальные воздействия, синхронное накопление (СН) является одним из самых распространенных методов [1]. Наиболее широко он применяется при изучении вызванных потенциалов мозга [2, 3]. В последнее время его часто используют для анализа сигналов сердечно-сосудистой системы, принимая в качестве синхронизирующего события (СС) наиболее высокоамплитудный зубец (R-зубец) электрокардиограммы (ЭКГ) [4—6]. Распространение метода обусловлено тем, что он позволяет повысить точность экспериментальных данных, улучшая соотношение сигнал — шум путем суммирования периодически повторяющихся реализаций сигналов заданной продолжительности [7].

В указанных исследованиях используются как аппаратные [6, 8], так и программные [4, 5, 9] реализации метода. Первые обычно осуществляются в виде одной из функций многоканальных анализаторов и обладают ограниченным набором возможностей. Для вторых характерно программирование «под задачу», затрудняющее их использование в случае изменений экспериментальных условий.

Цель данной работы — создание программной системы, реализующей цифровое синхронное накопление физиологических сигналов и предоставляющей пользователю ряд дополнительных возможностей, повышающих эффективность применения метода и гибкость при адаптации к условиям конкретного исследования.

Программное обеспечение метода СН — исполняющая программная система (ИПС) SYNH — создана средствами модульной инструменталь-

ной системы программирования экспериментов САНПО-3 [10] и функционирует в составе типовой микрокомпьютерной системы, построенной на основе управляющего вычислительного комплекса типа «МикроКАМАК-лаб» [11], широко используемого для автоматизации различных физиологических исследований [12]. ИПС работает под управлением операционной системы RT-11 (версия 4.0). Программные модули, обслуживающие операции в реальном масштабе времени, написаны на Макроассемблере, остальные — на языках Фортран-IV и Паскаль — Рафос.

**Реализованные свойства.** Созданное программное обеспечение обладает следующими свойствами.

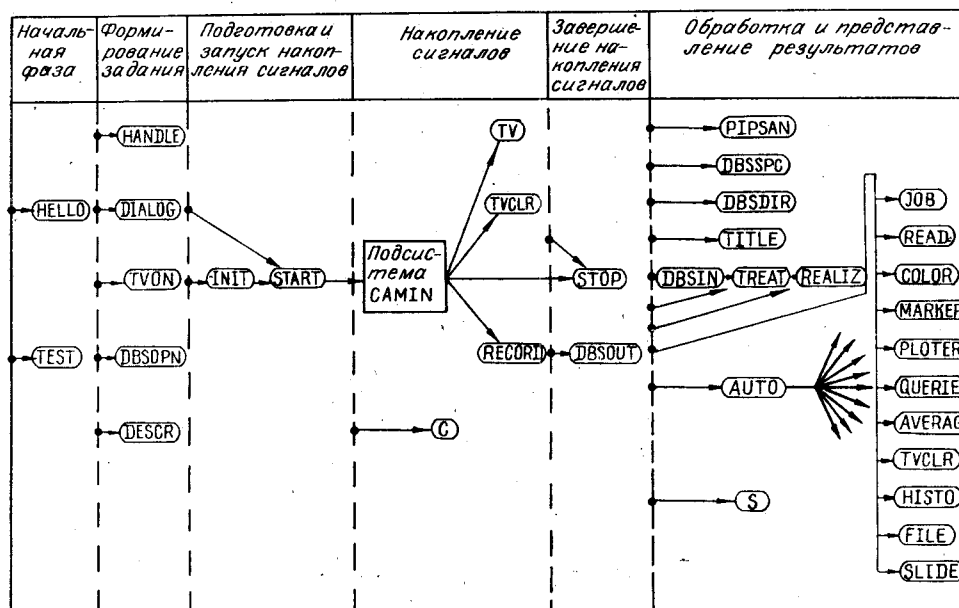
1. Одним из основных требований физиологического эксперимента является необходимость многоканальной регистрации сигналов. Описываемая ИПС позволяет производить синхронное накопление до восьми сигналов.

2. В качестве СС (определяющего моменты начала накопления реализаций сигналов) может быть принято любое заранее определенное событие (состояние), возникающее в ходе эксперимента и представляющее интерес с точки зрения решения поставленной задачи. Наиболее часто СС являются используемые в эксперименте стимулы. В ИПС предусмотрено использование до восьми различных СС с отдельной регистрацией реализаций сигналов в ответ на появление каждого из них. Необходимы лишь некоторые процедуры (реализуемые в виде программных модулей, включаемых в ИПС на этапе ее генерации), однозначно идентифицирующие моменты наступления этих событий и устанавливающие соответствующие им флаги готовности. В качестве флагов используются разряды определенного слова ИПС, называемого словом состояния СС. В процессе накопления сигналов осуществляется поразрядное тестирование этого слова. Обнаружение ненулевого разряда приводит к записи отсчетов накапливаемых сигналов в заранее отведенную для соответствующего СС область оперативной памяти (ОП). Запись реализаций сигнала производится в течение заданного интервала времени независимо от состояния флагов других СС. В ИПС предусмотрена возможность сбора информации о тех СС, которые появлялись во время накопления, инициированного другим СС. Это необходимо для контроля выполнения условий применения метода СН в конкретном эксперименте. Слово состояния СС тестируется начиная с младшего бита, что задает неявную систему приоритетов СС. При одновременном появлении нескольких СС накопление сигналов будет производиться в ответ на тот, который имеет наибольший приоритет. Для каждого из используемых в эксперименте СС возможно задание числа реализаций сигналов, накапливаемых в ответ на их появление.

3. Обычно реализации сигналов, подвергаемые в ходе эксперимента синхронному накоплению, последовательно суммируются, а затем усредняются по формуле

$$\bar{x}_i = (1/N) \sum_{j=1}^N x_{ij},$$

где  $\bar{x}_i$  —  $i$ -й отсчет усредненной реализации;  $x_{ij}$  —  $i$ -й отсчет  $j$ -й реализации;  $N$  — число накопленных реализаций. При этом информация об отдельных реализациях теряется, что делает невозможным проведение анализа сигналов с целью контроля выполнения условий усреднения, вычисления статистических характеристик сигналов по всему множеству реализаций (например, среднеквадратического разброса) и т. д. Вследствие этого в описываемую систему, наряду с режимом суммирования текущих реализаций, включен режим запоминания отдельных реализаций. Это свойство реализовано с помощью имеющихся в инструментальной системе средств работы со специализированными базами экспериментальных данных [10]. В режиме суммирования измеренные значения очередной реализации суммируются с соответствующими значениями текущих сумм. Для предотвращения переполнения текущие суммы хранятся в ОП в виде целых чисел удвоенной точности. Это позволяет суммировать порядка  $10^6$  реали-



заций для 12-разрядного АЦП. Деление полученных сумм на число накопленных реализаций выполняется после завершения накопления. Ограничение на число реализаций сигналов, накапливаемых в режиме запоминания, определяется размерами области внешней памяти, отводимой под файл базы данных. Оба режима накопления сигналов могут использоваться в эксперименте одновременно.

4. Осуществлена возможность смещения момента начала накопления реализаций относительно момента появления СС. Смещение может быть положительным или отрицательным. При положительных смещениях регистрируются участки реализаций, предшествующие появлению СС, при отрицательных — осуществляются задержки накопления реализаций. Такие задержки обеспечивают выбор информативных участков реализаций сигналов в случаях, когда эти участки отстоят от момента появления СС. Регистрация участков сигналов, предшествующих СС, реализована посредством кольцевых буферов.

5. Для каждого накапливаемого сигнала в соответствии с требованиями к точности анализа может быть установлен фактический период дискретизации, кратный базовому, который устанавливается программно и обрабатывается таймером. Его значения задаются с помощью коэффициента прореживания, определяемого как отношение фактического периода дискретизации сигнала к базовому.

6. Для оперативного контроля хода накопления сигналов в ИПС предусмотрена возможность вывода на цветной дисплей текущих реализаций любых трех сигналов.

Указанные свойства системы предоставляют экспериментатору возможность осуществлять сложные схемы многоканальных экспериментов и проводить всесторонний анализ функционирования исследуемого объекта под влиянием различных факторов.

**Исполнение программы синхронного накопления.** Функционально-логическая схема работы ИПС SYNН представлена на рисунке. Вертикальные линии разделяют логические фазы работы системы, названия которых указаны в верхней части рисунка. Функциональные действия системы обозначены эллипсами с именами внутри. Маленькие кружочки означают, что соответствующие операции системы инициируются приказом с терминала, а их размещение на той или иной вертикальной линии указывает на то, в какой фазе работы эти приказы допустимы. Утолщенные стрелки характеризуют связи между функциональными действиями. Два

функциональных действия связаны, если в результате работы одного из них автоматически может быть инициировано (при выполнении некоторых условий или безусловно) другое функциональное действие.

Рассмотрим наиболее важные приказы, допустимые на разных этапах работы системы.

Формирование задания на накопление сигналов в конкретном эксперименте производится приказом `DIALOG` и происходит в удобной для пользователя форме опроса. Он заключается в указании используемых в эксперименте каналов АЦП, соответствующих им коэффициентов усиления или калибровочных величин, а также параметров, необходимых для осуществления СН. К этим параметрам относятся (для каждого сигнала) режим накопления, длительность реализаций (в миллисекундах), величина смещения момента начала реализаций относительно момента появления СС (в миллисекундах) и коэффициент прореживания.

Далее система осуществляет опрос используемых в эксперименте СС. Формируемая по его результатам маска применяется в процессе накопления для контроля состояния соответствующих флагов в слове состояния СС. Для программных модулей, обслуживающих задействованные в эксперименте СС, проводится опрос необходимых для работы параметров.

Следующий приказ `TVON` позволяет задать те сигналы (из числа заказанных, но не более трех), текущие реализации которых будут выводиться на экран цветного дисплея в процессе накопления сигналов, и подобрать удобные для восприятия форматы изображения.

Резервирование необходимой области памяти на внешнем носителе под файл базы данных осуществляется приказом `DBSOPN`. Его инициация приводит к опросу спецификации и размера файла.

Исполнение директивы `INIT` вызывает разбиение области ОП, выделенной для хранения результатов накопления, на отдельные сегменты в соответствии с введенным заданием. Директива `START` запускает накопление, разрешая генерацию прерываний от КАМАК-блока «Таймер», задающего временную диаграмму измерений регистрируемых сигналов. Специализированное ядро ИПС `SYNH` — КАМАК-подсистема `CAMIN` — обеспечивает буферизацию очередной группы отсчетов, а также осуществление всех необходимых операций, связанных с обслуживанием СС и проведением СН сигналов.

В качестве фоновых операций система периодически инициирует операции, обеспечивающие вывод на цветной дисплей очередных отсчетов сигналов (`TV`), стирание экрана по мере его заполнения (`TVCLR`), запись в файл базы данных текущих реализаций сигналов, накапливаемых в режиме запоминания (`RECORD`). Приказ `S` позволяет в любой момент фазы накопления вывести на терминал текущие значения счетчиков числа появлений всех используемых в эксперименте СС.

Приказ `STOP` приостанавливает накопление сигналов, запрещая прерывания от оборудования. Помимо запуска с терминала, он может инициироваться автоматически в случае выполнения задания на накопление. Запоминание в базе данных всех параметров, необходимых для дальнейшей обработки накопленных сигналов, и ее закрытие производится директивой `DBSOUT`.

В общем случае обработка накопленных сигналов начинается с исполнения директивы `DBSSPC`, осуществляющей опрос спецификации файла базы данных. Собственно процесс обработки запускается приказом `DBSIN`, обеспечивающим чтение необходимых данных и параметров из базы данных, а в случае если обработка следует непосредственно за процедурой накопления, то приказом `TREAT`, так как все необходимые параметры и данные находятся в ОП. Конечным результатом этих операций является усреднение реализаций всех сигналов, накопленных в режиме суммирования (путем деления на значения соответствующих счетчиков числа накопленных реализаций), и преобразование их значений к требуемым единицам измерений (микровольтам). Для проведения дальнейшей обработки реализаций конкретного сигнала необходимо с по-

мощью директивы REALIZ указать номер СС, номер канала АЦП, по которому он был накоплен, и использованный режим накопления.

Для сигналов, накопленных в режиме суммирования, могут быть применены следующие директивы: COLOR — визуализация на экране цветного дисплея; PLOTTER — вывод «твердой копии» на двухкоординатный самописец; MARKER — использование программного маркера, позволяющего в интерактивном режиме, реализованном с помощью функциональной клавиатуры терминала, определять и выводить значения амплитудных и временных параметров кривых, представленных на экране дисплея; SLIDE — запоминание графиков (точнее, образов экрана) в отдельных файлах.

Для сигналов, накопленных в режиме запоминания, дополнительно могут быть проведены следующие операции: READ — чтение заданной реализации сигнала из базы данных; AVERAG — рекуррентное усреднение заданной реализации с предыдущими и визуализация текущей усредненной кривой; FILE — запись текущих реализаций в файл, предназначенный для отображения на экране цветного дисплея в виде трехмерного графика (по оси аппликат откладываются номера реализаций). Однако ввод многочисленных, однотипных терминальных приказов при анализе большого числа накопленных реализаций является весьма трудоемким. Поэтому в системе осуществлен режим автоматической обработки реализаций, позволяющий в цикле выполнять любую допустимую последовательность терминальных приказов, включая возможность предварительного опроса подтверждения на исполнение любого из них (директива QUERIE). Такой механизм особенно эффективен, когда усреднение сопровождается отсеиванием наиболее искаженных артефактами реализаций. Приказ JOB позволяет сформировать задание для автоматической обработки реализаций. Ее запуск осуществляется директивой AUTO, а останов в произвольный момент — директивой S.

Приказ HANDLE, выполненный после загрузки ИПС, дает возможность подготовить ее к обработке сигналов, полученных в ранее проведенных экспериментах, минуя фазу накопления (отсроченный режим обработки).

**Условия исполнения программы эксперимента.** Рассмотрим условия, при которых возможно выполнение задания на накопление сигналов в конкретном эксперименте.

Объем области ОП, отводимой для хранения результатов накопления, определяется постановкой задачи и ограничивается сверху объемом памяти, занимаемым различными компонентами резидента ИПС (областью фиксированных программ, оперативной базой данных и т. д.). Рассмотрим процедуру разбиения этой области на отдельные сегменты в соответствии с введенным заданием на накопление. Получаемые при этом начальные адреса сегментов и другая необходимая информация заносятся в специальные таблицы, которые затем используются в процессе накопления. После ввода в систему задания формируются маска используемых в данном эксперименте СС  $\bar{S}$  и маска задействованных каналов АЦП  $\bar{L}$ , роль которых играют определенные слова ИПС. Они могут рассматриваться как двоичные векторы, компоненты которых ( $S_j$  или  $L_i$ ) принимают значения 1, если соответствующий СС или канал АЦП используется, и 0 в противном случае. Считаем, что для реализаций накапливаемых сигналов заданы их длительности  $T_i^{\text{post}}$ , длительности участков, предшествующих СС  $T_i^{\text{pre}}$  (если они регистрируются, в противном случае эта величина равна 0), коэффициент прореживания  $K_i$  и режим накопления  $R_i$  (равен 0 в режиме суммирования и 1 в режиме запоминания). Тогда суммарный объем оперативной памяти  $V$ , необходимый для организации накопления (с учетом раздельного накопления реализаций сигналов в ответ на предъявление различных СС  $S_j$ ), равен

$$V = \sum_{j=1}^8 S_j \sum_{i=1}^8 \frac{L_i}{K_i \tau} (T_i^{\text{pre}} + (2 - R_i) (T_i^{\text{pre}} + T_i^{\text{post}})),$$

Период дискретизации сигналов, мс	Число сигналов	
	без регистрации участков, предшествующих СС	с регистрацией участков, предшествующих СС
2	2	1
4	6	4
5	8	6
6	8	8

где  $\tau$  — базовый период дискретизации. Очевидным условием выполнения заказа на накопление является  $V \leq V_0$ , где  $V_0$  — объем области памяти, отведенной под накопление. В случае  $V > V_0$  на терминал выводится сообщение об ошибке и значение величины  $V - V_0$  в словах.

Для устранения ошибки необходимо скорректировать задание в сторону уменьшения требуемого для его выполнения объема памяти. Этого можно достичь либо уменьшением числа накапливаемых сигналов и используемых СС, либо уменьшением продолжительностей реализаций каких-либо сигналов, либо увеличением их коэффициентов прореживания.

Другое условие выполнения задания на накопление состоит в том, что время обработки очередной группы отсчетов сигналов не должно превышать базовый период дискретизации. В процессе накопления выполнение этого условия непрерывно контролируется. Число его нарушений подсчитывается, при достижении заданного числа работа системы приостанавливается и на терминал выводится сообщение об ошибке. В этом случае необходимо скорректировать задание, отказавшись от каких-либо СС, сигналов или регистрации участков реализаций, предшествующих СС, либо увеличить величину базового периода дискретизации.

В таблице приведены данные о возможном числе накапливаемых сигналов при разных значениях периода дискретизации. Они получены для сигналов сердечно-сосудистой системы, в качестве СС использовался R-зубец ЭКГ, идентифицируемый специальным программным модулем.

При использовании режима запоминания необходимо учитывать, что из-за наличия у запоминающих устройств задержек на время доступа к данным (у накопителя на гибких магнитных дисках PL X 45D среднее значение этого параметра 300 мс) при относительно малом периоде следования СС возможна потеря информации о некоторых реализациях сигналов, так как во время операции записи очередной реализации накопление сигналов на данное СС запрещено до завершения операции.

**Заключение.** Описанное программное обеспечение цифрового синхронного накопления дает исследователю гибкий инструмент для проведения экспериментов с использованием этого метода обработки сигналов. Гибкость созданной исполняющей программной системы обусловлена заложенными в нее свойствами: многоканальностью, возможностью использования различных СС в одном эксперименте, осуществлением режима запоминания отдельных реализаций наряду с их суммированием, развитым диалоговым интерфейсом и рядом других возможностей. Благодаря выбранному подходу к разработке программного обеспечения (на основе инструментальной системы САНПО-3) обеспечена простота расширения и совершенствования функциональных возможностей данной ИПС.

Ориентация на получившую широкое распространение микроЭВМ «Электроника 60» приводит к некоторым ограничениям в применении системы, однако реализованный в ней контроль корректности условий работы позволяет подбором временных параметров накопления добиться выполнения условий.

Реализованная система может быть использована для решения ряда экспериментальных физиологических задач, связанных с анализом формы сигналов, при необходимости улучшения соотношения сигнал — шум.

Авторы благодарят за помощь в работе С. В. Астафьева, Б. Н. Деряга, И. В. Егорушкина и В. П. Третьякова.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фурно Г. и др. Микрокомпьютерные медицинские системы. Проектирование и применение.— М.: Мир, 1983.
2. Шагас Ч. Вызванные потенциалы головного мозга в норме и патологии.— М.: Мир, 1975.
3. Рутман Э. М. Вызванные потенциалы в психологии и психофизиологии.— М.: Наука, 1979.
4. Бербари Э. Дж. и др. Метод записи новых элементов электрокардиограммы с использованием вычислительной техники.— ТИИЭР, 1977, т. 65, № 5.
5. Халфен Э. Ш. и др. Непрерывный автоматический анализ ЭКГ с помощью ЭВМ при вводе кардиосигнала непосредственно от больного. Сообщение 1. Выделение полезного сигнала ЭКГ, идентификация и измерение его элементов.— Кардиология, 1977, № 7.
6. Герзанич В. В. и др. Естественная электрическая активность симпатических нервных волокон человека, зарегистрированная от поверхности тела.— Физиологический журн. СССР им. И. М. Сеченова, 1984, т. LXX, № 5.
7. Макс Ж. и др. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях.— М.: Мир, 1983, т. 1.
8. Макс Ж. и др. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях.— М.: Мир, 1983, т. 2.
9. Simmons P. J. Signal averaging by microcomputer using a program written in a high-level language.— J. of Neurosciences Methods, 1985, N 12.
10. Яновский Г. Я. Модульная инструментальная система программирования экспериментов САННО-3.— Новосибирск, 1985. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЛиЭ; № 267).
11. Гусев О. З. и др. Базовые конфигурации системы «МикроКАМАКлаб».— Автометрия, 1984, № 4.
12. Яновский Г. Я. и др. HUMAN — комплекс программных и аппаратных средств автоматизации исследований физиологических систем человека.— Новосибирск, 1985. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЛиЭ; № 269).

Поступила в редакцию 14 ноября 1985 г.

УДК 612.822 : 616.071

Ю. Л. ГОГОЛИЦЫН, С. Г. ДАНЬКО, Ю. Л. КАМИНСКИЙ,  
Ю. Д. КРОПОТОВ, С. В. МЕДВЕДЕВ, К. В. МЕЛЬНИЧУК,  
С. В. ПАХОМОВ, В. А. ПОНОМАРЕВ

(Ленинград)

### АППАРАТУРНОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫЗВАННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МОЗГА ЧЕЛОВЕКА

В ранее опубликованной статье [1] описывался аппаратно-программный комплекс для исследования динамики нейронной активности мозга человека, построенный на базе системы анализа сигналов «Plurimat». Возможность регистрации различных физиологических процессов мозга человека, в том числе импульсной активности нейронов, в состоянии покоя и на фоне выполнения пациентами ряда функциональных проб, включающих психологические тесты, появилась благодаря внедрению в клиническую практику вживленных электродов как средства диагностики и лечения больных паркинсонизмом и эпилепсией [2, 3]. Комплекс позволял регистрировать нейронную активность до восьми групп нейронов одновременно, предъявлять пациенту последовательности зрительных стимулов с заданными экспозициями и интервалами между стимулами, регистрировать вербальные и простые двигательные реакции и анализировать динамику текущей частоты нейронной активности.

В работе [4] основное внимание уделялось описанию общей структуры комплекса, вопросам отведения, усиления и организации ввода в ЭВМ импульсной активности нейронов одновременно по нескольким каналам,