

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ДУБНЕНСКОМ ГАЗОНАПОЛНЕННОМ СЕПАРАТОРЕ ЯДЕР ОТДАЧИ

Ю. С. Цыганов¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрено приложение, созданное в среде Builder C++ (Windows) для анализа экспериментальных данных спектрометра газонаполненного сепаратора (ГНС) ядер отдачи ЛЯР им. Г.Н. Флерова на основе детектора DSSSD (Double Side Silicon Strip Detector) в режиме off-line. Разработанный автоматический экспресс-метод калибровки 48 стрипов кремниевого позиционно-чувствительного детектора по трем наиболее энергичным линиям спектра из реакции ${}^{\text{nat}}\text{Yb} + {}^{48}\text{Ca} \rightarrow {}^*\text{Th}$ сравнивается по результатам с более тщательными калибровочными методами. Приведены примеры спектров для указанной реакции, а также результаты фильтрации для предлагаемого калибровочного алгоритма.

Abstract Builder C++ (Windows) application for the experimental data of the Dubna Gas-Filled Recoil Separator (DGFRS) and DSSSD detector based detection system is considered. Express method for 48 strip calibration of position sensitive silicon detector using three peaks from ${}^{\text{nat}}\text{Yb} + {}^{48}\text{Ca} \rightarrow {}^*\text{Th}$ reaction is designed. It is compared with the results of the precise calibration procedure. Examples of spectra from that reaction are presented too.

PACS: 07.05.-t

ВВЕДЕНИЕ

Более чем успешные эксперименты на установке ГНС за последние годы предполагают высокую степень автоматизации экспериментов по поиску редких событий распада сверхтяжелых ядер (СТЯ) [1–3]. Основные элементы таких систем и подходов изложены в работах [4–9]. Данная же работа является органическим продолжением [5] в области таких компонент, как off-line приложение для анализа данных и возможной корректировки работы аппаратуры как до эксперимента, так и в ходе длительного облучения. Экспресс-калибровка стрипов детектора DSSSD может рассматриваться как способ экономии времени при поиске корреляций типа ядро отдачи – α (ER– α) в реальном масштабе времени [10]. Кроме того, по мнению автора, большое значение имеет мониторинг правильности работы датчиков вращения механической рамки как мишени, так и входного окна сепаратора [11] исходя именно из файловой информации. Также при рассмотрении процесса автоматической калибровки спектров важно учитывать специфику спектра

¹E-mail: tyura@sungns.jinr.ru

α -распада из реакции полного слияния ${}^{\text{nat}}\text{Yb} + {}^{48}\text{Ca} \rightarrow {}^*\text{Th}$ как наиболее часто (практически безальтернативно) применяемой для данных целей на установке ГНС. В частности, это — наличие линии 9261 кэВ, которая легко может быть идентифицирована в автоматическом режиме и использоваться для первого приближения калибровки по одной линии.

1. RAD Builder C++ ФАЙЛОВОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ MONITOR'2015 ДЛЯ РАБОТЫ С ФАЙЛАМИ НАБОРА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ГНС

Данное приложение предназначено для работы с файлами детектирующей системы ГНС на основе детектора DSSSD (программа Writer.exe [5]). Оно подробно описано в указанных выше работах. Файлы данных (event-by-event) хранятся на носителе DS 1511 Disk Station [12] в комнате дистанционного контроля ГНС, там же расположены компьютеры для работы с данными (рис. 1).

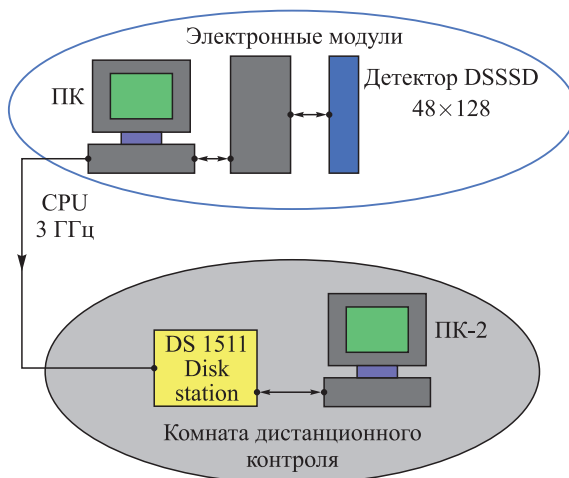


Рис. 1. Схематика процесса набора/визуализации данных

1.1. Основные гистограммы приложения MONITOR-2014. К числу основных гистограмм относятся их следующие группы:

- основная гистограмма, содержащая (различные цвета линий) спектры α -распада (суммарный, по текущей калибровке, если есть), спектр относительных времен при работе с вращающейся мишенью, спектр ΔE_1 , ΔE_2 (пропорциональные камеры низкого давления), TOF (время пролета);

- гистограммы (каналы, энергия по калибровке по событию OnMouseMove на отдельной панели) энергии для 48 передних стрипов и 128 задних, шесть спектров боковых детекторов и спектр VETO-детектора (расположен за фокальным детектором) [13, 14];

- гистограммы распределений загрузки по передним и задним стрипам;

- гистограмма (суммарная) энергий грубой шкалы (до 300 МэВ) по текущей калибровке;

- и ряд других.

В качестве примера на рис. 2 показана основная входная гистограмма.

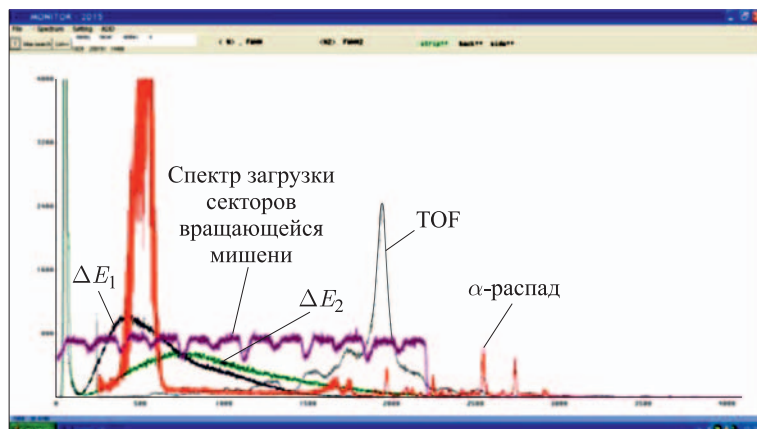


Рис. 2. Окно основных гистограмм приложения. Показаны гистограммы α -распада, спектра времен вращающейся мишени, пропорциональных камер ΔE_1 , ΔE_2 и времени пролета TOF

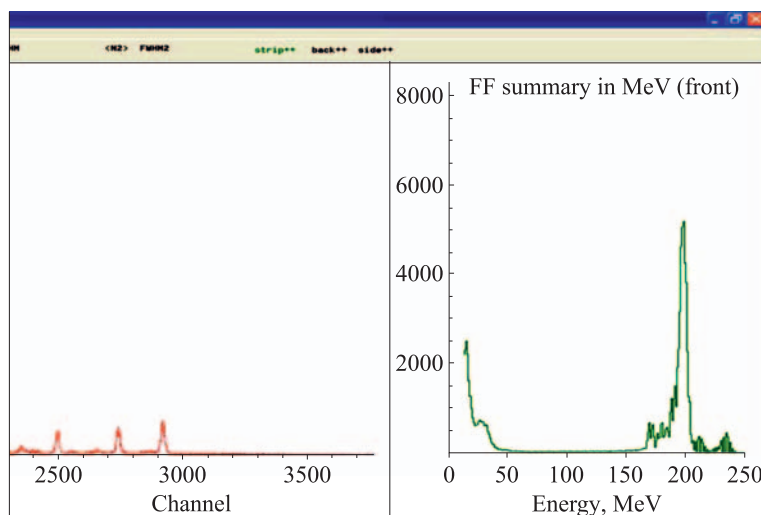


Рис. 3. Спектр шкалы осколков деления

Отметим, что спектр времен вращающейся мишени четко показывает разделение на отдельные сектора. На рис. 3 показан суммарный спектр шкалы осколков детектора DSSSD (реакция $^{nat}\text{Yb} + ^{48}\text{Ca}$).

1.2. Экспресс-метод автоматической калибровки по продуктам тестовой реакции полного слияния $^{nat}\text{Yb} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^*\text{Th}$. При проведении долговременных экспериментов по синтезу СТЯ прецизионный калибровочный процесс значим не только для окончательной обработки результатов, но и для получения массива калибровочных констант, применяемых для поиска в реальном масштабе времени корреляционных звеньев типа ER- α . Зачастую данная процедура занимает время до 2 сут и более. В то же время, при наличии достаточной статистики, экспресс-методы могут упростить данную процедуру. Ниже предлагается метод, суть которого в следующем:

— поскольку изначально коэффициенты усиления электронных трактов не отличаются на 10–15 % после настройки аппаратуры, то автоматическая процедура выбирает три наиболее энергичные линии, отсекая (по номеру канала) расположенные ниже;

— фильтруются каналы (и их содержание), если оно не достигает $\approx 15\text{--}35\%$ от максимально эффективной линии;

— находятся максимумы (центр тяжести) всех трех пиков в каналах;

— производится первое приближение калибровки по одной, самой правой линии с присвоением значения энергии α -распада ^{217}Th (9261 кэВ);

— определяются по первому приближению энергии двух левых пиков;

— происходит «распознавание» и коррекция энергии левых пиков, а именно до значений 8700 и 7923 кэВ;

— окончательно все 48 стрипов автоматически (по нажатию кнопки экспериментатором) калибруются с применением метода наименьших квадратов по трем уточненным линиям;

— образуются два выходных файла результата: а) набор констант ($E_i = a_i N + b_i$, $i = 0, \dots, 47$); б) файл отклонений от условно «правильной» калибровки (при ее наличии) для канала $N = 1000$ (примерно 8 МэВ).

Если, тем не менее, невозможно установить отсечку трех правых пиков единообразно (задав один номер канала для всех 48 стрипов), то экспериментатор имеет возможность установить канал индивидуально в интерактивном режиме по событию `onMouseClicked()`. Для общей демонстрации процесса на рис. 4, а–в показаны характерные шаги фильтрации спектров. В таблице, расположенной на палитре, приведены характерные величины энергий, каналы и содержание.

Значения отклонений от «правильной» калибровки соответствуют следующим числам (кэВ, №№ 44, 48 стрипы отключены. Первое число пары — номер стрипа, второе — отклонение)

{1, 1; 2, 5; 3, -7; 4, -3; 5, -2; 6, 1; 7, 1; 8, 1; 9, 0; 10, -1; 11, -3; 12, -3; 13, -4; 14, -3; 15, -1; 16, 0; 17, 1; 18, -3; 19, 0; 20, -2; 21, 0; 22, 3; 23, -2; 24, 0; 25, 0; 26, 0; 27, -4; 28, 0; 29, 0; 30, 0; 31, 0; 32, 0; 33, 2; 34, -2; 35, -2; 36, 0; 37, 0; 38, -4; 39, 0; 40, -1; 41, -1; 42, 2; 43, -1; 45, -1; 46, 3; 47, 0}.

Следует признать последовательность чисел удовлетворительной (стандартное отклонение 2,1 кэВ, рис. 5).

Типичные отклонения в более широком диапазоне (примерно 6,5–15 МэВ) показаны на рис. 5, б для стрипов №№ 21, 31.

Кроме того, при нахождении энергии α -распада для масс, отличающихся от района $\sim 200\text{--}220$ (например, $\sim 280\text{--}300$), следует считаться и с возможностью систематической ошибки, которая может достигать ~ 20 кэВ [9] из-за того, что фактически энерговыделение в кремниевом детекторе имплантированного нуклида соответствует не энергии α -частицы, а частичной сумме таковой с остатком энерговыделения ядра отдачи, хотя бы и с большим значением дефекта амплитуды импульса последнего. Сам же поправочный множитель определяется соотношением типа

$$\mu = \frac{e_{\text{SHE}}^\alpha}{e_0^\alpha} \approx \frac{1 + \eta \frac{m}{M_0}}{1 + \eta \frac{m}{M_{\text{SHE}}}}$$

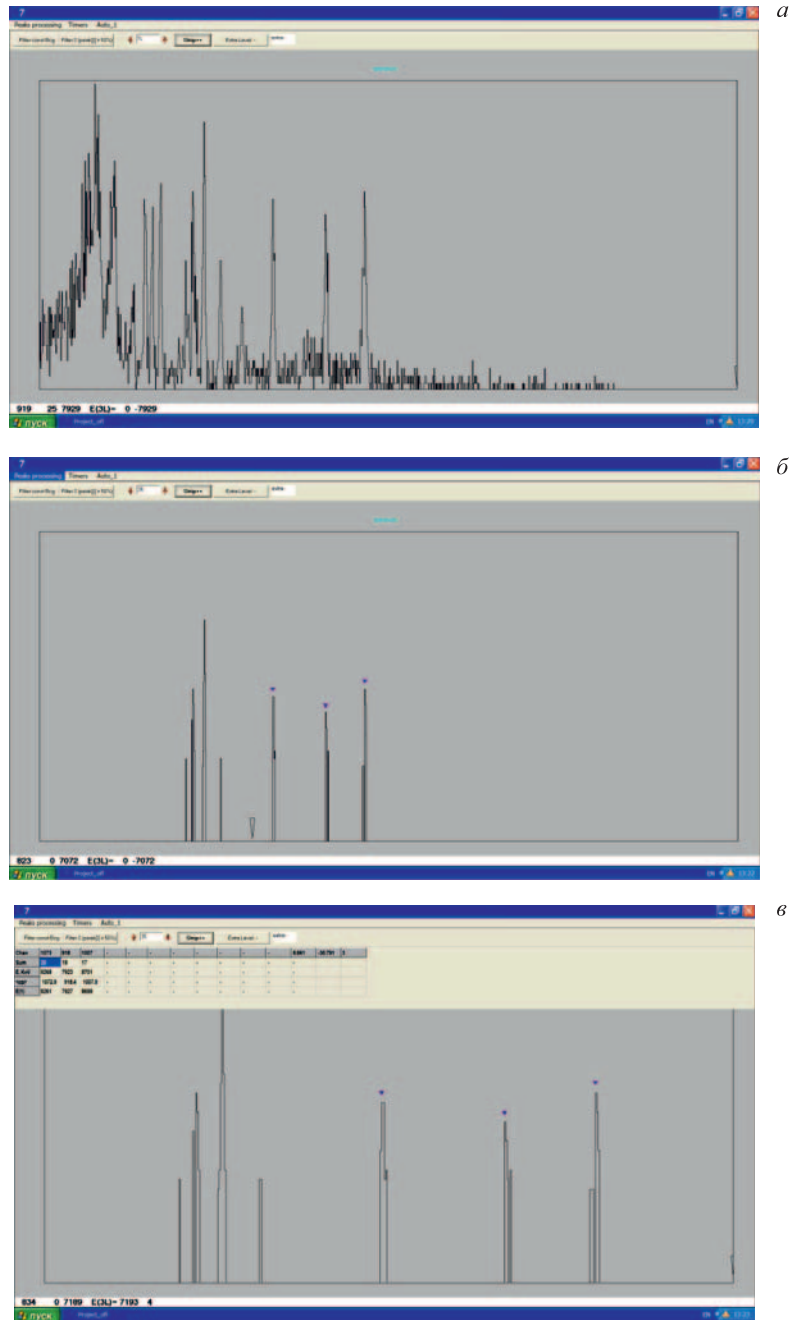


Рис. 4. Характерные шаги фильтрации спектров. а) Начальный спектр (стрип № 7). б) Нахождение трех пиков (маркер). в) Окончательный результат. В таблице показаны в том числе значения энергий в первом (по одному пикну) приближении

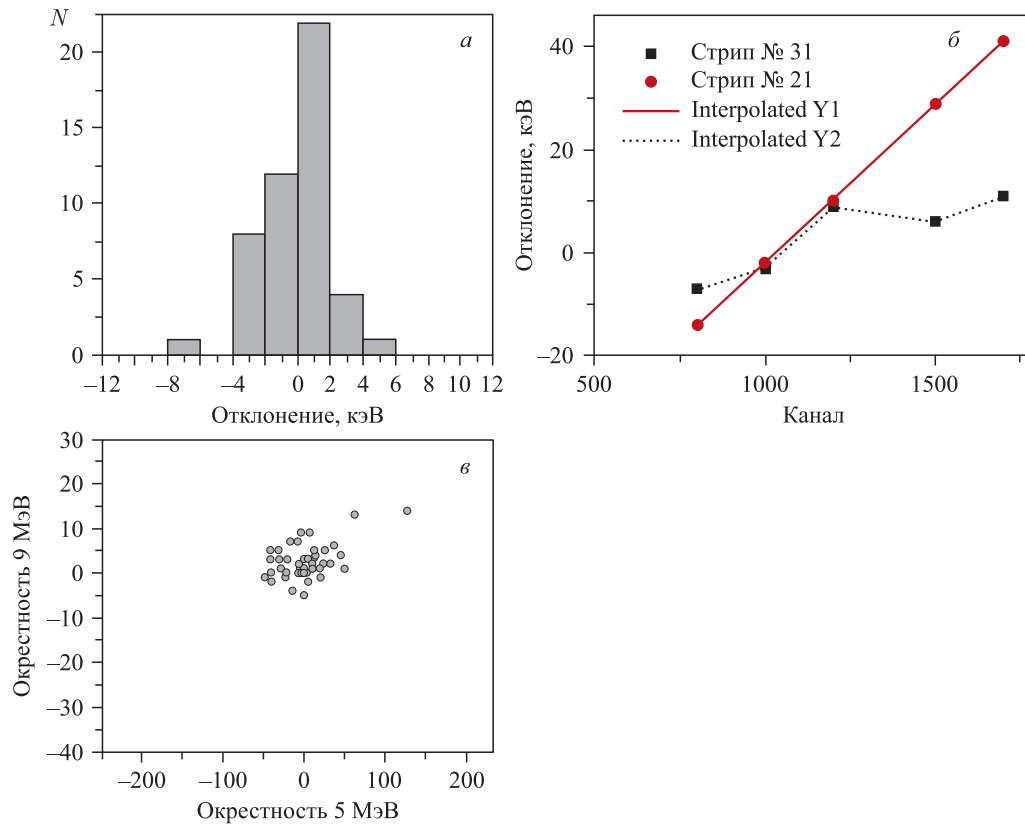


Рис. 5. Типичные отклонения. а) Отклонение от прецизионной калибровки. б) Отклонение от прецизионной калибровки в широком диапазоне на примере стрипов №№ 21, 31. в) Погрешность калибровки для окрестностей 5 и 9 МэВ для всех стрипов (кроме №№ 44, 48)

В данной формуле m — масса α -частицы; $M_{SHE,0}$ — массы СТЯ и калибратора (среднее значение по диапазону) соответственно; η — фактор, зависящий от потерь ядра отдачи при α -распаде имплантированного ядра на рекомбинацию электронно-дырочных пар и ядерное рассеяние в решетке кремния.

1.3. Вспомогательные файлы при работе в режиме поиска указателя на корреляцию ER- α . При работе программы Writer.exe [5] в режиме поиска потенциального кандидата на интересующую экспериментаторов корреляцию с задержкой около 5 мин образуется добавление к текстовому файлу ER_alfa.txt, содержащему основные параметры останова пучка циклотрона У-400. Ниже приведен фрагмент файла с выделенным событием.

```

32 26 32 29 8406,7 1234 10557,7 10643,2 3296,465462 0,305143 124 0 333163
8 22 23 6 6882,5 1213 10408,4 10433,9 659,463835 1,019952 124 0 1988255
31 13 46 39 6038,0 1131 10188,9 10181,7 273,261318 0,000092 125 0 355968
→ 26 14 30 37 10195,3 1230 10391,3 10452,2 1974,362087 0,252507 126 0 188488
16 20 16 9 8229,6 1310 11219,0 11302,4 2249,231891 0,433879 129 1 1161934
28 53 37 88 8201,2 1180 10158,0 9678,3 2791,649032 0,002914 129 0 1585918
29 13 40 40 6273,6 1311 11196,1 11210,7 3475,295652 0,048494 129 0 1616396
    
```

Событие произошло в файле № 126, порядковый номер 188488, энергия ядра отдачи 10,2 МэВ, корреляционное время 0,25 с.

Что касается программы MONITOR'2015, то она образует текстовый файл outb.txt (фрагмент):

```
→ 1 0 30 0 37 1230 10391,3 10452,2 1974,362087 24532 0 0 0 13322 188488
   1 1 30 0 37 1121 9462,4 9504,8 1976,690526 59214 0 0 0 7803 188499
   1 1 30 0 37 1006 8482,5 8496,5 2072,108045 56319 0 0 0 9525 188930
```

Из этой записи видно, что вслед за событием № 188488 следует распад в фокальном детекторе в том же стрипе «вне пучка» (число 1, вторая колонка), что очевидно является кандидатом на многозвенное событие и облегчает фазу тщательной обработки.

2. НЕКОТОРЫЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Наряду с рассмотренным выше программа предполагает:

- а) вывод количества ядер отдачи и α -частиц, энергии которых соответствуют потенциальной корреляции ER- α ;
- б) замену энергии 9,26 МэВ на 7,45 (^{211}Po) МэВ как источника для первого приближения процесса калибровки;
- в) показ номеров стрипов (передних и задних), подозреваемых в неправильной работе спектрометрических трактов;
- г) тест часов синхронизации составных событий, т.е. в том случае, когда энергия α -распада делится между основными и боковыми детекторами;
- д) вывод содержания количества событий, которые могут быть засчитаны как осколки деления по стрипам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданное С++ приложение MONITOR'2015 является значимым дополнением к системам детектирования и контроля параметров ГНС. Дополнительно она не только обеспечивает визуальный контроль гистограмм, но и позволяет совместно с кодом Writer.exe оптимизировать работу спектрометра ГНС в реальном масштабе времени. Автор намерен в ближайшем будущем совершенствовать инструменты и методы автоматизации длительных экспериментов ГНС на пучке тяжелых ионов циклотрона У-400 ЛЯР им. Г. Н. Флерова.

Дополнительный вывод заключается в том, что в случае применения экспресс-калибровки трактов и применения при поиске корреляций типа ER- α в реальном масштабе времени расширение диапазона энергий ядер отдачи на величину ± 200 кэВ при основном диапазоне 5–16 МэВ более чем достаточно.

Автор благодарен коллегам А. А. Воинову и А. М. Сухову за помощь в работе. Работа частично поддержана грантом губернатора Московской области 2013–1014 гг., а также грантом РФФИ № 13-02-12052.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Measurements of Cross Sections and Decay Properties of the Isotopes of Element 112, 114 and 116 Produced in the Fusion Reactions $^{233,238}\text{U}$, ^{242}Pu , and $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ // *Phys. Rev. C*. 2004. V. 70. P. 064609.
2. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Measurements of Cross Sections for the Fusion-Evaporation Reactions $^{244}\text{Pu} (^{48}\text{Ca}, xn)^{292-x}114$ and $^{245}\text{Cm} (^{48}\text{Ca}, xn)^{293-x}116$ // *Ibid.* V. 69. P. 054607.
3. *Witwer D. et al.* Gas Phase Chemical Studies of Superheavy Elements Using the Dubna Gas-Filled Recoil Separator-Stopping Range Determination // *Nucl. Instr. Meth. B*. 2010. V. 268. P. 28–35.
4. *Tsyganov Yu. S., Polyakov A. N., Sukhov A. M.* An Improved Real-Time PC-Based Algorithm for Extraction of Recoil-Alpha Sequences in Heavy-Ion Induced Nuclear Reactions // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2003. V. 513. P. 413–416.
5. *Цыганов Ю. С.* Элементы автоматизации экспериментов на установке дубненский газонаполненный сепаратор // *Письма в ЭЧАЯ*. 2015. Т. 12, № 1(192). С. 116–127.
6. *Zager V. B., Krylov A. I.* Visualization, Monitoring and Processing of Large Sets from Accelerator Control Systems // *Proc. of XXIV Intern. Symp. NEC'2013, Varna, Bulgaria, Sept. 9–16, 2013. Dubna, 2013.* P. 283–284.
7. *Цыганов Ю. С.* Газонаполненный сепаратор ядер отдачи: программные продукты, алгоритмы // *ЭЧАЯ*. 2011. Т. 42, вып. 5. С. 1535–1590.
8. *Tsyganov Yu. S., Polyakov A. N., Sukhov A. M.* Method of Active Correlations: Present Status // *Proc. of 3rd Intern. Conf. NPAE'2010, Kyiv, June 7–12, 2010.* P. 379–381.
9. *Tsyganov Yu. S.* Physical Basis of Critical Analysis // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11, No. 6.
10. *Subbotin V. G. et al.* The Detection System of the Dubna Gas-Filled Recoil Separator // *Acta Phys. Polon. B*. 2003. V. 34, No. 4. P. 2159–2162.
11. *Ivanov G. N.* A Device for Heavy Ion Beam Input into a Gas-Filled Magnetic Separator // *JINR Sci. Report / Ed. by B. I. Pustylnik.* 1991. P. 162–163.
12. http://www.nix.ru/autocatalog/nas_synology/Synology_DS1511_Disk_Station_5x3.5_HotSwap_HDD_SATA_RAID_2xGbLAN_4xUSB2.0_eSATA_111697.html
13. *Tsyganov Yu., Polyakov A.* Real-Time Operating Mode with DSSSD Detector to Search for Short Correlation ER-Alpha Chains // *Cybernetics and Physics*. 2014. V. 3, No. 2. P. 85–90.
14. *Tsyganov Yu. S.* Synthesis of New Superheavy Elements Using the Dubna Gas-Filled Recoil Separator: The Complex of Technologies // *Phys. Part. Nucl.* 2014. V. 45, No. 5. P. 817–847.

Получено 8 октября 2014 г.