

УДК 539.165,539.122,539.1.074.55,539.123,539.166

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА ^{58}Ni

© 2018 г. Н. И. Рухадзе^{1,*}, В. Б. Бруданин¹, А. А. Клименко¹, Ф. Пикмаль², Е. Н. Рухадзе³,
Ю. А. Шитов¹, И. Штекл³, Г. Варот²

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Моданская подземная лаборатория, Модан, Франция

³Институт экспериментальной и прикладной физики. Чешский технический университет в Праге,
Республика Чехия

*E-mail: rukhadze@jinr.ru

Исследование процессов двойного бета-распада (β^+EC , EC/EC) ^{58}Ni проведено в Моданской подземной лаборатории (LSM, Франция, 4800 м водного эквивалента) с использованием ультранизкофонового HPGe-детектора Obelix с чувствительным объемом 600 см³ и образца природного никеля с массой ~21.7 кг, содержащего ~68% ^{58}Ni . Из предварительной обработки экспериментальных данных, накопленных за ~144 сут, получены новые экспериментальные ограничения на $2\nu\beta^+EC$ -распад ^{58}Ni на основное 0^+ и на возбужденное 2^+ , 811 кэВ состояния ^{58}Fe , и $2\nu EC/EC$ -распад ^{58}Ni на возбужденные состояния 2^+ , 811 кэВ, 2^+ , 1675 кэВ ^{58}Fe . Они равны – $T_{1/2}(\beta^+EC, 0 \rightarrow 0^+) > 1.7 \cdot 10^{22}$ лет; $T_{1/2}(\beta^+EC, 0 \rightarrow 2^+) > 2.3 \cdot 10^{22}$ лет, $T_{1/2}(EC/EC, 0 \rightarrow 2^+) > 3.3 \cdot 10^{22}$ лет, $T_{1/2}(EC/EC, 0 \rightarrow 2^+) > 3.4 \cdot 10^{22}$ лет. Для резонансного безнейтринного радиационного EC/EC -распада с энергией 1918.3 кэВ получено экспериментальное ограничение $T_{1/2}(0\nu EC/EC - res, 1918 \text{ кэВ}) > 4.1 \cdot 10^{22}$ лет. Все пределы получены на 90% уровне достоверности.

DOI: 10.7868/S0367676518060200

ВВЕДЕНИЕ

Исследование безнейтринного двойного бета-распада ($\beta^-\beta^-$, $\beta^+\beta^+$, β^+EC , EC/EC) имеет большое значение в физике частиц и ядерной физике как действенный инструмент для изучения свойств нейтрино и слабого взаимодействия. Изучение безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$) позволит прояснить природу нейтрино (майорановское или дираковское), абсолютное значение массы нейтрино, иерархию нейтринных масс (нормальная, инвертированная, квазивырожденная) и возможное нарушение закона сохранения лептонного заряда [1]. Двойной бета-распад ($\beta\beta$) с испусканием двух нейтрино ($2\nu\beta\beta$) – это разрешенный в рамках стандартной модели (СМ) процесс второго порядка. Изучение $2\nu\beta\beta$ -распада 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] и $2\nu EC/EC$ -распад ^{130}Ba был зарегистрирован в геохимическом эксперименте [3]. Изучение переходов на возбужденные состояния дочерних ядер позволяет получить дополнительную информацию о двойном бета-распаде. Меньшие энергии переходов приводят к существенно подавленным вероятностям $\beta\beta$ -распада на возбужденные состояния по сравнению с переходами на основное состояние. Такие процессы сопровождаются испусканием γ -квантов при разрядке возбужденных состояний, и при использовании низкофонового высокоэффективных HPGe-детекторов $2\nu\beta\beta$ -распад на возбужденные состояния дочерних ядер может быть зарегистрирован для некоторых ядер (например, для ^{100}Mo , ^{96}Zr , ^{150}Nd).

$2\nu 2\beta^-$ -распад на возбужденные состояния дочерних ядер был уже зарегистрирован в распаде $^{100}\text{Mo} - ^{100}\text{Ru}$ (0_1^+ , 1130.3 кэВ) в нескольких экспериментах, в том числе измерения, проведенные в Моданской подземной лаборатории (LSM, Модан, Франция, 4800 м водного эквивалента) с использованием HPGe-спектрометра «Obelix» [4] и в распаде $^{150}\text{Nd} - ^{150}\text{Sm}$ (0_1^+ , 740.4 кэВ). Нужно отметить, что энергетический спектр, полученный при измерении $2\nu 2\beta^-$ -распада ^{100}Mo на возбужденные состояния ^{100}Ru с помощью детектора Obelix, содержал два четко видимых пика,

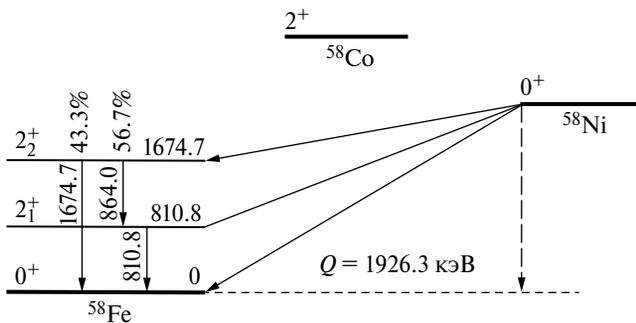


Рис. 1. Схема двойного бета-распада $^{58}\text{Ni} \rightarrow ^{58}\text{Fe}$. Штриховой стрелкой показан возможный радиационный $0\nu\text{EC}/\text{EC}$ -распад ^{58}Ni с энергией 1918.3 кэВ.

соответствующих гамма-переходам, сопровождающим этот распад [4]. Это позволило нам получить наиболее точное значение для периода полураспада этого редкого процесса. Основываясь на результатах этого эксперимента [4], который показал высокую чувствительность спектрометра Obelix в исследованиях таких редких процессов, было проведено аналогичное исследование двойного бета-распада ^{58}Ni на возбужденные состояния ^{58}Fe (рис. 1) в LSM (Модан, Франция) с использованием детектора Obelix.

1. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование процессов двойного бета-распада ($\beta^+\text{EC}$, EC/EC) ^{58}Ni проводилось в Моданской подземной лаборатории (LSM, Франция) на глубине 4800 м водного эквивалента с использованием ультранизкофонного детектора из сверхчистого германия (HPGe) Obelix с чувствительным объемом 600 см^3 и эффективностью $\sim 160\%$ [5, 6]. Энергетическое разрешение детектора Obelix составляет ~ 1.2 кэВ на γ -линии 122 кэВ (^{57}Co) и ~ 2 кэВ на γ -линии 1332 кэВ (^{60}Co). Детекторная часть криостата окружена пассивной защитой из нескольких слоев археологического свинца толщиной ~ 12 см (активность $< 60\text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$) и низкоактивного свинца (активность $5\text{--}20\text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$) общей толщиной ~ 20 см, и помещена внутри герметичного стального кожуха. Для предотвращения скопления газа радона (^{222}Rn) около детектора внутренняя часть пассивной защиты продувается воздухом с пониженным содержанием радона (концентрация ^{222}Rn в этом воздухе составляет $\sim 15\text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$) от установленной в LSM системы очистки воздуха от радона. Измеряемый образец из природного никеля, содержащий $\sim 68\%$ ^{58}Ni , был изготовлен в форме сосуда Маринелли в 2014 г. Он имеет вид цилиндра с наружным диаметром 192 мм и высотой 130 мм и внутренним отверстием с диаметром

126 мм и глубиной 106 мм. Общая масса образца составляет ~ 21.7 кг. Для размещения образца на детекторе Obelix был удален первый внутренний слой свинцовой защиты толщиной ~ 3.6 см [5, 6].

2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для проведения исследований двойного бета-распада ^{58}Ni было проведено три серии измерений в период с 2014 по 2017 г. Низкофонные измерения такого рода основываются на сравнении измерений образцов и фона спектрометра. Интегральная скорость счета фона детектора была в 2014 г. $73\text{ отсчетов} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ в энергетическом диапазоне $40\text{--}3000$ кэВ и $95\text{ отсчетов} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ в 2017 г. перед началом основной экспозиции измерений ^{58}Ni . Увеличение фона детектора было вызвано космогенными изотопами, наработанными на поверхности Земли (в конце 2016 г. детектор был отремонтирован фирмой Канберра). Объектами наблюдения и анализа в исследованиях двойного бета-распада ^{58}Ni (рис. 1) были γ -кванты с энергиями 511, 811, 864, 1675 и 1918.3 кэВ. $\beta^+\text{EC}$ -распад ^{58}Ni сопровождается испусканием позитрона, который затем (после аннигиляции с электроном) образует два коррелированных гамма-кванта с энергиями по 511 кэВ. $\beta^+\text{EC}$ -распад ^{58}Ni на первое 2_1^+ , 811 кэВ возбужденное состояние ^{58}Fe сопровождается испусканием дополнительного гамма-кванта с энергией 811 кэВ. EC/EC -распад ^{58}Ni

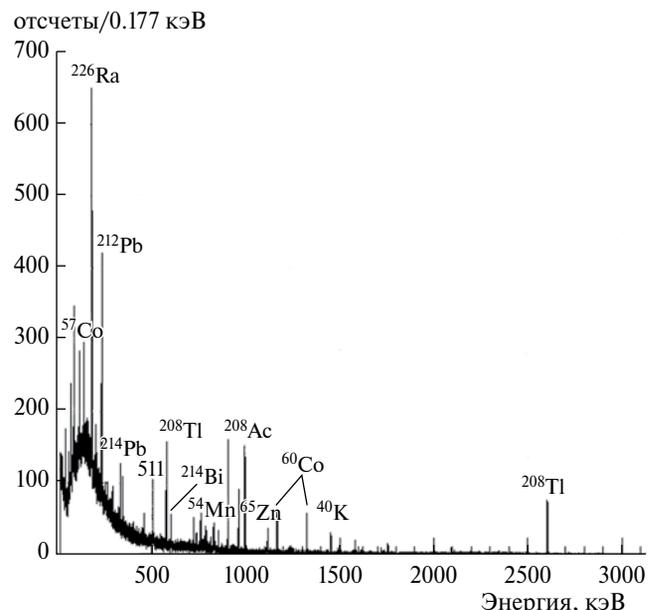


Рис. 2. Энергетический спектр, полученный при измерении образца из природного никеля массой ~ 21.7 кг на детекторе Obelix в течение ~ 143.8 сут.

на первое 2_1^+ , 811 кэВ и второе 2_2^+ , 1675 кэВ возбужденные состояния ^{58}Fe сопровождается испусканием γ -квантов с энергиями 811 кэВ и 1675 кэВ (или 811 + 864 кэВ) соответственно. Исследование резонансного безнейтринного радиационного EC/EC -распада $^{58}\text{Ni} \rightarrow ^{58}\text{Fe}$ основано на поиске в измеряемом спектре γ -квантов с энергией 1918.3 кэВ. Все эти γ -кванты могут быть с высокой эффективностью зарегистрированы детектором Obelix.

Измерения образца никеля, проведенные в 2014 ($T_{\text{изм}} = 47.5$ сут) и 2015 гг. ($T_{\text{изм}} = 19$ сут) показали повышенный уровень радиоактивности короткоживущих космогенных изотопов в образце никеля. Средние значения активностей космогенных изотопов составляли в 2014 г. — ^{57}Co ($T_{1/2} = 271.8$ сут) = 5.0 мБк · кг⁻¹, ^{58}Co ($T_{1/2} = 70.9$ сут) = 3.8 мБк · кг⁻¹, ^{56}Co ($T_{1/2} = 77.3$ сут) = 2.3 мБк · кг⁻¹, ^{54}Mn ($T_{1/2} = 312.3$ сут) = 0.7 мБ · кг⁻¹. Чтобы снизить уровень повышенной радиоактивности (особенно ^{58}Co), образец выдерживался в условиях подземной лаборатории до 2017 г., когда уровень активности ^{58}Co стал незначительным. Основное измерение образца никеля началось в апреле 2017 г. и продолжается до настоящего времени. Общее время измерений на настоящий момент составляет 3452 ч (примерно 143.8 сут) — см. энергетический спектр на рис. 2.

Обработка измеренного спектра основана на поиске возможных пиков в областях интереса 511, 811, 864, 1675 и 1918.3 кэВ. Основные области интереса и результаты поиска указанных пиков показаны на рис. 3–5. Эффективность детектора Obelix для регистрации γ -квантов, вылетающих из образца природного никеля, рассчитывалась с помощью

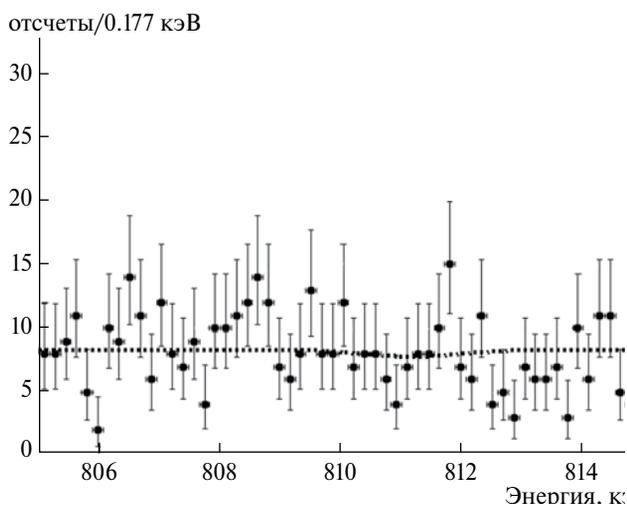


Рис. 3. Фитирование участка спектра природного никеля для поиска возможного пика с энергией 810.8 кэВ.

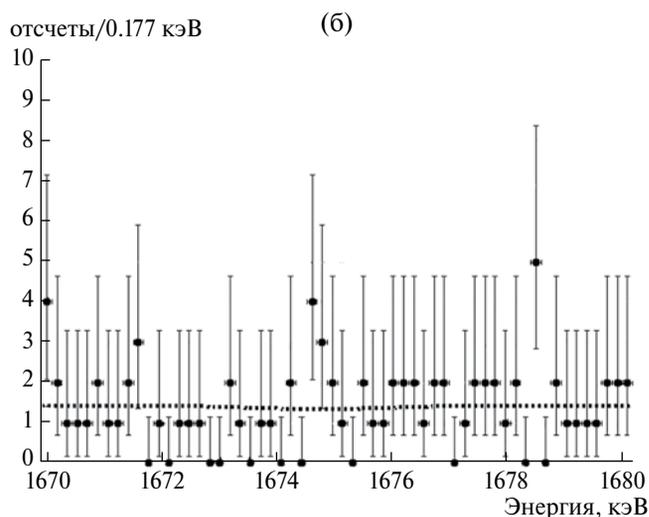
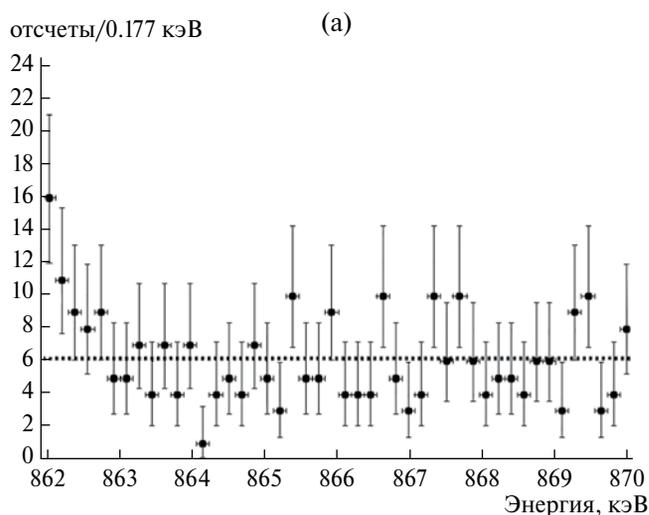


Рис. 4. Фитирование участка спектра природного никеля для поиска возможных пиков с энергиями 864 кэВ (а) и 1674.7 кэВ (б).

симуляций, проведенных на основе пакета ROOT-VMC-GEANT4 DPGE в диапазоне 0.05–5 МэВ. После этого расчетная эффективность проверялась с помощью измерений низкоактивного образца, изготовленного в сосуде Маринелли на основе порошка окиси лантана (La_2O_3). Природный La в этом порошке содержит $0.0888 \pm 0.0007\%$ ^{138}La с периодом полураспада $T_{1/2} = (1.02 \pm 0.01) \cdot 10^{11}$ лет, который характеризуется испусканием γ -квантов с энергиями 788.7 кэВ и 1435.8 кэВ. Этот метод калибровки детектора по эффективности при низкофоновых измерениях детально описан в работе [5].

Предварительная обработка данных, полученных при измерении образца никеля на спектрометре Obelix в течение 143.8 сут, показала отсутствие искомого пика в областях интереса (рис. 3–5). Для нахождения пределов изучаемых ветвей распада ^{58}Ni было подсчитано количество исключенных событий

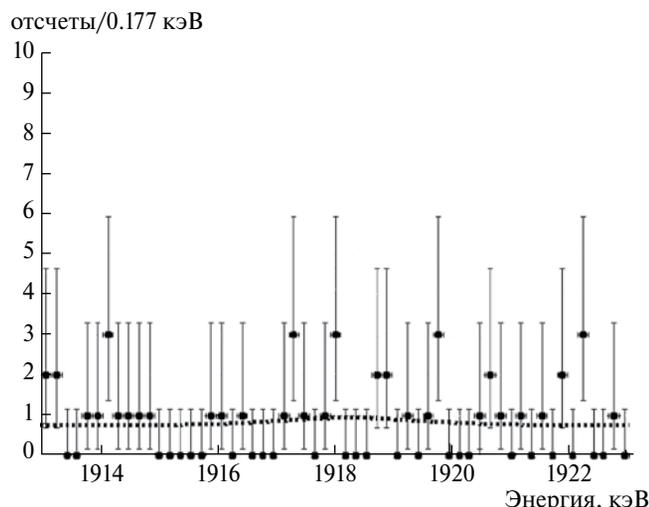


Рис. 5. Фитирование участка спектра природного никеля для поиска возможного пика с энергией 1918.3 кэВ.

для всех возможных гамма-переходов в распаде $^{58}\text{Ni} \rightarrow ^{58}\text{Fe}$. Для распада на первое 2_1^+ , 811 кэВ возбужденное состояние ^{58}Fe (γ -пик 811 кэВ) число исключенных событий за время измерения (143.8 сут) составило 18 событий (рис. 3). Для распада на второе 2_2^+ , 1675 кэВ возбужденное состояние ^{58}Fe число исключенных событий составило 11 и для γ -пика 864 кэВ (рис. 4а), и для γ -пика 1675 кэВ (рис. 4б). Для возможного γ -пика с энергией 1918.3 кэВ (безнейтринный резонансный двойной электронный захват) число исключенных событий составило 12.3 (рис. 5). На основе полученных данных для числа исключенных событий (пределы обнаружения пиков) определены новые ограничения на β^+EC -, EC/EC -распады ^{58}Ni (на 90% уровне достоверности) – (данные приведены в таблице),

улучшающие существующие экспериментальные пределы (последняя колонка в таблице) более чем на порядок. Теоретические предсказания для периодов полураспада $2\nu\beta^+EC$ -, $2\nu EC/EC$ - и $0\nu EC/EC$ -радиационного распада ^{58}Ni находятся в пределах – $T_{1/2}(2\beta^+EC, 0 \rightarrow 0^+) = 1.9 \cdot 10^{24} - 8.6 \cdot 10^{25}$ лет [10, 11], – $T_{1/2}(2\nu EC/EC, 0 \rightarrow 0^+) = 3.9 \cdot 10^{23} - 2.8 \cdot 10^{25}$ лет [10, 11], $T_{1/2}(0\nu EC / EC - res, 0 \rightarrow 0^+) = 2 \cdot 10^{35} - 3 \cdot 10^{36}$ лет [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование двойного бета-распада ^{58}Ni на спектрометре Obelix, позволившее улучшить экспериментальные ограничения на $2\nu\beta^+EC$ -, $2\nu EC/EC$ - и $0\nu EC/EC$ -распады ^{58}Ni более чем на порядок. Измерения образца природного никеля на спектрометре Obelix в Моданской подземной лаборатории продолжают, и мы надеемся еще улучшить наши экспериментальные пределы (приведенные в таблице), которые теперь являются самыми лучшими для двойного бета-распада ^{58}Ni .

По завершению измерений никеля планируется провести исследования двойного бета-распада ^{74}Se , ^{82}Se , ^{96}Zr и ^{150}Nd на возбужденные состояния дочерних ядер. Эти исследования будут, как и исследование распада ^{58}Ni , проводиться в Моданской подземной лаборатории (4800 м водного эквивалента) с использованием детекторов Obelix и Idefix. Idefix – это новый коаксиальный HPGe детектор Р-типа в ультранизкофоновом криостате U-типа с чувствительным объемом и основными характеристиками, аналогичными детектору Obelix. Idefix, как и Obelix, изготовлен фирмой Канберра.

Новые ограничения на двойной бета-распад ^{58}Ni , полученные из измерений природного никеля с массой ~21.7 кг на детекторе Obelix в течение 143.8 сут

Мода распада	Конечное состояние или энергия перехода, кэВ	Новое значение предела для $T_{1/2}$ распада, настоящая работа	Предыдущие значения пределов для $T_{1/2}$ распада, ссылка на работы
$2\nu\beta^+EC$	Основное сост.	$1.7 \cdot 10^{22}$ лет (90% У.Д.)	$7.0 \cdot 10^{20}$ лет (68% У.Д.) [7]
$2\nu\beta^+EC$	811	$2.3 \cdot 10^{22}$ лет (90% У.Д.)	$4.0 \cdot 10^{20}$ лет (68% У.Д.) [7]
$2\nu EC/EC$	811	$3.3 \cdot 10^{22}$ лет (90% У.Д.)	$4.0 \cdot 10^{19}$ лет (90% У.Д.) [8]
$2\nu EC/EC$	1675	$3.4 \cdot 10^{22}$ лет (90% У.Д.)	$4.0 \cdot 10^{19}$ лет (90% У.Д.) [8]
$0\nu EC/EC - res$	1918.3	$3.3 \cdot 10^{22}$ лет (90% У.Д.)	$2.1 \cdot 10^{21}$ лет (90% У.Д.) [9]

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 ERDF cz.02.1.01/0.0/0.0/16_013/0001733 и РФФИ № 18-02-00732.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Haxton W.C., Stephenson G.S.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 1984. V. 12. P. 409.
2. *Barabash A.S.* // AIP Conf. Proc. 2013. V. 1572. P. 11.
3. *Meshik A.P., Hohenberg C.M., Pravdivtseva O.V. et al.* // Phys. Rev. C. 2001. V. 64. P. 035205.
4. *Arnold R., Augier C., Barabash A.S. et al. (The NEMO-3 collaboration)* // Nucl. Phys. A. 2014. V. 925. P. 25.
5. *Brudanin V.B., Egorov V.G., Hodák R. et al.* // JINST. 2017. V. 12. P. 02004.
6. *Рухадзе Н.И., Бруданин В.Б., Бриансон Ш., и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. С. 424; *Rukhadze N.I., Brudanin V.B., Briancon Ch. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. P. 379.
7. *Vasil'ev S.I., Klimenko A.A., Osetrov S.B. et al.* // JETP Lett. 1993. V. 57. P. 631.
8. *Bellotti E., Fiorini E., Liguori C. et al.* // Lett. Nuovo Cim. 1982. V. 33. P. 273.
9. *Lehnert B., Degering D., Frotscher A. et al.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2016. V. 43. P. 065201.
10. *Tretyak V.I., Zdesenko Yu.G.* // At. Data and Nucl. Data Tables. 1995. V. 61. P. 43.
11. *Tretyak V.I., Zdesenko Yu.G.* // At. Data and Nucl. Data Tables. 2002. V. 80. P. 83.