

P7-2018-71

Ю. С. Цыганов\*

**REDSTORM2 — ПАКЕТ ПРОГРАММ C++  
ДЛЯ НОВОГО ГАЗОНАПОЛНЕННОГО СЕПАРАТОРА  
ЯДЕР ОТДАЧИ ЛЯР ОИЯИ**

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

---

\* E-mail: tyra@jinr.ru

Цыганов Ю. С.

P7-2018-71

REDSTORM2 — пакет программ C++ для нового газонаполненного сепаратора ядер отдачи ЛЯР ОИЯИ

Представлен пакет программ C++ для нового газонаполненного сепаратора ядер отдачи ЛЯР ОИЯИ. Данная версия программного обеспечения является глубокой модернизацией пакета REDSTORM (REal-time Detection and STORage of Multichain events) и предназначена для работы с фокальным DSSSD-детектором сепаратора и газовым времяпролетным модулем низкого давления в экспериментах по поиску редких  $\alpha$ -распадов сверхтяжелых ядер. Программа набора спектрометрических данных работает с применением метода активных корреляций. Отдельно рассмотрены программы, моделирующие ход эксперимента, и ряд тестов с применением как генератора точной амплитуды, так и внешних источников  $\alpha$ -частиц.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2018

Tsyganov Yu. S.

P7-2018-71

REDSTORM2 — C++ Program Package for New Gas-Filled Recoil Separator of FLNR (JINR)

C++ program package for new FLNR (JINR) Gas-Filled Recoil Separator is presented. This version of the software is in fact a deep upgrade of former REDSTORM program. It will be applied together with DSSSD focal plane detector and time-of-flight gaseous detector of the separator in the experiments aimed at the search of rare  $\alpha$ -decays of superheavy nuclei. Program for storage of spectrometry data operates with applying of active correlation technique. Programs modeling the experiments to search for correlation chains in a real-time mode as well as simple tests of electronics apparatuses are under consideration too. For those purposes a specific pulse generator and external  $\alpha$ -decay sources are used.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Начало текущего века, вне всякого сомнения, ознаменовалось выдающимся открытием в области ядерной физики — открытием «острова стабильности» сверхтяжелых ядер [1–5]. Синтез новых элементов  $Z = 113–118$  был осуществлен на установке «Дубненский газонаполненный сепаратор ядер отдачи» (ГНС) [6, 7]. В экспериментах на интенсивном (вплоть до  $1,5 \text{ p} \cdot \text{мкА}$ ) пучке ионов  $^{48}\text{Ca}$  был применен ряд уникальных технологий [8–16], что и определило успех трудоемких долговременных экспериментов по синтезу сверхтяжелых ядер на ускорителе У-400 ЛЯР (ОИЯИ). С точки зрения подавления фонов, связанных так или иначе с работой циклотрона, решающая роль в экспериментах принадлежала методу активных корреляций [8–16], который позволял производить регистрацию ультраредких событий  $\alpha$ -распада исследуемых ядер в практически бесфоновых условиях. Отметим, что с вводом в строй в 2019 г. нового сверхинтенсивного циклотрона DC-280 ЛЯР ОИЯИ («Фабрика сверхтяжелых элементов») [17, 18] значение данного метода возрастает многократно. Совершенствованию метода и его алгоритмов, программного обеспечения, а также ряду других аспектов и посвящена эта работа.

### 1. МЕТОД АКТИВНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ И ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ УСТАНОВКИ «ДУБНЕНСКИЙ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЙ СЕПАРАТОР ЯДЕР ОТДАЧИ»

Метод активных корреляций основан на том, что природа сама дает исследователям некий «ключ» к бесфоновой регистрации  $\alpha$ -распадов сверхтяжелых ядер благодаря их многозвенности. В этом случае регистрация в реальном масштабе времени указателя на потенциальную корреляцию может служить триггером для отключения пучка циклотрона У-400 и создавать, таким образом, короткий интервал времени для бесфоновой регистрации последующих распадов. В прошлых экспериментах на ГНС таким указателем являлась корреляция по энергии-времени-координате звена типа ER- $\alpha$ , где первый сигнал соответствовал регистрации имплантированного в кремниевый детектор ядра отдачи в реакции полного слияния с ионами  $^{48}\text{Ca}$ . Особенно актуален данный метод при наличии сравнительно больших времен распада в конце регистрируемой цепочки  $\alpha$ -распадов. Диапазон времен может составлять от

минут до десятков часов. Типичные для этого случая примеры представлены в работе [19] для элемента  $Z = 115$  (Mc).

## 2. ПРОЕКТ DC-280

В работах [17, 18] описан новый циклотрон ЛЯР ОИЯИ — DC-280, приведены некоторые его параметры для различных тяжелых ионов. Так, при потенциале инжектирующего пучка вплоть до 100 кВ и магнитном поле 0,6–1,3 Тл диапазон ускоряемых частиц составлял  $A/Z = 4–7,5$ . Ожидаемые интенсивности пучков на мишени могут составлять несколько  $\mu$ -мкА, и это намного больше значений, полученных при опытах на циклотроне У-400. Этот факт и определяет повышенные требования к системам детектирования, электронным блокам, программному обеспечению, методам и алгоритмам реального времени при проведении экспериментов по синтезу элементов  $Z = 119, 120$  (например, на пучке ионов  $^{50}\text{Ti}$ ). Отдельный актуальный вопрос — это вопрос радиационной стабильности фокальных позиционно-чувствительных детекторов спектрометра нового газонаполненного сепаратора.

## 3. ПРОГРАММА REDSTORM2: СТРУКТУРА, ОСНОВНЫЕ ПУНКТЫ МЕНЮ

В работе [20] описана программа REDSTORM для набора данных — остановов пучка для детектирующей системы газонаполненного сепаратора на основе 32-стрипового детектора с резистивным слоем производства Capberga NV (Бельгия). Данная система детектирования имела: 32 позиционно-чувствительных резистивных стрипа; восемь боковых кремниевых детекторов без позиционной чувствительности для повышения геометрической эффективности регистрации частиц, вылетающих в обратную полусферу по отношению к направлению пучка; вето-детектор, помещенный за фокальным, для подавления фона длиннопробежных частиц; газовый времяпролетный детектор для регистрации заряженных частиц, движущихся по направлению имплантируемых ядер. Именно эта система детектирования была применена при открытии нового элемента —  $Z = 117$  (Ts) [21].

Описываемое в данной работе приложение C++ Builder REDSTORM2, по существу, является глубокой модернизацией предыдущей версии, что конкретно выражается:

- в большей степени гибкости алгоритма поиска коррелированных звеньев в реальном масштабе времени;
- в наличии файлов задания, не предполагающих процесса перекомпиляции;
- в наличии разнообразных внутренних тестов аппаратуры;

— в наличии теста Монте-Карло для моделирования процесса облучения с привязкой к сигналам генератора-эквивалента сигналов IMI-2011 TekhInvest [22];

— в ряде других усовершенствований, таких как приложения теоретического характера для моделирования процесса регистрации.

На рис. 1 представлена блок-диаграмма рассматриваемой программы, а на рис. 2 — частичная спецификация для случая моделированных спектров. На рис. 3 показан основной интерфейс пользователя, а на рис. 4 и 5 содержатся пункты меню основных тестов и других вспомогательных действий. Разумеется, рис. 2 соответствует тестовому режиму поиска корреляций типа ER- $\alpha$ . В качестве стартового шага осуществляется процедура чтения установочных файлов config\_ADC.txt, 111.txt, 112.txt и 333.txt, которые должны помещаться в той же (текущей) директории.

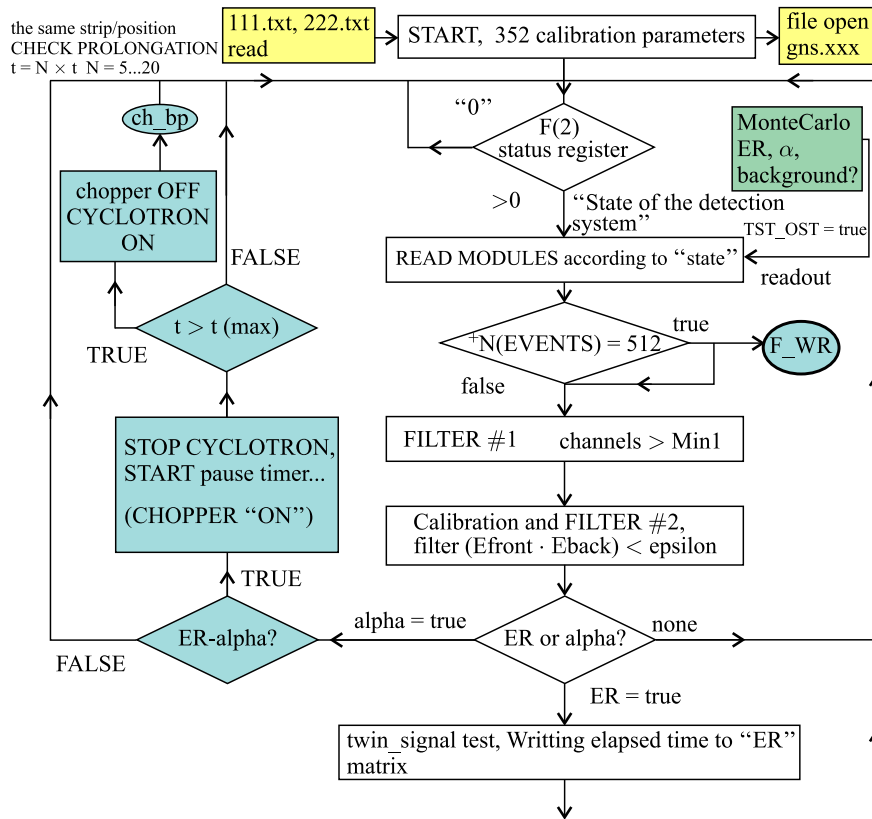


Рис. 1. Блок-диаграмма программы REDSTORM2. Зеленым цветом показан блок условной компиляции по ключу TST\_OST

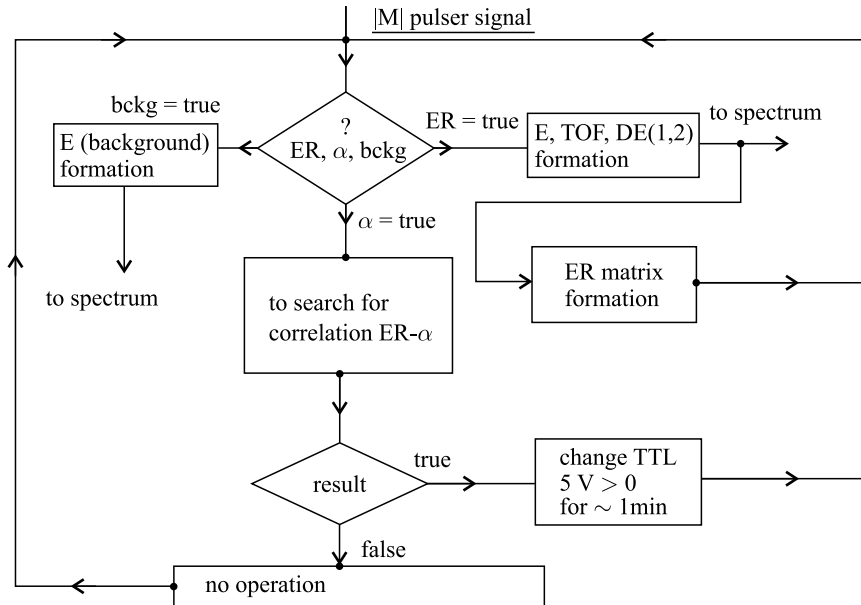


Рис. 2. Блок-схема, спецификация варианта Монте-Карло ER,  $\alpha$ , фон (см. рис. 1)

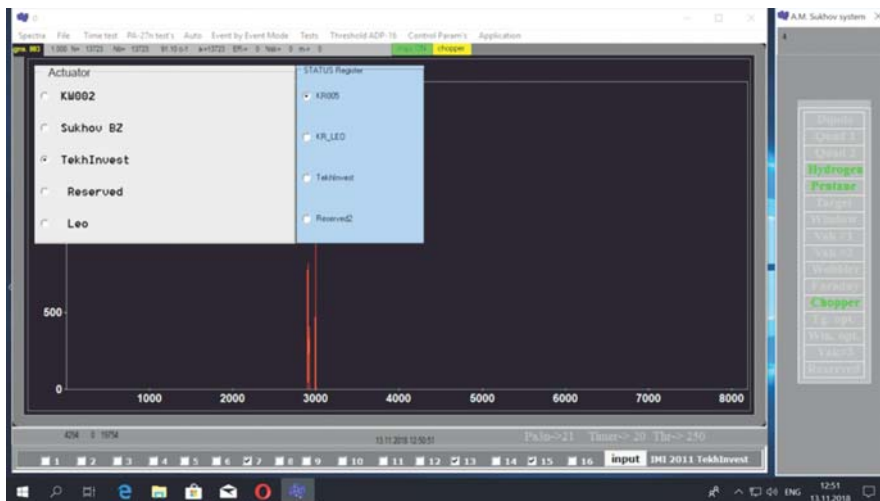


Рис. 3. Основной интерфейс пользователя программы REDSTORM2. Тестирование программы с применением генератора IMI-2011 TekhInvest. Правая панель — регистр блока защиты. Актуальный контроль — пентан, водород, прерыватель пучка (chopper)

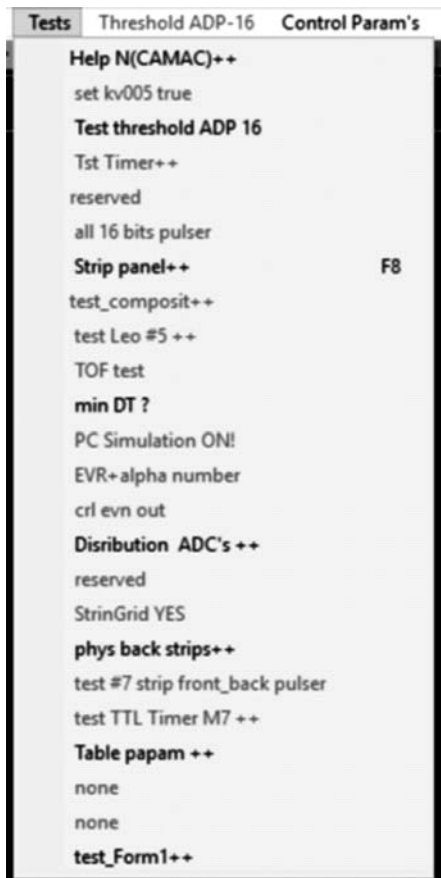


Рис. 4. Меню тестов аппаратуры и программы

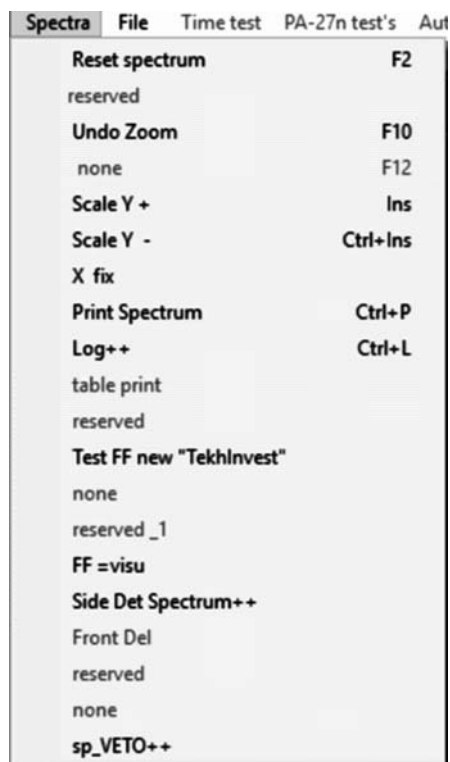


Рис. 5. Пункты меню раздела «Spectra»

Для данного пункта главного меню:

- «Strip panel» открывает панель запуска генератора IMI-2011 (пользователь выбирает номера каналов актуального стрипа, подключенного к генератору многостырьковым разъемом, или нескольких стрипов (1–16));
- «Help N (CAMAC)» показывает спецификацию мест конкретных модулей в крейте;
- «Table param» показывает параметры корреляций (первично содержащихся в 222.txt);
- «min dt» открывает гистограмму разности времен между любыми двумя последовательными событиями в интервале 5–100 мкс;

- $\langle \text{test\_VOLT} \rangle$  — тестовое периодическое (1–3 с) переключение уровня TTL блока 16-in Discriminator «ТехИнвест» (факт переключения  $3.3 \rightarrow 0$  В наблюдается на осциллографе);

- $\langle \text{test\_eff} \rangle$  — тест определения величины эффективности подавления пучка тяжелых ионов по наблюдаемому пику времяпролетным детектором.

Такие основные пункты меню, как  $\langle \text{Reset Spectrum} \rangle$ ,  $\langle \text{Print Spectrum} \rangle$ ,  $\langle \text{FF=visu} \rangle$ ,  $\langle \text{sp\_VETO} \rangle$ ,  $\langle \text{Log++} \rangle$ , соответственно обозначают:

- сброс накопленного суммарного спектра (при этом некоторые пункты меню неактивны для пользователя и предназначены для разработчиков программного обеспечения или электронных модулей в процессе создания, тестирования и настройки);

- печать спектра на установленном принтере (формата Landscape);

- открытие окна спектра второй шкалы ( $\sim 20\text{--}300$  МэВ);

- визуализацию спектра сигналов вето-детектора;

- включение/выключение логарифмической шкалы оси ординат (отсчеты).

Пункт  $\langle \text{Puasson} \rangle$  в главном меню  $\langle \text{Calculation} \rangle$  вызывает процедуру вычисления вероятности того, что на временном интервале  $8 \cdot t_{\text{dead}} \approx 200$  мкс произойдет переполнение внутреннего буфера размером восемь слов 16 bit блока ADP-16 с учетом конкретных загрузок фокального детектора. В данном случае восемь — это максимальный размер буфера. При этом величина реальной загрузки вводится в интерактивном режиме. Параметр  $t_{\text{dead}}$  — мертвое время считывания одного события. Значение параметра загрузки фокального детектора по умолчанию равно  $10^3$  Гц.

Программа компилируется в зависимости от ключей компиляции в трех вариантах, такие как:

- 1) рабочая программа для экспериментов на ГНС (GNS\_2019.exe);

- 2) программа для тестирования спектрометрических трактов с применением генератора IMI-2011 TekhInvest (pulser.exe);

- 3) тест Монте-Карло остановов пучка с привязкой к импульсам генератора IMI-2011 (Carlo.exe).

**3.1. Загрузочные файлы, некоторые пункты меню приложения, формат события.** Загрузочные файлы 111.txt, 112.txt и 333.txt определяют задание программе режима работы и содержат основные загрузочные параметры. Так, файл 111.txt содержит калибровочные коэффициенты всех  $48 + 48 = 96$  стрипов (фронтальных + боковых) в предположении линейности шкал. То есть на каждый стрип приходится по два параметра — нулевая ордината и наклон  $E_i = a_i N_i + b_i$ ,  $i = 1, \dots, 96$ . Здесь  $E_i$  — актуальное значение энергии регистрируемого сигнала,  $N_i$  — номер канала. Порядок следования коэффициентов калибровки в файле таков:

- первые 48 чисел — коэффициенты наклона передних стрипов;

- следующие 48 чисел — нулевые ординаты передних стрипов;



- следующие 48 чисел — коэффициенты наклона боковых стрипов;
- следующие 48 чисел — нулевые ординаты боковых стрипов.

Файл 112.txt содержит параметры, актуальные для режима поиска коррелированных звеньев типа ER- $\alpha$  в реальном масштабе времени, такие как:

ER<sub>min</sub> — минимальная измеряемая энергия рекойла (6000 кэВ);

ER<sub>max</sub> — максимальная измеряемая энергия рекойла (17 000 кэВ);

E <sub>$\alpha$ .min</sub> — минимальная энергия  $\alpha$ -частицы (8500 кэВ);

E <sub>$\alpha$ .max</sub> — максимальная энергия  $\alpha$ -частицы (12 000 кэВ);

MAX <sub>$\alpha$</sub>  и MIN <sub>$\alpha$</sub>  — вспомогательные параметры (20 000–7000 кэВ);

(TOF<sub>min</sub>, TOF<sub>max</sub>) — интервал (каналы) для времени пролета (1000–3000; 12 bit АЦП);

DE<sub>1,2\_MIN</sub> — минимально значимые каналы для зачета сигнала  $\Delta E_{1,2}$  с камер «Старт» и «Стоп» (примерно 100);

EPS — допустимый интервал корреляционного времени ER- $\alpha$  (1 000 000 мкс);

kkk — фактор продления интервала паузы (~3–20);

(E <sub>$\alpha$ nextmin</sub>, E <sub>$\alpha$ nextmax</sub>) — энергетический интервал для продления паузы (8000, 9500 кэВ);

Pause — пауза облучения мишени (60 с).

Следующий параметр в тексте, принимающий значения 1/0, означает разрешение/запрет на поиск корреляций и остановки облучения, затем следует число в микросекундах, означающее, что разница меньше этого времени может указывать на то, что событие является составным. Следующий параметр 1/0 означает то, что после каждой регистрации рекойла происходит понижение порога регистрации соответствующего блока ADP-16 на время (в микросекундах), на которое указывает последний параметр файла.

При работе программы формируются следующие спектры (гистограммы):

— суммарный спектр (48 стрипов) шкалы  $\alpha$ -частиц (~300 кэВ – 13 МэВ);

— спектр вето-детектора;

— суммарный спектр с 48 боковыми детекторами;

— гистограммы распределения количества событий по передним и задним стрипам;

— спектры времени пролета и удельных потерь в счетчиках «Старт» и «Стоп» (TOF,  $\Delta E_1$  и  $\Delta E_2$ );

— суммарный спектр шкалы 25–300 МэВ (FF — шкала);

— спектр разности текущих файловых времен 5–100 мкс;

— спектр событий «вне пучка»;

— ряд других.

Файл 333.txt имеет вспомогательное значение и становится актуальным в случае, когда один из блоков защиты системы контроля и защиты сепаратора находится в этом же крейте (блок 1M). В этом случае в данный файл

записывается состояние системы контроля с точки зрения разрешения постановки на контроль того или иного технологического параметра (всего 16 параметров). Тогда при перезапуске программы возвращается предыдущее состояние блока защиты. Файл gate.txt содержит предельную величину загрузок и кратность повторения данного события в течение 1–3 с. В случае превышения данной величины происходит отключение пучка при наличии разрешения на данную операцию в пункте меню (ALARM).

Что же касается формата события, то он представлен так:

```
class ara
{
public:
Word ID; // код события 1...6
Word aa; // амплитуда передних стрипов,  $\alpha$ -шкала 0...8192
Word ff; // шкала осколков деления  $16 \cdot 4096$ 
Word tsi; // микросекундный счетчик вращения мишени 0...65535
Word tfl; // время пролета 0...4095 (каналы)
Word D11; //  $\Delta E_1$ , 0...4095 (каналы)
Word D12; //  $\Delta E_2$ , 0...4095 (каналы)
Word as; // ВЕТО-детектор, 0...4095 (каналы)
Word fs; // статус регистр 0...65535
Byte cod; // номер заднего стрипа
Byte cob; // номер второго стрипа, если есть
unsigned wsec; // текущее время, секунды Windows
unsigned exs; ; // текущее время, микросекунды Windows
Word ab; // амплитуда  $\alpha$ -шкалы, задний стрип
Word bb; // вторая амплитуда (если есть)
};
static ara zeroev={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
ara event[EVENT_IN_BUFFER];
```

Обычно параметр EVENT\_IN\_BUFFER=515, а zeroev — нулевое событие.

**3.2. Основные блоки при работе программы.** При работе приложения взаимодействие (чтение/запись) происходит с 14 блоками — аналоговыми процессорами КАМАК ADP-16 «ТехИнвест», блоком-исполнителем передачи TTL сигнала через блок оптической развязки и блоком защиты системы контроля параметров на остановку пучка 16-in дискриминатор (2М), блоком Ра3п (сигналы TOF,  $\Delta E_1$  и  $\Delta E_2$ ), а также блоком «статусный регистр» (1М). Триггирование процесса чтения события осуществляется при помощи блока 1М 6-ИЛИ, фактически объединяющего по ИЛИ шесть сигналов блоков ADP-16 (48 фронтальных стрипов DSSSD-детектора и 48 боковых детекторов).



Рис. 6. Спектры, генерируемые программой с привязкой к сигналам генератора. Показаны (слева направо) сгенерированные спектры  $\Delta E_{1,2}$ , TOF, ER. Узкие пики соответствуют сигналам  $\alpha$ -распада. Также показаны фоновые отсчеты (равномерное распределение)

Основу системы представляет блок ADP-16. Он позволяет:

- принимать 16 входных сигналов с зарядочувствительного преобразователя;
- образовывать цифровые коды для двух шкал ( $\alpha$ -частиц и осколков деления);
- считывать «штамп времени» (time stamp) для каждого входного сигнала с точностью 1 мкс;
- менять пороги регистрации, используя команды КАМАК.

Для записи трех сигналов TOF,  $\Delta E_{1,2}$  используется блок 1M Pa3n «ТехИнвест».

Кроме трех указанных файлов в директории должен находиться файл ADC\_config.txt, в котором указаны номера станций блоков Pa3n, 16-in дискриминатор, а последнее значение (обычно 100–250) указывает на величину порога по умолчанию для блоков ADP-16. Отображение этой информации содержит нижняя панель приложения при его запуске. Так, на рис. 3 величина порога регистрации указана как Thr → 250.

**3.3. Тест режима прерывания пучка.** Работа программы осуществляется при наличии генератора IMI-2011 TekhInvest в крейте. При этом любой регистрируемый сигнал преобразуется в сигнал либо типа  $\alpha$ , либо типа ER, либо «фон» с соответствующими вероятностями. На рис. 6 показан типичный суммарный спектр генерируемых с привязкой к генератору IMI-2011 собы-

тий «имплантации», « $\alpha$ -распада», а также «фоновых» событий (равномерно). В качестве примера ниже приведен фрагмент, соответствующий ситуации «рекойл» (ER=true). Отметим, что в этом примере параметр `carlo1 = 4`, а ключ `TST_OST` в header-файле означает начало/конец блока условной компиляции. Переменные `tof`, `DE1` и `DE2` — генерируемые амплитуды «сигналов» времени пролета и  $\Delta E$  для камер «Старт» и «Стоп»:

```
#if (TST_OST)
tof=0; DE1=0; DE2=0; cnt_rrr++; chn=0;
int rrr=random(100);
if (rrr>set_carlo1)
{
chn=(TOF_MIN+TOF_MAX)/2+160+random(330)-
random(310)+random(150)-random(130)+random(120)-
random(138)+random(70)-random(65)+random(18)-
random(22)+random(8);
tof=chn;
DE1=1000-random(270)+random(250)-
random(180)+random(160)+random(30);
DE2=1300-random(240)+random(220)-random(120)+
random(80)+random(24);
ww=ww+600+random(250)-random(240)+random(140)-random(120)+
random(40)-random(30);
}
// продолжение, если rrr≤set_carlo1
#endif
```

Фрагмент файла-результата генераторного теста (файл `B.STOP.txt` актуальной директории) следующий:

```
4353 7 29 39 20 11614.1 9471.3 34354 649469543 11383 32769 827
4353 7 29 39 20 11361.1 9474.6 34456 750987097 10955 32768 827
4353 7 29 39 20 11223.0 9507.5 35206 1501325783 7685 32769 827
4353 7 29 39 20 11423.5 9481.2 35587 1882098620 5928 32766 827
...
```

В данной записи результата:

- 1-я колонка содержит статусный регистр;
- 2-я — номер переднего стрипа (электронное значение);
- 3-я — номер переднего стрипа (физическое значение);
- 4-я — номер заднего стрипа (электронное значение);
- 5-я — номер заднего стрипа (физическое значение);
- 6-я — значение энергии рекойла;
- 7-я — значение энергии  $\alpha$ -частицы;
- 8-я — время Windows (с);
- 9-я — файловое, текущее время (мкс);
- 10-я — время в мкс по отношению к старту от прохождения спиц вращающейся мишени;

11-я — корреляционное время  $ER-\alpha$ ;

12-я — номер файла.

Что касается содержания статусного регистра, то фактически это позиционный код сработавших модулей (14 bit) и дополнительная (специальная) информация (15-й, 16-й bit), а именно наличие единицы означает срабатывание трех модулей, регистрирующих сигналы 48 передних стрипов, трех модулей, регистрирующих сигналы 48 стрипов боковых детекторов, и шести модулей, регистрирующих сигналы 128 задних стрипов соответственно. Bit 16 = 1 означает, что система остановила облучение, а bit 15 = 1 означает, что сработал дополнительный аналоговый блок, объединяющий по ИЛИ сигналы срабатывания камер «Старт» и «Стоп» времяпролетной системы. При этом подразумевается, что названные в данном порядке блоки ADP-16 занимают места в крейте с первого по четырнадцатое.

Переключение уровня TTL блока-исполнителя контролируется, в том числе и визуально по осциллографу. Разумеется, ведется запись в файл-протокол «остановов пучка» B\_STOP.txt, где наряду с энергетическими характеристиками пары сигналов, ответственных за прерывание процесса «облучения мишени», записываются координата, текущее время события и временной интервал между сигналом рекойла и  $\alpha$ -распада.

#### 4. ДРУГИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Рассматриваемые ниже программы не являются спектрометрическими в прямом смысле этого слова, но они либо предназначены для контроля технологических параметров, либо моделируют применение тех или иных алгоритмов для минимизации фона и детектирования редких событий распада, либо рассчитывают те или иные специфические величины при регистрации сильноионизирующих частиц кремниевыми детекторами.

**4.1. Программа (SU-2019) для автономной системы контроля газонаполненного сепаратора.** На рис. 7 показан основной интерфейс программы. На нижних панелях рисунка показаны два ряда кнопок — по 16 в каждом. При нажатии каждой кнопки происходит постановка того или иного параметра на контроль. При следующем нажатии происходит обратная операция: снятие с контроля. В случае актуальности контроля текст заглавия кнопки становится светло-зеленым, в то время как исходный цвет — желтый. Это касается нижнего (основного) регистра кнопок, которые соответствуют первому блоку защиты КАМАК 1М (см., например, [23], различие — в количестве каналов: 16 вместо 8). Второй регистр кнопок постановки/снятия с контроля (второй блок защиты на 16 входов) использует мнемонику да/нет (Y/N).

В данном тестовом примере система выдает код ошибки 12 в верхнем левом углу, что соответствует третьей и четвертой кнопкам (причинам). Надпись ADC dc во второй строке верхней панели говорит о том, что включен

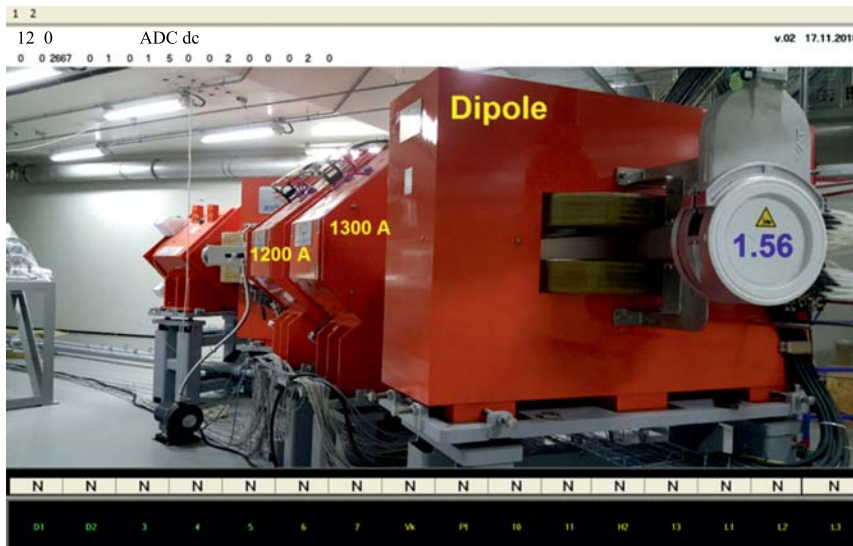


Рис. 7. Основной интерфейс пользователя программы SU-2019: 1 и 2 на верхней панели — главное меню приложения

16-входный (0–5 В) АЦП постоянного тока фирмы «ТехИнвест». В данном примере на 3-й вход АЦП поступает сигнал +3,3 В, который преобразуется в канал 2667. Опрос как АЦП, так и выхода обоих блоков защиты осуществляется по событию onTimer (C++ Builder) обычно с фиксированным интервалом времени 2–3 с.

**4.2. Программа моделирования процесса остановов пучка для более сложных алгоритмов.** Программа Simula.exe разработана для компьютерного моделирования «регистрируемых» событий и проверки алгоритмов поиска корреляций, в том числе и более сложных, чем ER- $\alpha$ , таких как моделирование и поиск в реальном масштабе времени коррелированных звеньев типа ER- $\alpha$ - $\alpha$ . Следует отметить, что подробное описание данной программы представлено в работе [24]. Конечным же результатом действия программы является текстовый файл result.txt, в котором фиксируются найденные корреляционные звенья.

**4.3. Программа U400.exe.** Данная программа является модификацией ранее применяемого приложения для измерения энергии пучка циклотрона У-400 ЛЯР ОИЯИ путем измерения времени пролета с электродов PickUp [23]. Принцип работы предельно прост. После заполнения буфера (1000 импульсов) программа находит центр тяжести пика, и по найденному значению времени пролета и известной массе иона находится искомое значение энергии пучка. Данное значение доступно не только экспериментатору, но и оператору

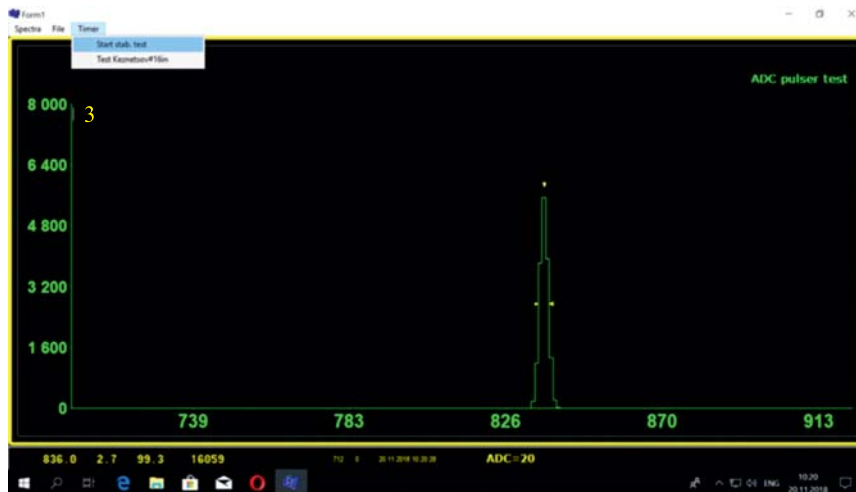


Рис. 8. Интерфейс программы Single.exe. Показан пункт меню теста стабильности. На нижней панели показано текущее значение центра тяжести пика (канал 836.0). Верхнее значение в левом углу 3 — ПШПВ в каналах. Тип АЦП — ПА25 «ТехИнвест»

циклотрона, который может вносить коррективы, менять настройку циклотрона в масштабе времени одной или нескольких секунд. Подробно принцип измерения изложен в работе [23].

**4.4. Программа Single.exe.** Программа Single.exe предназначена для тестирования одиночных АЦП, в том числе для проведения тестов долговременной стабильности. На рис. 8 показан основной интерфейс программы, а также развернутый пункт меню для включения теста стабильности. После включения данного режима программа по событию onTimer (обычно раз в 5 мин) автоматически находит центр тяжести наиболее интенсивного пика и заносит это значение в текстовый файл с указанием астрономического времени. Анализ этого файла и является результатом теста. В данном случае проверяется стабильность всей аппаратной линии: генератор – зарядочувствительный предусилитель – формирующий усилитель – АЦП.

## 5. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ БЛОК 2М 16-in «ТехИнвест» КАК ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ

Если, как показано на рис. 3, в меню ⟨actuator⟩ выбрана позиция 16-in TekhInvest, то это означает, что на соответствующем месте в крейте должен находиться блок 16-in Discriminator. При этом фирма-производитель должна так запрограммировать матрицу «ALTERA», чтобы были актуальны следующие функции и выходы блока:

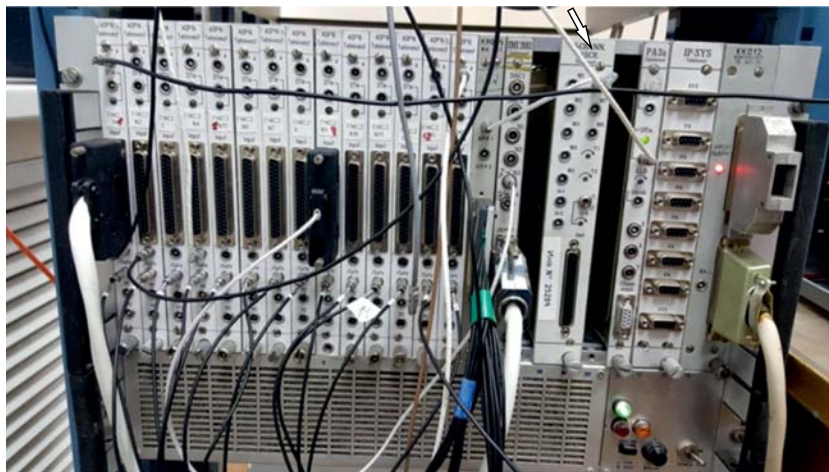


Рис. 9. Блок 2М 16-in Discriminator в крейте системы набора данных (показан стрелкой)

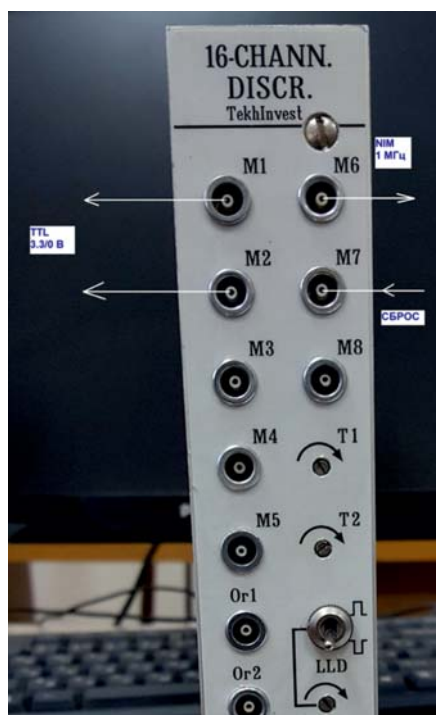


Рис. 10. Блок 16-in Discriminator. Стрелками показаны основные выходы



- Входы 1–15 DB-37-NIM, счетчики (15 шт.) 16 bit, причем F(10)A(0) — запуск интервала измерения всех счетчиков и сброс предыдущих значений;
- F(16)A(0)W[8-1] — запись интервала счета всех счетчиков;
- F(0)A[14-0]W[8-1] — чтение данных счетчиков;
- разъем M1 — выход TTL, NA(1)F(26) установка на уровне +3,3 В. NA(1)F(24) — установка на уровне 0 В (см. рис. 10);
- M8 — вход сигнала «сброс» дополнительного счетчика 16 bit. Сброс осуществляется по изменению 3.3 → 0 TTL;
- выход M6 — генератор NIM сигналов 1 МГц.

На рис. 10 показан блок 2M 16-in Discriminator и соответствующие входы/выходы.

## 6. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ («ГИБКИЙ») АЛГОРИТМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В работе [9] предложено оптимизировать алгоритм реального времени по допустимой величине потерь времени облучения мишени. Шаблон функции, осуществляющей данное действие, мог бы выглядеть следующим образом. Пусть  $\|\varepsilon_{ij}\|$  — матрица входных параметров, определяющих возможность останова при регистрации корреляционного события в элементе  $(i, j)$ , где  $i = 1-48$  и  $j = 1-128$ .

Для определенности рассмотрим корреляцию типа ER- $\alpha$ - $\alpha$ . В этом случае допустимое время  $t_{i,j}$  от рекойла до второй  $\alpha$ -частицы определяется из соотношения

$$CP_{i,j}^{\text{ER}}(1, t_{i,j})P_{i,j}^{\alpha}(2, t_{i,j}) \leq \varepsilon_{i,j}.$$

В данной записи значения  $P$  обозначают вероятности получить на интервале  $(0, t_{i,j})$  один рекойл (ER) и две  $\alpha$ -частицы. Обычно имеют дело с вероятностями, соответствующими пуассоновскому процессу [24]. Нормировочный множитель  $C$  с очевидностью (см. комбинации сигналов ниже) в данном случае равен 1/3. Комбинации возможных сигналов таковы: ER- $\alpha$ - $\alpha$ ,  $\alpha$ -ER- $\alpha$  и  $\alpha$ - $\alpha$ -ER.

Отметим, что только первая комбинация отвечает физическому смыслу. И в случае, если сигналы двух  $\alpha$ -частиц различимы, т. е. имеют место сигналы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , будем иметь дело со следующими комбинациями: ER- $\alpha_1$ - $\alpha_2$ , ER- $\alpha_2$ - $\alpha_1$ ,  $\alpha_1$ -ER- $\alpha_2$ ,  $\alpha_2$ -ER- $\alpha_1$ ,  $\alpha_1$ - $\alpha_2$ -ER и  $\alpha_2$ - $\alpha_1$ -ER. Соответственно, в этом случае  $C = 1/6$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен программный пакет C++ REDSTORM2 для исследований реакций на пучке тяжелых ионов нового циклотрона ЛЯР ОИЯИ — DC-280. Ряд решений соответствует как применению DSSSD позиционно-чувствительных детекторов нового газонаполненного сепаратора ЛЯР ОИЯИ, так

и условиям использования сверхинтенсивных пучков тяжелых ионов в реакциях синтеза сверхтяжелых элементов. Выполнен ряд предварительных тестов.

Автор выражает благодарность своим коллегам А. Н. Полякову и А. А. Воинову за помощь в работе. Работа выполнена при частичной поддержке грантом РФФИ № 16-52-55002.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. P. 064609.
2. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Ibid. V. 69. P. 054607.
3. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. P. 034609.
4. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 011601 (R).
5. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 014320.
6. *Цыганов Ю. С.* // ЭЧАЯ. 2014. Т. 45, вып. 5–6. С. 1485–1531.
7. *Tsyganov Yu. S.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 378. P. 356–359.
8. *Tsyganov Yu. S. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 513. P. 413–416.
9. *Цыганов Ю. С. и др.* // ЭЧАЯ. 2018. Т. 49, вып. 6. С. 1624–1642.
10. *Tsyganov Yu. S., Polyakov A. N.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 558. P. 329–332.
11. *Tsyganov Yu. S. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 525. P. 213–216.
12. *Tsyganov Yu. S.* // Phys. Part. Nucl. 2016. V. 47, No. 1. P. 73–107.
13. *Tsyganov Yu. S.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 1. P. 112–119.
14. *Tsyganov Yu. S.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 4. P. 570–577.
15. *Tsyganov Yu. S.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2011. V. 8, No. 5. P. 374–378.
16. *Tsyganov Yu., Polyakov A.* // Cybernetics & Physics. 2014. V. 3, No. 2. P. 85–90.
17. *Gulbekian G. G., Dmitriev S. N., Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15, No. 7. P. 803–807.
18. *Gulbekian G., Gikal B., Kalagin I., Kazarinov N.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2010. V. 7, No. 7. P. 1–6.
19. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 014302.
20. *Tsyganov Yu. S.* // Proc. of XXIV Intern. Symp. Nucl. Electronics & Computing “NEC’2013”, Varna, Bulgaria, Sept. 9–16, 2013. Dubna, 2016. P. 247–250.
21. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. P. 162501.
22. IMI-2011 “TekhInvest” Manual; *Kuznetsov A. N.* Private Communication. 2011.
23. *Сухов А. М., Поляков А. Н., Цыганов Ю. С.* // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 5(161). С. 603–615.

Получено 27 декабря 2018 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 26.02.2019.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,00. Уч.-изд. л. 1,18. Тираж 215 экз. Заказ № 59614.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)