

УДК 539.165:539.122:539.1.074.55:539.123:539.166

## ПОИСК $\beta^+EC$ И $EC/EC$ РАСПАДОВ $^{74}Se$

© 2020 г. Н. И. Рухадзе<sup>1, \*</sup>, А. С. Барабаш<sup>2</sup>, В. Б. Бруданин<sup>1</sup>, А. А. Клименко<sup>1</sup>,  
С. И. Коновалов<sup>2</sup>, А. В. Рахимов<sup>1</sup>, Е. Н. Рухадзе<sup>3</sup>, Ю. А. Шитов<sup>1</sup>,  
И. Штекл<sup>3</sup>, В. И. Юматов<sup>2</sup>, Г. Варо<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение “Институт теоретической и экспериментальной физики  
имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Чешский технический университет в Праге, Институт экспериментальной и прикладной физики,  
Прага, Республика Чехия

<sup>4</sup>Моданская подземная лаборатория, Модан, Франция

\*E-mail: rukhadze@jinr.ru

Поступила в редакцию 02.03.2020 г.

После доработки 15.04.2020 г.

Принята к публикации 27.04.2020 г.

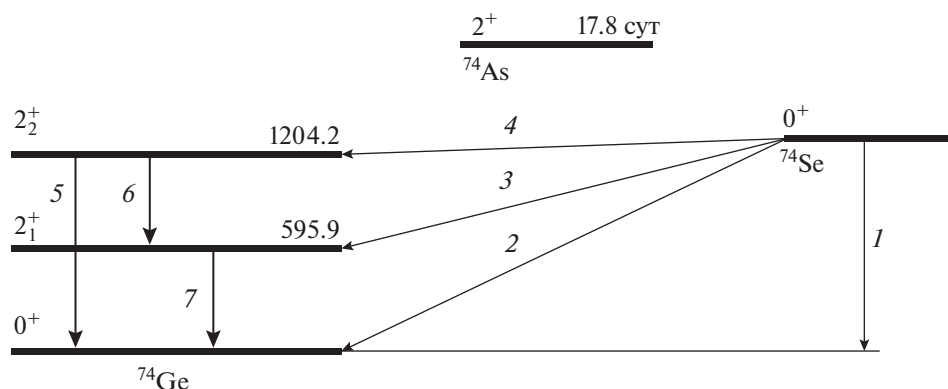
Поиск двойного бета-распада ( $\beta^+EC$ ,  $EC/EC$ ) ядра  $^{74}Se$  проведен в Моданской подземной лаборатории (LSM, Франция, на глубине 4800 м водного эквивалента) с использованием ультра-низкофонного HPGe детектора Obelix с чувствительным объемом 600 см<sup>3</sup> и образца природного селена с массой 1.6 кг, содержащего 0.89% (~14.24 г)  $^{74}Se$ . Из обработки экспериментальных данных, накопленных за 135 сут измерений, получены новые экспериментальные ограничения на  $\beta^+EC$  и  $EC/EC$  распады ядра  $^{74}Se$  на основное  $0^+$  и возбужденные состояния  $2_1^+$ , 596 кэВ,  $2_2^+$ , 1204 кэВ ядра  $^{74}Ge$ .

DOI: 10.31857/S0367676520080268

### ВВЕДЕНИЕ

Поиск безнейтринного двойного бета-распада ( $\beta^-\beta^-$ ,  $\beta^+\beta^+$ ,  $\beta^+EC$ ,  $EC/EC$ ) имеет большое значение в физике частиц и ядерной физике как инструмент изучения свойств нейтрино и слабого взаимодействия. Наблюдение безнейтринного двойного бета-распада ( $0\nu\beta\beta$ ) позволит прояснить природу нейтрино (майорановское или дираковское) абсолютное значение массы нейтрино, иерархию нейтринных масс и возможное нарушение закона сохранения лептонного заряда [1]. Двухнейтринный двойной бета-распад ( $2\nu\beta\beta$ ) — это процесс второго порядка, разрешенный в рамках стандартной модели (СМ), и его изучение дает возможность экспериментально определять ядерные матричные элементы (ЯМЭ) для процессов двойного бета-распада. Это приводит к развитию теоретических моделей расчета ЯМЭ как для  $2\nu\beta\beta$ , так и для  $0\nu\beta\beta$  распадов. Двойной бета-распад может происходить как путем переходов на основное состояние, так и на различные возбужденные состояния дочернего ядра. В настоящее время  $2\nu\beta\beta$  распад на основное состояние дочерних ядер зарегистрирован для 11 ядер ( $^{48}Ca$ ,  $^{76}Ge$ ,  $^{82}Se$ ,  $^{96}Zr$ ,  $^{100}Mo$ ,  $^{116}Cd$ ,  $^{128}Te$ ,  $^{130}Te$ ,  $^{136}Xe$ ,  $^{150}Nd$ ,  $^{238}U$ ) [2]. Изу-

чение переходов на возбужденные состояния дочерних ядер позволяет получить дополнительную информацию о двойном бета-распаде. Меньшие энергии переходов на возбужденные состояния дочерних ядер приводят к существенному подавлению вероятностей двойного бета распада по сравнению с переходами на основное состояние в тех же ядрах [1, 3]. Однако такие процессы сопровождаются испусканием  $\gamma$ -квантов при разрядке возбужденных состояний, что облегчает детектирование этих редких процессов с помощью низкофоновых высокоэффективных HPGe детекторов. Двухнейтринный двойной бета распад ( $2\nu\beta\beta^-$ ) на возбужденные состояния дочерних ядер был зарегистрирован в распадах  $^{100}Mo$ — $^{100}Ru$  ( $0_1^+$ , 1130.3 кэВ) и  $^{150}Nd$ — $^{150}Sm$  ( $0_1^+$ , 740.4 кэВ). На более точное значение для периода полураспада  $^{100}Mo$ — $^{100}Ru$  ( $0_1^+$ , 1130.3 кэВ) [3] было получено в эксперименте, проведенном на спектрометре Obelix [4] в Моданской подземной лаборатории (LSM, Модан, Франция, на глубине 4800 м водного эквивалента). Высокая чувствительность спектрометра Obelix в исследованиях редких процессов, позволила провести аналогичные иссле-



**Рис. 1.** Схема двойного бета-распада ядра  $^{74}\text{Se}$ :  $I$  – энергия распада  $^{74}\text{Se}-^{74}\text{Ge}$  (разность атомных масс)  $Q = 1209.2$  кэВ,  $2$  – КК, КL, LL-захваты, и  $\beta^+$ ЕС распад на основное  $0^+$  состояние ядра  $^{74}\text{Ge}$ ,  $3$  – КК, КL, LL- захваты, и  $\beta^+$ ЕС распад на  $2_1^+$ , 595.9 кэВ состояние ядра  $^{74}\text{Ge}$ ,  $4$  – LL-захват на  $2_2^+$ , 1204.2 кэВ состояние ядра  $^{74}\text{Ge}$ ,  $5$  –  $\gamma$ -переход с энергией 1204.2 кэВ и относительной интенсивностью 31.5%,  $6$  –  $\gamma$ -переход с энергией 608.2 кэВ и относительной интенсивностью 68.5%,  $7$  –  $\gamma$ -переход с энергией 595.9 кэВ.

дования двойного бета-распада ядра  $^{58}\text{Ni}$  на возбужденные состояния  $^{58}\text{Fe}$  [5] и ядра  $^{74}\text{Se}$  на основное и на возбужденные состояния  $^{74}\text{Ge}$ .

#### УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование процесса двойного бета распада ( $\beta^+$ ЕС, ЕСЕС)  $^{74}\text{Se}$  проводилось в Моданской подземной лаборатории (LSM, Франция) на глубине 4800 м водного эквивалента с использованием ультра-низкофонового детектора из сверхчистого германия (HPGe) Obelix с чувствительным объемом  $600\text{ см}^3$  и относительной эффективностью  $\sim 160\%$  [6], относительно кристалла NaI диаметром 3 дюйма и высотой 3 дюйма, с точечным источником, установленным на расстоянии 25 см от поверхности детектора для энергии гамма-квантов 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$  [6]. Энергетическое разрешение детектора Obelix составляет  $\sim 1.2$  кэВ на  $\gamma$ -линии 122 кэВ ( $^{57}\text{Co}$ ) и  $\sim 2$  кэВ на  $\gamma$ -линии 1332 кэВ ( $^{60}\text{Co}$ ). Детекторная часть криостата окружена пассивной защитой из нескольких слоев археологического свинца толщиной  $\sim 12$  см (активность менее  $60\text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ) и низкоактивного свинца (активность  $5\text{--}20\text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ) общей толщиной  $\sim 20$  см, и помещена внутри герметичного стального кожуха. Для предотвращения скопления газа радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) около детектора, внутренняя часть пассивной защиты продувается воздухом с пониженным содержанием радона (концентрация  $^{222}\text{Rn}$  в этом воздухе составляет  $\sim 15\text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ ) от установленной в LSM системы очистки воздуха от радона. Низкофоновые измерения основываются на сравнении измерений образца с фоном спектро-

метра. Фон спектрометра измеряется до и после основных измерений. Длительность измерений фона составляет, как правило, не менее 30 сут. Контрольные измерения фона спектрометра при исследовании  $^{74}\text{Se}$  составляли  $\sim 53$  сут. Интегральная скорость счета фона спектрометра для измерений селена составила  $73\text{ отсчетов} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$  в энергетическом диапазоне  $30\text{--}2900$  кэВ. Измеряемый образец из природного порошкообразного селена с массой 1.6 кг, содержащий 0.89% ( $\sim 14.24\text{ г}$ )  $^{74}\text{Se}$ , был помещен в тефлоновую коробку диаметром 115 мм, высотой 80 мм и толщиной стенок 3 мм. Коробка с природным селеном была установлена на крышке криостата детектора Obelix. Измерения проводились в течении 135 сут.

#### АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Поиск двойного бета-распада (безнейтринного и двухнейтринного) ядра  $^{74}\text{Se}$  проводился ранее в работах [7, 8]. Схема этого процесса (рис. 1) составлена на основе данных, приведенных в [8]. Искомый  $\beta^+$ ЕС распад  $^{74}\text{Se}$  должен сопровождаться испусканием позитрона, который затем, после аннигиляции с электроном, образует два коррелированных гамма-кванта с энергиями по 511 кэВ. При  $0\nu\text{EC/EC}$  распаде  $^{74}\text{Se}$  возможны следующие варианты переходов: а) захват двух электронов с L-оболочки атома, при этом энергия распада равна  $\sim 1206.4$  кэВ; б) захват одного электрона с K-оболочки, а другого с L-оболочки атома, в этом случае энергия распада  $\sim 1196.7$  кэВ; в) захват двух электронов с K-оболочки атома, при этом энергия распада  $\sim 1187.0$  кэВ. Перечис-

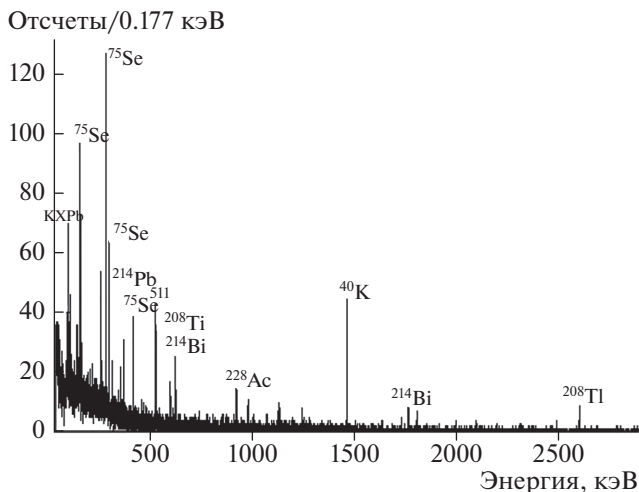
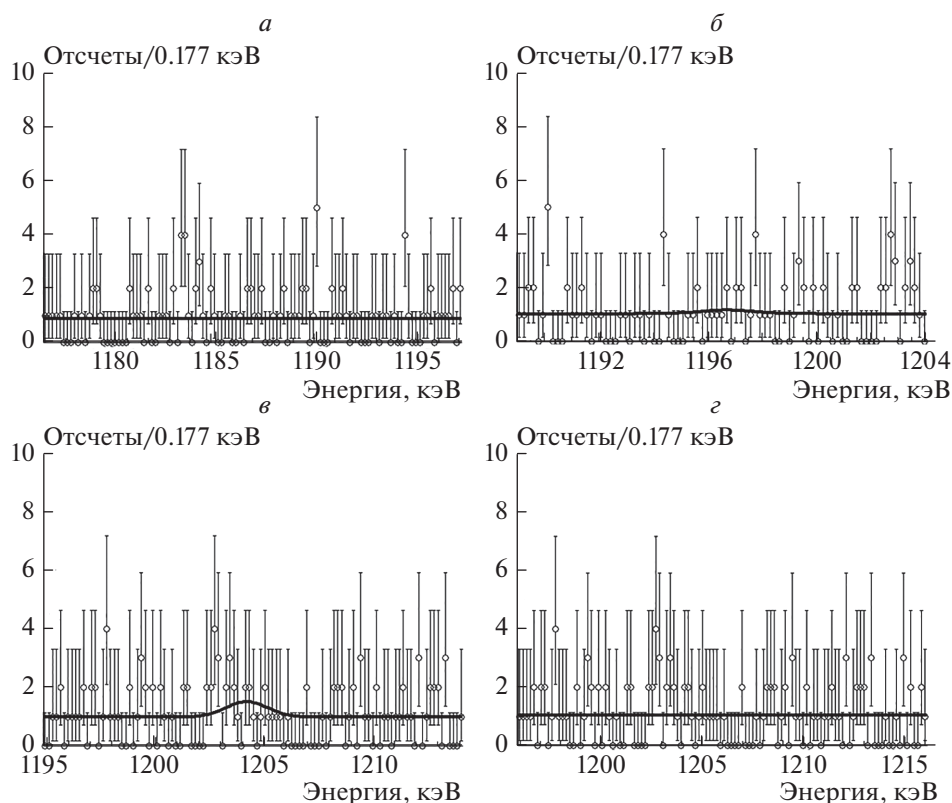


Рис. 2. Спектр природного селена, накопленный на спектрометре Obelix в течении 135 сут.

ленные ветви  $0\nu\text{ECES}$  распадов на основное состояние должны сопровождаться испусканием гамма-квантов соответствующих энергий.  $0\nu\text{LL}$  распад на второе  $2^+$  состояние ядра  $^{74}\text{Ge}$  будет сопровождаться испусканием гамма-квантов с энергиями 1204.2 или  $595.9 + 608.3$  кэВ.  $0\nu\text{LL}$  распад на первое  $2^+$  состояние  $^{74}\text{Ge}$  595.9 кэВ должен сопровождаться испусканием гамма-кванта  $\sim 610.6$  кэВ и гамма-кванта 595.9 кэВ. Учитывая, наличие в экспериментальном спектре фоновой линии 609.3 кэВ ( $^{214}\text{Bi}$ ), анализ этой ветви распада проводился только по гамма-квантам 595.9 кэВ.  $0\nu\text{KL}$  распад на первое  $2^+$  состояние ядра  $^{74}\text{Ge}$  595.9 кэВ должен сопровождаться испусканием гамма-кванта  $\sim 600.9$  кэВ и гамма-кванта 595.9 кэВ. Распад  $0\nu\text{KK}$  на первое  $2^+$  состояние ядра  $^{74}\text{Ge}$  595.9 кэВ должен сопровождаться испусканием гамма-кванта  $\sim 591.2$  кэВ и гамма-кванта 595.9 кэВ. Учитывая вышеизложенное, объектами наблюдения и анализа в исследованиях двойного бета распада ядра  $^{74}\text{Se}$  были  $\gamma$ -кванты с энергиями 511, 591.2, 595.9, 600.9, 1187.0, 1196.7, 1204.2 и 1206.4 кэВ, поиск которых проводился в спектре натурального селена (рис. 2), накопленного в течении 135 сут на спектрометре Obelix. Возможный  $\text{EC}/\text{EC}$  (KK, KL, LL) распад ядра  $^{74}\text{Se}$  должен сопровождаться испусканием одного или двух гамма-квантов с вышеприведенными энергиями (рис. 1). Все эти  $\gamma$ -кванты могут быть с высокой эффективностью зарегистрированы детектором Obelix. Обработка экспериментальных данных, накопленных за 135 сут измерений, основана на поиске возможных пиков в вышеперечисленных областях спектра селена (рис. 2). Фитирование таких областей с максимальным энерговыделением (1187, 1196.7, 1204.2 и 1206.4 кэВ) при поиске  $0\nu\text{EC}/\text{EC}$  распада

$^{74}\text{Se}$  показано на рис. 3. Экспериментальные точки спектра на рис. 3 приведены с погрешностями. Фитирование участков спектра проводилось в предположении линейного фона (т.е. прямой линии на участке спектра). Отклонение фона от прямой линии на рис. 3в предположительно связано с возбуждением уровня 1204.2 кэВ ядра  $^{74}\text{Ge}$ , содержащегося в самом детекторе в количестве  $\sim 36.7\%$ . А отклонение от прямой линии на рис. 3б вызвано флуктуацией фона в этой области спектра. Эффективность детектора Obelix для регистрации  $\gamma$ -квантов, вылетающих из образца природного селена, рассчитывалась с помощью симуляций проведенных на основе пакета ROOT-VMC-GEANT4 DPGE в диапазоне 0.05–5 МэВ. После чего расчетная эффективность проверялась с помощью измерений низкоактивных образцов, изготовленных на основе порошка окиси лантана ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ). Природный La в этом порошке содержит  $0.0888 \pm \pm 0.0007\%$  изотопа  $^{138}\text{La}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = (1.02 \pm 0.01) \cdot 10^{11}$  лет, распад которого сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов с энергиями 788.7 и 1435.8 кэВ. Этот метод калибровки детектора по эффективности при низкофоновых измерениях детально описан в работе [4]. Обработка данных, полученных при измерении природного селена на спектрометре Obelix в течение 135 сут, показала отсутствие искомым пиков в областях энергий  $\gamma$ -квантов, сопровождающих двойной бета распад ядра  $^{74}\text{Se}$  (рис. 3). Для определения пределов на изучаемые ветви распада  $^{74}\text{Se}$  было определено количество исключенных событий ( $N_{\text{excl}}$ ) на 90% уровне достоверности для всех возможных гамма переходов в распаде  $^{74}\text{Se} \rightarrow ^{74}\text{Ge}$  (аналогично подобной процедуре в работе [5]). Эти величины составляют соответственно – 11 (591.2 кэВ), 31 (595.9 кэВ), 11 (600.9 кэВ), 9 (1187.0 кэВ), 13 (1196.7 кэВ), 18 (1204.2 кэВ), 7 (1206.4 кэВ) – см. табл. 1. Пределы на исследуемые ветви двойного бета распада  $^{74}\text{Se}$ , в некоторых случаях, определялись по совместному анализу двух  $\gamma$ -переходов. В этих случаях, энергии гамма-переходов ( $E_\gamma$ , кэВ) объединяет знак “+” (см. табл. 1). На основе этих данных получены новые экспериментальные ограничения на периоды полураспада  $\beta^+\text{EC}$ ,  $\text{EC}/\text{EC}$  распада  $^{74}\text{Se}$  на основное и на возбужденные  $2_1^+$ , 596 кэВ и  $2_2^+$ , 1204 кэВ состояния  $^{74}\text{Ge}$ . В табл. 1 также указаны возможные переходы двойного бета-распада  $^{74}\text{Se}$  на возбужденные состояния (значения их энергий приведены в кэВ) или на основное состояние (g. s.)  $^{74}\text{Ge}$  (Переход), энергии гамма-переходов ( $E_\gamma$ , кэВ) и эффективность регистрации (Эфф. %) гамма-квантов, испущенных при таких гамма-переходах вместе с коли-



**Рис. 3.** Участки спектра природного селена для поиска возможных пиков с энергиями 1187.0 (а), 1196.7 (б), 1204.2 (в) и 1206.4 кэВ (г) при двойном бета-распаде  $^{74}Se$ . Сплошными линиями на участках спектра показаны результаты фитирования фона в этих областях. Обсуждение нелинейностей фона на рис. 3в и 3б приведено в тексте статьи.

чеством исключенных событий для данной энергии перехода ( $N_{excl}$ ). Для сравнения полученных результатов с существующими данными приведе-

ны также предыдущие экспериментальные ограничения на соответствующие ветви двойного бета-распада  $^{74}Se$ , полученные в работах [7, 8]. Все пре-

**Таблица 1.** Экспериментальные ограничения на  $\beta^+EC$  и  $EC/EC$  распады  $^{74}Se$

Переход	$E_{\gamma}$ , кэВ	Эфф. %	$N_{excl}$	$T_{1/2}$ , $10^{19}$ лет	$T_{1/2}$ , $10^{19}$ лет [7]	$T_{1/2}$ , $10^{19}$ лет [8]
$0\nu LL \rightarrow 2_2^+$ , 1204.2	595.9 + 1204.2	1.23 0.57	31 18	1.10	0.55	0.70
$0\nu LL \rightarrow 2_1^+$ , 595.9	595.9	1.82	31	1.58	1.30	0.82
$0\nu LL \rightarrow g.s.$	1206.4	1.67	7	6.47	0.41	0.58
$0\nu KL \rightarrow 2_1^+$ , 595.9	600.9	1.81	11	4.37	1.12	0.82
	595.9	1.81	31	1.57		
$0\nu KL \rightarrow g.s.$	1196.7	1.67	13	3.48	0.64	0.96
$0\nu KK \rightarrow 2_1^+$ , 595.9	591.2	1.81	11	4.39	1.57	1.43
	595.9	1.81	31	1.57		
$0\nu KK \rightarrow g.s.$	1187.0	1.67	9	4.83	0.62	—
$2\nu EC/EC \rightarrow 2_2^+$ , 1204	595.9 + 1204.2	1.23 0.57	31 18	1.10	0.55	0.70
$2\nu EC/EC \rightarrow 2_1^+$ , 596	595.9	2.11	31	1.83	0.77	0.92
$(0\nu + 2\nu)\beta^+EC \rightarrow g.s.$	511	4.32	512	0.23	0.19	—

дела в табл. 1 приведены на 90% уровне достоверности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен поиск двойного бета-распада  $^{74}\text{Se}$  на спектрометре Obelix, позволивший уточнить экспериментальные ограничения на различные ветви  $\beta^+\text{EC}$ ,  $\text{EC}/\text{EC}$  распадов  $^{74}\text{Se}$  на основное и на возбужденные состояния  $^{74}\text{Ge}$ . Измерения образца природного селена на спектрометре Obelix в Моданской подземной лаборатории будет продолжено с увеличенной массой исследуемого изотопа и улучшенной геометрией измерения, обеспечивающей повышение эффективности регистрации гамма-квантов. Это должно обеспечить дальнейшее улучшение приведенных в табл. 1 экспериментальных пределов на двойной бета распад  $^{74}\text{Se}$ .

По завершению измерений  $^{74}\text{Se}$  планируется провести исследования двойного бета распада  $^{96}\text{Zr}$  и  $^{150}\text{Nd}$  на возбужденные состояния дочерних ядер. Эти исследования будут, как и исследование распада  $^{74}\text{Se}$ , проводиться в Моданской подземной лаборатории с использованием детекторов Obelix и Idefix (коаксиальный HPGe детектор Р-типа в ультра низкофоновом криостате U-типа с чувствительным объемом и основными характеристиками аналогичными детектору Obelix). Idefix, как и Obelix, изготовлен фирмой Канберра и установлен в Моданской подземной лаборатории.

Авторы благодарят персонал LSM за техническую поддержку и помощь в проведении измерений. Настоящая работа выполнена в рамках соглашения LEA-JOULE и договора о сотрудничестве между IN2P3 (Франция) и JINR (ОИЯИ, Россия) № 15-93 и частично поддержана грантами Республики Чехия LM2015072, ERDF cz.02.1.01/0.0/0.0/16 013/0001733 и РФФИ (проект № 20-52-16201).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Haxton W.C., Stephenson G.S.* // Progr. Part. Nucl. Phys. 1984. V. 12. P. 409.
2. *Barabash A.S.* // AIP Conf. Proc. 2013. V. 1572. P. 11.
3. *Arnold R., Augier C., Barabash A.S. et al. (The NEMO-3 collaboration)* // Nucl. Phys. A. 2014. V. 925. P. 25.
4. *Brudanin V.B., Egorov V.G., Hodák R. et al.* // JINST. 2017. V. 12. P. 02004.
5. *Рухадзе Н.И., Бруданин В.Б., Клименко А.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. С. 786; *Rukhadze N.I., Brudanin V.B., Klimenko A.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. P. 708.
6. [https://www.aps.anl.gov/files/APS-Uploads/DET/Detector-Pool/Spectroscopic-Detectors/Canberra/Germanium\\_Detectors\\_Manual.pdf](https://www.aps.anl.gov/files/APS-Uploads/DET/Detector-Pool/Spectroscopic-Detectors/Canberra/Germanium_Detectors_Manual.pdf).
7. *Barabash A.S., Hubert Ph., Nachab A., Umatov V.* // Nucl. Phys. A. 2007. V. 785. P. 371.
8. *Lehnert B., Wester T., Degering D. et al.* // J. Phys. G. 2016. V. 43. Art. № 085201.