

# ОНЛАЙНОВАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХАРАКТЕРИСТИК АТОМНЫХ ЯДЕР, ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ И РАДИОАКТИВНЫХ РАСПАДОВ

В.В. Варламов, С.Ю. Комаров, Н.Н. Песков

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова

## 1. Введение.

Настоящий доклад продолжает серию презентаций направлений научного сервиса в сети Интернет, развиваемых в сетевом центре [1] ядерных данных (<http://cdfc.sinp.msu.ru>) – Центре данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова. Он посвящен представлению интерактивной вычислительно-графической системы, предназначенной для оперативного и эффективного информационного обеспечения научных ядерно-физических исследований и соответствующего учебного процесса в области разнообразных характеристик как самих атомных ядер, так и процессов их превращения друг в друга в ядерных реакциях и радиоактивных распадах. Работы ЦДФЭ НИИЯФ МГУ по созданию и поддержанию подобных систем проводятся в рамках международной Сети Центров ядерных данных МАГАТЭ [2] и в разное время поддерживались грантами РФФИ (№№ 99-07-90015, 03-07-90431, 05-07-90329). Созданные системы активно используются в настоящее время в работах, предусмотренных исследованиями в рамках гранта РФФИ № 13-02-00124.

Как одна из главных задач научного сервиса может рассматриваться задача организации эффективного и удобного доступа исследователей и специалистов к данным и знаниям, накопленным ранее. В огромном ряду средств такого информационного обеспечения особое место занимают электронные базы фактографических данных, сочетающие свойства своеобразных «склады готовой продукции» и новых оригинальных средств собственн научных исследований. Огромные массивы информации современных электронных БД и гибкое программное обеспечение открывают перед пользователями практически неограниченные возможности поиска конкретных данных, позволяя подойти ко всей совокупности накопленных данных с единой точки зрения и впервые сформулировать к этой совокупности данных вопросы, для которых без этих возможностей не было никаких оснований. Ответы на такие вопросы, полученные впервые, представляют собой, по существу, новые данные, новую информацию, а в конечном счете — новое знание. Зачастую даже относительно простая системная обработка известных результатов обнаруживает (точнее — «выявляет») принципиально новую физическую информацию, которая ранее отсутствовала (по крайней мере, в явном виде). Прежде всего это относится к возможностям выявления неизвестных ранее систематических погрешностей результатов разных экспериментов, установлению неизвестных ранее закономерностей в таких результатах, получения точных и надежных данных на основе взаимной оценки результатов различных экспериментов с учетом их систематических погрешностей, возможностям оценки результатов экспериментов, которые не были (или не могут быть в принципе) проведены. На создании и поддержании таких БД уже много лет специализируется ЦДФЭ [1], сочетая такие формы их реализации обработки запросов, как традиционные с использованием запросных форм, графические, основанные на электронных картах и форм интерактивного калькулятора.

Именно в такой последней форме и реализована представляемая интерактивной вычислительно-графическая система характеристик атомных ядер, ядерных реакций и радиоактивных распадов.

## 2. Система интерактивных калькуляторов ядерно-физических характеристик.

Для расчета различных параметров атомных ядер, энергетических характеристик ядерных реакций и радиоактивных распадов ядер была реализована специальная компьютерная программа [3] — система интерактивных калькуляторов [[http://cdfc.sinp.msu.ru/services/calc\\_thr/calc\\_thr\\_ru.html](http://cdfc.sinp.msu.ru/services/calc_thr/calc_thr_ru.html)], состоящая из пяти поисковых форм, с помощью которых возможно получение современных данных [4] о наиболее востребованных характеристиках различных ядерно-физических процессов:

- «1. Энергии связи ядер»;
- «2. Энергии отделения нуклонов и ядер»;
- «3. Энергии распадов»;
- «4. Пороги и энергии реакций»;
- «5. Энергия деления».

В каждой поисковой форме присутствует кнопка «**Вычислить**», при нажатии которой появляется таблица, содержащая запрашиваемую числовую информацию.

Кроме того в первых трех (1, 2, 3) поисковых формах присутствуют кнопки «**Построить график**» и панель «**На оси абсцисс**», с помощью которых возможно воспроизвести в нужном виде графики зависимостей запрашиваемых величин от одного из выбранных чисел  $Z$ ,  $N$ ,  $A$ .

В двух последних формах (4, 5) эти кнопка и панель отсутствуют, поскольку при расчетах порогов и энергий реакций, а также энергий деления диапазон параметров не предусмотрен.

Ниже приведено несколько примеров того, каким образом разнообразная информация о свойствах атомных ядер и характеристиках ядерных взаимодействий может быть получена из анализа масс атомных ядер и использована при проведении ядерно-физических исследований.

### 2.1. Энергия связи ядра $E_{cb}(A,Z)$

Энергия связи ядра  $E_{cb}(A,Z)$  с массовым числом  $A$  и зарядом  $Z$  может быть выражена через массу ядра  $M(A,Z)$ , массу протона  $M_p$  и массу нейтрона  $M_n$ :

$$E_{cb}(A,Z) = [Z M_p + (A - Z) M_n - M(A,Z)] c^2.$$

Сравнение удельных энергий связи  $\epsilon(A,Z) = E_{cb}(A,Z)/A$  лёгких и тяжёлых ядер показывает энергетическую выгодность слияния легких ядер и деления тяжелых ядер. Эта информация даёт прекрасный иллюстративный материал при изучении вопросов деления тяжёлых ядер и ядерного нуклеосинтеза лёгких ядер. Более точные представления о величине энергии связи ядер можно получить, сравнивая различные сечения энергетической зависимости удельной энергии связи ядра  $\epsilon(A,Z)$  от массового числа  $A$ , числа нейтронов  $N$  в различных изотопах (ядрах с одинаковым значением  $Z$ ) или числа протонов  $Z$  в различных изотопах (ядрах с одинаковым значением  $N$ ).

1-я поисковая форма калькулятора – «1. Энергии связи ядер» позволяет рассчитывать для произвольного ядра или группы ядер следующие параметры:

- энергия связи ядра  $E_{cb}(A,Z)$ ;
- удельная энергия связи  $\epsilon(A,Z)$ ;
- разность  $d$  между энергией связи  $E_{cb}(A,Z)_{exp}$ , полученной экспериментально, и энергией связи  $E_{cb}(A,Z)_{theor}$  полученной с помощью формулы Вайцзеккера:

$$d(A,Z) = E_{cb}(A,Z)_{exp} - E_{cb}(A,Z)_{theor}$$

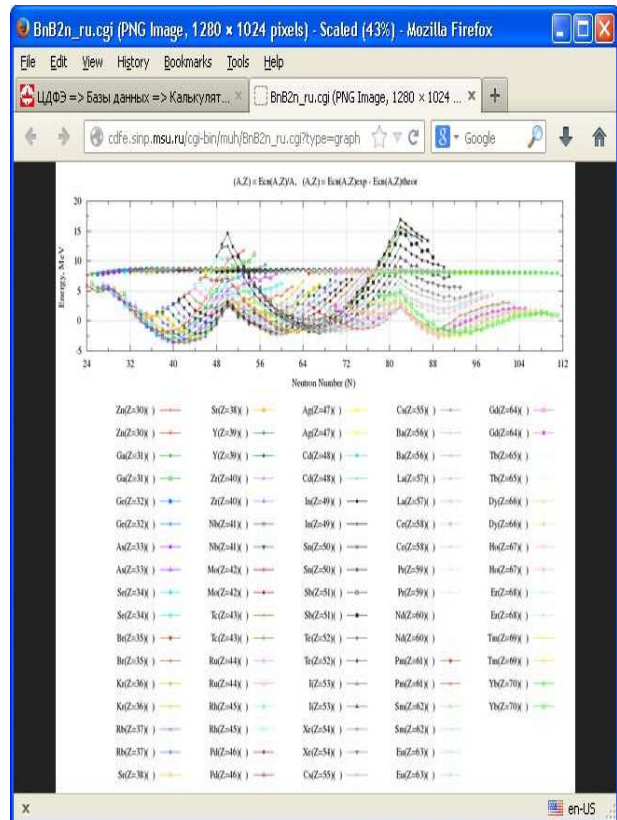
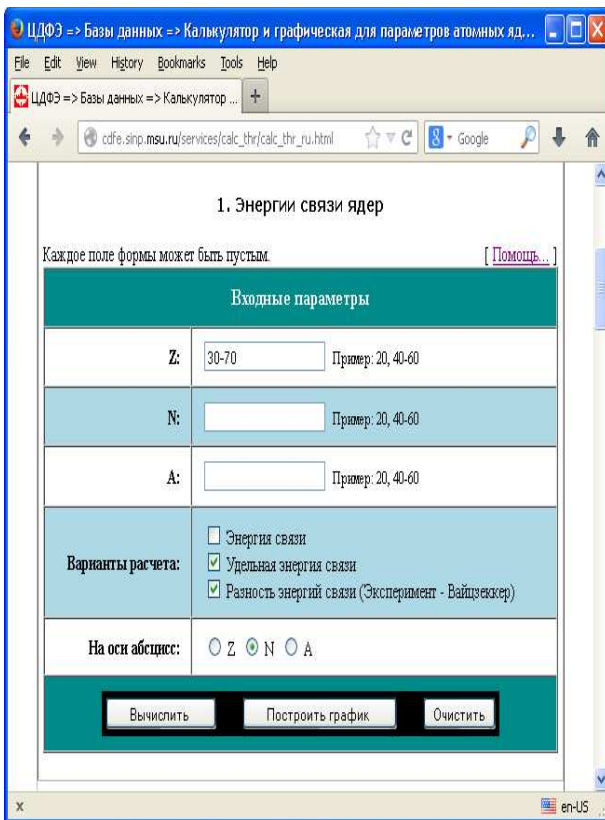


Рис. 1. Поисковая форма системы и полученные результаты для определения значений энергии связи  $d(A,Z)$  и  $\epsilon(A,Z)$ .

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что полученные результаты наглядно иллюстрируют явление возрастания величин  $d(A,Z)$  для магических чисел  $N = 50$  и  $82$ .

## 2.2. Энергии отделения нуклонов и ядер от ядра (A,Z)

Энергии отделения протонов  $B_p(A,Z)$  и нейтронов  $B_n(A,Z)$  от ядра  $(A,Z)$  могут быть выражены через массы ядра и нуклонов следующим образом:

$$B_p(A,Z) = [M(A-1, Z-1) + M_p - M(A,Z)]c^2 = E_{св}(A,Z) - E_{св}(A-1, Z-1)$$

$$B_n(A,Z) = [M(A-1, Z) + M_n - M(A,Z)]c^2 = E_{св}(A,Z) - E_{св}(A-1, Z)$$

Ядро перестаёт быть связанным и, следовательно, перестаёт существовать, когда энергия отделения нуклона становится меньше нуля ( $B_n < 0$ ,  $B_p < 0$ ), то есть тогда, когда существование ядра  $(A,Z)$  становится энергетически не выгодно.

Поисковая форма калькулятора «2. Энергии отделения нуклонов и ядер» представлена на Рис. 2 с примерами формирования запросных предписаний для определения энергий отделения в первом случае нейтрона и протона от различных изотопов ядра La с  $Z = 57$ , а во втором — двух нейтронов от нескольких ядер с нечетными значениями  $Z$ :

- «Входные параметры» - введено значение « $Z = 57$ »;
- «Варианты отделения» - введено значение « $n,p$ »;
- «Тип атомных ядер» - выбраны «Все ядра»;
- «На оси абсцисс» - по умолчанию оставлен вариант « $A$ » и
- «Входные параметры,  $Z$ » - введены значения «55, 57, 59, 61, 63, 65»;
- «Варианты отделения» - введено значение « $2n$ »;
- «Тип атомных ядер» - выбраны «Все ядра»;
- «На оси абсцисс» - по умолчанию выбран вариант « $A$ ».

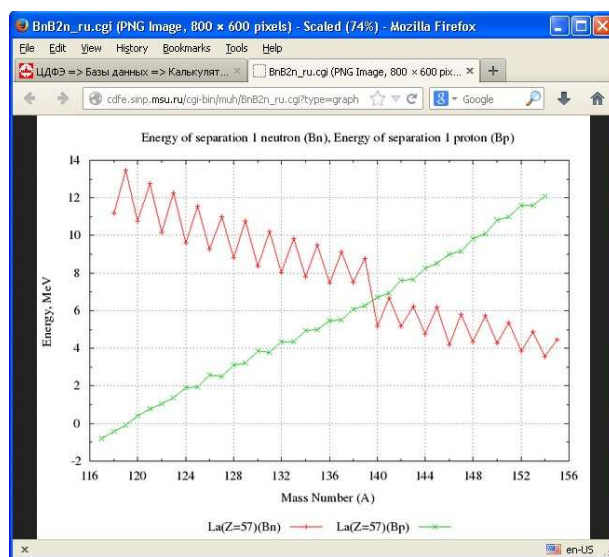
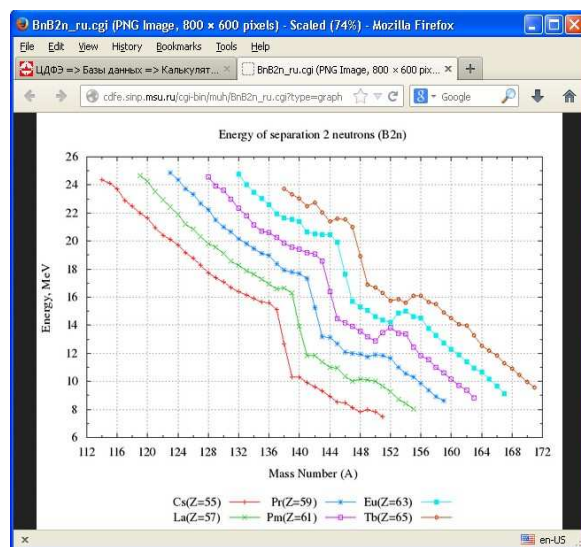



Рис. 2. Поисковые формы системы и результаты определения энергий отделения нейтрона и протона, а также двух нейтронов от разных ядер.

Полученные результаты наглядно иллюстрируют известные особенности в энергиях отделения двух нейтронов в ядрах, обладающих магическими свойствами — для всех исследованных ядер имеются характерные особенности в случаях ядер с магическим числом нейтронов  $N = 80$  ( $A = 55 + 80 = 135$ ,  $A = 57 + 80 = 137, \dots$ ,  $A = 65 + 80 = 145$ ).

Подобные зависимости относительно просто и наглядно позволяют выявлять определенные особенности в поведении энергий отделения одного и двух нуклонов, которые являются признаками, характерными для магических ядер. Наряду с другими признаками (большая (по сравнению с ее значениями для соседних ядер) энергия первого уровня со спином-четностью  $2_1^+$ , меньшая деформация и ряд других) такие особенности позволяют выявлять новые неклассические дважды магические ядра, у которых ни число протонов, ни число нейтронов не являются классическими магическими числами (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126). К настоящему времени таких новых неклассических магических ядер, магические свойства которых связаны с явлением протон-нейтронного спаривания) обнаружено достаточно много —  $^{14}\text{C}$ ,  $^{14,24,28,40,48}\text{O}$ ,  $^{30}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{S}$ ,  $^{54}\text{Ca}$ ,  $^{96}\text{Sr}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  [5].

### 2.3. Энергии распадов

Поисковая форма «3. Энергии распадов» калькулятора позволяет формировать запросные предписания на определение энергий радиоактивных распадов.

3. Энергии распадов

Энергии распадов рассчитаны на основании значений атомных масс по [следующим формулам](#). Каждое поле формы может быть пустым. [Помощь...]

Входные параметры

Z: 85, 87, 89, 91, 93 Пример: 20, 40-60

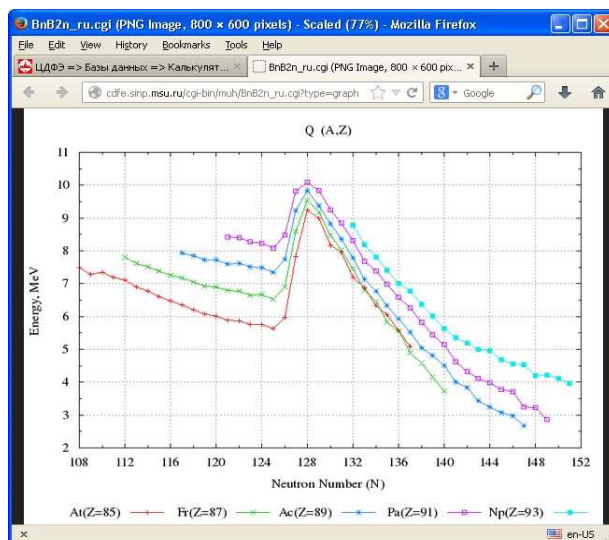
N: Пример: 20, 40-60

A: Пример: 20, 40-60

Тип распада:  $\alpha$  (альфа-распад),  $\beta^+$  (позитронный бета-распад),  $\beta^-$  (бета-распад),  $\epsilon$  (электронный захват)

На оси абсцисс:  Z  N  A

Вычислить Построить график Очистить



3. Энергии распадов

Энергии распадов рассчитаны на основании значений атомных масс по [следующим формулам](#). Каждое поле формы может быть пустым. [Помощь...]

Входные параметры

Z: 91-93 Пример: 20, 40-60

N: Пример: 20, 40-60

A: Пример: 20, 40-60

Тип распада:  $\alpha$  (альфа-распад),  $\beta^+$  (позитронный бета-распад),  $\beta^-$  (бета-распад),  $\epsilon$  (электронный захват)

На оси абсцисс:  Z  N  A

Вычислить Построить график Очистить

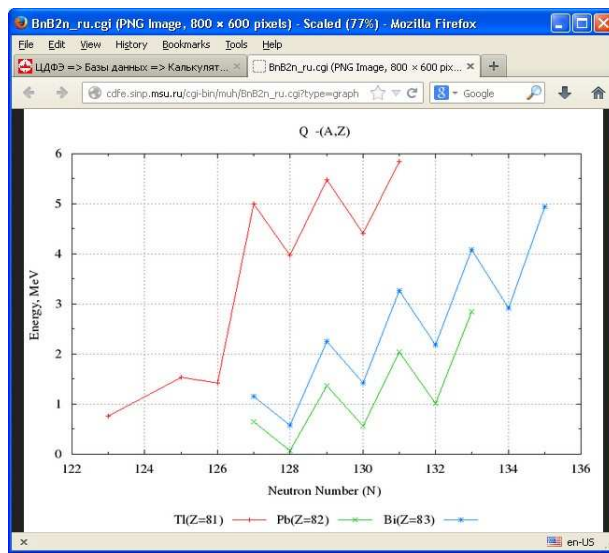


Рис. 3. Поисковые формы системы и результаты о определения энергий  $\alpha$ - и  $\beta^-$ -распадов.

Зависимость величины энергии  $\alpha$ -распада  $Q_\alpha(A,Z)$  от  $A$ ,  $Z$  и  $N$

$$Q_\alpha(A,Z) = [M(A,Z) - (M(A-4), Z-2) - M(4,2)]c^2$$

позволяет получить информацию об оболочечной структуре атомных ядер.

Поисковая форма «3. Энергии распадов» калькулятора представляет примеры формирования запросного предписания на определение энергий  $\alpha$ -распада:

- «Входные параметры» - введены значения « $Z = 85, 87, 89, 91, 93$ »;
- «Тип распада» - в меню выбрано значение “ $\alpha$  (альфа-распад)”.
- «На оси абсцисс» - выбран вариант “ $N$ ” и на определение энергий  $Q_{\beta^-}(A, Z)$   $\beta$ -распада нескольких ядер:
- «Входные параметры,  $Z$ » - заданы значения «81 – 83»;
- «Тип распада» - задано значение “ $\beta^-$  (бета-распад)”;
- «На оси абсцисс» - выбран вариант « $N$ ».

На приведенном Рис. 3 с результатами отчетливо проявляется известный эффект возрастания энергии  $\alpha$ -распада у всех ядер, обладающих магическим числом нейтронов  $N = 128$ .

#### 2.4. Пороги и энергии реакций

Поисковая система определения энергетических порогов и энергий реакций позволяет получить эти данные для любого ядра-мишени и любого количества и сочетания вылетающих нуклонов, а также и ядер-продуктов.

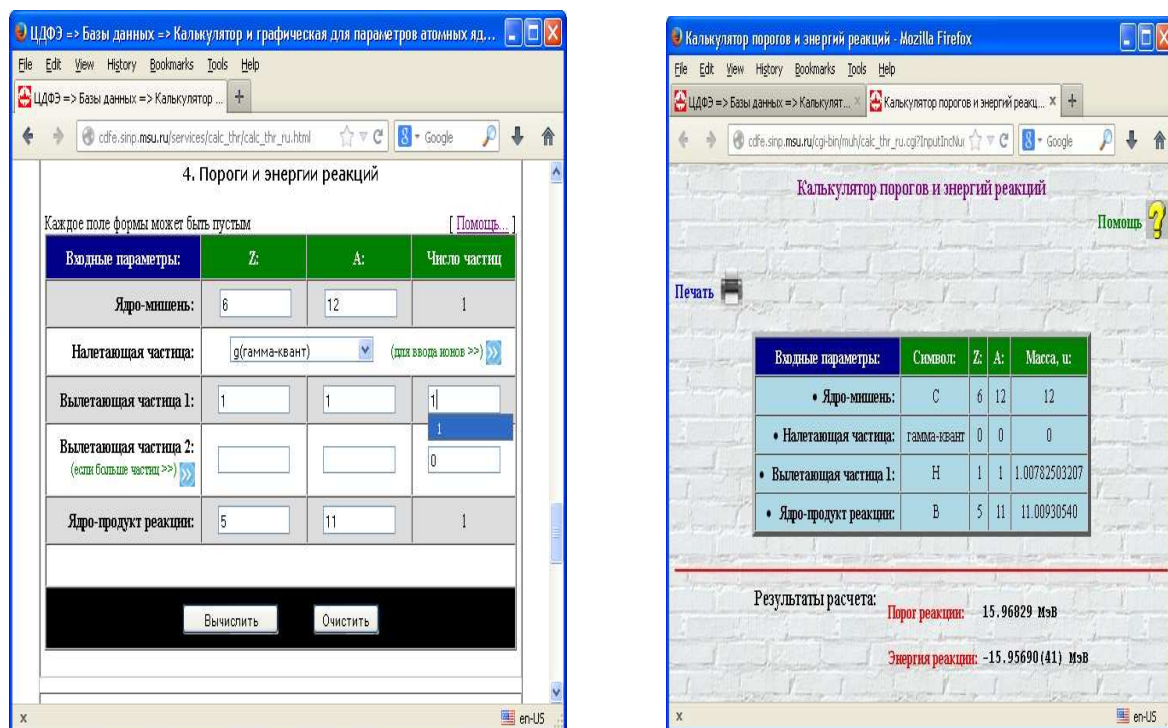


Рис. 4. Поисковые формы и результаты расчета порогов и энергий реакций и спонтанного деления.

#### 2.5. Энергии деления ядер.

Поисковая система по параметрам деления ядер позволяет рассчитать энергию процесса для любого сочетания фрагментов деления и любого числа сопровождающих процесс деления ядра нейтронов.

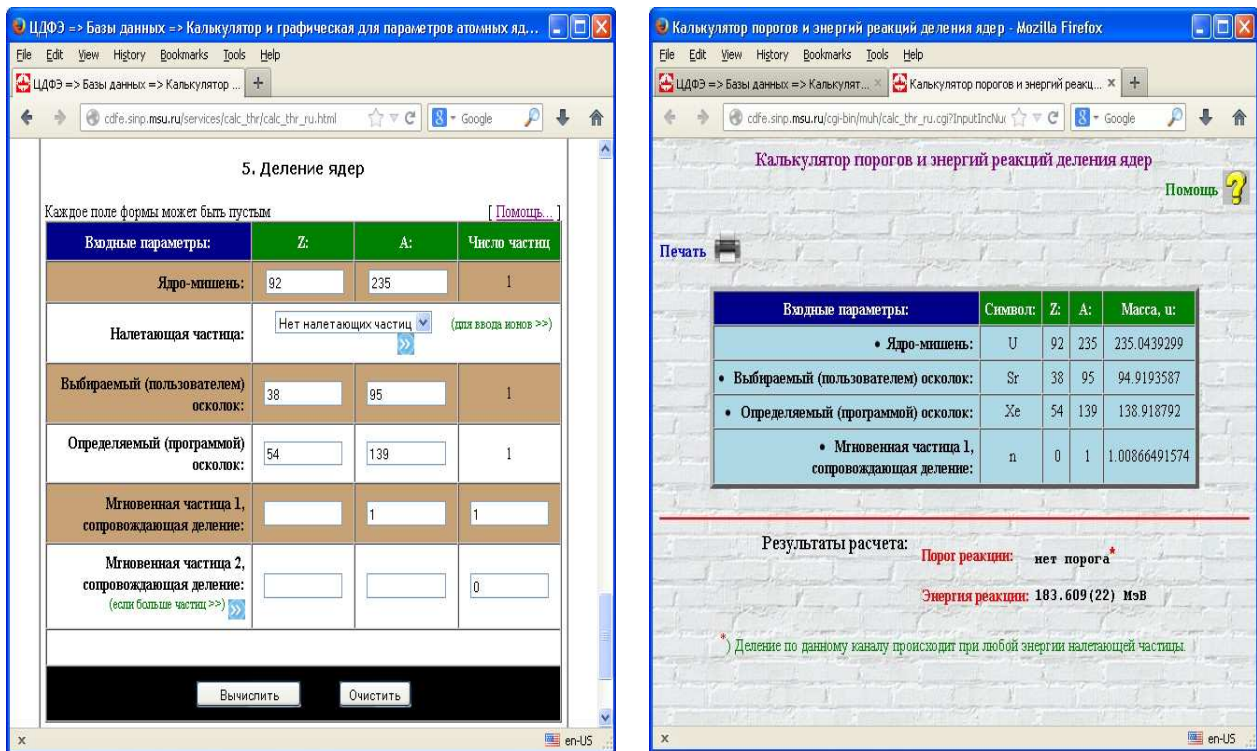


Рис. 5. Поисковые формы и результаты расчета порогов и энергий реакций деления и процессов и спонтанного деления ядер.

Конкретный пример, приведенный на Рис. 5 иллюстрирует расчет энергии и энергетического порога для процесса спонтанного деления ядра  $^{235}\text{U}$  (порог реакции отсутствует).

### 3. Заключение.

На основании международной систематики экспериментальной и расчетной информации о массах атомных ядер создан удобный и эффективный универсальный интерактивный калькулятор разнообразных характеристик ядер, функционирующий в среде Интернет. Широкие поисковые возможности 5 разделов системы позволяют получать запрошенные по конкретным запросам данные. Вычислительно-графическая система калькулятора предоставляет пользователю возможности получить рассчитанные данные как в табличном, так и графическом виде. Приведенные примеры показывают, каким образом современные БД — склады готовой продукции — позволяют эффективно исследовать  $Z$ -,  $N$ - и  $A$ -зависимости различных ядерно-физических характеристик атомных ядер и во многих случаях либо получать наглядные подтверждения проявления эффектов, многие из которых известны лишь теоретически, либо выявлять новые неизвестные ранее систематические закономерности.

Работы по созданию описанной и других аналогичных [1, 3, 6] информационных систем, функционирующих в Интернет, проводились в ЦДФЭ НИИЯФ МГУ, функционирующем в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер. Авторы выражают благодарность заведующему ОЭПВАЯ и кафедры Общей ядерной физики Физического факультета МГУ профессору Б.С. Ишханову за постановку задач и их практическое применение в учебном процессе.

Работы по созданию универсального интерактивного калькулятора, как и других баз ядерных данных ЦДФЭ НИИЯФ МГУ поддерживались грантами РФФИ (№№ 99—07—90015, 03—07—90431, 05—07—90329, 09—02—00368, 13—02—00124), грантом Президента РФ, грантами поддержки ведущих научных школ, различными контрактами.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, С.Ю. Комаров, Н.Н. Песков, М.Е. Степанов, В.В. Чесноков. Сетевой центр ядерно-физических данных НИИЯФ МГУ: научный сервис и научные исследования. Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет: многоядерный компьютерный мир. 15 лет РФФИ». Новороссийск, 24 – 29 сентября 2007 г. ISBN 978-5-211-05419-6. Издательство Московского университета, Москва, 2007, сс. 318 – 321
2. N. Otsuka, S. Dunaeva, "International Network of Nuclear Reaction Data Centres" // INDC(NDS)-0401, IAEA, Vienna, Austria, 2010

3. В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, С.Ю. Комаров. Атомные ядра. Основные характеристики. Учебное пособие. ISBN 978-5-91304-145-6. –М, «Университетская книга», 2010
4. Nuclear Wallet Cards (current version), USA National Nuclear Data Center – NNDC,
5. URL: <http://www.nndc.bnl.gov/wallet/wccurrent.html>
6. И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, С.Ю. Комаров, Е.А. Романовский. Известия РАН, серия физическая, 72, №3 (2008) 308 – 314
7. В.В. Варламов, Н.Н. Песков, М.Е. Степанов. Базы данных в научном сервисе — от известного к новому. Труды Международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма». Сборник трудов (23 – 28 сентября 2013 г., г. Новороссийск). –М., Изд-во МГУ, 2013, сс. 489 - 495