

## ИССЛЕДОВАНИЕ МНОЖЕСТВЕННОСТИ НЕЙТРОНОВ СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ КОРОТКОЖИВУЩИХ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР НА СЕПАРАТОРЕ ВАСИЛИСА

*А. И. Свирихин<sup>а</sup>, М. Гупта<sup>б</sup>, А. В. Еремин<sup>а</sup>, И. Н. Изосимов<sup>а</sup>, А. В. Исаев<sup>а</sup>,  
А. Н. Кузнецов<sup>а</sup>, О. Н. Мальшев<sup>а</sup>, С. Мулинс<sup>в</sup>, А. Г. Попеко<sup>а</sup>, Е. А. Сокол<sup>а</sup>,  
М. Л. Челноков<sup>а</sup>, В. И. Чепигин<sup>а</sup>*

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

<sup>б</sup> Манипальский университет, Манипал, Карнатака, Индия

<sup>в</sup> Лаборатория ускорительных и прикладных наук, Кейптаун

С целью изучения множественности мгновенных нейтронов спонтанного деления детектирующая система сепаратора ВАСИЛИСА была дополнена сборкой из 54 <sup>3</sup>He-счетчиков нейтронов. Приведено техническое описание детектирующей системы, и представлены результаты экспериментов по изучению множественности нейтронов спонтанного деления <sup>252</sup>No и <sup>244,246</sup>Fm, полученные в ходе экспериментов в 2008–2010 гг.

For experiments aimed at the study of spontaneous fission of transfermium nuclei, improvements in the focal plane detector system of recoil separator VASSILISSA have been made. A neutron detector consisting of 54 <sup>3</sup>He-filled counters has been mounted around the focal plane detector chamber. The description of detection system and the results of experiments aimed at investigating the neutron multiplicity of neutron deficient isotopes of <sup>252</sup>No and <sup>244,246</sup>Fm are presented.

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

### ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть четно-четных изотопов тяжелых элементов ( $Z > 96$ ) распадается посредством спонтанного деления. До настоящего времени для большей части спонтанно делящихся изотопов этих элементов были экспериментально определены периоды полураспада, достаточно точно измерены полные кинетические энергии ТКЕ (Total Kinetic Energy) и (для нескольких изотопов) построены массовые и энергетические распределения осколков [1]. Однако множественность нейтронов спонтанного деления с высокой точностью была измерена только для долгоживущих изотопов из области кюрия и калифорния, а также для нескольких нейтронно-избыточных изотопов фермия [2]. Это объясняется тем, что в экспериментах использовались достаточно простые механические системы, осуществлявшие перенос исследуемых ядер к детекторам в течение нескольких секунд.

Между тем изучение множественности мгновенных нейтронов спонтанного деления имеет большое значение как с теоретической, так и с методической точек зрения. Для теории деления ядер важно, что количество нейтронов, испускаемое в процессе деления, непосредственно зависит от степени возбуждения осколков деления и таким образом играет важную роль в восстановлении энергетического баланса реакции. С другой стороны, среднее число нейтронов на один акт спонтанного деления является уникальной характеристикой ядра. Изучение зависимости этого числа от массы ядра может в значительной степени облегчить идентификацию сверхтяжелых ядер, получаемых как в off-line экспериментах, где выделенные химическим путем образцы помещаются внутрь детектора [3], так и в on-line экспериментах на пучках тяжелых ионов с использованием кинематических сепараторов.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Эксперименты проводились на электростатическом сепараторе ВАСИЛИСА [4], расположенном на выведенном пучке тяжелых ионов циклотрона У-400 (ЛЯР ОИЯИ). Сепаратор ВАСИЛИСА используется для экспериментов по синтезу и изучению свойств радиоактивного распада тяжелых ядер, получаемых в ядерных реакциях полного слияния. Исследуемые в экспериментах продукты реакций полного слияния (ядра отдачи) при помощи сепаратора отделяются от ионов первичного пучка и продуктов побочных ядер-

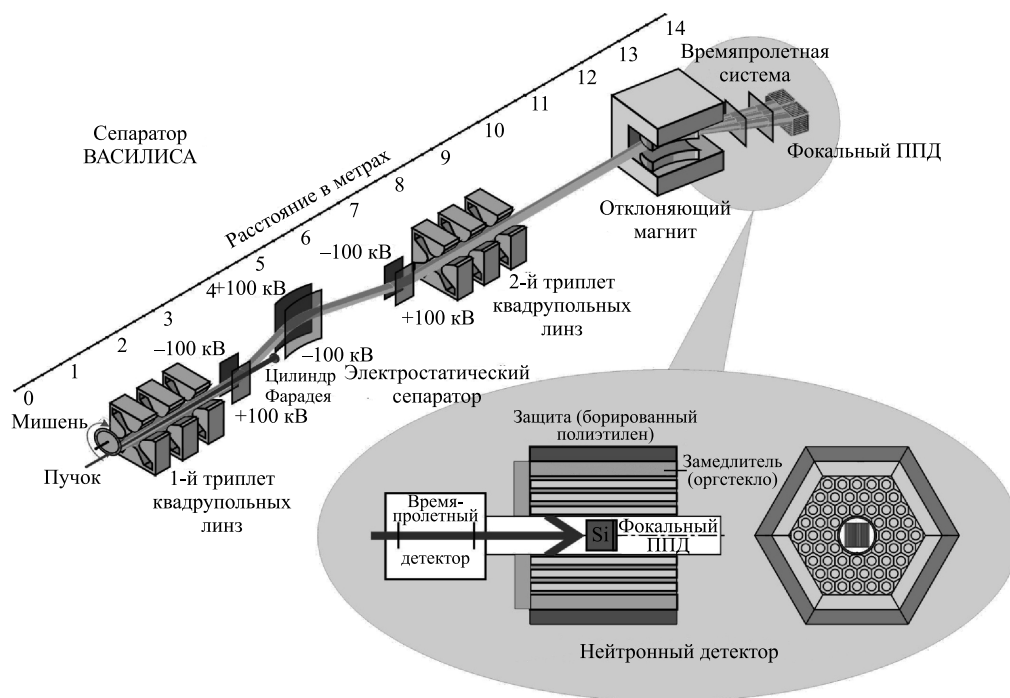


Рис. 1. Электростатический сепаратор ВАСИЛИСА и схема новой детектирующей системы

ных реакций, проходят через времяпролетный детектор и имплантируются в фокальный кремниевый детектор, где происходит регистрация как самих ядер отдачи, так и  $\alpha$ -частиц и осколков деления. Уникальные характеристики сепаратора позволяют проводить эксперименты по изучению свойств короткоживущих изотопов с периодом полураспада в несколько микросекунд. В 2008 г. детектирующая система сепаратора была модернизирована. Вокруг нового, компактного полупроводникового фокального детектора была смонтирована сборка из 54  $^3\text{He}$ -счетчиков нейтронов. Схема сепаратора ВАСИЛИСА и его детектирующей системы показана на рис. 1.

Времяпролетный детектор состоит из двух одинаковых («старт» и «стоп») широкоапертурных детектирующих модулей на базе микроканальных пластин [5]. После прохождения времяпролетных детекторов ядра отдачи вбиваются в сборку позиционно-чувствительных полупроводниковых детекторов в форме колодца [6]. Детекторная сборка состоит из пяти 16-стриповых полупроводниковых детекторов с размером чувствительной поверхности  $58 \times 58$  мм. У фокального детектора, в который вбиваются ядра отдачи, каждый стрип имеет резистивный слой, обеспечивающий позиционную чувствительность вдоль стрипа. Энергетическое разрешение для  $\alpha$ -частиц в диапазоне 6–10 МэВ, измеренное в тестовых экспериментах, составляет величину порядка 20 кэВ. Позиционное разрешение детектора около 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. Для уменьшения числа электронных каналов каждые четыре соседних стрипа боковых детекторов соединены между собой, и, кроме того, боковые детекторы не обладают позиционной чувствительностью.

Полупроводниковый детектор располагается в цилиндрической вакуумной камере с внутренним диаметром 120 мм. Для измерения количества нейтронов вакуумную камеру окружают три коаксиальных слоя  $^3\text{He}$ -счетчиков, расположенные таким образом, чтобы обеспечить как можно больший захват телесного угла вылета нейтронов (см. рис. 1). Поскольку эффективность регистрации нейтронов максимальна для нейтронов теплового энергетического диапазона, счетчики помещены в замедлитель из капролона.

Сигналы с быстрых выходов спектрометрических усилителей фокального ППД запускают схему опроса нейтронных счетчиков («окно» на 128 мкс), что позволяет достоверно измерять количество нейтронов, сопровождающих каждый акт деления. Сигналы от предусилителей, расположенных на торцах  $^3\text{He}$ -счетчиков, подаются на дискриминатор, с выхода которого на логические схемы поступают импульсы длительностью 150 нс. Разрешение временного счетчика для опроса детекторов нейтронов составляет 1 мкс. Снаружи сборка из счетчиков нейтронов окружена дополнительным замедлителем из плексигласа толщиной 5 см и защитой от внешних нейтронов из листов борированного полиэтилена толщиной 5 см. Счет фоновых нейтронов на весь нейтронный детектор при работе циклотрона У-400 составляет величину  $\sim 100$  нейтронов в секунду.

Для проверки совместной работы полупроводниковых детекторов и нейтронной сборки, а также для измерения эффективности регистрации нейтронов в условиях, максимально приближенных к эксперименту на пучке тяжелых ионов, на минимальном расстоянии от чувствительной области фокального полупроводникового детектора помещалась рамка с алюминиевой фольгой, на которую было нанесено небольшое количество спонтанно делящегося изотопа  $^{248}\text{Cm}$ . Интенсивность этого источника составляла 2–3 акта спонтанного деления в секунду. Для контроля над стабильностью электронной

системы и детекторов проверочные измерения проводились непосредственно до и после экспериментов на пучке. Эффективность нейтронного детектора, измеренная при помощи источника  $^{248}\text{Cm}$ , составляла величину от 36 до 39 %, в зависимости от настройки регистрирующей аппаратуры.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первый эксперимент на сепараторе с модернизированной детектирующей системой проводился в октябре 2008 г. Впервые измерялись выходы нейтронов спонтанного деления нейтронно-дефицитного ядра  $^{246}\text{Fm}$ , получаемого в реакции полного слияния ионов  $^{40}\text{Ar}$  с ядрами мишени  $^{208}\text{Pb}$  [7]. Ранее для этого изотопа были измерены период полураспада [8], ТКЕ и вероятность распада на основе спонтанного деления по сравнению с  $\alpha$ -распадом (branching ratio,  $b_{\text{SF}}$ ). В ходе десятидневного эксперимента для  $^{246}\text{Fm}$  было зарегистрировано 108 событий спонтанного деления и около 1000  $\alpha$ -распадов. Измеренный период полураспада составил величину  $T_{1/2} = (1,3 \pm 0,3)$  с (ранее опубликованные значения 1,1 с [8] и 1,2 с [9]). Вероятность распада посредством спонтанного деления составила  $b_{\text{SF}} = (5 \pm 3) \%$ , эта величина также хорошо согласуется с ранее измеренным значением  $b_{\text{SF}} = 8 \%$  [9].

Среднее число нейтронов на один акт спонтанного деления ядра  $^{246}\text{Fm}$  составило величину  $\bar{\nu} = 3,6 \pm 0,5$ . Для измеренного распределения нейтронов (рис. 2, *a*) при помощи метода статистической регуляризации [10] проводилась процедура восстановления реальной множественности нейтронов с учетом величины эффективности нейтронного детектора (в этом эксперименте она составляла  $\varepsilon = (36 \pm 1) \%$ ). Восстановленное распределение по множественностям нейтронов спонтанного деления  $^{246}\text{Fm}$  представлено на рис. 2, *б*. Для сравнения на рис. 2 также показано измеренное и восстановленное распределение нейтронов для тестового источника  $^{248}\text{Cm}$ .

В июле 2010 г. был проведен эксперимент, в котором измерялась множественность нейтронов спонтанного деления изотопа  $^{252}\text{No}$ . Ранее уже проводились эксперименты [11, 12], нацеленные на изучение множественности нейтронов спонтанного деления этого изотопа, но статистика была недостаточна для точного восстановления рас-

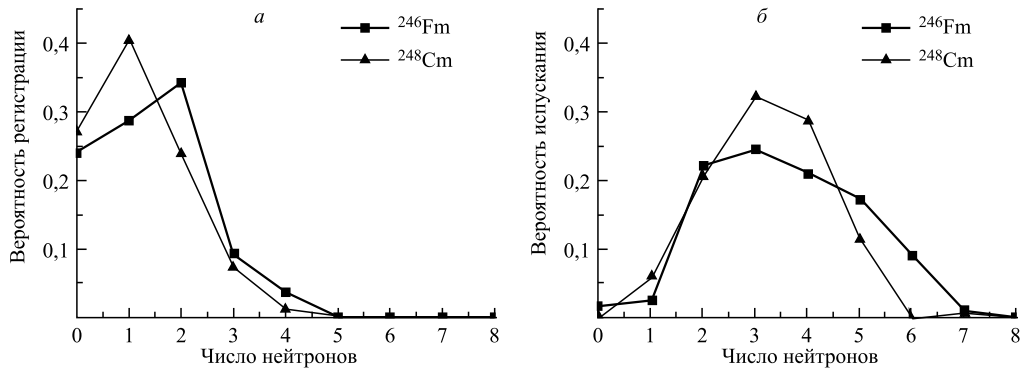


Рис. 2. Экспериментальная (*a*) и восстановленная (*б*) множественность нейтронов спонтанного деления  $^{246}\text{Fm}$

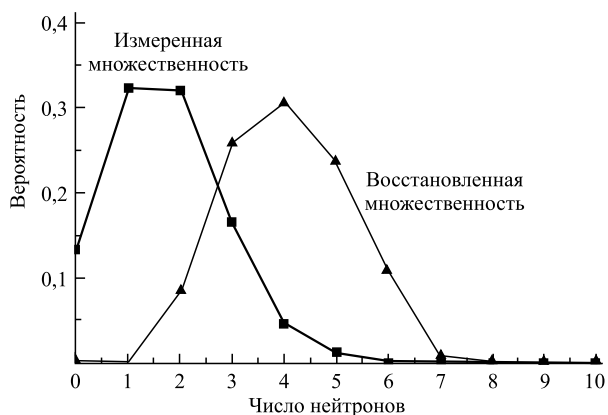


Рис. 3. Экспериментальная и вычисленная из нее реальная множественность нейтронов спонтанного деления  $^{252}\text{No}$

пределений. В описываемом эксперименте ядра  $^{252}\text{No}$  получали в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb} = 2n + ^{252}\text{No}$ . Сечение этой реакции составляет около 200 нб в максимуме функции возбуждения.

С мишенью провзаимодействовало  $1,7 \cdot 10^{17}$  ионов  $^{48}\text{Ca}$ , в результате за 1 сут облучения было зарегистрировано около 2000 актов спонтанного деления  $^{252}\text{No}$ . Это позволило нам с высокой точностью измерить распределения нейтронов по множественностям и протестировать работу всей детектирующей системы (рис. 3).

Величина среднего числа нейтронов на один акт спонтанного деления  $^{252}\text{No}$  составила  $\bar{\nu} = 4,06 \pm 0,09$ . Это значение хорошо согласуется с полученными ранее результатами  $\bar{\nu} = 4,43 \pm 0,45$  [11] и  $\bar{\nu} = 4,15 \pm 0,30$  [12].

На основе учета достаточно высокой статистики событий спонтанного деления  $^{252}\text{No}$ , а также опубликованных ранее данных [1, 13] полученное в эксперименте значение ТКЕ  $^{252}\text{No}$  было использовано для калибровки тракта осколков фокального полупроводникового детектора (рис. 4).

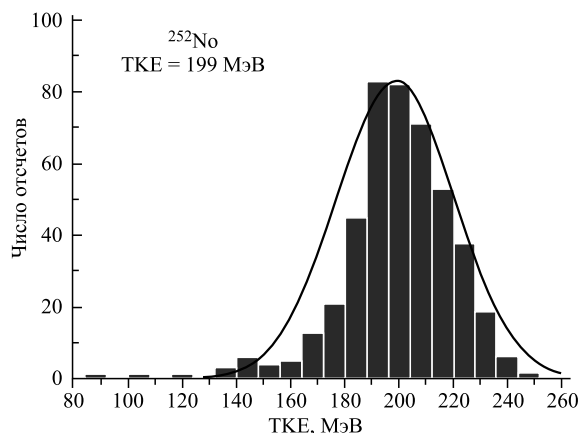


Рис. 4. Спектр ТКЕ  $^{252}\text{No}$ , полученный путем сложения амплитуды сигналов фокального и боковых полупроводниковых детекторов

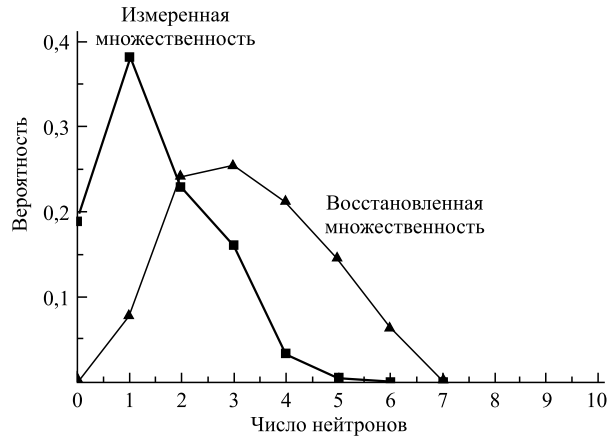


Рис. 5. Экспериментальная и восстановленная реальная множественность нейтронов спонтанного деления  $^{244}\text{Fm}$

Следующим был эксперимент по изучению свойств  $^{244}\text{Fm}$ , получаемого в  $2n$ -канале реакции слияния  $^{40}\text{Ag} + ^{206}\text{Pb}$ . Сечение реакции образования ядра отдачи составляет около 3 нб. Эксперимент продолжался 7 сут ( $1,6 \cdot 10^{18}$  ионов  $^{40}\text{Ag}$  на мишени), за это время были зарегистрированы 212 событий, которые относятся к спонтанному делению  $^{244}\text{Fm}$ .

Среднее число нейтронов на один акт спонтанного деления  $^{244}\text{Fm}$  измерялось впервые и составило  $\bar{\nu} = 3,3 \pm 0,3$ . Распределение нейтронов по множественностям показано на рис. 5.

Кроме того, для ядра  $^{244}\text{Fm}$  была оценена полная кинетическая энергия осколков, которая составила приблизительно  $(195 \pm 14)$  МэВ. Это значение рассчитывалось сложением амплитуды сигналов в фокальном и боковых детекторах и определялось с учетом калибровочных данных, полученных из ТКЕ  $^{252}\text{No}$  (рис. 4). Полученная величина хорошо согласуется с ранее опубликованными данными [8]. Как и в других работах [8, 14], не было зарегистрировано ни одного  $\alpha$ -распада, который можно было бы отнести к распаду ядра  $^{244}\text{Fm}$ , таким образом подтвердились данные о том, что этот изотоп распадается только через спонтанное деление.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе описанных экспериментов были получены уникальные данные о свойствах спонтанного деления изотопов из экзотической области нейтронно-дефицитных короткоживущих тяжелых ядер. Высокая эффективность установки и благоприятные фоновые условия, в которых находится модернизированный фокальный детектор, позволяют изучать тяжелые ядра с периодами полураспада более нескольких микросекунд.

Полученные результаты хорошо вписываются в существующие систематики и теоретические предсказания. Так, в работе [8] исходя из данных о ТКЕ и масс-асимметрии деления была сделана оценка величины  $\bar{\nu}$ , она составила  $(4 \pm 1)$  нейтрон на деление для изотопов  $^{244,246}\text{Fm}$ . На рис. 6 показана систематика зависимости среднего числа нейтронов спонтанного деления от атомной массы делящихся тяжелых ядер.

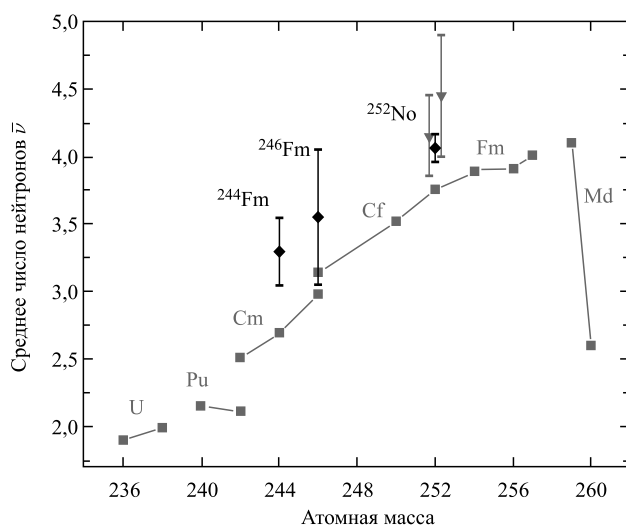


Рис. 6. Среднее число нейтронов на один акт спонтанного деления в зависимости от  $A$  и  $Z$  спонтанно делящегося изотопа. Результаты описываемых в данной работе экспериментов показаны ромбами, ранее опубликованные результаты для  $^{252}\text{No}$  обозначены треугольниками

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 08-02-00116-а и № 11-02-00490-а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hulet E. K.* Role of Second Barrier upon Mass Division in the Spontaneous Fission of the Heaviest Elements // *Yad. Fiz.* 1994. V. 57. P. 1165–1173.
2. *Hoffman D. C.* Spontaneous Fission Properties and Lifetime Systematics // *Nucl. Phys. A.* 1989. V. 502. P. 22–40.
3. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Synthesis of Elements 115 and 113 in the Reaction  $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$  // *Phys. Rev. C.* 2005. V. 72. P. 034611.
4. *Yeremin A. V. et al.* The Upgrade of the Kinematic Separator VASSILISSA — Experimental Results and Plans // *Phys. At. Nucl.* 2003. V. 66, No. 6. P. 1042–1052.
5. *Andreev A. N. et al.* Large Area High-Efficiency Time-of-Flight System for Detection of Low Energy Heavy Evaporation Residues at the Electrostatic Separator VASSILISSA // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1995. V. 364. P. 342–348.
6. *Malyshev O. N. et al.* Modernization of the Detector System at the Recoil Separator VASSILISSA // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2000. V. 440. P. 86–94.
7. *Svirikhin A. I. et al.* Neutron Multiplicity at Spontaneous Fission of  $^{246}\text{Fm}$  // *Eur. Phys. J. A.* 2010. V. 44. P. 393–396.
8. *Богданов Д. Д. и др.* Исследование энергетических характеристик спонтанного деления изотопов  $^{244,246}\text{Fm}$ . Препринт ОИЯИ Р15-81-706. Дубна, 1981.
9. *Hoffman D. C. et al.* Fragment Mass and Kinetic-Energy Distributions from Spontaneous Fission of the Neutron-Deficient Isotopes, 1.2-s  $^{246}\text{Fm}$  and 38-s  $^{248}\text{Fm}$  // *Phys. Rev. C.* 1980. V. 22. P. 1581–1584.

10. *Dakowski M. et al.* Reconstruction of Particle Multiplicity Distributions Using the Method of Statistical Regularization // Nucl. Instr. Meth. 1973. V. 113. P. 195–200.
11. *Lazarev Yu. A. et al.* Multiplicity of Prompt Neutrons from Spontaneous Fission of the Isotope  $^{252}\text{102}$  // Phys. Lett. B. 1974. V. 52. P. 321–324.
12. *Yeremin A. V. et al.* Neutron Detector at the Focal Plane of the Setup VASSILISSA // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 539. P. 441–444.
13. *Bemis C. E. et al.* Fragment Mass and Kinetic-Energy Distributions from Spontaneous Fission of  $^{252}\text{No}$  // Phys. Rev. C. 1977. V. 15. P. 705–712.
14. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Experiments on the Production of Fermium Neutron-Deficient Isotopes and New Possibilities of Synthesizing Elements with  $Z > 100$  // Nucl. Phys. A. 1975. V. 239. P. 353–364.

Получено 17 мая 2011 г.