

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПА $^{250}\text{No}$

*А. И. Свирихин<sup>a,1</sup>, А. В. Андреев<sup>a</sup>, А. В. Еремин<sup>a</sup>, И. Н. Изосимов<sup>a</sup>,  
А. В. Исаев<sup>a</sup>, А. Н. Кузнецов<sup>a</sup>, А. А. Кузнецова<sup>a</sup>, О. Н. Малышев<sup>a</sup>,  
А. Г. Попеко<sup>a</sup>, Ю. А. Попов<sup>a</sup>, Е. А. Сокол<sup>a</sup>, М. Л. Челноков<sup>a</sup>,  
В. И. Чепигин<sup>a</sup>, Т. М. Шнейдман<sup>a</sup>, Б. Галл<sup>b</sup>, О. Дорво<sup>b</sup>, П. Брионе<sup>b</sup>,  
К. Хошилд<sup>c</sup>, А. Лопез-Мартенс<sup>c</sup>, К. Резинкина<sup>c</sup>, С. Мулинс<sup>c</sup>,  
П. Джонс<sup>d</sup>, П. Мошати<sup>d</sup>*

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>b</sup> IPHC, IN2P3-CNRS, Страсбург, Франция

<sup>c</sup> CSNSM, IN2P3-CNRS, Орсе, Франция

<sup>e</sup> Лаборатория ускорительных и прикладных наук, Кейптаун, ЮАР

<sup>d</sup> Университет им. Я. Коменского, Братислава

Данная работа описывает эксперимент по изучению свойств спонтанного деления короткоживущих нейтронодефицитных ядер, синтезированных в реакции полного слияния  $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb} \rightarrow ^{252}\text{No}^*$ . Эксперимент проводился с использованием сепаратора SHELS и пучка У-400 ЛЯР ОИЯИ. Зарегистрированы две спонтанно делящиеся активности, относящиеся к основному и изомерному состояниям ядра  $^{250}\text{No}$ . Для полученных короткоживущих ядер измерены периоды полураспада, полные кинетические энергии осколков деления и нейтронные множественности. Среднее число нейтронов на деление для активности с  $t_{1/2} = (5,1 \pm 0,3)$  мкс составило величину  $\bar{\nu} = 4,38 \pm 0,13$ , для ядер с периодом полураспада  $t_{1/2} = (36 \pm 3)$  мкс эта величина составила  $\bar{\nu} = 3,90 \pm 0,20$ .

Our last experiments were aimed at investigating the spontaneous fission properties of short-lived neutron-deficient isotopes synthesized in the complete fusion reaction  $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb} \rightarrow ^{252}\text{No}^*$ . Our experiment registered two short-lived activities that can be related to the spontaneous fission (SF) of ground and isomeric states of  $^{250}\text{No}$ . The half-life, total kinetic energies of fission fragments and neutron multiplicities were measured. The average number of neutrons per SF-activity of  $t_{1/2} = (5.1 \pm 0.3) \mu\text{s}$  and  $t_{1/2} = (36 \pm 3) \mu\text{s}$  were determined as  $\bar{\nu} = 4.38 \pm 0.13$  and  $\bar{\nu} = 3.90 \pm 0.20$ , respectively.

PACS: 23.70.+j; 25.70.Jj; 25.85.Ca; 27.90.+b

---

<sup>1</sup>E-mail: asvirikhin@jinr.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Деление тяжелых ядер — вынужденное и спонтанное — является одним из наиболее важных разделов физики атомного ядра. Интерес к спонтанному делению обусловлен тем, что этот процесс связан с коренной перестройкой структуры ядра и с движением большого количества ядерной материи. Согласно современным представлениям именно деление определяет границы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева для тяжелых ядер.

До настоящего времени для большей части известных спонтанно делящихся ядер с  $Z \geq 100$  были экспериментально измерены парциальные периоды полураспада [1], достаточно точно измерены полные кинетические энергии (ТКЕ, Total Kinetic Energy) осколков и, для нескольких изотопов, построены массовые и энергетические распределения осколков [1, 2]. В последние годы нашей группой получены интересные результаты по изучению такой важной, но слабо изученной характеристики, как множественность нейтронов спонтанного деления. Спонтанно делящиеся ядра, для которых ранее измерялись множественности нейтронов, описаны в работах [3, 4]. Как правило, они имеют периоды полураспада, достаточные для их изучения с помощью методик «вне пучка», так называемых офф-лайн. Трудности в изучении свойств спонтанного деления тяжелых ядер объясняются сложностью получения достаточных количеств исследуемых изотопов, а также невозможностью использования офф-лайн методик для измерения характеристик спонтанного деления короткоживущих ядер.

Настоящая работа продолжает цикл экспериментов по изучению характеристик спонтанного деления ядер, лежащих в экзотической области короткоживущих нейтронодефицитных изотопов с  $Z \geq 100$ . В процессе экспериментов на сепараторах ВАСИЛИСА и SHELS в комбинации с нейтронным детектором были получены уникальные данные о свойствах распада нейтронодефицитных изотопов Fm [5, 6], No [6], Rf [7], синтезируемых в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{204,206}\text{Pb} \rightarrow ^{252,254}\text{No}^*$ ,  $^{40}\text{Ar} + ^{206,208}\text{Pb} \rightarrow ^{246,248}\text{Fm}^*$ ,  $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{258}\text{Rf}^*$ .

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ранее уже проводились эксперименты [8–10], нацеленные на изучение закономерностей образования изотопов нобелия в реакциях полного слияния ускоренных ионов кальция с мишенями из изотопов свинца. В описываемом эксперименте искомые ядра синтезировались в реакции полного слияния  $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb} = ^{252-x}\text{No} + xn$ .

В работе использовалась вращающаяся свинцовая мишень (соединение PbS, обогащение  $^{204}\text{Pb} = 99,6\%$ ) толщиной  $(330 \pm 30)$  мкг/см<sup>2</sup>, нанесенная на подложку из титана (2 мкм). Для «тонких» мишеней максимальный выход продуктов реакций полного слияния достигается при энергиях бомбардирующих ионов  $E_{1/2}$ , соответствующих расположению максимума функции возбуждения в середине мишени. Для изучаемой реакции значение энергии  $E_{1/2}$  варьировалось в пределах от 214 до 228 МэВ (рис. 1). Интенсивность пучка ионов  $^{48}\text{Ca}^{+18}$  составляла  $3 \cdot 10^{12}$  с<sup>-1</sup>.

Отделение искомого ядра отдачи (ЯО) от продуктов побочных реакций осуществлялось сепаратором SHELS [11, 12]. После сепарации ядра пролетают через времяпролетный детектор и имплантируются в фокальный двусторонний кремниевый стриповый детектор (DSSS-детектор, конфигурация —  $48 \times 48$  стрипов), где происходит регистрация исследуемых ядер, а также испускаемых ими  $\alpha$ -частиц и осколков спонтанного

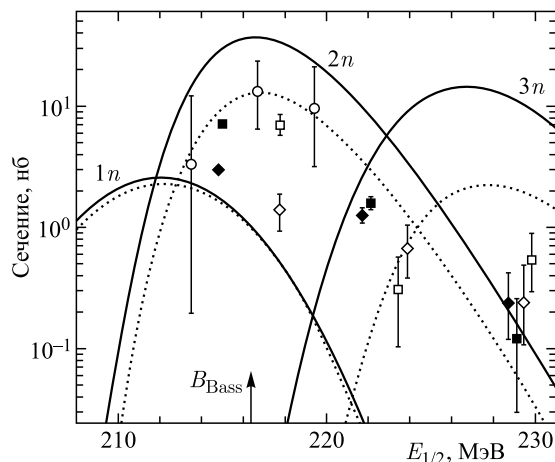


Рис. 1. Сечения образования изотопов, полученных в реакции  $^{48}\text{Ca}(^{204}\text{Pb}, xn)^{252-x}\text{No}$ . ■ — короткоживущая ( $t_{1/2} = (5,1 \pm 0,3)$  мкс) и ◆ — долгоживущая ( $t_{1/2} = (36 \pm 3)$  мкс) SF-активности, наблюдавшиеся в нашей работе; ○ — сечения образования  $^{250}\text{No}$  ( $t_{1/2} = 36$  мкс), измеренные в работе [10]; □ — короткоживущая и ◇ — долгоживущая SF-активности, наблюдавшиеся в работе [8]. Сплошные и пунктирные кривые — расчеты по статистической модели с разными параметрами (см. [8])

деления. Вокруг полупроводникового фокального детектора смонтирована сборка из 54  $^3\text{He}$ -счетчиков нейтронов в замедлителе (подробное описание детектирующей системы приводится в работе [13]). Сепаратор SHELS в комбинации с мультidetекторной системой регистрации позволяет проводить эксперименты по изучению свойств короткоживущих изотопов с периодом полураспада в несколько микросекунд. По расчетам для ядер нобелия, синтезируемых в реакции полного слияния  $^{48}\text{Ca}(^{204}\text{Pb}, xn)^{252-x}\text{No}$ , время пролета от мишени до детектирующей системы составляет порядка 2,3 мкс.

Энергетическое разрешение фокального DSSS-детектора для  $\alpha$ -частиц в диапазоне 6–10 МэВ составляет величину порядка 20 кэВ. Позиционное разрешение детектора 1 мм. Четыре детектора, смонтированные по бокам фокального детектора и образующие сборку в виде колодца, предназначены для регистрации  $\alpha$ -частиц и осколков спонтанного деления, вылетающих из фокального детектора, эффективность регистрации таких продуктов боковыми детекторами составляет приблизительно 35 %, энергетическое разрешение боковых детекторов для  $\alpha$ -частиц — примерно 70 кэВ. Эффективность нейтронного детектора, измеренная при помощи источника  $^{248}\text{Cm}$ , составила  $(43,6 \pm 1)$  % для единичных нейтронов. Следует отметить весьма благоприятные фоновые условия, которые сохранялись на протяжении всего эксперимента: счет фоновых нейтронов в комнате с детекторами не превышал 100 случайных отсчетов в 1 с.

В этом эксперименте детектирующая система была дополнена сцинтилляционным детектором для регистрации  $\gamma$ -квантов, расположенным после фокального DSSS-детектора. Сцинтилляционный детектор на базе кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и компактного ФЭУ Hamamatsu R7600 позволил нам отделять сигналы осколков деления (по совпадению с  $\gamma$ -квантами) от паразитных импульсов, регистрируемых в том же диапазоне энер-

гий, что и осколки деления (энергия около 200 МэВ). Сигналы от высокоэнергетических паразитных импульсов пучка, не распознаваемые времяпролетным детектором, могут быть ошибочно идентифицированы как сигналы от осколков деления. Ввиду того, что практически каждый акт спонтанного деления сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов, сцинтилляционный детектор позволяет отсеивать паразитные импульсы, которые не сопровождаются испусканием фотонов. Эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов, испускаемых осколками спонтанного деления ядер, имплантированных в фокальный DSSSD, составляет величину 70%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

За время эксперимента в фокальной плоскости сепаратора было зарегистрировано около 700 делений, которые можно отнести к распаду короткоживущих изотопов нобелия. Это число значительно превышает статистику, полученную в проведенных ранее экспериментах [8, 9]. В нашем эксперименте, как и в этих работах, были зарегистрированы две активности с периодами полураспада  $t_{1/2} = (5,1 \pm 0,3)$  мкс и  $t_{1/2} = (36 \pm 3)$  мкс, которые можно отнести к спонтанному делению нейтронодефицитных изотопов нобелия. Учитывая достаточно высокую статистику полученных событий, удалось сравнить выходы этих активностей в зависимости от энергии пучка (см. рис. 1). Сравнив полученные значения выходов с расчетной функцией возбуждения реакции  $^{48}\text{Ca}(^{204}\text{Pb}, 2n)^{250}\text{No}$ , мы пришли к тому же выводу, что и авторы работы [9]: зарегистрированные события

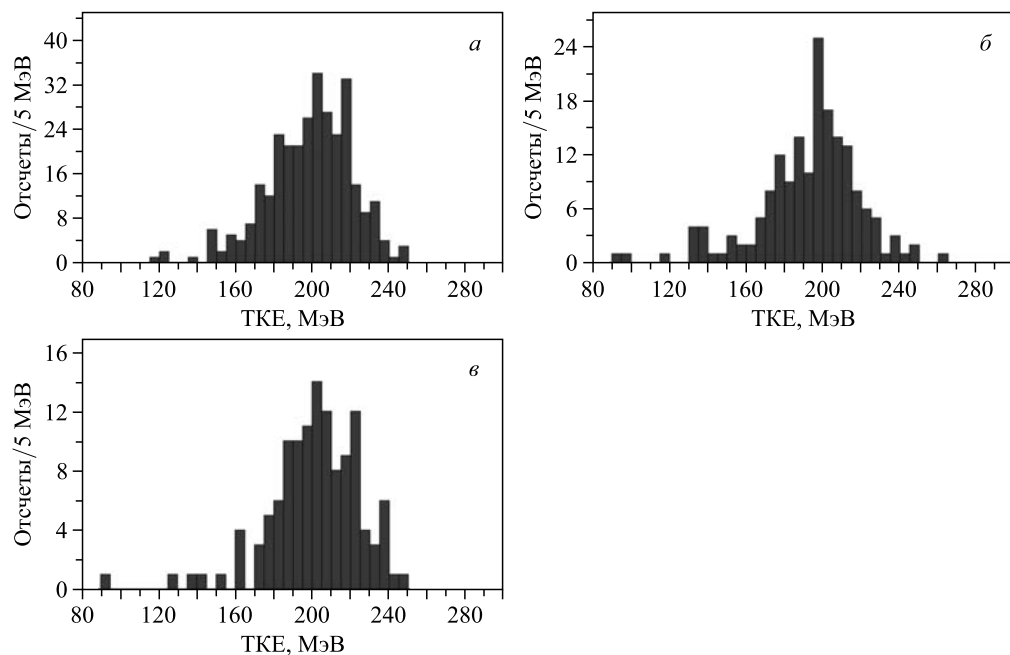


Рис. 2. Спектры ТКЕ осколков спонтанного деления ядер  $^{252}\text{No}$  (*a*) и  $^{250}\text{No}$  (деление из основного состояния — рис. *б*, из изомерного — рис. *в*), полученные сложением сигналов в фокальном DSSSD и боковых детекторах

относятся к спонтанному делению из основного ( $t_{1/2} = (5,1 \pm 0,3)$  мкс) и изомерного ( $t_{1/2} = (36 \pm 3)$  мкс) состояний ядра  $^{250}\text{No}$ . Если предположить, что более долгоживущая активность относится к делению изотопа  $^{249}\text{No}$ , как это предложено в работе [8], то следовало бы ожидать заметного увеличения количества этих событий с увеличением энергии пучка и увеличением влияния  $3n$ -канала реакции слияния. Однако, как показано на рис. 1, этого не происходит, из чего можно сделать вывод о том, что активность с  $t_{1/2} = (36 \pm 3)$  мкс также относится к делению изотопа  $^{250}\text{No}$ , но к распаду из изомерного состояния.

Для зарегистрированных событий спонтанного деления, отнесенных к спонтанному делению  $^{250}\text{No}$ , были измерены множественности мгновенных нейтронов. Среднее число нейтронов на деление из основного состояния составило величину  $\bar{\nu} = 4,38 \pm 0,13$ , для деления из изомерного состояния эта величина составила  $\bar{\nu} = 3,90 \pm 0,20$ . Следует отметить, что подобные измерения для тяжелых ядер, испытывающих спонтанное деление из изомерного состояния, осуществлены впервые. Примерные значения полной кинетической энергии осколков деления из основного и изомерного состояния  $^{250}\text{No}$  составили  $(192 \pm 2)$  МэВ и  $(200 \pm 2)$  МэВ соответственно. Ошибки измеренных значений содержат только статистическую погрешность, аппаратные ошибки, связанные с типом и конфигурацией фокального детектора, не учитываются. В качестве калибровочных данных использовался спектр полной кинетической энергии осколков спонтанного деления  $^{252}\text{No}$  (рис. 2) с учетом величины ТКЕ =  $(198,7 \pm 1,2)$  МэВ из работы [14].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты описанного эксперимента в основном подтверждают данные проведенных ранее работ. Как видно из рис. 1, закономерности образования ядер  $^{250}\text{No}$  в реакции  $^{48}\text{Ca}(^{204}\text{Pb}, xn)^{252-x}\text{No}$  заметно не отличаются от опубликованных ранее [8–10]. То же самое можно сказать о периоде полураспада ядра  $^{250}\text{No}$  и его изомера  $^{250m}\text{No}$ . Следует отметить, что появление дополнительной моды спонтанного деления с увеличенным периодом полураспада связывается с  $K$ -изомерными состояниями [15–18]. Под  $K$ -изомерами понимают двухквaziчастичные состояния ядра, в которых угловой момент неспаренных нуклонов связан в состояние с большим значением  $K$ -проекции углового момента на ось симметрии деформированного ядра. В частности, для  $^{250}\text{No}$  [18]  $K$ -изомер

$$\left[ \frac{7^+}{2} [624] \otimes \frac{5^+}{2} [622] \right]_{6^+}.$$

Энергия по отношению к основному состоянию  $E_K \approx 1,2$  МэВ. Расчет, основанный на модели, описанной в [18], с учетом полученного нами значения периода полураспада в основное состояние ( $t_{1/2} = (5,1 \pm 0,3)$  мкс), дает значение периода полураспада для изомерного состояния  $^{250}\text{No}$  — 77,8 мкс. Эта величина находится в неплохом соответствии с полученным экспериментально значением  $t_{1/2} = (36 \pm 3)$  мкс.

Интерес представляет обнаруженная для этого изотопа «изомерия нейтронной множественности». Как видно из полученных результатов, отличие в среднем числе нейтронов на одно деление для ядра  $^{250}\text{No}$ , находящегося в основном и изомерном состояниях, составляет величину, близкую к 0,5. Как видно из систематики нейтронных множе-

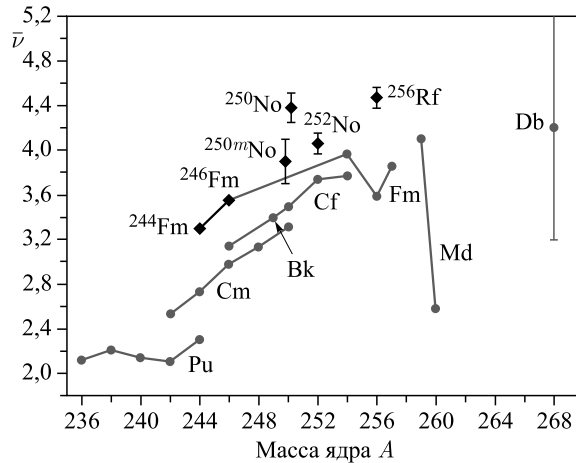


Рис. 3. Систематики  $\bar{\nu}$  (кружки) среднего числа нейтронов спонтанного деления в зависимости от  $A$ . Ромбы — результаты, полученные в экспериментах на сепараторе ВАСИЛИСА-SHELS ([5–7] и данная работа)

ственности, представленной на рис. 3, такая ошутимая разница характерна, скорее, для изотопов, отличающихся по массе на 1–2 нуклона.

Обращает на себя внимание и различие в измеренных значениях полной кинетической энергии — для  $^{250}\text{No}$   $\text{ТКЕ} = (192 \pm 2)$  МэВ и  $^{250m}\text{No}$   $\text{ТКЕ} = (200 \pm 2)$  МэВ, такое отличие также характерно для ядер с различным числом нуклонов, причем сохраняется тенденция к уменьшению кинетической энергии осколков с увеличением числа испарившихся из осколков нейтронов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В планах экспериментов с использованием сепаратора SHELS и детектирующей системы с нейтронным детектором стоит продолжение детальных исследований спонтанного деления четно-четных изотопов элементов 104, 106 и 108, для которых можно набрать приемлемую статистику при длительности экспериментов не более месяца. Также планируется изучение спонтанного деления более нейтроноизбыточных изотопов Fm, No, Rf и Sg с использованием мишеней  $^{238}\text{U}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  и высокоинтенсивных пучков ускоренных ионов  $^{22}\text{Ne}$ . При длительности эксперимента порядка одного месяца будет набираться достаточная статистика для определения множественности мгновенных нейтронов спонтанного деления с приемлемой точностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 13-02-12003, 14-02-93962, 14-02-91051, а также грант 15-02-07569).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hoffman D. C. Spontaneous Fission Properties and Life-Time Systematic // Nucl. Phys. A. 1989. V. 502. P. 21–40.
2. Хьюлетт Е. К. Роль второго барьера в массовом разделении при спонтанном делении самых тяжелых элементов // ЯФ. 1994. Т. 57, № 7. С. 1165–1173.

3. Vorobyev A. S. *et al.* Distribution of Prompt Neutron Emission Probability for Fission Fragments in Spontaneous Fission of  $^{252}\text{Cf}$  and  $^{244,248}\text{Cm}$  // Proc. of Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Santa Fe, New Mexico, USA, 2004. AIP Conf. Proc. 2005. V. 769. P. 613–616.
4. Hoffman D. C. *et al.* Neutron Multiplicity Measurements of Cf and Fm Isotopes // Phys. Rev. C. 1980. V. 21, No. 2. P. 637–646.
5. Svirikhin A. I. *et al.* Neutron Multiplicity at Spontaneous Fission of  $^{246}\text{Fm}$  // Eur. Phys. J. A. 2010. V. 44. P. 393–396.
6. Svirikhin A. I. *et al.* The Emission of Prompt Neutrons from the Spontaneous Fission of  $^{252}\text{No}$  and  $^{244}\text{Fm}$  // Eur. Phys. J. A. 2012. V. 48. P. 121–127.
7. Свирихин А. И. и др. Спонтанное деление  $^{256}\text{Rf}$  — новые данные // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 4. С. 759–762.
8. Belozherov A. V. *et al.* Spontaneous-Fission Decay Properties and Production Cross-Sections for the Neutron-Deficient Nobelium Isotopes Formed in the  $^{44,48}\text{Ca} + ^{204,206,208}\text{Pb}$  Reactions // Eur. Phys. J. A. 2003. V. 16. P. 447–456.
9. Peterson D. *et al.* Decay Modes of  $^{250}\text{No}$  // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. P. 014316.
10. Oganessian Yu. Ts. *et al.* Measurements of Cross Sections for the Fusion-Evaporation Reactions  $^{204,206,207,208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$  and  $^{207}\text{Pb} + ^{34}\text{S}$ : Decay Properties of the Even–Even Nuclides  $^{238}\text{Cf}$  and  $^{250}\text{No}$  // Phys. Rev. C. 2001. V. 64. P. 054606.
11. Еремин А. В. и др. Первые экспериментальные тесты модернизированного сепаратора ВАСИЛИСА // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 1. С. 63–73.
12. Еремин А. В. и др. Экспериментальные тесты модернизированного сепаратора ВАСИЛИСА (SHELs) с использованием ускоренных ионов  $^{50}\text{Ti}$  // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 1. С. 74–80.
13. Свирихин А. И. и др. Детектор для изучения характеристик спонтанного деления короткоживущих тяжелых ядер // ПТЭ. 2011. № 5. С. 50–54.
14. Bemis C. E. *et al.* Fragment-Mass and Kinetic-Energy Distributions from the Spontaneous Fission of  $^{252}\text{No}$  // Phys. Rev. C. 1977. V. 15, No. 2. P. 705–712.
15. Xu F. R. *et al.* Enhanced Stability of Superheavy Nuclei due to High-Spin Isomerism // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92, No. 25. P. 252501.
16. Herzberg R.-D. *et al.* Nuclear Isomers in Superheavy Elements as Stepping Stones towards the Island of Stability // Nature. 2006. V. 442. P. 896–899.
17. Heßberger F. P. *et al.* Decay Studies of *K*-Isomers in  $^{254}\text{No}$  // Eur. Phys. J. A. 2010. V. 43. P. 55–66.
18. Adamian G. G., Antonenko N. V., Scheid W. High-Spin Isomers in Some of the Heaviest Nuclei: Spectra, Decays, and Population // Phys. Rev. C. 2010. V. 81. P. 024320.

Получено 6 декабря 2016 г.