

Измерение сечения ядерных реакций для безнейтронного термоядерного синтеза

Бикчурина М.И.^{a,b,*}, Быков Т.А.^{a,b}, Касатов Д.А.^{a,b}, Колесников Я.А.^{a,b},
Остреинов Г.М.^{a,b}, Савинов С.С.^{a,b}, Соколова Е.О.^{a,b}, Шуклина А.А.^{a,b} и Таскаев С.Ю.^{a,b,c}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

^b Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090 Россия

^c Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: M.I.Bikchurina@inp.nsk.su

Аннотация — Ускорительный источник нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией (VITA) и литиевой мишени предложен и создан в Институте ядерной физики СО РАН в Новосибирске, Россия. Ускоритель генерирует стабильные пучки протонов/дейтронов с энергией до 2.3 МэВ и постоянным током до 10 мА. Установка оснащена γ -, α - и нейтронными спектрометрами и дозиметрами. VITA используется для разработки методики бор-нейтронозахватной терапии, радиационных испытаний перспективных материалов и многих других приложений. В последнее время VITA активно применяется для измерения сечений ядерных реакций.

Данное исследование посвящено изучению такой перспективной для термоядерного синтеза реакции как $^{11}\text{B} + \text{p}$. Измерено сечение ядерных реакций $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_1)^8\text{Be}$, $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_0)^8\text{Be}^*$ и $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha)\alpha$ в диапазоне энергий протонов от 75 кэВ до 2.2 МэВ. Проведено сравнение полученных данных с результатами, опубликованными другими группами исследователей и используемые при оценке перспективности реализации безнейтронной термоядерной энергетики.

Keywords: источник нейтронов, ускоритель-тандем, сечения ядерных реакций, борная мишень

ВВЕДЕНИЕ

Реакция бора-11 с протоном одна из самых интересных термоядерных реакций. Она проходит с выделением энергии 8.7 МэВ, при этом отсутствует нейтронный выход. Реакция считается перспективной для осуществления безнейтронного термоядерного синтеза, а также рассматривается применительно к лечению онкологических заболеваний методом протон-борной терапии, она также интересна в рамках астрофизических приложений и получении фундаментальных знаний о механизме реакции. Известно, что ядерная реакция взаимодействия бора-11 с протоном протекает тремя путями: $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_0)^8\text{Be}$, $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_1)^8\text{Be}^*$ и $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha)\alpha$, однако в значениях сечений наблюдается большой разброс, представленный в базах

данных. Ранее нами измерены сечения ряда ядерных реакций [1–4]. В данной работе исследованы механизмы взаимодействия бора с протоном и измерены сечения ядерных реакций $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_0)^8\text{Be}$, $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_1)^8\text{Be}^*$ и $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha)\alpha$.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проведены на ускорительном источнике нейтронов VITA [5], его схема показана на рис. 1. На установке генерирует протонный пучок и направляют на тонкую борную мишень 6. Энергию пучка протонов варьируют от 0.1 до 2.2 МэВ и поддерживают со стабильностью 0.1%. На выходе из ускорителя 1 пучок протонов имеет поперечный размер 10 мм, угловую расходимость до ± 1.5 мрад и нормированный эмиттанс 0.2 мм·мрад [6]. Ток протонного пучка измеряют и контролируют бесконтактным датчиком тока NPCT (Bergoz Instrumentation, Франция) 2.

Для проведения исследований ток пучка протонов на мишени уменьшают до величины менее 1.5 мкА, размещая на его пути охлаждаемый коллиматор 3, расположенный в 4 м от мишени. Коллиматор представляет собой медный прямоугольный параллелепипед с отверстием в центре диаметром 1 мм. Положение и размер пучка протонов на мишени контролируют видеокамерой Hikvision 5.

БОРНАЯ МИШЕНЬ

Борная мишень, созданная для проведения данного эксперимента, представляет собой медный диск, на который методом магнетронного распыления в Институте сильноточной электроники, г. Томск, нанесен тонкий слой бора (~ 1 мкм). Напыление производят в атмосфере азота особой чистоты (99.999%), поэтому в составе мишени присутствует не только природный бор кристаллической плотности, но и соединения бора с азотом. Для определения скорости напыления бора на медную и алюминиевую подложки использован метод микропротивоизферометрии с помощью прибора МИИ-4 в пяти точках на поверхности подложки, где покрытие было удалено. Средняя скорость нанесения покрытия в условиях эксперимента равна 8.4 нм/мин, ожидаемая неоднородность покрытия — 10%. Для определения состава мишени использован метод микрорентгеноспектрального анализа. Установлено, что в покрытии присутствуют в основном бор и азот с долями 84.5 и 15.5 ат.% соответственно (рис. 2).

Также в Институте сильноточной электроники проведен анализ шероховатости пленок бора с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47. Установлено, что шероховатость поверхности участка покрытия бора размером 1×1 мкм толщиной 1 мкм составляет около 0.2 нм. Дополнительное измерение толщины борной пленки проведено на микропротивоизферометре Линника МИИ-4 в Институте ядерной физики, г. Новосибирск. По результатам измерений получено значение толщины слоя бора равное 1.1 мкм с точностью 20%.

Поскольку определение значения толщины борной мишени вносит определяющий вклад в конечную величину погрешности дифференциального сечения, данному вопросу удалено особое внимание. С наибольшей точностью толщина бора измерены нами предложенным и

разработанным *in situ* методом [7], который успешно применяли для измерения толщины литиевого слоя [1–4]. В данном случае метод основан на сравнении выхода α -частиц из исследуемого тонкого борного слоя и из толстого (рис. 3). Толстым слоем называют слой бора толщиной более длины пробега протона в боре, т.е. до полной потери энергии. В данном эксперименте в качестве толстой мишени используют образец из карбида бора. Учитывая процентное содержание углерода в толстой мишени и азота в тонкой мишени, установленное после обработки спектра, измеренного α -спектрометром, определена линейная плотность бора в тонкой борной мишени; она равна $8.48 \cdot 10^{18}$ ат/см² (0.65 мкм бора кристаллической плотности) с точностью 10%. Данная оценка хорошо согласуется с результатами приведенных ранее методов.

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ $p + {}^{11}\text{B}$

Сечение реакции измерено следующим образом. В течение определенного времени t пучком протонов с током i облучают слой лития толщиной l и α -спектрометром под углом 168° и 135° к импульсу протонов регистрируют α -частицы, вылетающие в телесный угол Ω . Дифференциальное сечение реакции рассчитывают по формуле:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{eY}{knl\Phi\Omega_{\text{lab}}},$$

где e – заряд электрона, Y – экспериментально измеренный выход α -частиц (количество α -частиц в пике), k – эффективность регистрации спектрометром α -частиц, n – ядерная плотность атомных ядер ${}^{11}\text{B}$, l – толщина слоя бора, Φ – флюенс протонов, Ω_{lab} – телесный угол.

Интенсивность и энергию α -частиц в реакции ${}^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$ измеряют α -спектрометром 5, 7 рис. 1 с кремниевым полупроводниковым детектором ПДПА-1К (ИФТП, Дубна, Россия) [8]. Площадь чувствительной поверхности детектора $S = 20 \pm 1$ мм², энергетическое разрешение – 12 кэВ, энергетический эквивалент шума – 7 кэВ, емкость – 30 пФ, толщина входного окна – 0.08 мкм, стандартный естественный фон в диапазоне 3 – 8 МэВ – 0.15 имп/(см²·ч). Калибровка проведена двумя стандартными радиоактивными источниками на основе плутония-239. Эффективность регистрации детектора составила 100%. Калибровка детектора по энергии осуществлена с помощью калибровочного изотопа ${}^{236}\text{Ra}$.

При измерении сечения реакции чувствительную часть α -спектрометра располагают в позиции 7 на расстоянии $R = 707 \pm 1$ мм от мишени под углом $168 \pm 0.5^\circ$ к импульсу протона, и в позиции 5 на расстоянии $R = 717 \pm 1$ мм от мишени под углом $135 \pm 0.5^\circ$ к импульсу протона. Телесный угол составляет $\Omega_{\text{lab}} = S/R^2 = 3.89 \cdot 10^{-5}$ ср. для угла 135° и $\Omega_{\text{lab}} = 4.00 \cdot 10^{-5}$ ср. для угла 168° .

Спектр α -частиц, предсказанный теорией, в случае трехчастичного распада имеет куполообразную форму, в случае каскадных распадов с образованием ядра бериллия-8 в основном и возбужденном состоянии в спектре будут заметны два пика от α -частиц из реакций ${}^{11}\text{B}(p,\alpha_0){}^8\text{Be}$ и ${}^{11}\text{B}(p,\alpha_1){}^8\text{Be}^*$ в высокоэнергетичной части спектра и широкий пик в низкоэнергетичной части спектра, вызванный распадом бериллия-8 на две α -частицы.

Типичный спектр частиц, полученный α -спектрометром при облучении борной мишени пучком протонов, показан на рис. 4. По спектру видно, что реакция протекает каскадными распадами. Маленький пик в высоких энергиях (в области 6000 кэВ) образован α -частицами из реакции $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_0)^8\text{Be}$, а широкий соответственно из реакции $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_1)^8\text{Be}^*$. При этом низкоэнергетичная часть спектра перекрыта сигналом от упруго отраженных протонов, в том числе двойными и тройными событиям, т.е. одновременной регистрацией двух или трех частиц. Данное обстоятельство затрудняет интерпретацию формы сигнала α -частиц из интересующих нас реакций в диапазоне энергий 0–2000 кэВ. Тем не менее дифференциальные сечения реакций $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_0)^8\text{Be}$ и $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_1)^8\text{Be}^*$ для углов 168° и 135° рассчитаны, результаты представлены в [9] и приведены на рис. 5, 6. При сравнении со значениями сечений из баз данных видно, что наши результаты по измерению сечения реакции $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_0)^8\text{Be}$ хорошо согласуются с ними. В случае с данными сечения реакции $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_1)^8\text{Be}^*$ есть только одно ранее опубликованное измерение, представленное в [10].

Стоит также отметить выраженную анизотропность реакций, что затрудняет восстановление значения полного сечения реакций и требует проведения дополнительных измерений под большим количеством углов. Такой эксперимент планируется в будущем, для этого изготовлена вакуумная камера с десятью патрубками для размещения спектрометра под разными углами, также закуплено дополнительное диагностическое оборудование, что позволит проводить измерения одновременно под несколькими углами.

Так как реакция взаимодействия бора-11 с протоном протекает не только каскадным путем, нам было интересно провести оценку для прямого распада. В случае прямого распада энергия α -частиц находится в диапазоне от 0 до 9 МэВ. Таким образом, только события от прямого распада или шумовой сигнал могут находиться правее пика α -частиц из реакции $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_0)^8\text{Be}$. Суммируя все события правее этого пика и предполагая куполообразную форму энергетического распределения α -частиц из прямого распада, мы получили вероятность прямого распада в 2000–3000 раз меньшую по сравнению с каскадным.

Поскольку ускоритель-тандем VITA генерирует не только протонный, но и дейтронный пучок, мы измерили ряд сечений ядерных реакций взаимодействия дейтрана с бором [11]: $^{10}\text{B}(\text{d},\alpha_0)^8\text{Be}$, $^{10}\text{B}(\text{d},\alpha_1)^8\text{Be}^*$, $^{11}\text{B}(\text{d},\alpha_0)^9\text{Be}$, $^{10}\text{B}(\text{d},\text{p}_2)^{11}\text{B}$, $^{11}\text{B}(\text{d},\alpha_2)^9\text{Be}^*$.

ВЫВОДЫ

На ускорительном источнике нейтронов VITA в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в г. Новосибирске, Россия, измерены сечения ядерных реакций взаимодействия протона и дейтрана с бором: $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_0)^8\text{Be}$, $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_1)^8\text{Be}^*$, $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha)\alpha\alpha$, $^{10}\text{B}(\text{d},\alpha_0)^8\text{Be}$, $^{10}\text{B}(\text{d},\alpha_1)^8\text{Be}^*$, $^{11}\text{B}(\text{d},\alpha_0)^9\text{Be}$, $^{10}\text{B}(\text{d},\text{p}_2)^{11}\text{B}$, $^{11}\text{B}(\text{d},\alpha_2)^9\text{Be}^*$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005).

КОНФЛИКТЫ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Measurement of the $7\text{Li}(\text{p},\text{p}'\gamma)7\text{Li}$ reaction cross-section and 478 keV photon yield from a thick lithium target at proton energies from 0.65 MeV to 2.225 MeV / S. Taskaev, T. Bykov, D. Kasatov [et al.]. – // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2021. Vol. 502. – P. 85-94. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.010>. – Дата публикации: 01.09.2021.
2. S. Taskaev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, A. Makarov, G. Ostreinov, S. Savinov, E. Sokolova. Cross-section measurement for the $7\text{Li}(\text{p},\text{alfa})4\text{He}$ reaction at proton energies 0.6 - 2 MeV. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B 525 (2022) 55-61.
3. S. Taskaev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, G. Ostreinov, S. Savinov, E. Sokolova. Measurement of cross-section of the $6\text{Li}(\text{d},\alpha)4\text{He}$, $6\text{Li}(\text{d},\text{p})7\text{Li}$, $6\text{Li}(\text{d},\text{p})7\text{Li}^*$, $7\text{Li}(\text{d},\alpha)5\text{He}$, and $7\text{Li}(\text{d},\text{n}\alpha)4\text{He}$ reactions at the deuteron energies from 0.3 MeV to 2.2 MeV. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B 554 (2024) 165460.
4. S. Meshchaninov, A. Krasilnikov, N. Rodionov, Yu. Kashchuk, S. Obudovsky, A. Dzhurik, T. Kormilitsyn, R. Rodionov, V. Amosov, G. Nemtsev, M. Bikchurina, T. Bykov, G. Verkhovod, D. Kasatov, Ya. Kolesnikov, G. Ostreinov, E. Sokolova, and S. Taskaev. Measurement of Cross-Section of the $7\text{Li}(\text{d},\text{n})8\text{Be}$ Reactions at the Deuteron Energies from 0.4 to 2.1 MeV. Physics of Atomic Nuclei, 87 (Suppl. 6) (2024), S771–S785.
5. Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target / S. Taskaev, E. Berendeev, M. Bikchurina [et al.]. // Biology. – 2021. – Vol. 10, nr 5. – P. 350. URL: <https://doi.org/10.3390/biology10050350>. – Дата публикации: 21.04.2021.
6. Измерение фазового портрета пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией / М. И. Бикчурина, Т. А. Быков, Я. А. Колесников [и др.]. – Текст : электронный // Приборы и техника эксперимента. – 2022. – №. 4. – С. 18–29. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48867746>.
7. D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, A. Koshkarev, A. Makarov, E. Sokolova, I. Shchudlo, S. Taskaev. Method for in situ measuring the thickness of a lithium layer. JINST 15 (2020) P10006.
8. Кремниевые детекторы альфа-излучения ПДПА-1К : [сайт]. – URL: <https://iftp.ru/cat/kremnievye-detektory-alfa-izlucheniya-pdpa-1k/>.
9. S. Taskaev, V. Bessmeltsev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, A. Nikolaev, E. Oks, G. Ostreinov, S. Savinov, A. Shuklina, E. Sokolova, G. Yushkov. Measurement of the $11\text{B}(\text{p},\text{a}0)8\text{Be}$ and the $11\text{B}(\text{p},\text{a}1)8\text{Be}^*$ reactions cross-sections at the proton energies up to 2.2 MeV. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B 555 (2024) 165490.
10. J.Liu,X.Lu,X.Wang,W.Chu,Cross-sections of $11\text{B}(\text{p},\alpha)8\text{Be}$ reaction for boron analysis,Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B 190 (2002) 107–111,https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)01272-1.
11. S. Taskaev, V. Bessmeltsev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, I. Kolesnikov, A. Nikolaev, E. Oks, G. Ostreinov, S. Savinov, A. Shuklina, E. Sokolova, G. Yushkov. Measurement of the

10B(d, α 0)8Be, 10B(d, α 1)8Be*, 10B(d,p2)9Be*, 11B(d, α 0)9Be, and 11B(d, α 2)9Be* reactions cross-sections at the deuteron energies up to 2.2 MeV. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B 557 (2024) 165527.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – tandemный ускоритель с вакуумной изоляцией, 2 – бесконтактный датчик тока, 3 – коллиматор, 4 – мишень в сборе, 5 – α -спектрометр под углом 135° , 6 – борная мишень, 7 – α -спектрометр под углом 168°

Рис. 2. Анализ состава борного покрытия, нанесенного на кремниевую подложку KEF-25 с ориентацией кристаллов $<100>$, выполненный с помощью растрового электронного микроскопа Philips SEM 515 с приставкой-микроанализатором EDAX ECON IV

Рис. 3. Спектр, измеренный α -спектрометром, при энергии протонного пучка 0,5 МэВ (а) и 0,7 МэВ (б): 1 – толстая мишень, 2 – тонкая мишень

Рис. 4. Спектр частиц, полученный при облучении борной мишени пучком протонов

Рис. 5. Дифференциальное сечение $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_0)^8\text{Be}$: 1 – 135° , 2 – 168°

Рис. 6. Дифференциальное сечение $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_1)^8\text{Be}^*$: 1 – 135° , 2 – 168° , 3 – [9]

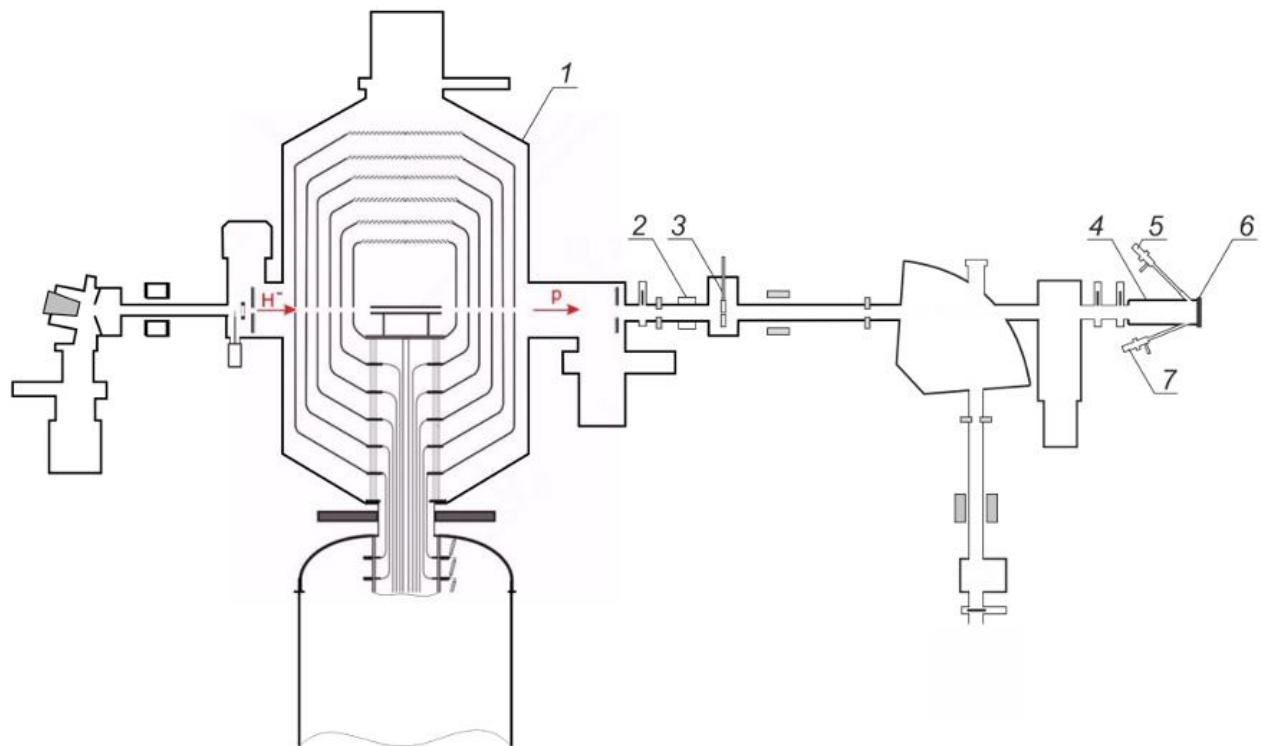


Рис. 1.

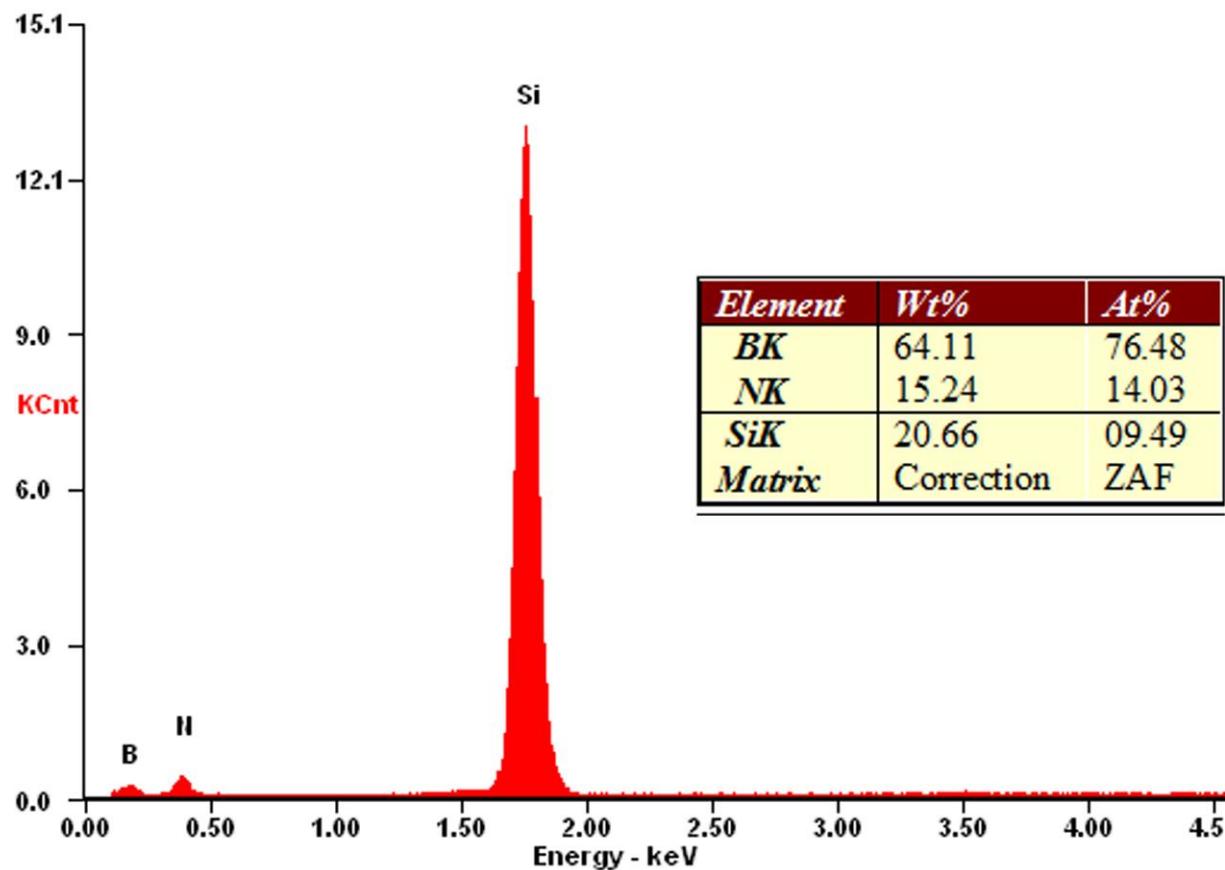


Рис. 2.

Y , события, отн. ед.

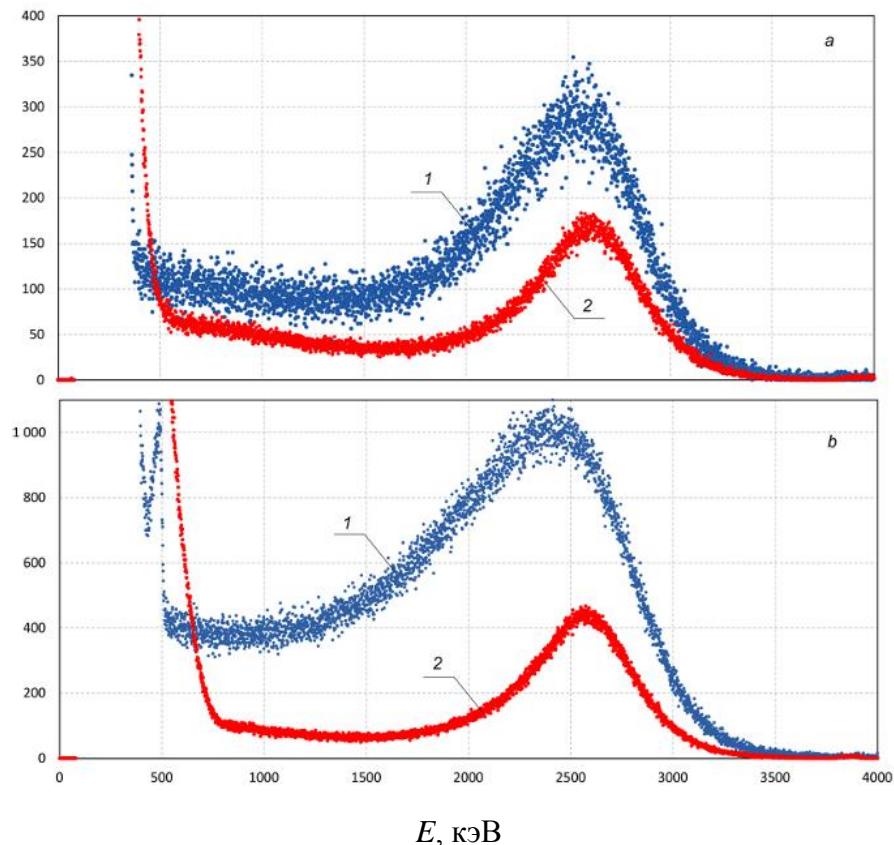


Рис. 3.

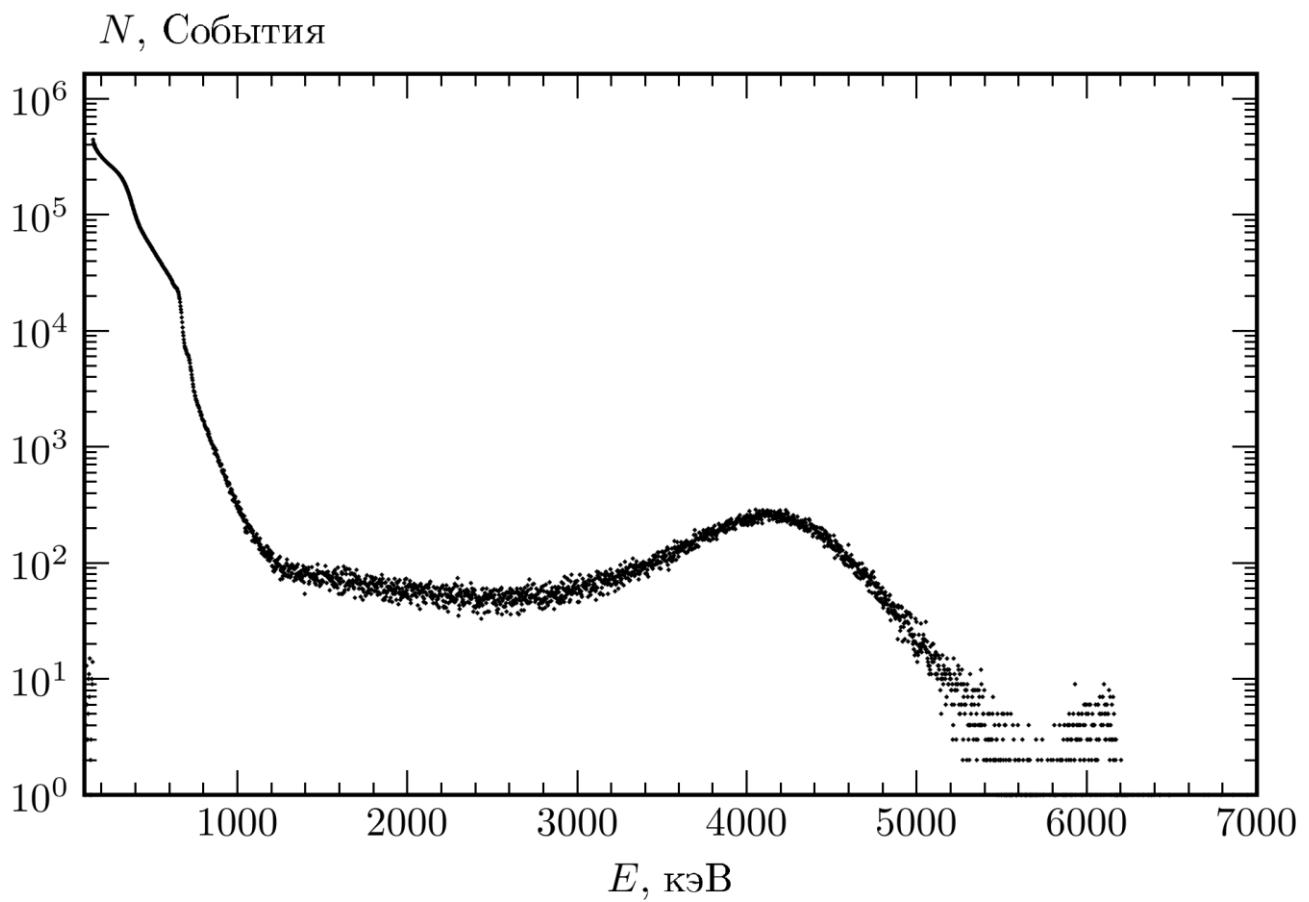


Рис. 4.

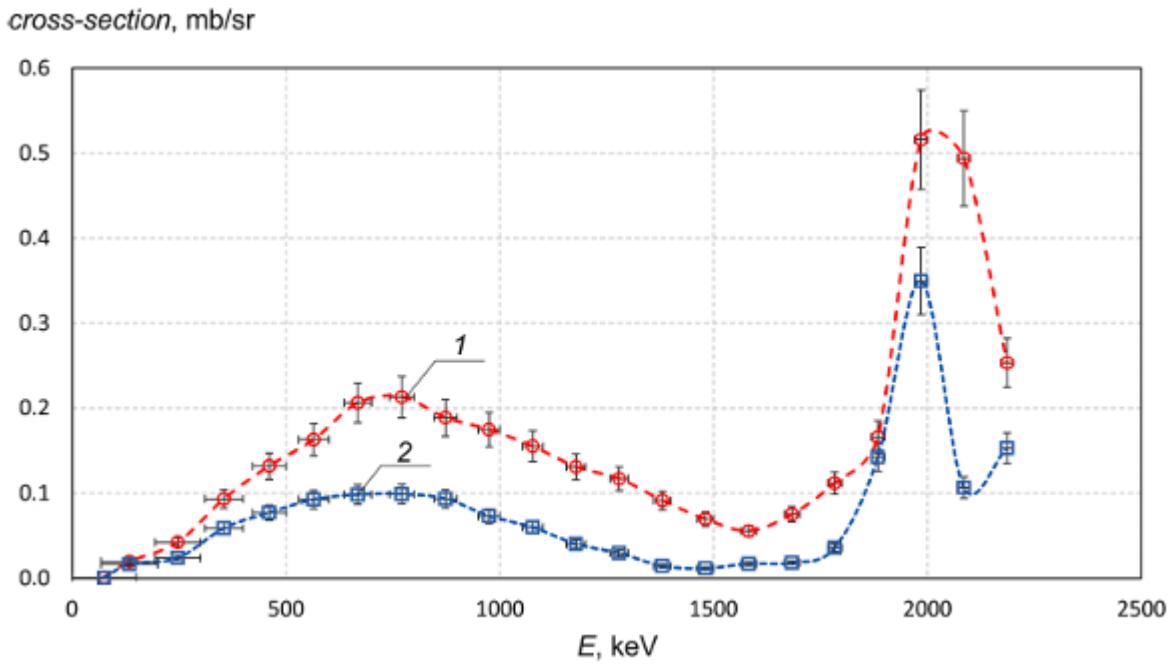


Рис. 5.

cross-section, mb/sr

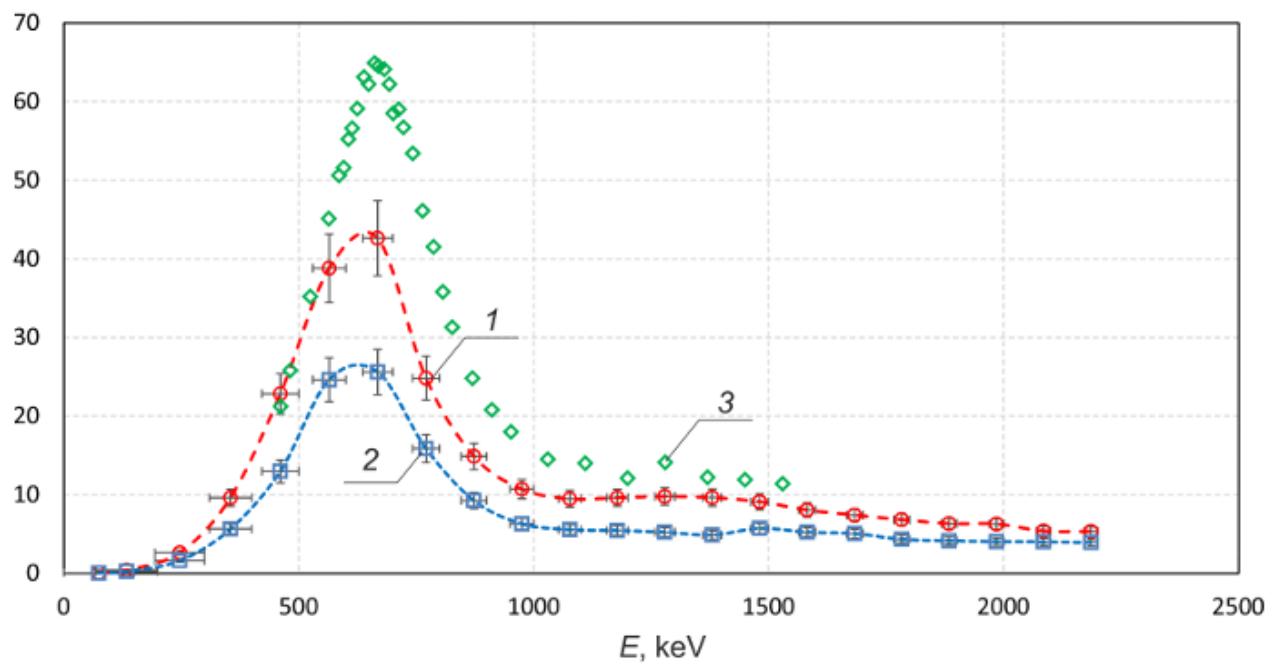


Рис. 6.