

ПРОЕКТ DERICA: DUBNA ELECTRON-RADIOACTIVE ISOTOPE COLLIDER FACILITY

*Л. В. Григоренко*¹ от имени коллаборации DERICA

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Изучение радиоактивных изотопов (РИ) является сегодня магистральным направлением развития ядерной физики низких энергий. В данной работе рассматривается концепция и научный план перспективного ускорительно-накопительного комплекса для исследования РИ, предлагаемого в качестве международного мегапроекта на базе Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований [1]. Изложена мотивация нового проекта, и даны краткие характеристики комплекса по производству РИ, которые по ряду направлений сопоставимы с характеристиками передовых мировых центров — «фабрик РИ». В проекте делается акцент на исследованиях короткоживущих РИ в накопительных кольцах. Уникальной особенностью проекта является возможность изучения взаимодействий электронов с РИ в коллайдерном эксперименте с целью определения фундаментальных свойств ядерной материи — электромагнитных формфакторов экзотических ядер.

Studies with the radioactive ion beams (RIBs) is the most intensively developing field of low-energy nuclear physics. In this paper, the concept and the scientific agenda of prospective accelerator and storage ring facility for the RIB research are proposed for the large-scale international project based at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research. The motivation for the new facility is discussed, and its characteristics are briefly presented, which are comparable to those of the advanced world centers, the so-called “RIB factories”. In the project the emphasis is made on the studies with the short-lived RIBs in storage rings. A unique feature of the project is the possibility to study the electron-RI interactions in the collider experiment for determination of fundamental properties of the nuclear matter, in particular, electromagnetic form factors of exotic nuclei.

PACS: 29.38.-c; 25.30.-c

ВВЕДЕНИЕ

Свойства, строение и превращения атомных ядер являются центральными объектами исследований фундаментальной науки — ядерной физики. Всеобъемлющее понимание структуры атомных ядер необходимо для описания и предсказания астрофизических процессов, включая нуклеосинтез, развития методов отображения разнообразных явлений, в которых ядерная структура играет ключевую роль. Значительный прогресс в этом

¹E-mail: lgrigorenko@yandex.ru

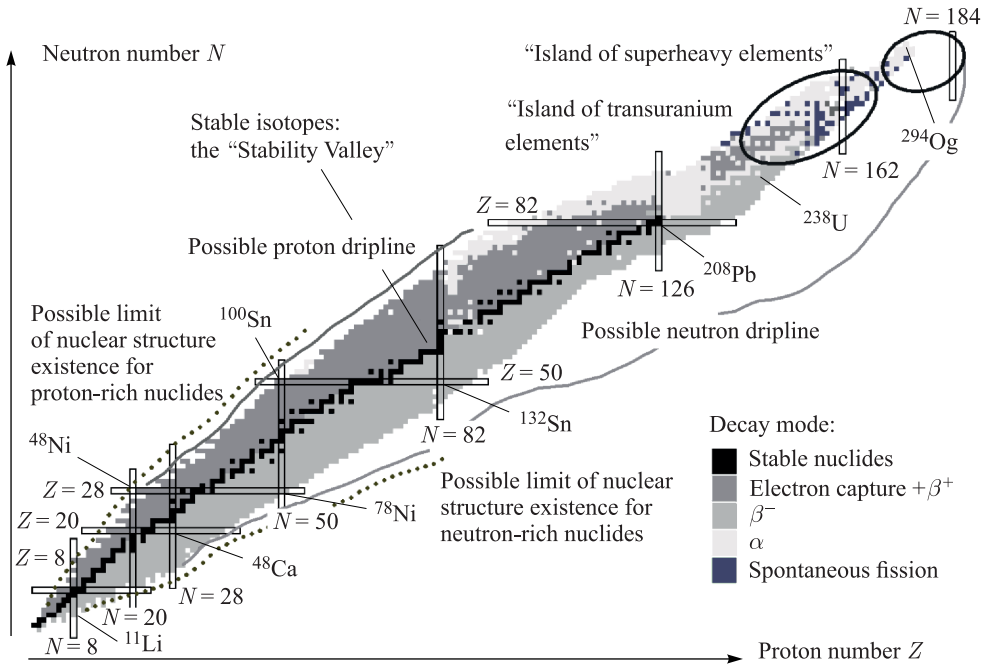


Рис. 1. Иллюстрация глобальных структур на карте нуклидов по материалам [2]. Карта нуклидов является аналогом таблицы Менделеева для ядерной физики. В атомной физике основные закономерности связаны с систематикой заполнения атомных орбиталей электронами. В ядерной физике аналогичные зависимости связаны с заполнением ядерных орбиталей для двух типов частиц — протонов и нейтронов. Горизонтальные и вертикальные полосы соответствуют магическим числам по протонам Z и нейтронам N (согласно оболочечной модели ядра)

направлении уже достигнут, но мы еще далеки от достижения данной цели. За всю историю существования ядерной физики были синтезированы свыше трех тысяч радиоактивных изотопов (РИ). По различным теоретическим оценкам возможно существование еще от 2000 до 3000 изотопов, которые ранее не наблюдались и не исследовались (см. рис. 1). Таким образом, у нас пока нет ответа даже на основополагающий вопрос ядерной физики о положении границы ядерной стабильности на большей части карты нуклидов. Положение границы ядерной стабильности известно для легких ядер ($Z < 32$ или $N < 20$), но даже здесь наши знания почти не распространяются за границу ядерной стабильности, и, таким образом, у нас нет ответа на важнейший вопрос — где находятся пределы существования ядерной структуры на карте нуклидов?

Для решения этих и других фундаментальных проблем необходимо изучение нестабильных изотопов, синтезируемых в лабораторных условиях. По этой причине строительство «фабрик РИ» на данный момент является важным для развития ядерной физики низких энергий. Анализ ситуации показывает, что одно из наиболее важных и перспективных направлений — создание кольцевых накопительных комплексов РИ с задачей-максимум исследования свойств экзотических ядер в коллайдерных эксперимен-

тах по их столкновению с электронами — не вошло в реализуемые на сегодня проекты строительства всех современных фабрик РИ. Очевидно, развитие этого направления способно принести отечественной и мировой науке важнейшие результаты при сравнительно скромном бюджете.

КОНЦЕПЦИЯ И НАУЧНАЯ ПРОГРАММА ПРОЕКТА DERICA

В концепции проекта DERICA [1] РИ, отобранные фрагмент-сепаратором DFS (DERICA Fragment Separator, рис. 2), останавливаются в газовой ячейке, аккумулируются в ионной ловушке и передаются ионному источнику (система gas cell – ion trap – ion source/charge breeder), формирующему максимально высокое зарядовое состояние для дальнейшего эффективного ускорения. Предполагается использование линейного ускорителя LINAC-30 с энергией ~ 30 МэВ/нуклон. Для ряда задач требуются более высокие энергии, и для этих целей повышение энергии ионов от ~ 30 до ~ 300 МэВ/нуклон будет проходить достаточно быстро при помощи бустера — синхротрона с максимальным темпом изменения магнитного поля FRR (Fast Ramping Ring). В зависимости от схемы постускорения (только LINAC-30 или LINAC-30 + FRR) время до инжекции в экспериментальное кольцо CR будет составлять 0,1–1,0 с. Концепция DERICA по сравнению

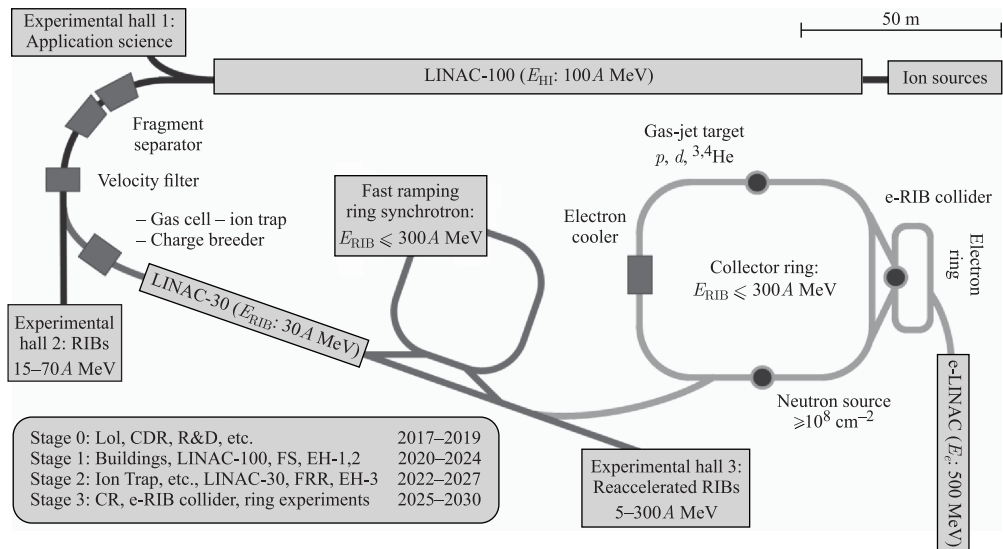


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Концепция проекта DERICA, стадии 2–4. Цвета пучковых линий показывают разные этапы проекта. На первом этапе развития проекта исследования могут вестись в экспериментальных зонах 1 (прикладные исследования на стабильных пучках 25–100 МэВ/нуклон) и 2 (исследования прямых реакций с РИ на промежуточных энергиях 20–70 МэВ/нуклон). На втором этапе высококачественные пучки РИ в широком диапазоне значений энергии (5–300 МэВ/нуклон) доступны в экспериментальной зоне 3. На третьем этапе добавляются три экспериментальные зоны на кольце CR

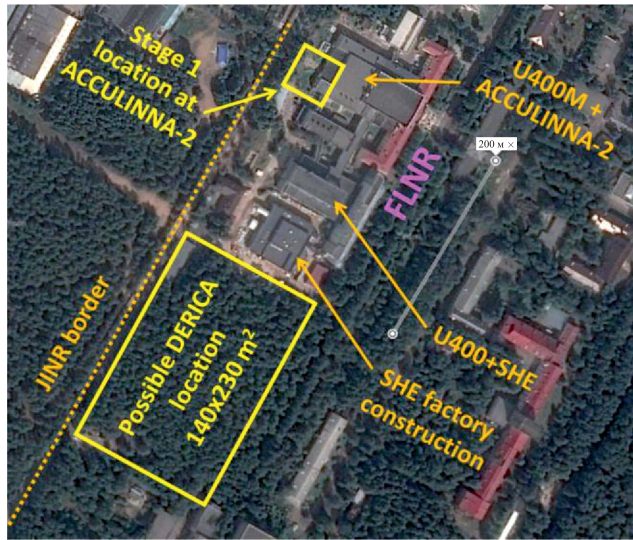


Рис. 3. Предполагаемое место размещения новой лаборатории на территории ОИЯИ около Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова. Стрелки показывают расположение основных объектов ЛЯР: циклотрон U-400 (программа синтеза сверхтяжелых элементов), циклотрон U-400M (программа исследования легких РИ на установке ACCULINNA-2), строящееся здание фабрики сверхтяжелых элементов

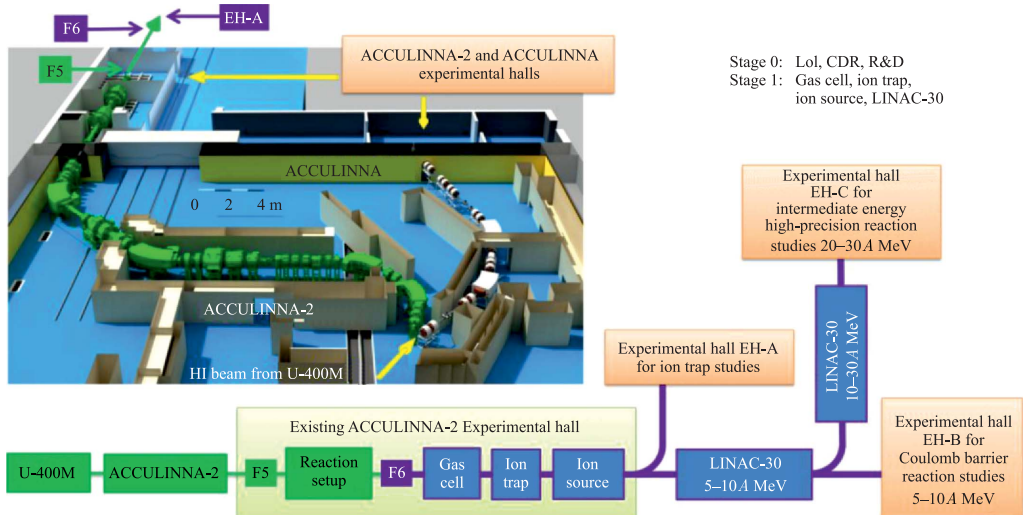


Рис. 4. Концепция проекта DERICA, стадии 0–1. Система gas cell–ion trap–ion source/charge breeder и ускоритель LINAC-30 монтируются в зоне F6 существующего фрагмент-сепаратора ACCULINNA-2, делая возможным проведение НИОКР и экспериментов уже на ранней стадии проекта

с ранее предложенными подходами дает существенный выигрыш по времени, протекающему до начала измерений, что может быть критично для исследования короткоживущих РИ ($T_{1/2} < 1-5$ с).

Базовые компоненты DERICA предполагается расположить на свободной территории ОИЯИ (рис. 3). Предусматривается план поэтапной реализации проекта (рис. 2 и 4): для проведения НИОКР и экспериментов стадии 1 будет использован недавно построенный в ЛЯР ОИЯИ при ускорителе U-400М фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2 [3, 4]. Использование существующей научной инфраструктуры ЛЯР ускорит и технически «обезопасит» проект, так как позволит отработать ключевые технологии формирования и постускорения РИ.

Задачей-максимум проекта DERICA является измерение зарядовых формфакторов РИ [5] и, в частности, определение их зарядовых радиусов (рис. 5 и 6). Кроме того, реализация проекта откроет исключительные возможности для передовых исследований в других областях современной ядерной и атомной физики. Кратко упомянем синтез новых изотопов, измерение масс и времен жизни новых ядер, изучение структуры и радиоактивных распадов экзотических ядер и резонансов, измерение сечений для астрофизики, получение тяжелых ядер, изучение барьеров деления и атомно-физические исследования с почти полностью ободранными ионами. Особенностью проекта являются широкие возможности экспериментов с постускоренными пучками РИ как на фиксированной мишени (экспериментальная зона 3), так и в накопительном кольце CR. При этом для экспериментов будут доступны три физических важных диапазона значений энергии: а) $E_{\text{RIB}} \sim 5-10$ МэВ/нуклон — околобарьерные и резонансные реакции, б) $E_{\text{RIB}} \sim 20-30$ МэВ/нуклон — прямые реакции при промежуточных энергиях (срыв, передача, подхват и т. д.), в) $E_{\text{RIB}} \sim 100-300$ МэВ/нуклон — прямые реакции при высоких энергиях (срыв, упругое, квазисвободное рассеяние и т. д.). Стадийность проекта DERICA (см. рис. 2 и 4) предусматривает появление новых возможностей для фундаментальных и прикладных исследований каждые 3-5 лет по мере ввода подсистем в эксплуатацию.

На стадии 0 полностью формулируется научная программа и выполняются НИОКР.

На стадии 1 (см. рис. 4) оборудование системы gas cell–ion trap–ion source/charge breeder размещается на участке F6 установки ACCULINNA-2 и вводится в строй система постускорения РИ на основе ускорителя LINAC-30. Эксперименты с РИ в электромагнитных ловушках и изучение реакций с высококачественными постускоренными пучками РИ с энергиями в двух диапазонах 5–10 и 20–30 МэВ/нуклон.

На стадии 2 (ввод LINAC-100, DFS, см. рис. 2) появляется возможность исследования реакций с РИ при промежуточных энергиях (20–70 МэВ/нуклон) на экспериментальной площадке ЕН-2. Ожидается, что в данном энергетическом диапазоне интенсивность пучков РИ будет рекордной среди фабрик РИ в мире.

На стадии 3 (см. рис. 2) оборудование системы gas cell–ion trap–ion source/charge breeder перемещается с установки ACCULINNA-2 на DFS и строится синхротрон FRR. На площадке ЕН-3 становятся доступны высококачественные постускоренные пучки РИ с энергией, свободно варьруемой в диапазоне 5–300 МэВ/нуклон.

На стадии 4 (CR) эксперименты можно проводить в трех независимых экспериментальных зонах на кольце CR, в том числе на электрон-ионном коллайдере.

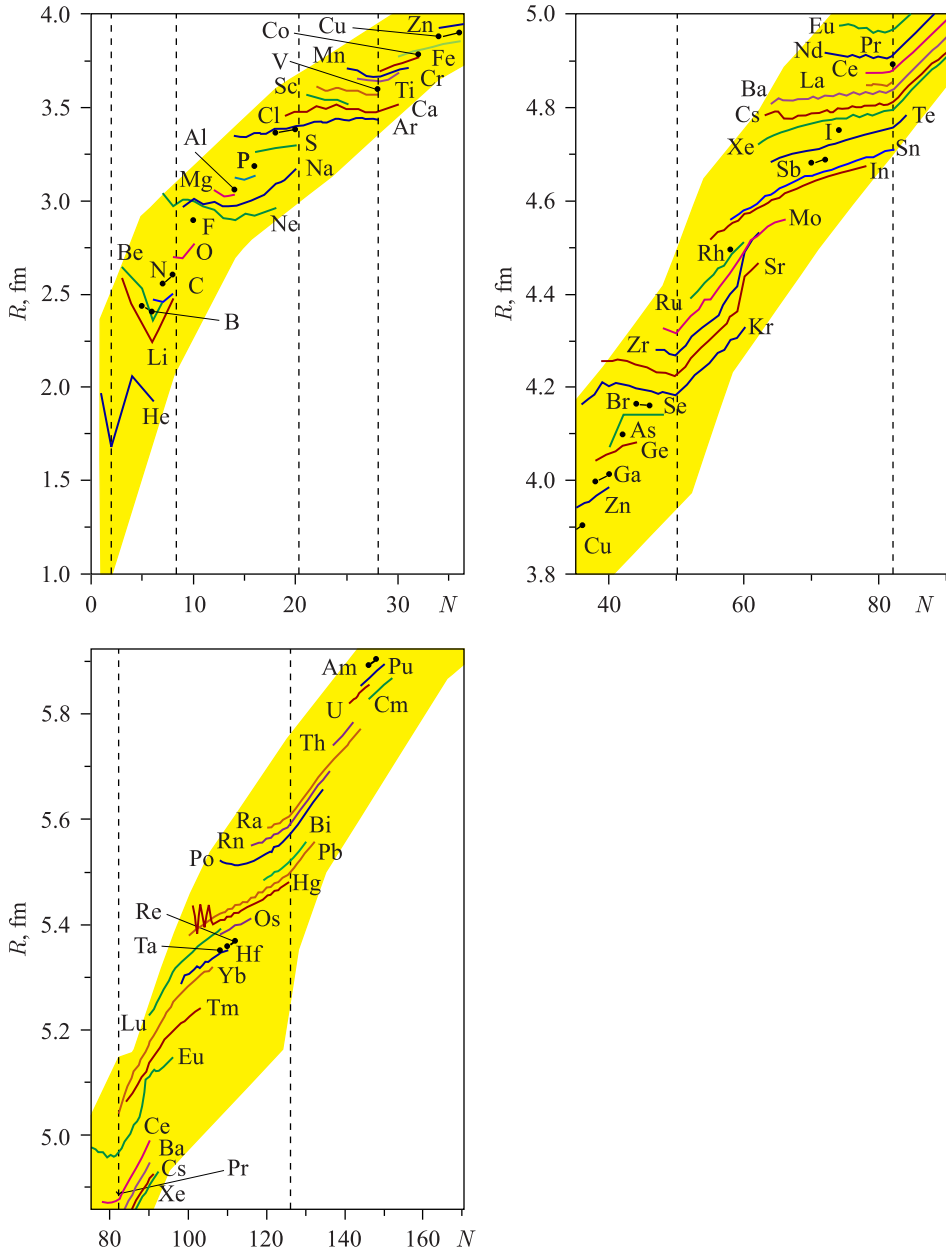


Рис. 5. Статус исследования зарядовых радиусов ядер по материалам [6]. На сегодня измерены зарядовые радиусы примерно 900 изотопов из порядка 3100 известных. Закрашенная область соответствует диапазону ядерно-стабильных изотопов по оценкам работы [7] в предположении, что радиусы ядер ведут себя как $\sim A^{1/3}$. Хорошо видны «неравномерность» доступной информации в зависимости от изотопа и сложные эффекты ядерной структуры в зависимости от N

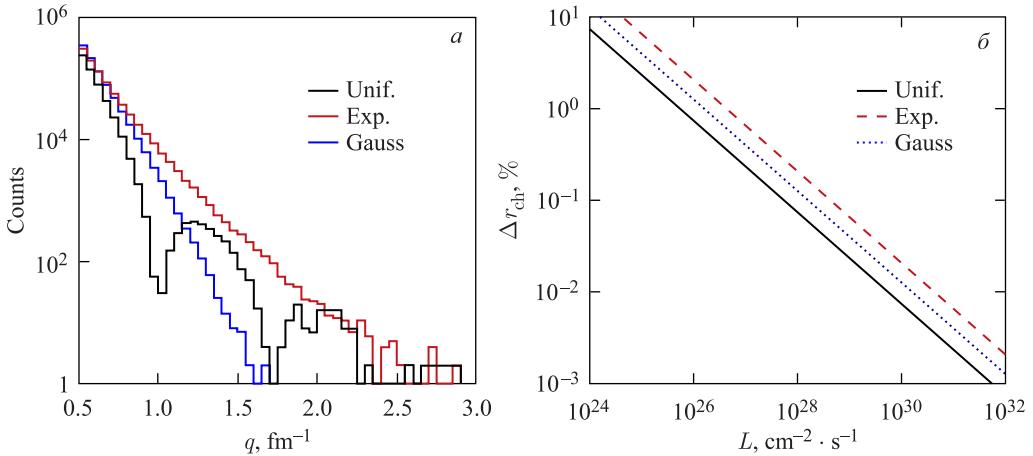


Рис. 6. Моделирование Монте-Карло выходов упругого e - ^{48}Ca -рассеяния для трех модельных зарядовых распределений: однородного шара, гауссианы и экспоненты (а), и точность определения зарядового радиуса ядра ^{48}Ca в коллайдерном эксперименте как функция светимости (б). Эксперимент продолжительностью 10 сут при реалистической эффективности всей установки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение радиоактивных изотопов является сегодня одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений ядерной физики низких энергий. Реализация проекта DERICA позволит создать в ОИЯИ мощный ускорительно-накопительный комплекс, не только входящий в число мировых лидеров изучения РИ по ряду параметров, но и предоставляющий уникальные научные возможности специалистам из России, стран-участниц ОИЯИ и зарубежным партнерам. Задачей-максимум проекта и одной из таких уникальных в мировом масштабе возможностей должна стать программа исследования свойств экзотических ядер в коллайдерных экспериментах по столкновению электронов и радиоактивных изотопов. Проект DERICA направлен также на решение весьма широкого круга задач современной ядерной, атомной и прикладной физики [1]. Россия принимает значительное участие в международном проекте FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) создания передовой фабрики РИ в Германии [8]. Однако видится необходимым также создание и поддержание полноценной инфраструктуры передовых исследований РИ непосредственно у нас в стране.

Благодарности. Автор выражает благодарность РНФ (грант №17-12-01367) за частичную поддержку данной работы. Автор признателен за важные комментарии к тексту статьи и вклад в развитие данного проекта в целом Ю. Ц. Оганесяну, С. Н. Дмитриеву, И. Н. Мешкову, Е. Ю. Никольскому, Г. М. Тер-Акопяну, А. С. Фомичеву и Б. Ю. Шаркову. Расчеты рис. 6 предоставлены П. Г. Шаровым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DERICA Project: <http://aculina.jinr.ru/derica.php>
2. National Nuclear Data Center: <http://www.nndc.bnl.gov>

3. *Grigorenko L., Fomichev A., Ter-Akopian G. M.* Light Exotic Nuclei at JINR: ACCULINNA and ACCULINNA-2 Facilities // *Nucl. Phys. News.* 2014. V. 24. P. 22–27.
4. *Григоренко Л. В. и др.* Исследования легких экзотических ядер вблизи границы стабильности в ЛЯР ОИЯИ // *УФН.* 2016. Т. 186. С. 337–386.
5. *De Vries H., De Jager C. W., De Vries C.* Nuclear Charge-Density-Distribution Parameters from Elastic Electron Scattering // *At. Data Nucl. Data Tables.* 1987. V. 36. P. 495–536.
6. *Angeli I., Marinova K. P.* Table of Experimental Nuclear Ground State Charge Radii: An Update // *At. Data Nucl. Data Tables.* 2013. V. 99. P. 69–95.
7. *Erler J. et al.* The Limits of the Nuclear Landscape // *Nature.* 2012. V. 486. P. 509–512.
8. *Фортвов В. Е., Шарков Б. Ю., Штокер Х.* Научная программа в новом международном центре фундаментальной физики — Европейском центре антипротонных и ионных исследований FAIR // *УФН.* 2012. Т. 182. С. 621.