

ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ЛЕГКИХ ЯДЕР В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ ДО 2,2 МэВ НА УСКОРИТЕЛЕ-ТАНДЕМЕ VITA

*М. И. Бикчурина, Т. А. Быков, Д. А. Касатов,
Я. А. Колесников, А. М. Кошкарёв, Г. М. Остреинов,
С. С. Савинов, Е. О. Соколова, А. А. Шуклина,
С. Ю. Таскаев**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

На ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией VITA с применением альфа-, гамма- и нейтронных спектрометров измерены параметры ядерных реакций $p + \text{Li}$, $d + \text{Li}$, $p + \text{B}$ и $d + \text{B}$ при энергии ионов до 2,2 МэВ: выход частиц, сечение реакции, пути распада, угловое и энергетическое распределение продуктов. Дается краткое описание установки, представляются и обсуждаются результаты проведенных исследований, декларируются планы.

The following parameters of nuclear reactions $p + \text{Li}$, $d + \text{Li}$, $p + \text{B}$ and $d + \text{B}$ at ion energies up to 2.2 MeV were measured at the vacuum-insulated tandem accelerator VITA using alpha, gamma and neutron spectrometers: particle yield, reaction cross section, decay path, angular and energy distribution of products. The paper provides a brief description of the facility, presents and discusses the results of the research, and declares the plans.

PACS: 29.20.Ba; 29.50.+v

ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН для бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей (БНЗТ) [1] предложен и разработан ускорительный источник нейтронов VITA [2–4], обеспечивающий получение терапевтического пучка нейтронов, в наибольшей степени удовлетворяющий требованиям БНЗТ. Ускорительным источником нейтронов VITA-II α оснащен центр БНЗТ в г. Сямынь (Китай), в котором с 9 октября 2022 г. приступили к проведению клинических испытаний методики БНЗТ, что сделало Китай второй страной в мире, освоившей новую методику лечения. Ускорительным источником нейтронов VITA-II β скоро оснастят НМИЦ онкологии им. Н. Н. Блохина в Москве для того, чтобы

* E-mail: taskaev@inp.nsk.su

с 2025 г. приступить к проведению клинических испытаний методики БНЗТ в Российской Федерации. Установку VITA на площадке ИЯФ СО РАН используют для развития средств и методов дозиметрии для БНЗТ, для тестирования новых препаратов адресной доставки бора, для лечения крупных домашних животных со спонтанными опухолями, для радиационного тестирования перспективных материалов и для измерения параметров ряда ядерных реакций, важных для БНЗТ, термоядерного синтеза и других приложений.

Представлено краткое описание используемой установки, обоснована важность измерения параметров ряда ядерных реакций и приведены результаты исследований.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследование проведено на ускорительном источнике нейтронов VITA, включающем в себя ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для получения стационарного пучка протонов или дейтронов, литиевую мишень для генерации нейтронов и ряд систем формирования пучка нейтронов различного энергетического диапазона. Установка оснащена современным диагностическим оборудованием, включая γ -, α - и нейтронные спектрометры и дозиметры. Схема установки приведена на рис. 1.

Получаемый пучок ионов отличается высокой монохроматичностью и стабильность энергии — 0,1 %, высокая стабильность тока — 0,4 %,

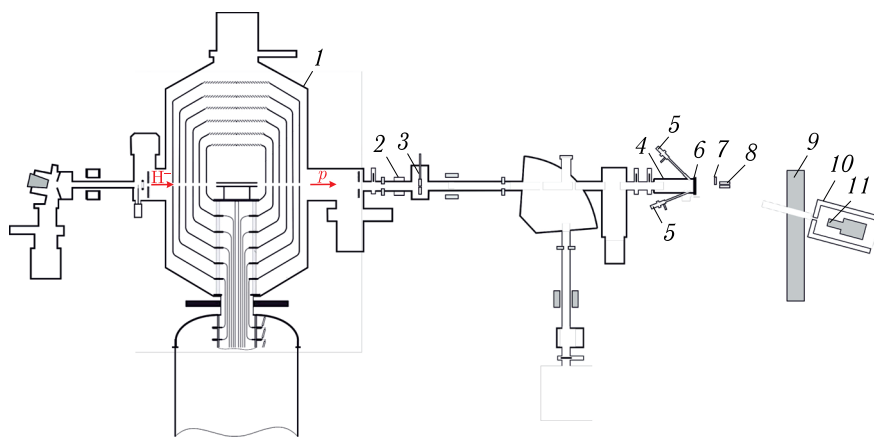


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией; 2 — бесконтактный датчик тока; 3 — выдвижной охлаждаемый коллиматор; 4 — мишенный узел; 5 — α -спектрометр; 6 — литиевая мишень; 7 — временно размещаемый лист свинца; 8 — спектрометрические радиометры быстрых нейтронов с алмазным детектором; 9 — временно возводимая бетонная стена; 10 — свинцовый коллиматор; 11 — γ -спектрометр

возможность менять энергию от 0,1 до 2,2 МэВ, ток — от 0,5 до 10 мА. Ток пучка ионов измеряют бесконтактным датчиком тока NPCT (Bergoz Instrumentation, Франция) и калиброванным сопротивлением, подключенным к мишенному узлу, электрически изолированному от установки, используя последний как глубокий цилиндр Фарадея.

Литиевая мишень представляет собой медный диск диаметром 144 мм и толщиной 8 мм. На одну сторону диска по центру в круге диаметром 84 мм методом термического напыления в вакууме наносят однородный слой лития кристаллической плотности. С обратной стороны внутри медного диска диаметром 122 мм сделаны спиралевидные каналы для охлаждения водой, эту сторону медного диска прижимают алюминиевым диском толщиной 16 мм. Литиевая мишень интегрирована в мишен-ный узел, оснащенный шибером и диагностическими патрубками. Для напыления используют природный литий производства Новосибирско-го завода химконцентратов, в котором содержание собственно лития равно 99,956 %, остальные 0,044 % — примеси. Содержание изотопа 7 в природном литии полагаем равным 92,5 %.

Энергетический спектр нейтронов измеряют двумя радиометрами быстрых нейтронов с алмазными спектрометрическими детекторами (Проектный центр ИТЭР, Москва): α -частиц — α -спектрометром с крем-ниевым полупроводниковым детектором ПДПА-1К (Институт физико-технических проблем, Дубна), γ -излучения — спектрометром γ -излу-чения СЕГ-1КП (Институт физико-технических проблем, Дубна) на ос-нове полупроводникового детектора, изготовленного из особо чистого германия.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОТОНА С ЛИТИЕМ

Реакция ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ обеспечивает генерацию нейтронов для БНЗТ. При планировании терапии используют расчетные данные выхода ней-тронов из работы [5], поскольку экспериментально измеренные значения существенно отличаются друг от друга и от расчетных: в 2 раза меньше расчетного из [6], в 1,7 раза меньше из [7] и от диапазона (в 7 раз меньше)–(в 1,4 раза больше) из [8]. Необходимо было экспериментально подтвердить выход нейтронов из литиевой мишени.

Для измерения выхода нейтронов исходили из того, что продуктом реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ является не только нейтрон, но и радиоактив-ное атомное ядро ${}^7\text{Be}$. Если не допустить распространения бериллия с мишени, то измерение активации мишени позволит определить ко-личество наработанных ядер ${}^7\text{Be}$, которое равно количеству сгенери-рованных нейтронов. Для измерения выхода нейтронов литиевую ми-шень облучают пучком протонов до определенного флюенса, используя поворотный магнит в качестве энергоанализатора и контролируя по-ложение пучка протонов на поверхности мишени видеокамерами, тер-момпарами и малогабаритными датчиками нейтронов для поддержания



энергии протонов с высокой точностью. На следующий день мишенный узел разбирают и γ -спектрометром измеряют активацию мишени и остального мишенного узла (чтобы убедиться в малости перемещения бериллия с мишени). Эффективность регистрации γ -спектрометра по линии 478 кэВ с высокой точностью определена с помощью двух мощных источников фотонного излучения с радионуклидом цезий-137 и барий-133, семи точечных эталонных радионуклидных источников фотонного излучения из набора ОСГИ-РТ, трех слабых точечных самостоятельно изготовленных источников фотонного излучения, а также детальным изучением влияния мертвого времени детектора на достоверность измерения и учетом конечного размера детектора. В итоге продемонстрировано, что измеренный выход нейтронов согласуется с расчетным с точностью 5%, что важно для планирования терапии, начавшейся в г.Сямынь (Китай) с использованием литиевой мишени. Результаты проведенного исследования подробно изложены в работе [9].

Взаимодействие протона с литием ведет не только к генерации нейтронов, но и 478-кэВ фотонов за счет неупругого рассеяния на атомных ядрах лития ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$, сравнимого по потоку. При проведении БНЗТ эти фотоны дают нежелательную неселективную дозу γ -излучения. Экспериментальные данные о выходе фотонов в реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ скудны и противоречивы, поэтому для оценки дозы используют расчетные данные, приведенные в работе [10]. Необходимо было экспериментально измерить выход 478-кэВ фотонов из литиевой мишени. Измерение интенсивности излучения и сечения реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ проведено при размещении γ -спектрометра под углами 15 и 110° по направлению пучка протонов. Выяснилось, что излучение изотропно. Полученные результаты представлены на рис. 2. Установлено, что измеренная интенсивность излучения фотонов примерно в 1,7 раза меньше расчетной [10]. Полученные значения сечения реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ и выхода 478-кэВ фотонов из толстой литиевой мишени в табличном виде представлены в работе [11] и внесены в базы данных IBANDL и EXFOR. Позднее подобные измерения были проведены греческой группой при энергии протонов от 1 до 4 МэВ, получившей результаты, совпадающие с нашими измерениями [12].

Измеренная зависимость выхода 478-кэВ фотонов из толстой литиевой мишени от энергии протонов позволила предложить и реализовать *in situ* метод измерения толщины слоя лития. Суть метода состоит в облучении мишени протонами и измерении γ -спектрометром скорости счета γ -квантов энергией 478 кэВ. При измерении применяют две литиевые мишени: исследуемую и толстую. Толстой называют мишень, в которой протоны затормозились в литии до энергии ниже 478 кэВ — порога реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$. Тонкой называют мишень, в которой протоны затормозились в литии до энергии выше 478 кэВ. Если исследуемая мишень не будет толстой, то выход 478-кэВ фотонов из нее будет мень-



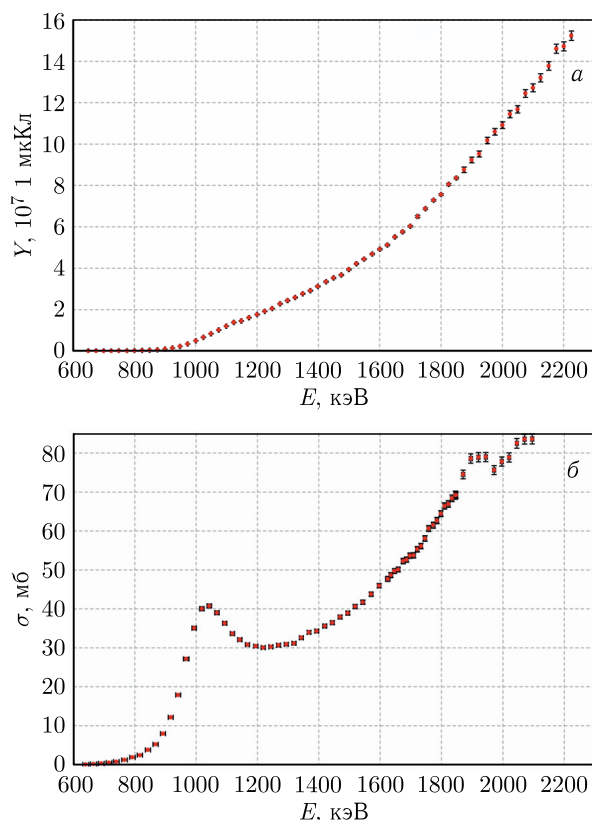


Рис. 2. Зависимость выхода 478-кэВ фотонов из толстой литиевой мишени с природным содержанием изотопов лития (а) и сечения реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ от энергии протонов E (б)

ше, чем из толстой. Измерив отношение скорости счета 478-кэВ фотонов из исследуемой и толстой мишени, можно определить толщину лития, поскольку скорость потери энергии протоном в литии известна. Подробно этот метод измерения толщины слоя лития изложен в работе [13].

Взаимодействие протона с ядром лития приводит также к сравнимому потоку α -частиц в реакции ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$, характеризующейся высоким выходом энергии — 14,347 МэВ. Эта реакция является одной из термоядерных реакций, участвующих в звездном цикле синтеза тяжелых элементов во Вселенной и может быть использована для *in situ* контроля толщины слоя лития в мишени. Курьезность ситуации состоит в том, что сечение реакции, рекомендуемое базой данных JENDL, в 2 раза больше сечения, рекомендуемого базами данных ENDF/B и TENDL. Необходимо было понять, каким данным верить. Характерный энергетический

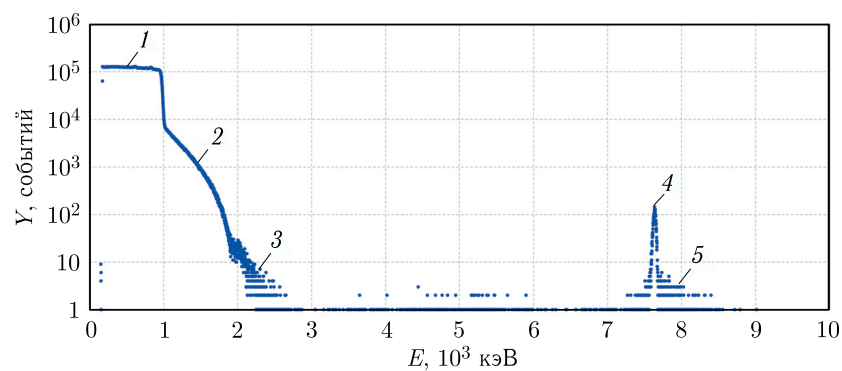


Рис. 3. Спектр заряженных частиц, регистрируемых α -спектрометром при энергии протонов 1 МэВ: 1–3 — обратно рассеянные протоны (1 — одиночные события, 2 — двойные, 3 — тройные); 4 — α -частицы; 5 — одновременная регистрация α -частицы и протона

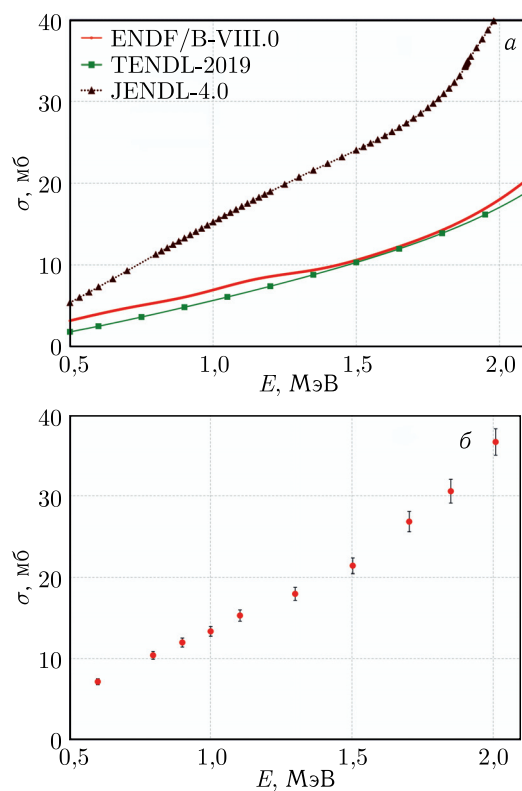


Рис. 4. Сечение реакции ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$, представленное в базах данных (а) и измеренное (б)

спектр регистрируемых спектрометром заряженных частиц представлен на рис. 3. Видно, что он достаточно простой для идентификации: полезный сигнал α -частиц разделен от сигнала обратно рассеянных протонов промежуточком отсутствия сигнала в каналах регистрации.

Результаты измерения в сравнении с данными, представленными в базах данных, приведены на рис. 4. Видно, что измеренное сечение ядерной реакции ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ согласуется со значениями, приведенными в базе данных ядерных реакций JENDL-4.0, и примерно в 2 раза больше значений, приведенных в базах данных ядерных реакций ENDF/B-VIII.0 и TENDL-2019. Результаты измерения представлены в работе [14] и внесены в базы данных ядерных реакций IBANDL и EXFOR. Достоверность полученным данным придает тот факт, что толщина литиевой мишени измерена шестью независимыми методиками: наиболее точно путем сравнения интенсивности 478-кэВ фотонов из толстой и исследуемой мишени, а также по массе напыленного лития, по проводимости воды, которой был смыт литий, по сдвигу и ширине пика α -частиц, по амплитуде сигнала протонов, обратно рассеянных на атомных ядрах лития.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕЙТРОНА С ЛИТИЕМ

Взаимодействие дейтронов с энергией меньше 2,2 МэВ с ядрами природного лития приводит к 10 ядерным реакциям, в пяти из которых генерируются нейтроны. Эти реакции обеспечивают наивысший выход нейтронов на единицу тока пучка заряженных частиц, начиная с энергии 0,7 МэВ. Вместе с тем данные о сечении этих реакций скудны и зачастую отсутствуют. В базе данных ENDF/B приведены данные только для двух реакций: ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ и ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}$, в базе данных TENDL — для этих же реакций, но со ссылкой на то, что они взяты из базы данных ENDF/B, в базе данных JENDL — данные отсутствуют. В библиотеках EXFOR и IBANDL приводятся данные из оригинальных статей, также в этих библиотеках, помимо данных о реакциях ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ и ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}$, есть данные о сечении реакций ${}^7\text{Li}(d, \alpha){}^5\text{He}$ (${}^5\text{He} \rightarrow \alpha + n$) и ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}^*$.

Характерный энергетический спектр заряженных частиц, регистрируемых спектрометром, представлен на рис. 5. Нами измерено сечение шести реакций: ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}^*$, ${}^7\text{Li}(d, \alpha){}^5\text{He}$, ${}^7\text{Li}(d, n\alpha){}^4\text{He}$ [15] и ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$. На рис. 6 приведены измеренное сечение реакции ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ в сравнении с представленным в базе данных ENDF/B и измеренные сечения реакций ${}^7\text{Li}(d, \alpha){}^5\text{He}$, ${}^7\text{Li}(d, n\alpha){}^4\text{He}$ и ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$ с образованием ядра Be в основном и первом возбужденном состоянии. Таким образом, из пяти реакций генерации нейтронов измерены сечения трех из них. Оставшиеся две реакции генерации нейтронов, ${}^6\text{Li}(d, n){}^7\text{Be}$ и ${}^6\text{Li}(d, {}^3\text{He}){}^5\text{He}$ (${}^5\text{He} \rightarrow \alpha + n$), сложны для измерения из-за низкой энергии продуктов реакции, но из-за низкого содержания изотопа ${}^6\text{Li}$ в природном литии могут давать небольшой вклад в суммарный

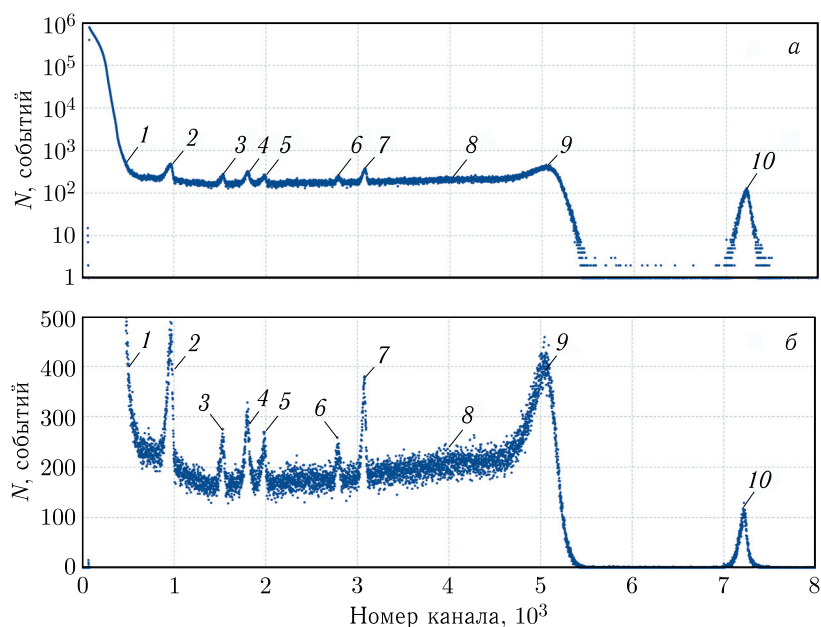


Рис. 5. Сигнал α -спектрометра при 0,6-МэВ пучке дейтронов: 1 — обратно рассеянные дейтроны; 2 — протоны реакции $^{16}\text{O}(d, p_1)^{17}\text{O}^*$; 3 — протоны реакции $^{16}\text{O}(d, p_0)^{17}\text{O}$; 4 — α -частицы реакции $^{16}\text{O}(d, \alpha)^{14}\text{N}$; 5 — протоны реакции $^{12}\text{C}(d, p_0)^{13}\text{C}$; 6 — протоны реакции $^6\text{Li}(d, p_1)^7\text{Li}^*$; 7 — протоны реакции $^6\text{Li}(d, p_0)^7\text{Li}$; 8 — α -частицы реакции $^7\text{Li}(d, n\alpha)^4\text{He}$; 9 — α -частицы реакции $^7\text{Li}(d, \alpha)^5\text{He}$; 10 — α -частицы реакции $^6\text{Li}(d, \alpha)^4\text{He}$ (a — шкала ординат представлена в логарифмическом масштабе, б — в линейном)

выход нейтронов. Следовательно, имеющиеся данные позволяют оценить энергетический спектр генерируемых нейтронов. Отметим, что измерить сечение реакции $^6\text{Li}(d, n)^7\text{Be}$ можно, измерив активацию мишени изотопом ^7Be , и данное исследование предполагается выполнить в ближайшее время. Также предполагается точнее измерить сечения реакций $^6\text{Li}(d, p)^7\text{Li}$ и $^6\text{Li}(d, p)^7\text{Li}^*$, используя литиевую мишень, обогащенную изотопом ^6Li .

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОТОНА С ЯДРОМ БОРА

Реакция синтеза протона и бора привлекает внимание со времени зарождения ядерной физики своей актуальностью и потенциальным применением в различных областях, от безнейтронного ядерного синтеза до астрофизики и адронной терапии. Эту реакцию изучают с 1930 г., но данные разных авторов различаются. Получение надежных экспериментальных данных о фундаментальных величинах (например, о прямом или

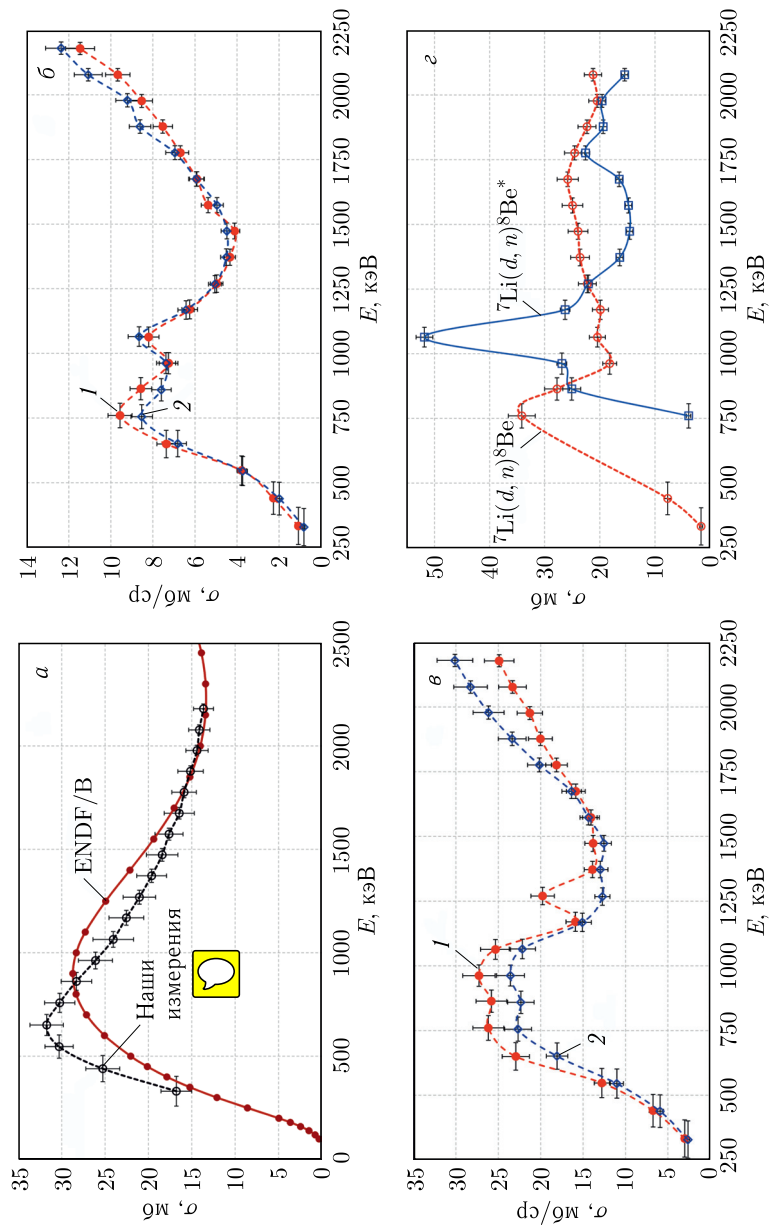


Рис. 6. Измеренные сечения реакций ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ (а), ${}^7\text{Li}(d, \alpha){}^5\text{He}$ (б), ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$ и ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}^*$ (в); 1 — под углом 135° ; 2 — под углом 168°

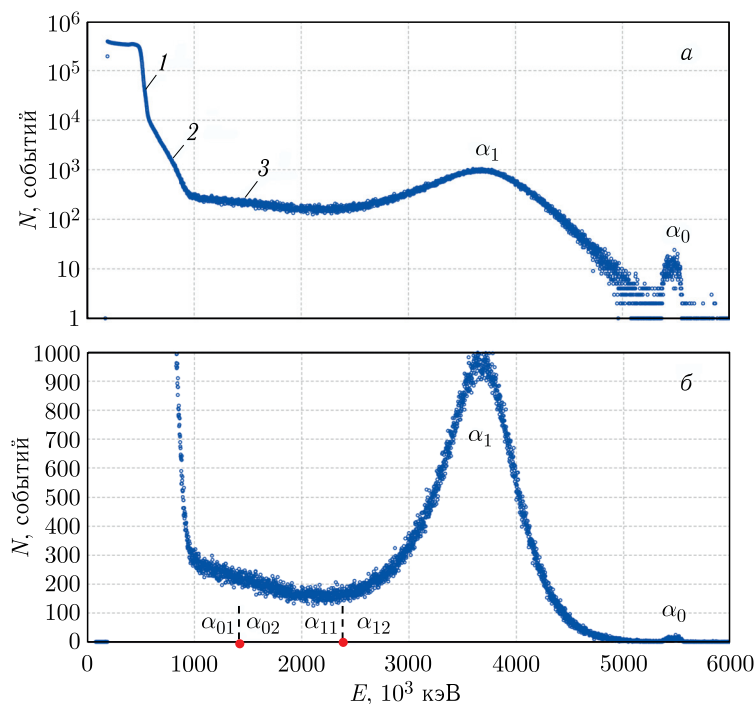
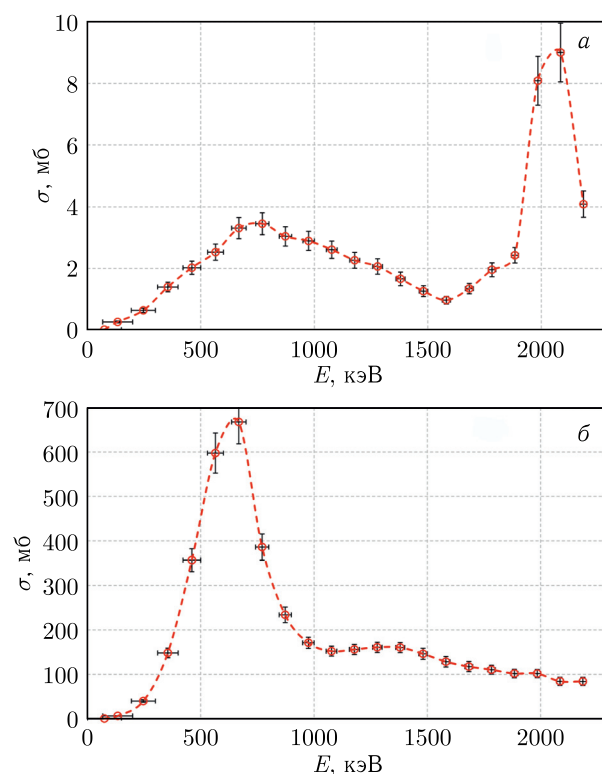


Рис. 7. Сигнал α -спектрометра при 0,6-МэВ пучке дейтронов и угле 168° : 1, 2 — обратно рассеянные дейтроны (1 — одиночные события, 2 — двойные); 3 — α -частицы

последовательном распаде, поперечном сечении, энергетическом спектре α -частиц, орбитальном угловом моменте α -частиц) по-прежнему актуально. Измеренный энергетический спектр α -частиц (рис. 7) позволяет нам утверждать, что прямой процесс образования трех α -частиц маловероятен и реакция идет путем последовательного распада: сначала на α -частицу и ядро ^8Be в основном или в возбужденном состоянии, а затем ядро ^8Be распадается на две α -частицы [16]. Измеренные сечения реакций приведены на рис. 8.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕЙТРОНА С ЯДРОМ БОРА

Облучение пучком дейтронов борной мишени, используемой при изучении взаимодействия протона с атомным ядром бора, позволило нам измерить сечения реакций $^{10}\text{B}(d, \alpha)^8\text{Be}$, $^{10}\text{B}(d, \alpha)^8\text{Be}^*$, $^{11}\text{B}(d, \alpha)^9\text{Be}$, $^{11}\text{B}(d, \alpha)^9\text{Be}^*$, $^{10}\text{B}(d, p_2)^{11}\text{B}$ и $^{11}\text{B}(d, p_3)^{11}\text{B}$. Полученные результаты в настоящее время обрабатываются.

Рис. 8. Измеренные сечения реакций $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$ (a) и $^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}^*$ (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный в ИЯФ СО РАН ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией VITA применен для исследования ядерных реакций легких ядер в области энергий до 2,2 МэВ: измерены выход нейтронов в реакции $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$, выход фотонов в реакции $^7\text{Li}(p, p'\gamma)^7\text{Li}$, сечения реакций $^7\text{Li}(p, p'\gamma)^7\text{Li}$, $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$, $^6\text{Li}(d, \alpha)^4\text{He}$, $^6\text{Li}(d, p)^7\text{Li}$, $^6\text{Li}(d, p)^7\text{Li}^*$, $^7\text{Li}(d, \alpha)^5\text{He}$, $^7\text{Li}(d, n\alpha)^4\text{He}$, $^7\text{Li}(d, n)^8\text{Be}$, $^7\text{Li}(d, n)^8\text{Be}^*$, $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$, $^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}^*$, $^{10}\text{B}(d, \alpha)^8\text{Be}$, $^{10}\text{B}(d, \alpha)^8\text{Be}^*$, $^{11}\text{B}(d, \alpha)^9\text{Be}$, $^{11}\text{B}(d, \alpha)^9\text{Be}^*$, $^{10}\text{B}(d, p_2)^{11}\text{B}$ и $^{11}\text{B}(d, p_3)^{11}\text{B}$ и изотропность излучения. Полученные данные важны для бор-нейтронозахватной терапии, безнейтронной термоядерной энергетики, для генерации мощного потока быстрых нейтронов и других приложений.

Благодарности. Авторы приносят благодарность Е.М.Оксу (Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники), А.Г.Николаеву и Г.Ю.Юшкову (Институт сильноточной

электроники СО РАН, Томск) за изготовление тонкой мишени бора, А. В. Красильникову, С. А. Мещанинову и Г. Е. Немцову (Проектный центр ИТЭР, Москва) за измерение сечения реакции ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$ с помощью разработанного ими спектрометра.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30005). <https://rscf.ru/project/19-72-30005/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Boron Neutron Capture Therapy. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2023. 416 p.
2. Taskaev S. Ю. Разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии // ЭЧАЯ. 2019. Т. 50, № 5. С. 657–669.
3. Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A., Ostreinov G., Porosev V., Savinov S., Shchudlo I., Sokolova E., Sorokin I., Sycheva T., Verkhovod G. Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target // Biology. 2021. V. 10. P. 350.
4. Taskaev S. Ю. Ускорительный источник нейтронов VITA. М.: Физматлит, 2024. 248 с.
5. Lee C., Zhou X. Thick Target Neutron Yields for the ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ Reaction near Threshold // Nucl. Instr. Meth. B. 1999. V. 152. P. 1–11.
6. Yu W., Yue G., Han X., Chen J., Tian B. Measurements of the Neutron Yields from ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ Reaction (Thick Target) with Incident Energies from 1.885 to 2.0 MeV // Med. Phys. 1998. V. 25, No. 7. P. 1222–1224.
7. Bleuel D. L., Chu W. T., Donahue R. J., Ludewigt B. A., McDonald R. J., Smith A. R., Stone N. A., Vujic J. Initial Experimental Verification of the Neutron Beam Modeling for the LBNL BNCT Facility // AIP Conf. Proc. 1999. V. 475. P. 1050–1055.
8. Aslam, Prestwich W. V., McNeill F. E. Lithium Target Performance Evaluation for Low-Energy Accelerator-Based *In Vivo* Measurements Using Gamma Spectroscopy // Appl. Radiat. Isot. 2003. V. 58. P. 321–331.
9. Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov I. A., Makarov A., Shchudlo I., Sokolova E., Taskaev S. The Measurement of the Neutron Yield of the ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ Reaction in Lithium Targets // Biology. 2021. V. 10. P. 824.
10. Lee C. L., Zhou X.-L., Kudchadker R. J., Harmon F., Harker Y. D. A Monte Carlo Dosimetry-Based Evaluation of the ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ Reaction near Threshold for Accelerator Boron Neutron Capture Therapy // Med. Phys. 2000. V. 27, No. 1. P. 192–202.
11. Taskaev S., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov I. A., Koshkarev A., Makarov A., Savinov S., Shchudlo I., Sokolova E. Measurement of the ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ Reaction Cross-Section and 478 keV Photon Yield from a Thick Lithium Target at Proton Energies from 0.65 MeV to 2.225 MeV // Nucl. Instr. Meth. B. 2021. V. 502. P. 85–94.
12. Ziačkova A., Axiotis M., Harissopoulos S., Kokkoris M., Lagoyannis A., Maragkos F., Ntemou E., Taimpiri E. Differential Cross Section Measurements

- of the ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma_{1-0}){}^7\text{Li}$ Reaction Suitable for PIGE Applications // Nucl. Instr. Meth. B. 2023. V. 539. P. 113–119.
13. Kasatov D., Kolesnikov Ia., Koshkarev A., Makarov A., Sokolova E., Shchudlo I., Taskaev S. Method for *In Situ* Measuring the Thickness of a Lithium Layer // J. Instrum. 2020. V. 15. P. 10006.
 14. Taskaev S., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Makarov A., Ostreinov G., Savinov S., Sokolova E. Cross-Section Measurement for the ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ Reaction at Proton Energies 0.6–2 MeV // Nucl. Instr. Meth. B. 2022. V. 525. P. 55–61.
 15. Taskaev S., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Ostreinov G., Savinov S., Sokolova E. Measurement of Cross Section of the ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}^*$, ${}^7\text{Li}(d, \alpha){}^5\text{He}$, and ${}^7\text{Li}(d, n\alpha){}^4\text{He}$ Reactions at Deuteron Energies from 0.3 MeV to 2.2 MeV // Nucl. Instr. Meth. B. 2024. V. 554(366). 165460.
 16. Бикчурина М.И., Быков Т.А., Касатов Д.А., Соколова Е.О., Таскаев С.Ю., Шуклина А.А. Исследование реакции ${}^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ при энергии пучка протонов 0,3–2,15 МэВ // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 3(254). С. 508–514.