

## СЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА BEST

*А. А. Шихин\**, *В. Н. Гаврин*, *В. В. Горбачев*,  
*Т. В. Ибрагимова*, *В. В. Казалов*, *А. В. Калихов*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Представлены счетные характеристики системы регистрации редких событий распада  $^{71}\text{Ge}$  в радиохимическом галлиевом эксперименте BEST. Регистрация событий производится одновременно по восьми счетным каналам в диапазоне значений энергии 0,3–16 кэВ и охватывает распады  $^{71}\text{Ge}$  в области пиков *L* и *K* с общей эффективностью до 75%. Анализ данных основан на записи полной формы фронта зарядовых импульсов с помощью цифрового осциллоскопа.

The counting data of the registration system of rare events from  $^{71}\text{Ge}$  decay in radiochemical gallium experiment BEST are presented. The registration of the events is provided by eight counting channels simultaneously in the energy range of 0.3–16 keV which includes the  $^{71}\text{Ge}$  decays in the region of the *L* and *K* peaks with total efficiency up to 75%. Data analysis is based on full charge pulse shape recording using digital oscilloscope.

PACS: 07.05.Hd; 14.60.Pq; 29.40.Cs; 29.40.Mc

### ВВЕДЕНИЕ

BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) [1,2] является радиохимическим калибровочным экспериментом с мишенью из металлического галлия и искусственным источником нейтрино на изотопе  $^{51}\text{Cr}$ . Он был предложен для исследования так называемой галлиевой аномалии [3], связанной с гипотезой о возможности существования стерильных нейтрино [4]. В настоящее время BEST находится в стадии активной подготовки на базе эксперимента SAGE [5,6] в БНО ИЯИ РАН.

В BEST планируется провести 10 облучений мишени по 9 сут каждое. Извлечения и счет наработанных атомов  $^{71}\text{Ge}$  будут проводиться независимо из каждой зоны мишени по методикам и технологиям, применяемым

---

\*E-mail: shikhin@inr.ru

в SAGE [5, 7]. Схема проведения BEST предполагает удвоение числа образцов с содержанием  $^{71}\text{Ge}$  по сравнению с SAGE. Счет половины из них будет обеспечен с помощью системы регистрации SAGE [5]. Новая система регистрации, разработанная для BEST и кратко представленная в [7], обеспечит счет другой половины образцов. В данной работе представлено более детальное описание частей системы, имеющих непосредственное отношение к ее счетным характеристикам.

## ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

**Защита счетчиков.** Фундамент защиты счетчиков выложен из низкофоновых бетонных блоков кубической формы со стороной 200 мм на подушке из кварцевого песка без применения цемента. Это позволило сохранить исходный низкий  $\gamma$ -фон помещения. В защите от нейтронного фона нет необходимости, поскольку измеренный предел на поток тепловых нейтронов в помещении не превышает  $0,57 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} (+3\sigma)$ . Фундамент также выполняет роль демпфера. Он гасит механические колебания всей конструкции, которые могут возникать относительно вертикальной оси при работе гидравлического механизма во время операций по перемещению внутренней (активной) части защиты относительно ее внешней (пассивной) части.

Все металлы для сооружения защиты счетчиков были выдержаны в подземных низкофоновых условиях более 25 лет. Состав слоев металлов, их толщина и предпочтительное чередование были выбраны в результате отбора по результатам измерения фона. Пассивная защита состоит из наружного слоя свинца кубической формы, выложенного из стандартных ( $200 \times 100 \times 75$  мм) кирпичей с взаимным смещением слоев, толщиной 300 мм снизу и сбоку. Промежуточный слой — стальной короб с толщиной стенок по 20 мм снизу и сбоку, образующий внутреннюю полость защиты. Внутри него расположена медная бочка с толщиной стенок 107 мм сбоку и 130 мм снизу. Бочка крепится снизу в подвешенном состоянии к верхней крышке из стали толщиной 100 мм. Эта крышка перекрывает всю площадь защиты сверху за исключением круглого отверстия по оси бочки, предназначенного для доступа к внутренней части защиты. Сверху на ней по одной вертикальной оси с медной бочкой закреплен механизм, предназначенный для операций по подъему и опусканию внутренней части защиты, медной крышки бочки толщиной 130 мм и верхней стальной крышки общей толщиной 200 мм, полностью перекрывающей сверху площадь внутренней части защиты. Внутренние объемы всех частей защиты продуваются испаряющимся жидким азотом с целью вытеснения атмосферного радона. Соосность и единая база всей конструкции обеспечивают точные перемещение и позиционирование подвижных частей защиты, которые производятся с помощью платформы, приводимой в движе-

ние автоматизированным червячно-винтовым гидроприводом. Доступ к счетчикам производится за один шаг.

Внутренняя часть защиты представляет собой медный цилиндр габаритами  $\varnothing 270 \times 495$  мм и толщиной стенки 25 мм. В нижней части его внутренней полости на кольцевом выступе установлена круглая медная платформа толщиной 22 мм, предназначенная для установки детектора NaI(Tl), модулей счетчиков (см. п. «Пропорциональные счетчики» ниже) и калибровочного устройства. Платформа также имеет восемь сквозных отверстий  $\varnothing 21$  мм, расположенных по окружности через угол  $45^\circ$ . Модули со счетчиками устанавливаются на платформу и фиксируются механическими защелками. При этом «стволы» модулей проходят через отверстия платформы внутрь полости колодца детектора, а разъемы на модулях обращены на наружную боковую сторону, где в пазах проложены кабели. Сверху цилиндр скреплен одним пакетом с медной конусной крышкой бочки, стальной крышкой наружной защиты и платформой гидравлического механизма. Кабели от модулей счетчиков и ФЭУ уложены в фигурные пазы, расположенные ортогонально на наружной поверхности цилиндра и крышек, и закрыты шильдиками из соответствующих материалов.

Активная защита счетчиков от фона основана на принципе антисовпадений, поскольку распад  $^{71}\text{Ge}$  не сопровождается  $\gamma$ -излучением. Рабочие объемы счетчиков размещаются внутри колодца сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI(Tl). Любое событие, зарегистрированное одновременно в счетчике и в детекторе, считается заведомо фоновым и отбрасывается на этапе стандартной обработки данных. Описание и характеристики детектора представлены в работах [7, 8].

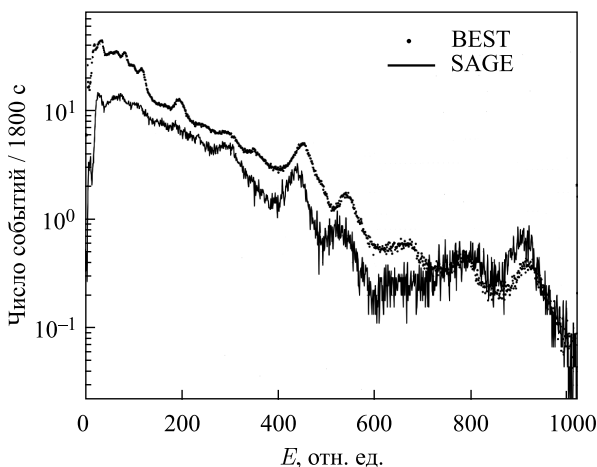


Рис. 1. Спектры фона детекторов NaI(Tl) систем регистрации BEST и SAGE

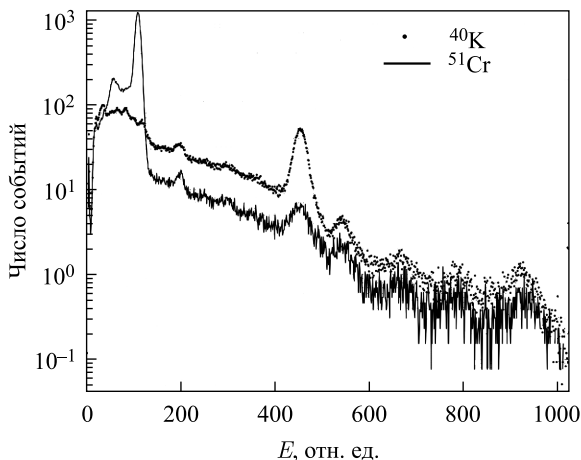


Рис. 2. Отклик детектора на источники в позиции пропорционального счетчика

Скорость счета фона детектора в защите равна  $(3,24 \pm 0,03) \text{ с}^{-1}$ , что вдвое больше в сравнении с системой регистрации SAGE. Исключение составляет область энергии выше 2600 кэВ (рис. 1), где фон становится относительно ниже. Это может быть обусловлено как более низким содержанием  $^{232}\text{Th}$  в материалах детектора и окружающей его пассивной защиты, так и размерами самого детектора, не позволяющими регистрировать пик полного поглощения от  $^{208}\text{Tl}$ . Моделированием функции отклика детектора было показано, что основным источником его фона является радиоактивность ФЭУ [8].

На рис. 2 показан отклик детектора на источники  $\gamma$ -излучения малой интенсивности  $^{40}\text{K}$  (1460 кэВ) и  $^{51}\text{Cr}$  (320 кэВ), помещенные внутри колодца детектора в позиции пропорционального счетчика. Видно, что сложные форма и условия светосбора не оказывают значимого влияния на спектрометрические свойства детектора.

**Пропорциональные счетчики.** Счетчики для системы регистрации BEST по конструкции и характеристикам идентичны счетчикам для SAGE [6]. Для BEST была изготовлена партия новых счетчиков, имеющих более компактные габариты в поперечном сечении. Это позволило разместить их в специальных модулях. Корпус счетчика, за исключением крана и хвостовика, помещается в акриловый пенал цилиндрической формы. Это надежно защищает счетчик от механического повреждения в его наиболее хрупкой части — катодной трубке. Толщина акрила в этой области равна 2,5–7 мм (ось анода имеет эксцентриситет относительно оси крана).

Пенал со счетчиком вставляется в модуль, имеющий форму «пистолета». Пенал размещается внутри «ствола» пистолета, а кран счетчика и его

хвостовик — внутри объема «рукоятки». Здесь же находятся зарядочувствительный предусилитель, высоковольтный фильтр, коаксиальные разъемы для цепи высокого напряжения и сигналов предусилителя, разъем его питания. Корпус «рукоятки» выполнен из нержавеющей стали и меди в виде короба прямоугольной формы с откидной крышкой. «Ствол» пистолета — медная трубка габаритами  $\varnothing 18 \times 140$  мм и толщиной стенки 1 мм. Совместно с акриловым пеналом он является локальной пассивной защитой счетчика от рентгеновского излучения окружающих материалов защиты.

Счетчики калибруются источником  $^{55}\text{Fe}$ , который в специальном приспособлении помещается внутрь колодца детектора по его оси напротив активных объемов счетчиков. Их облучение производится через узкую продольную щель, выполненную в медном «стволе» каждого модуля и акрилового пенала по оси, соединяющей аноды счетчиков с осью детектора. Такая конструкция обеспечивает возможность одновременной калибровки всех установленных в системе счетчиков, что позволяет сократить мертвое время сбора данных.

Данная защита счетчиков имеет следующие преимущества. Они изолированы внутри модулей и хорошо защищены механически. В течение всего периода сбора данных счетчики находятся в одном и том же окружении внутри колодца детектора, что обеспечивает высокую стабильность фона. Внутри пенала объем окружающего счетчик воздуха очень мал, и он практически изолирован от перемешивания с наружной атмосферой. Весь модуль заземлен, и тем самым счетчик экранирован от внешнего электростатического поля. Этим почти снимается проблема фона от атмосферного радона и связанное с ним мертвое время сбора данных. Высокое напряжение на счетчике и питание предусилителя включены постоянно, даже во время операций по перемещению внутренней защиты. Этим достигается высокая стабильность газового и электрического усилений.

В табл. 1 представлены характеристики новых счетчиков, полученные за время их работы в составе систем регистрации SAGE и BEST: среднее значение энергетического разрешения  $\bar{R}$  и предварительные значения фона счетчиков в области пиков  $L$  и  $K$  распада  $^{71}\text{Ge}$   $\text{Bkg}_L$  и  $\text{Bkg}_K$ , полученные в результате стандартной обработки исходных данных. Прочерки означают, что характеристики вновь изготовленных счетчиков находятся на измерении.

Таблица 1. Измеренные характеристики новых счетчиков

Характеристика	Счетчик							
	N28	N32	N41	N42	N43	N46	N113	Na9
$\bar{R}$ , % (5,9 кэВ)	21,5	23,0	20,0	20,5	20,1	23,2	20,0	21,1
$\text{Bkg}_L$ , $\text{сут}^{-1}$	—	—	0,2	0,8	0,1	0,3	0,2	0,2
$\text{Bkg}_K$ , $\text{сут}^{-1}$	—	—	0,1	1,2	0,1	0,2	0,1	0,2

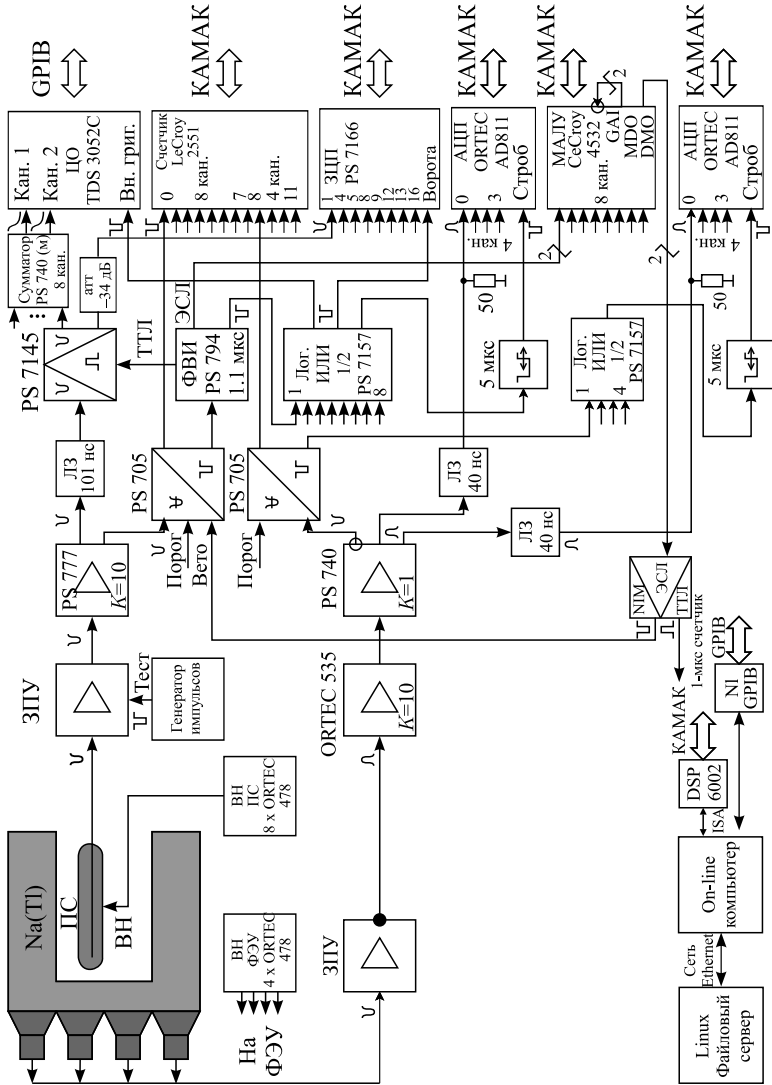


Рис. 3. Функциональная схема системы регистрации BEST

**Электроника системы регистрации.** Пассивная защита и оборудование системы регистрации BEST размещены в подземном комплексе SAGE в отдельном экранированном помещении, снабженном системами вентиляции, с освещением лампами накаливания и питанием оборудования от бесперебойного источника on-line типа.

За основу разработки была принята система регистрации SAGE с учетом опыта, приобретенного за весь длительный период ее работы. Но данная система не является ее «клонем». Все основные части системы регистрации BEST, в частности структура электроники, предусилители сигналов от счетчиков и программное обеспечение, были разработаны заново. При этом новая система имеет полную совместимость со стандартным анализом данных SAGE.

Функциональная схема одного канала системы показана на рис. 3. Работа остальных каналов системы (семи — для счетчиков и трех — для NaI) идентична описываемому. В основном система базируется на коммерческом оборудовании в стандартах NIM и КАМАК. Сокращения на схеме: ПС — пропорциональный счетчик; ВН — высокое напряжение; ЗПУ — зарядочувствительный предусилитель; PS — блоки Phillips Scientific\*; ЛЗ — линия задержки; ФВИ — формирователь временных интервалов; атт. — аттенюатор; ЦО — цифровой осциллоскоп; ЗЦП — зарядочувствительный АЦП; МАЛУ — мажоритарное логическое устройство.

Схема состоит из двух основных ветвей. Первая предназначена для регистрации сигналов и записи полной формы фронта зарядовых импульсов от пропорциональных счетчиков (цепь от ПС до ЦО Tektronix TDS3052С, ЗЦП и МАЛУ). Вторая ветвь регистрирует сигналы от системы антисовпадений (цепь от детектора NaI(Tl) до двух АЦП — одного для записи энергии событий от детектора NaI(Tl) в режиме совпадений с событиями от пропорциональных счетчиков, другого для записи спектров фона. Счетчик служит для независимой фиксации общего числа превысивших аппаратный порог дискриминации событий по каждому счетному каналу в обеих ветвях и вычисления скорости счета событий.

Стандартный анализ данных SAGE [5] и BEST основан на обработке полной формы фронта зарядовых импульсов, записанных с помощью ЦО одновременно по двум независимым каналам. Отношение коэффициентов вертикального отклонения каналов выбрано равным 6,5, что обеспечивает регистрацию событий в области пиков  $L$  и  $K$  распада  $^{71}\text{Ge}$ .

В системе регистрации BEST применены разработанные в ИЯИ РАН зарядовые предусилители на основе интегральных ОУ [7]. На рис. 4 показана переходная характеристика (ПХ) ЗПУ с подключенным ко входу счетчиком

---

\*<http://www.phillipsscientific.com>

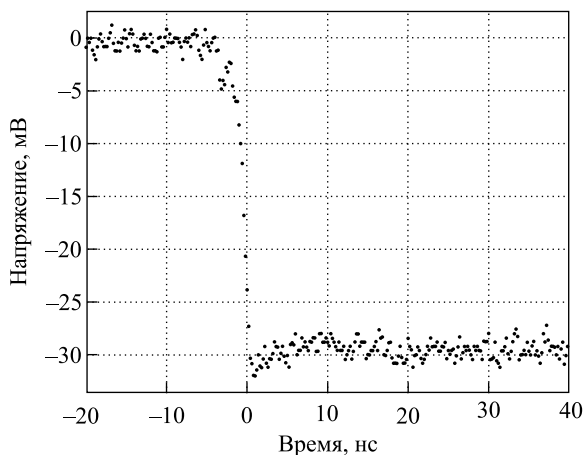


Рис. 4. Переходная характеристика ЗПУ системы регистрации BEST

в виде отклика на прямоугольный импульс с временем нарастания фронта  $< 0,5$  нс. Период квантования равен 0,2 нс. Время нарастания ПХ предусилителя составляет около 2 нс.

Особенностью систем регистрации SAGE и BEST является применение быстрого аналогового мультиплексора в канале регистрации сигналов от ПС. Он образован блоками линейного усилителя PS 777, дискриминатора PS 705, коаксиальной линией задержки на время 100 нс (кабель RG-217), линейными воротами PS 7145, ФВИ PS 794 и сумматором PS 740. Данная схема обеспечивает существенно меньший уровень шума по сравнению с обычным линейным сумматором, поскольку линейные ворота открыты только тогда, когда на их входе присутствует сигнал. Это важно для регистрации формы сигналов с небольшой (десятки милливольт) амплитудой, типовой для событий от распада атомов  $^{71}\text{Ge}$ . Сведение шкал ЗЦП и ЦО обеспечивается индивидуально по каждому счетному каналу путем подстройки длительности сигнала ворот в блоке ФВИ.

Энергия сигналов от ПС измеряется при помощи ЗЦП PS 7166. Выбор зарядового типа преобразователя обусловлен тем, что по превышению полученного значения энергии события над заданным программным порогом принимается решение о дальнейшей обработке регистрируемого события, в том числе его записи с помощью ЦО. Значительная часть помех не связана с работой пропорциональных счетчиков. Обычно помехи имеют природу импульсных электромагнитных наводок. Сигнал от таких событий имеет знакопеременную затухающую форму, значение интеграла от которой в пределах ворот близко к нулю. Напротив, форма зарядового импульса от реального



события даже при малой его амплитуде имеет значимую величину интеграла. Таким образом значительно сокращается мертвое время системы и объем записываемых данных. Сигналы на входы ЗЦП поступают через коаксиальные аттенуаторы, выполняющие роль преобразователей напряжение–ток.

Аппаратная синхронизация работы подсистем КАМАК и ЦО позволяет, в частности, производить одновременную калибровку всех установленных в системе счетчиков. Она обеспечена обратной связью с выхода блока МАЛЮ на вход «вето» дискриминатора PS 705.

В подсистеме антисовпадений одновременность прохождения сигналов от ПС и ФЭУ обеспечивается симметрией функциональной схемы и одинаковыми задержками в кабельных линиях. Низкая вероятность ложных совпадений обеспечивается в том числе за счет отдельной регистрации сигналов от ФЭУ. Интервал совпадения, равный 5 мкс, соответствует длительности сформированного с постоянной времени 1 мкс сигнала от ФЭУ. Преобразованию подвергаются амплитуды всех импульсов на входах АЦП, попавшие в интервал совпадения. Энергия события в кристалле NaI(Tl) вычисляется как сумма амплитуд на входах АЦП, деленная на четыре. Событие считается зашкаливающим, если хотя бы одна из амплитуд импульса или их среднее значение превышает максимальное значение шкалы АЦП.

Программное обеспечение системы обеспечивает регистрацию событий от ПС и детектора NaI в режиме «on-line», запись формы импульсов от ПС с помощью ЦО, калибровку ПС и ФЭУ. Оно функционирует в среде MS DOS, FreeDOS в реальном режиме или режиме dosemu под управлением ОС Linux.

Таблица 2. Основные характеристики систем регистрации SAGE и BEST

Параметр	SAGE	BEST
Число счетных каналов	8	8
Энергетический диапазон (канал счетчиков), кэВ	0,37–15	0,3–16
Полоса пропускания (канал формы импульсов), МГц	100	> 125
Время нарастания ПХ (канал формы импульсов), нс	3,5	< 3
Частота квантования (канал формы импульсов), ГГц	1	1 (5)
Объем кадра (канал формы импульсов), точек	10 <sup>3</sup> (8 кБ)	10 <sup>3</sup> (10 <sup>4</sup> )
Цифровое разрешение (канал формы импульсов), бит	8	8 (9)
Разрешение АЦП в канале «Энергия», бит	11	11 (12)
Длина интервала ворот в канале «Энергия», нс	800	1100–1200
Мертвое время, мс	340	270
Разрешение АЦП в канале NaI, бит	10 (13)	10 (11)
Постоянная времени формирования в канале NaI, мкс	1	1,1
Длина интервала антисовпадений, мкс	4	5
Энергетический диапазон (канал NaI), кэВ	60–3000	60–3000

Сбор данных производится на сетевые носители файлового сервера в рамках локальной вычислительной сети.

Основные технические характеристики систем регистрации SAGE и BEST представлены в табл. 2. Для совместимости параметры обеих систем максимально сближены. В скобках отмечены максимальные значения параметров. Видно, что при необходимости точность представления исходных данных в системе регистрации BEST может быть улучшена вдвое.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gavrin V. N., Gorbachev V. V., Veretenkin E. P., Cleveland B. T.* arXiv:1006.2103v2 [nucl-ex]. 2011.
2. *Gavrin V. N., Cleveland B. T., Gorbachev V. V., Ibragimova T. V., Kalikhov A. V., Kozlova Yu. P., Malyshkin Yu. A., Mirmov I. N., Shikhin A. A., Veretenkin E. P.* // IOP Conf. Ser.: J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012113.
3. *Barinov V., Gavrin V., Gorbunov D., Ibragimova T.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. P. 073002; arXiv:1602.03826v1 [hep-ph]. 2016.
4. *Abazajian K. N., Acero M. A., Agarwalla S. K., Aguilar-Arevalo A. A., Albright C. H., Antusch S., Argüelles C. A., Balantekin A. B., Barenboima G., Barger V., Bernardini P., Bezrukov F., Bjaelde O. E., Bogacz S. A., Bowden N. S.* arXiv:1204.5379v1 [hep-ph]. 2012.
5. *Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.)* // Phys. Rev. C. 1999. V. 60. P. 055801.
6. *Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.)* // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. P. 015807.
7. *Shikhin A. A., Gavrin V. N., Gorbachev V. V., Ibragimova T. V., Kalikhov A. V., Yants V. E.* // IOP Conf. Ser.: J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012201.
8. *Kazalov V. V., Gavrin V. N., Gorbachev V. V., Gavriljuk Yu. M., Ibragimova T. V., Kalikhov A. V., Shikhin A. A.* // Ibid. P. 012200.