

DOI: 10.7868/S3034646026060149

Оригинальная статья

УДК 621.384

## Ускорительный источник нейтронов ВИТА для бор-нейтронозахватной терапии и других приложений

М. И. Бикчурина<sup>1, 2</sup>, Т. А. Быков<sup>1, 2</sup>, Г. Д. Верховод<sup>1</sup>, В. С. Дегтярев<sup>1</sup>, И. С. Ибрагим<sup>1</sup>,  
А. И. Касатова<sup>1, 2</sup>, Д. А. Касатов<sup>1, 2</sup>, А. А. Кашеев<sup>1</sup>, Я. А. Колесников<sup>1, 2</sup>, В. Д. Коновалова<sup>1</sup>,  
А. М. Кошкарёв<sup>1</sup>, К. С. Кузьмина<sup>1, 2</sup>, Г. М. Остреинов<sup>1, 2</sup>, С. С. Савинов<sup>1</sup>,  
Н. Ш. Сингатулина<sup>1, 2</sup>, Е. О. Соколова<sup>1, 2</sup>, А. Е. Солдатов<sup>1</sup>, И. Н. Сорокин<sup>1, 2</sup>,  
Ю. С. Таскаева<sup>1, 2</sup>, Т. В. Шейн<sup>1, 2</sup>, А. А. Шуклина<sup>1, 2</sup>, И. М. Щудло<sup>1, 2</sup>,  
С. В. Шукин<sup>1</sup>, С. Ю. Таскаев<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики Сибирского отделения  
Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»,  
Новосибирск, Российская Федерация  
\*e-mail: taskaev@inp.nsk.su

**Аннотация.** Приводится описание конструкции ускорительного источника нейтронов ВИТА, включающего в себя электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, оригинальную тонкую литиевую мишень и ряд систем формирования пучка, характеристики источника, области его применения, полученные результаты и декларируются планы.

**Ключевые слова:** ускоритель заряженных частиц, литиевая мишень, нейтрон, бор-нейтронозахватная терапия

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

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** М.И. Бикчурина — интерпретация результатов; Т.А. Быков — программное обеспечение; Г.Д. Верховод — исследование; В.С. Дегтярев — валидация; И.С. Ибрагим — исследование; А.И. Касатова — исследование; Д.А. Касатов — формальный анализ; А.А. Кашеев — техническое решение; Я.А. Колесников — исследование; В.Д. Коновалова — исследование; А.М. Кошкарёв — программное обеспечение; К.С. Кузьмина — исследование; Г.М. Остреинов — формальный анализ; С.С. Савинов — техническое решение; Н.Ш. Сингатулина — исследование; Е.О. Соколова — интерпретация результатов; А.Е. Солдатов — техническое решение; И.Н. Сорокин — исследование; Ю.С. Таскаева — исследование; Т.В. Шейн — расчеты; А.А. Шуклина — исследование; И.М. Щудло — управление установкой; С.В. Шукин — расчеты; С.Ю. Таскаев — концептуализация, руководство, написание: рецензирование и редактирование.

**Ссылка для цитирования:** Бикчурина М.И., Быков Т.А., Верховод Г.Д., Дегтярев В.С., Ибрагим И.С., Касатова А.И., Касатов Д.А., Кашеев А.А., Колесников Я.А., Коновалова В.Д., Кошкарёв А.М., Кузьмина К.С., Остреинов Г.М., Савинов С.С., Сингатулина Н.Ш., Соколова Е.О., Солдатов А.Е., Сорокин И.Н., Таскаева Ю.С., Шейн Т.В., Шуклина А.А., Щудло И.М., Шукин С.В., Таскаев С.Ю. Ускорительный источник нейтронов ВИТА для бор-нейтронозахватной терапии и других приложений // Известия Российской академии наук. Серия физическая / Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2026. Т. 90. № 6. С. 1361–1372. <https://doi.org/10.7868/S3034646026060149>

© Бикчурина М.И., Быков Т.А., Верховод Г.Д., Дегтярев В.С., Ибрагим И.С., Касатова А.И., Касатов Д.А., Кашеев А.А., Колесников Я.А., Коновалова В.Д., Кошкарёв А.М., Кузьмина К.С., Остреинов Г.М., Савинов С.С., Сингатулина Н.Ш., Соколова Е.О., Солдатов А.Е., Сорокин И.Н., Таскаева Ю.С., Шейн Т.В., Шуклина А.А., Щудло И.М., Шукин С.В., Таскаев С.Ю., 2026

## Accelerator based neutron source VITA for boron neutron capture therapy and other applications

M. I. Bikchurina<sup>1, 2</sup>, T. A. Bykov<sup>1, 2</sup>, G. D. Verkhovod<sup>1</sup>, V. S. Degtyarev<sup>1</sup>, I. S. Ibrahim<sup>1</sup>,  
A. I. Kasatova<sup>1, 2</sup>, D. A. Kasatov<sup>1, 2</sup>, A. A. Kashcheev<sup>1</sup>, Ya. A. Kolesnikov<sup>1, 2</sup>, V. D. Kononova<sup>1</sup>,  
A. M. Koshkarev<sup>1</sup>, K. S. Kuzmina<sup>1, 2</sup>, G. M. Ostreinov<sup>1, 2</sup>, S. S. Savinov<sup>1</sup>, N. Sh. Singatulina<sup>1, 2</sup>,  
E. O. Sokolova<sup>1, 2</sup>, A. E. Soldatov<sup>1</sup>, I. N. Sorokin<sup>1, 2</sup>, I. S. Taskaeva<sup>1, 2</sup>, T. V. Shein<sup>1, 2</sup>,  
A. A. Shuklina<sup>1, 2</sup>, I. M. Shchudlo<sup>1, 2</sup>, S. V. Shchukin<sup>1</sup>, S. Yu. Taskaev<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup>Budker Institute of Nuclear Physics,  
Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State University,  
Novosibirsk, 630090, Russian Federation

\*e-mail: taskaev@inp.nsk.su

**Abstract.** The design of the accelerator-based neutron source VITA, which includes an electrostatic tandem charged particle accelerator of an original design, an original thin lithium target and a set of beam shaping assemblies, is described, as well as its characteristics, its areas of application, the results obtained and plans declared.

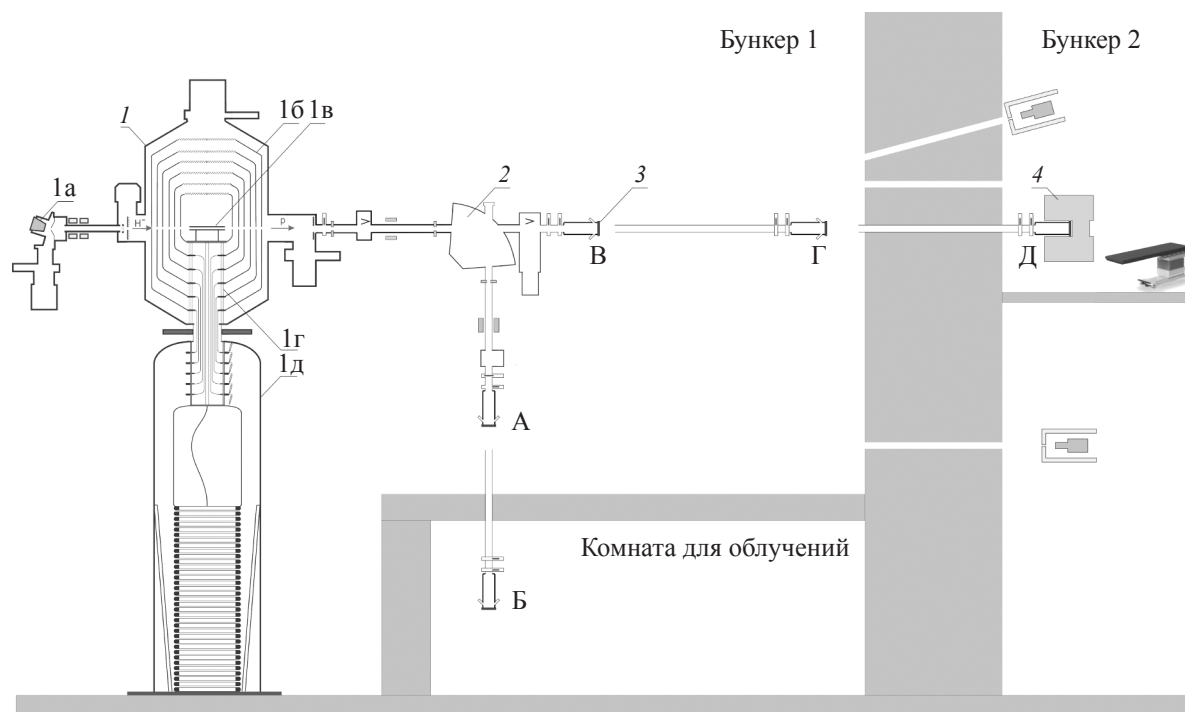
**Keywords:** accelerator, lithium target, neutron, boron neutron capture therapy

**Funding.** This work was supported by the Russian Science Foundation (grant number 19–72–30005).

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Authors contributions.** M.I. Bikchurina — interpretation of results; T.A. Bykov — software; G.D. Verkhovod — research; V.S. Degtyarev — validation; I.S. Ibrahim — research; A.I. Kasatova — research; D.A. Kasatov — formal analysis; A.A. Kashcheev — technical solution; Ya. Kolesnikov — research; V.D. Kononova — research; A.M. Koshkarev — software; K.S. Kuzmina — research; G.M. Ostreinov — formal analysis; S.S. Savinov — technical solution; N.Sh. Singatulina — research; E.O. Sokolova — interpretation of the results; A.E. Soldatov — technical solution; I.N. Sorokin — research; I.S. Taskaeva — research; T.V. Shein — calculations; A.A. Shuklina — research; I.M. Shchudlo — facility operation; S.V. Shchukin — calculations; S.Yu. Taskaev — conceptualization, supervision, writing; reviewing and editing.

**For citation:** Bikchurina M.I., Bykov T.A., Verkhovod G.D., Degtyarev V.S., Ibrahim I.S., Kasatova A.I., Kasatov D.A., Kashcheev A.A., Kolesnikov Ya.A., Kononova V.D., Koshkarev A.M., Kuzmina K.S., Ostreinov G.M., Savinov S.S., Singatulina N.Sh., Sokolova E.O., Soldatov A.E., Sorokin I.N., Taskaeva I.S., Shein T.V., Shuklina A.A., Shchudlo I.M., Shchukin S.V., Taskaev S.Yu. Accelerator based neutron source VITA for boron neutron capture therapy and other applications. *Izvestiya Rossiyskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya / Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2026. Vol. 90. No. 6. Pp. 1361–1372. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034646026060149>



**Рис. 1.** Схема ускорительного источника нейтронов VITA: 1 — ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, 2 — поворотный магнит, 3 — литиевая мишень, 4 — система формирования пучка нейтронов. Литиевую мишень размещают в положениях A, B, C, D или E

**Fig. 1.** Scheme of the accelerator-based neutron source VITA: 1 — vacuum insulated tandem accelerator, 2 — bending magnet, 3 — lithium target, 4 — beam shaping assembly. The lithium target is placed in positions A, B, C, D or E

## ВВЕДЕНИЕ

Для перспективной методики лечения злокачественных опухолей — БНЗТ [1, 2] — требуются интенсивные пучки нейтронов эпитеплового диапазона энергий (0.5 эВ — 10 кэВ), идеально — монохроматические с энергией вблизи 10 кэВ. Наилучшее решение — использовать для генерации нейтронов пороговую ядерную реакцию  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  (порог реакции 1.882 МэВ). Из-за быстрого роста сечения реакции вблизи порога до 0.59 б при 2.25 МэВ можно получить необходимый поток нейтронов при энергии протонов 2.3–2.5 МэВ. В этом случае энергия генерируемых нейтронов минимальна (сотни кэВ), и, используя относительно компактный замедлитель из фторида магния, можно за счет упругого и неупругого рассеяния нейтронов сформировать наиболее монохроматический пучок эпитепловых нейтронов с требуемой плотностью потока выше  $5 \times 10^8$  нейтронов/(см<sup>2</sup> с).

Такой ускорительный источник нейтронов предложен и разработан в Институте ядерной физики СО РАН. Его стали использовать не только для БНЗТ, но и для ряда других приложений [3].

**Сокращения:** БНЗТ — бор-нейтронозахватная терапия

## УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ VITA

Ускорительный источник нейтронов VITA — физическая установка, включающая в себя электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, названный со временем ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией (Vacuum Insulated Tandem Accelerator — VITA), для получения стационарного пучка протонов или дейтронов, оригинальную тонкую литиевую мишень для генерации нейтронов и ряд систем формирования пучка нейтронов с замедлителем из фторида магния, оргстекла или тяжелой воды. Схема установки представлена на рис. 1. В основном установка размещена в одном радиационно-защищенном бункере, в соседнем бункере размещают литиевую мишень с системой формирования пучка нейтронов, пригодных для терапии пациентов, либо гамма- или нейтронный спектрометр для проведения научных исследований.

Оригинальность конструкции ускорителя заключается в том, что здесь используют не традиционные ускорительные трубки, а электроды в виде вложенных друг в друга соосных цилиндров, которые крепят на

единственном проходном изоляторе. Отнесение межэлектродных изоляторов подальше от пучка заряженных частиц и обеспечение высокого темпа ускорения ионов за счет близкого размещения электродов позволили увеличить ток ионов до 10 мА. Отличительной особенностью электростатических ускорителей является высокая монохроматичность пучка ионов, в данном случае 0.1%. Энергию ионов можно изменять в широком диапазоне — от 100 кэВ до 2.3 МэВ.

Литиевая мишень представляет собой тонкий слой чистого лития кристаллической плотности, напыленный термическим способом в вакууме на эффективно охлаждаемую медную подложку. Благодаря созданию при напылении очень тонкого слоя, защищающего литий от взаимодействия с воздухом [4], и формированию в процессе использования промежуточного слоя между литием и медью, нечувствительного к радиационному блистерингу [5], мишень отличается чрезвычайно длительным сроком эксплуатации без снижения ее генерирующих свойств.

На установке получают пучки нейтронов в широком диапазоне энергий: быстрых при использовании пучка дейтронов, а при использовании пучка протонов — надэпитепловых, эпитепловых с применением замедлителя из фторида магния, моноэнергетических с применением кинематической коллимации, тепловых с применением замедлителя из оргстекла или полиэтилена с вкрапленным порошком висмута, холодных с применением замедлителя из тяжелой воды, замороженного жидким азотом.

Вначале установку использовали для развития бор-нейтронозахватной терапии, облучая клеточные культуры и лабораторных животных [6, 7]. Затем положительные результаты были достигнуты при лечении крупных домашних животных (кошек и собак) со спонтанными опухолями [8, 9]. К настоящему времени пролечено 31 домашнее животное; в последнее время при лечении животных успешно используется метод мгновенной  $\gamma$ -спектроскопии для прямого измерения количества произошедших ядерных реакций  $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)^7\text{Li}$  и оценки борной дозы [10]. Значительное количество новых препаратов адресной доставки бора протестировано на клеточных культурах и лабораторных животных с вполне хорошими результатами, особенно с клеточными культурами [11–15], но ни один из них пока не может заменить используемые при терапии боркаптан натрия и борфенилаланин.

В БНЗТ принято выделять четыре компоненты поглощенной дозы ионизирующего излучения: борную, дозу тепловых нейтронов, быстрых нейтронов и  $\gamma$ -излучения. Нами впервые успешно применен метод мгновенной  $\gamma$ -спектроскопии для прямого измерения борной дозы [10], а вместе с химическим дозиметром для измерения полной дозы, предложен новый метод измерения борной дозы путем добавления в препарат адресной доставки бора стабильных атом-

ных ядер, активируемых при облучении нейтронами [16], разработан малогабаритный детектор с парой литиевых полистирольных сцинтилляторов, один из которых обогащен бором, для измерения борной дозы и дозы  $\gamma$ -излучения в воздухе или в водном фантоме [17], предложен и реализован «клеточный дозиметр» — метод измерения суммы дозы быстрых и тепловых нейтронов [18], изготовлен и применяется активационный датчик для измерения потока эпитепловых нейтронов [19, 20].

Нами открыта эра литий-нейтронозахватной терапии, несущей новое качество — 100% доставку дозы в клетки опухоли. Сначала на лабораторных животных показано, что природный литий можно накопить в клетках опухоли в концентрации, достаточной для проведения терапии, и с такой однократной инъекцией лития справляются почки [21, 22]. Затем, используя хлорид лития, обогащенного изотопом литий-6, который вводили перорально или интраперитонеально, получили впечатляющий результат: группа, получившая терапию, отличалась от трех других контрольных групп значимым повышением выживаемости и в 2–4 раза более медленным ростом опухоли.

Значительное внимание на установке уделяют получению фундаментальных знаний о сечении ядерных реакций, важных для многих приложений [23–25]: измерен выход нейтронов в реакции  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$  [26], выход фотонов с энергией 478 кэВ в реакции  $^7\text{Li}(p, p'\gamma)^7\text{Li}$  [27], сечение реакций  $^7\text{Li}(p, p'\gamma)^7\text{Li}$  [27] и  $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$  [28], важных для БНЗТ, сечение реакций  $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$ ,  $^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}^*$  и  $^{11}\text{B}(p, \alpha\alpha)\alpha$  [29], важных для безнейтронной термоядерной энергетики, а также сечение реакций  $^6\text{Li}(d, \alpha)^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}(d, p)^7\text{Li}$ ,  $^6\text{Li}(d, p)^7\text{Li}^*$ ,  $^7\text{Li}(d, \alpha)^5\text{He}$ ,  $^7\text{Li}(d, n\alpha)^4\text{He}$  [30],  $^{10}\text{B}(d, \alpha_0)^8\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}(d, \alpha_1)^8\text{Be}^*$ ,  $^{10}\text{B}(d, p_2)^{11}\text{Be}^*$ ,  $^{11}\text{B}(d, \alpha_0)^9\text{Be}$ ,  $^{11}\text{B}(d, \alpha_2)^9\text{Be}^*$  [31] и  $^7\text{Li}(d, n)^8\text{Be}$ ,  $^7\text{Li}(d, n)^8\text{Be}^*$  [32].

Установку используют для радиационного тестирования образцов карбида бора и стали для Международного термоядерного реактора ИТЭР [33], оптических кабелей для Большого адронного коллайдера (ЦЕРН) [34], неодимовых магнитов для мощного линака, газовых сенсоров на основе фталоцианинов титанила [35], полупроводниковых фотоумножителей, электронных компонент и устройств. Так, облучение образцов карбида бора тепловыми нейтронами позволило определить минимально активируемые, а облучение их быстрыми нейтронами флюенсом  $10^{14}$  нейтронов/см<sup>2</sup> привело к уменьшению плотности образцов на 5%, модуля Юнга — на 13%, прочности на изгиб — на 14%. Измерена зависимость прозрачности трех типов оптического волокна, представленных Центром ядерных исследований Саклэ (Франция), от флюенса быстрых нейтронов до величины  $3 \times 10^{14}$  нейтронов/см<sup>2</sup>. Установлено, что прозрачность оптического волокна уменьшается на

~ 50%, как только волокно облучается быстрыми нейтронами, и не возвращается к прежнему уровню после окончания облучения. Измеренная деградация прозрачности оптических волокон варьируется от 20% до 35% при набранном флюенсе быстрых нейтронов  $10^{14}$  нейтронов/см<sup>2</sup>. Такое детальное изучение зависимости прозрачности оптического волокна от флюенса быстрых нейтронов проведено впервые, и полученные результаты уникальны и важны для науки и практики, в том числе для лазерной калибровки калориметра детектора CMS при планируемой работе Большого адронного коллайдера ЦЕРН в режиме высокой светимости.

Благодаря применению тонкой литевой мишени ускорительный источник нейтронов VITA отличается крайне высокой яркостью, что может быть использовано для реализации нейтрон-нейтронного коллайдера. В качестве первого шага на пути реализации амбициозного проекта предложено получить пучок холодных (ультрахолодных) нейтронов и, используя секступольный магнит, повторить опыт Штерна—Герлаха и дать ему верное описание [36]. Следующим шагом может стать создание нейтрон-электронного коллайдера для прямого изучения нейтрона впервые.

### VITA-II

Ускорительные источники нейтронов VITA-II $\alpha$  (рис. 2) [37] и VITA-II $\beta$ , сделанные для онкологических клиник, отличаются от VITA наличием предускорения для увеличения энергии протонов до энергии 2.35 МэВ, изменением подключения высоковольтного источника питания для существенного уменьшения высоты установки и использованием источника



**Рис. 2.** Ускорительный источник нейтронов VITA-II $\alpha$  на площадке ИЯФ СО РАН перед отправкой в Китай

**Fig. 2.** Accelerator-based neutron source VITA-II $\alpha$  at the BINP site before shipment to China

отрицательных ионов водорода с объемной генерацией ионов компании D-Pace (Канада) вместо источника с поверхностно-плазменной генерацией ионов разработки ИЯФ СО РАН для увеличения надежности и упрощения эксплуатации.

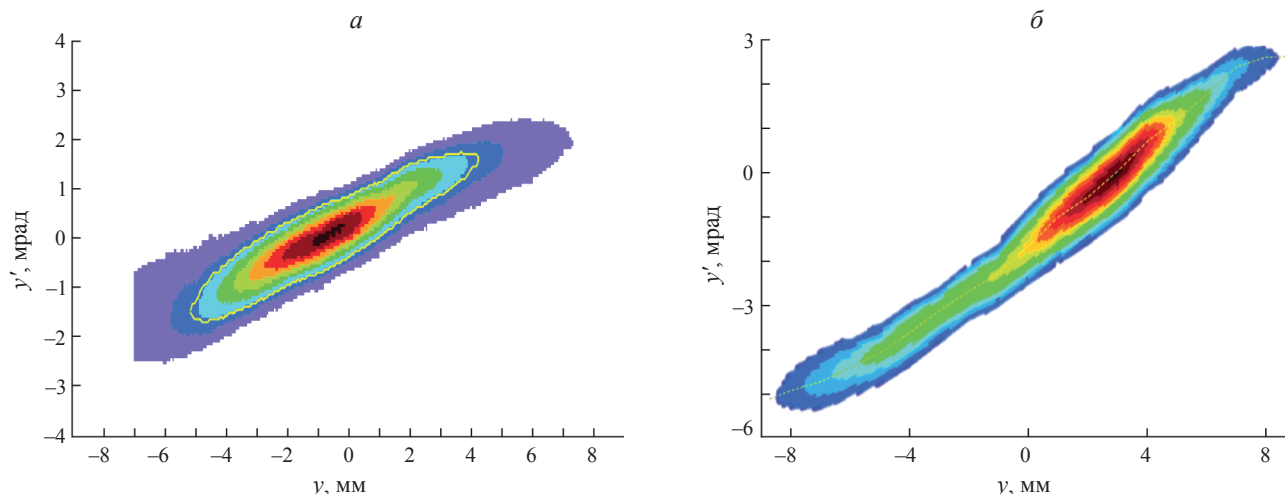
Ускорительный источник нейтронов VITA-II $\alpha$  поставлен в Китай и уже на протяжении нескольких лет используется для проведения клинических испытаний БНЗТ, что позволило Китаю стать второй страной в мире, после Японии, освоившей новый метод лечения злокачественных опухолей.

Ускорительный источник нейтронов VITA-II $\beta$  изготовлен для НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России. К настоящему времени осуществлена его транспортировка, сборка и пуско-наладка в Москве. До конца текущего года планируется вывести установку на рабочий режим с проектными параметрами и начать клинические испытания. Завершение клинических испытаний и регистрация ускорительного источника нейтронов для БНЗТ как нового медицинского изделия запланированы на конец 2027 г.

### VITA-III

В ускорителе VITA реализован режим, когда инжектируемый пучок отрицательных ионов перефокусируется на вход ускорителя так, что сильная входная электростатическая линза ускорителя делает пучок практически параллельным внутри и слегка расходящимся на выходе. На выходе из ускорителя пучок протонов имеет поперечный размер  $10 \pm 1$  мм, угловую расходимость — от  $\pm 0.5$  мрад до  $\pm 1.2$  мрад, нормализованный эмиттанс — 0.2 мм мрад, его поперечный профиль хорошо описывается гауссовым распределением. Малая угловая расходимость позволяет транспортировать пучок ионов на расстояние до 10 м без применения средств фокусировки. Существенным недостатком такого режима инъекции следует признать нагрев неохлаждаемой диафрагмы первого ускоряющего электрода, ограничивающий работу при большом токе пучка.

В ускорителе VITA-II инжектируемый пучок отрицательных ионов фокусируется внутри ускорителя, так что на выходе из ускорителя пучок протонов имеет поперечный размер 15–20 мм, угловую расходимость  $\pm 3$ –4 мрад, нормализованный эмиттанс — 0.2 мм мрад, его поперечный профиль неоднородный. На рисунке 3 представлены фазовые портреты пучка протонов, измеренные на ускорителях VITA и VITA-II $\beta$ . Использование предускорения дало как положительный, так и отрицательный эффект. Положительный эффект состоит в том, что энергия протонов увеличена на 100 кэВ и не происходит нагрева неохлаждаемых диафрагм ускорителя из-за меньшего размера пучка ионов в ускорителе. Отрицательный эффект в том, что ухудшилось качество получаемого



**Рис. 3.** Фазовый портрет 3 мА пучка протонов ускорителя VITA (а) и ускорителя VITA-II $\beta$  (б)

**Fig. 3.** Phase portrait of the 3 mA proton beam of the VITA accelerator (a) and the VITA-II $\beta$  accelerator (b)

пучка протонов: он стал больше в размере, его расходимость стала больше, и он стал неоднородным. Получение такого пучка усложняет установку, поскольку для его транспортировки требуются средства фокусировки. Также усложняет установку само использование предускорения: требуются высоковольтная платформа и развязывающий трансформатор.

Одним из основных предложений по усовершенствованию ускорителя является замедление инжектируемого в него ионного пучка [38]. Это достигается изоляцией входной диафрагмы ускорителя и подачей на нее отрицательного потенциала. Результаты численного моделирования показывают, что это позволяет уменьшить поперечный размер пучка в ускорителе и, как следствие, нагрев неохлаждаемых диафрагм и получить на выходе параллельный протонный пучок, удобный для транспортировки. Полученный результат можно качественно объяснить тем, что действие изолированной диафрагмы под потенциалом аналогично эффекту линзы Эйнцеля, фокусирующей ионный пучок, или тем, что торможение инжектируемых ионов уменьшает их поперечный импульс и, как следствие, поперечный размер пучка в ускорителе.

### VITamin

Высоту ускорительного источника нейтронов можно существенно снизить, если разместить высоковольтный источник питания внутри верхней вакуумной части проходного изолятора и исключить нижнюю газовую часть проходного изолятора [39].

Такое решение с симметричным каскадным генератором Кокрофта–Уолтона на 500 кВ разрабатывают для мощного компактного источника быстрых нейтронов [40, 41] и с генератором на 1.1 МВ для очень компактной установки для БНЗТ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН предложен и разработан ускорительный источник нейтронов, включающий в себя электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, оригинальную тонкую литиевую мишень и ряд систем формирования пучка нейтронов. Первую версию источника нейтронов в течение десятилетия активно используют на площадке института для развития методики бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей, для радиационного тестирования перспективных материалов, для измерения сечения ядерных реакций и ряда других приложений. Вторую версию источника нейтронов используют в Китае для проведения клинических испытаний методики БНЗТ и скоро начнут использовать для проведения клинических испытаний в Российской Федерации. Третью версию источника нейтронов разрабатывают для последующего оснащения им онкологических клиник с целью широкого внедрения методики в клиническую практику. Еще одну версию источника нейтронов разрабатывают в качестве мощного компактного источника быстрых нейтронов и очень компактной установки для БНЗТ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmed M., Alberti D., Altieri S. et al. *Advances in Boron Neutron Capture Therapy*. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2023, 416 p.

2. Sauerwein W., Wittig A., Moss R., Nakagawa Y., Ono K. (Editors). *Neutron Capture Therapy: Principles and Applications*. Second Edition. Springer, 2025. 806 p.
3. Таскаев С.Ю. *Ускорительный источник нейтронов VITA*. М.: Физматлит, 2024, 248 с.
4. Bikchurina M., Bykov T., Byambatseren E. et al. *J. Neutron Res.* 2022. Vol. 24. P. 273.  
<https://doi.org/10.3233/JNR-220020>
5. Bykov T., Goloshevskii N., Gromilov S. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2020. Vol. 481. P. 62.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.08.010>
6. Sato E., Zaboronok A., Yamamoto T. et al. *J. Rad. Research.* 2018. Vol. 59. P. 101. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrx071>
7. Zavjalov E., Zaboronok A., Kanygin V. et al. *Int. J. Rad. Biol.* 2020. Vol. 96(7). P. 868.  
<https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1761039>
8. Kanygin V., Kichigin A., Zaboronok A. et al. *Biology.* 2022. Vol. 11. Art. No. 138.  
<https://doi.org/10.3390/biology10111124>
9. Kanygin V., Zaboronok A., Kichigin A. et al. *Veterinary Sciences.* 2023. Vol. 10. Art. No. 274.  
<https://doi.org/10.3390/biology10111124>
10. Maltseva V., Bykov T., Chesnokova Y. et al. *Appl. Radiat. Isot.* 2026. Vol. 234. Art. No. 112648.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2026.112648>
11. Vorobyeva M., Dymova M., Novopashina D. et al. *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22. Art. No. 7326.  
<https://doi.org/10.3390/ijms22147326>
12. Popova T., Dymova M., Koroleva L. et al. *Molecules.* 2021. Vol. 26. Art. No. 6537.  
<https://doi.org/10.3390/molecules26216537>
13. Zaboronok A., Khaptakhanova P., Uspenskii S. et al. *Pharmaceutics.* 2022. Vol. 14. Art. No. 761.  
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14040761>
14. Aiyyzhy K., Barmina E., Zavestovskaya I. et al. *Laser Phys. Lett.* 2022. Vol. 19. Art. No. 066002.  
<https://doi.org/10.1088/1612-202X/ac642c>
15. Novopashina D., Dymova M., Davydova A. et al. *Int. J. Mol. Sci.* 2023. Vol. 24. Art. No. 306.  
<https://doi.org/10.3390/ijms24010306>
16. Zaboronok A., Taskaev S., Volkova O. et al. *Pharmaceutics.* 2021. Vol. 13. Art. No. 1490.  
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091490>
17. Bykov T., Kasatov D., Koshkarev A. et al. *JINST.* 2021. Vol. 16. Art. No. P10016.  
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/10/P10006>
18. Dymova M., Dmitrieva M., Kuligina E. et al. *Radiat. Res.* 2021. Vol. 196. P. 192.  
<https://doi.org/10.1667/RADE-21-00015.1>
19. Byambatseren E., Burdakov A., Bykov T. et al. *JINST.* 2023. Vol. 18. Art. No. 02020.  
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/02/P02020>
20. Byambatseren E., Bykov T., Kasatov D. et al. *Appl. Radiat. Isot.* 2025. Vol. 222. Art. No. 111844.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.111844>
21. Taskaeva I., Kasatova A., Surodin D. et al. *Life.* 2023. Vol. 13. Art. No. 518. <https://doi.org/10.3390/life13020518>
22. Taskaeva I., Kasatova A., Razumov I. et al. *J. Appl. Toxicol.* 2024. Vol. 44(8). P. 712. <https://doi.org/10.1002/jat.4576>
23. Генералов Л.Н., Жеребцов В.А., Селянкина С.М. *Изв. РАН. Сер. физ.* 2022. Т. 86. № 8. С. 1134.  
<https://doi.org/10.31857/S0367676522080087>
24. Ажибеков А.К., Самарин В.В. *Изв. РАН. Сер. физ.* 2022. Т. 86. № 9. С. 1320.  
<https://doi.org/10.31857/S036767652209006X>
25. Поташев С.И., Каспаров А.А., Пономарев В.Н. *Изв. РАН. Сер. физ.* 2022. Т. 86. № 9. С. 1304.  
<https://doi.org/10.31857/S0367676522090241>
26. Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D. et al. *Biology.* 2021. Vol. 10. Art. No. 824.  
<https://doi.org/10.3390/biology10090824>

27. Taskaev S., Bykov T., Kasatov D. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2021. Vol. 502. P. 85. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.010>
28. Taskaev S., Bikchurina M., Bykov T. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2022. Vol. 525. P. 55. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.06.010>
29. Taskaev S., Bessmeltsev V., Bikchurina M. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2024. Vol. 555. Art. No. 165490. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165490>
30. Taskaev S., Bikchurina M., Bykov T. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2024. Vol. 554. Art. No. 165460. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165460>
31. Taskaev S., Bessmeltsev V., Bikchurina M. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2024. Vol. 557. Art. No. 165527. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165527>
32. Мещанинов С.А., Красильников А.В., Родионов Н.Б. и др. *Ядерная физика.* 2024. Т. 87. № 6. С. 84.
33. Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M. et al. *Fusion Eng. Des.* 2021. Vol. 168. Art. No. 112426. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112426>
34. Kolesnikov Ya., Bikchurina M., Bykov T. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2026. Vol. 571. Art. No. 165968. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2025.165968>
35. Дюсенова С.Е., Клямер Д.Д., Сухих А.С. и др. *Журнал структурной химии.* 2023. Т. 64. № 3. Номер статьи 106824. [https://doi.org/10.26902/JSC\\_id106824](https://doi.org/10.26902/JSC_id106824)
36. Bogomyagkov A., Druzhinin V., Levichev E. et al. *Nucl. Phys. B.* 2025. Vol. 1012. Art. No. 116833. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2025.116833>
37. Иванов А.А., Смирнов А.Н., Таскаев С.Ю. и др. *Успехи физических наук.* 2022. Т. 192. № 7. С. 893. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.02.038940>
38. Bykov T., Kolesnikov Ya., Koshkarev A. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* 2025. Vol. 1077. Art. No. 170587. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170587>
39. Sorokin I., Taskaev S. *Appl. Radiat. Isot.* 2015. Vol. 106. P. 101. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.06.015>
40. Кашеев А.А., Колесников Я.А., Савинов С.С. и др. *Письма в ЭЧАЯ.* 2025. Т. 56. № 4. С. 782.
41. Касатов Д.А., Колесников Я.А., Сингатулина Н.Ш. и др. *Письма в ЭЧАЯ.* 2025. Т. 56. № 4. С. 660.

## REFERENCES

1. Ahmed M., Alberti D., Altieri S. et al. *Advances in Boron Neutron Capture Therapy.* International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2023, 416 p.
2. Sauerwein W., Wittig A., Moss R., Nakagawa Y., Ono K. (Editors). *Neutron Capture Therapy: Principles and Applications.* Second Edition. Springer, 2025. 806 p.
3. Taskaev S. Accelerator based neutron source VITA. Moscow: Fizmatlit, 2024, 248 p.
4. Bikchurina M., Bykov T., Byambatseren E. et al. *J. Neutron Res.* 2022. Vol. 24. P. 273. <https://doi.org/10.3233/JNR-220020>
5. Bykov T., Goloshevskii N., Gromilov S. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2020. Vol. 481. P. 62. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.08.010>
6. Sato E., Zaboronok A., Yamamoto T. et al. *J. Rad. Research.* 2018. Vol. 59. P. 101. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrx071>
7. Zavjalov E., Zaboronok A., Kanygin V. et al. *Int. J. Rad. Biol.* 2020. Vol. 96(7). P. 868. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1761039>
8. Kanygin V., Kichigin A., Zaboronok A. et al. *Biology.* 2022. Vol. 11. Art. No. 138. <https://doi.org/10.3390/biology10111124>
9. Kanygin V., Zaboronok A., Kichigin A. et al. *Veterinary Sciences.* 2023. Vol. 10. Art. No. 274. <https://doi.org/10.3390/biology10111124>
10. Maltseva V., Bykov T., Chesnokova Y. et al. *Appl. Radiat. Isot.* 2026. Vol. 234. Art. No. 112648. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2026.112648>

11. Vorobyeva M., Dymova M., Novopashina D. et al. *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22. Art. No. 7326.  
<https://doi.org/10.3390/ijms22147326>
12. Popova T., Dymova M., Koroleva L. et al. *Molecules*. 2021. Vol. 26. Art. No. 6537.  
<https://doi.org/10.3390/molecules26216537>
13. Zaboronok A., Khaptakhanova P., Uspenskii S. et al. *Pharmaceutics*. 2022. Vol. 14. Art. No. 761.  
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14040761>
14. Aiyzyzhy K., Barmina E., Zavestovskaya I. et al. *Laser Phys. Lett.* 2022. Vol. 19. Art. No. 066002.  
<https://doi.org/10.1088/1612-202X/ac642c>
15. Novopashina D., Dymova M., Davydova A. et al. *Int. J. Mol. Sci.* 2023. Vol. 24. Art. No. 306.  
<https://doi.org/10.3390/ijms24010306>
16. Zaboronok A., Taskaev S., Volkova O. et al. *Pharmaceutics*. 2021. Vol. 13. Art. No. 1490.  
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091490>
17. Bykov T., Kasatov D., Koshkarev A. et al. *JINST*. 2021. Vol. 16. Art. No. P10016.  
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/10/P10006>
18. Dymova M., Dmitrieva M., Kuligina E. et al. *Radiat. Res.* 2021. Vol. 196. P. 192.  
<https://doi.org/10.1667/RADE-21-00015.1>
19. Byambatseren E., Burdakov A., Bykov T. et al. *JINST*. 2023. Vol. 18. Art. No. 02020.  
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/02/P02020>
20. Byambatseren E., Bykov T., Kasatov D. et al. *Appl. Radiat. Isot.* 2025. Vol. 222. Art. No. 111844.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.111844>
21. Taskaeva I., Kasatova A., Surodin D. et al. *Life*. 2023. Vol. 13. Art. No. 518. <https://doi.org/10.3390/life13020518>
22. Taskaeva I., Kasatova A., Razumov I. et al. *J. Appl. Toxicol.* 2024. Vol. 44(8). P. 712. <https://doi.org/10.1002/jat.4576>
23. Generalov L., Zherebtsov V., Selyankina S. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2022. Vol. 86(8). P. 937.  
<https://doi.org/10.3103/S1062873822080081>
24. Azhibekov A., Samarin V. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2022. Vol. 86(9). P. 1092.  
<https://doi.org/10.3103/S1062873822090064>
25. Potashev S., Kasparov A., Ponomarev V. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2022. Vol. 86(9). P. 1079.  
<https://doi.org/10.3103/S1062873822090246>
26. Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D. et al. *Biology*. 2021. Vol. 10. Art. No. 824.  
<https://doi.org/10.3390/biology10090824>
27. Taskaev S., Bykov T., Kasatov D. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2021. Vol. 502. P. 85.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.010>
28. Taskaev S., Bikchurina M., Bykov T. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2022. Vol. 525. P. 55.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.06.010>
29. Taskaev S., Bessmeltsev V., Bikchurina M. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2024. Vol. 555. Art. No. 165490. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165490>
30. Taskaev S., Bikchurina M., Bykov T. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2024. Vol. 554. Art. No. 165460.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165460>
31. Taskaev S., Bessmeltsev V., Bikchurina M. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2024. Vol. 557. Art. No. 165527. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165527>
32. Meshchaninov S., Krasilnikov A., Rodionov N. et al. *Phys. At. Nucl.* 2024. Vol. 87(6). P. 771.  
<https://doi.org/10.1134/S1063778824700789>
33. Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M. et al. *Fusion Eng. Des.* 2021. Vol. 168. Art. No. 112426.  
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112426>
34. Kolesnikov Ya., Bikchurina M., Bykov T. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2026. Vol. 571. Art. No. 165968. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2025.165968>

35. Dyusenova S., Klyamer D., Sukhikh A. et al. *J. Struct. Chem.* 2023. Vol. 64. P. 337.  
<https://doi.org/10.1134/S0022476623030010>
36. Bogomyagkov A., Druzhinin V., Levichev E. et al. *Nucl. Phys. B.* 2025. Vol. 1012. Art. No. 116833.  
<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2025.116833>
37. Ivanov A., Smirnov A., Taskaev S. et al. *Phys. Usp.* 2022. Vol. 65(8). P. 834.  
<https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.02.038940>
38. Bykov T., Kolesnikov Ya., Koshkarev A. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* 2025. Vol. 1077. Art. No. 170587. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170587>
39. Sorokin I., Taskaev S. *Appl. Radiat. Isot.* 2015. Vol. 106. P. 101. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.06.015>
40. Kashcheev A., Kolesnikov Ya., Savinov S. et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2025. Vol. 22(4). P. 794.  
<https://doi.org/10.1134/S1547477125700591>
41. Kasatov D., Kolesnikov Ya., Singatulina N. et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2025. Vol. 22(4). P. 713.  
<https://doi.org/10.1134/S154747712570044X>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Марина Игоревна Бикчурина — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: M.I.Bikchurina@inp.nsk.su,  
<https://orcid.org/0000-0003-3561-2990>

Тимофей Александрович Быков — младший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: timaisabrony@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0001-6941-9342>

Глеб Дмитриевич Верховод — младший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: thevoidscreeamer@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-5264-636X>

Владимир Сергеевич Дегтярев — инженер, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: V.S.Degtyarev@inp.nsk.su

Ибрагим Сейфалдин Ибрагим — младший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: ibrahim93za@gmail.com

Анна Исмагиловна Касатова — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: A.I.Kasatova@inp.nsk.su,  
<https://orcid.org/0000-0002-6641-9344>

Дмитрий Александрович Касатов — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: kasatovd@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0001-5649-524X>

Артем Анатольевич Кашеев — инженер, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: A.A.Kascheev@inp.nsk.su

## ABOUT THE AUTHORS

Marina I. Bikchurina — PhD in Physics and Mathematics, senior researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: M.I.Bikchurina@inp.nsk.su,  
<https://orcid.org/0000-0003-3561-2990>

Timofey A. Bykov — junior researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: timaisabrony@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0001-6941-9342>

Gleb D. Verkhovod — junior researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: thevoidscreeamer@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-5264-636X>

Vladimir S. Degtyarev — engineer, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: V.S.Degtyarev@inp.nsk.su

Ibrahim S. Ibrahim — junior researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: ibrahim93za@gmail.com

Anna I. Kasatova — PhD in Medicine, senior researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: A.I.Kasatova@inp.nsk.su,  
<https://orcid.org/0000-0002-6641-9344>

Dmitrii A. Kasatov — PhD in Physics and Mathematics, senior researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: kasatovd@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0001-5649-524X>

Artem A. Kashcheev — engineer, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: A.A.Kascheev@inp.nsk.su

Ярослав Александрович Колесников — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: Ya.A.Kolesnikov@inp.nsk.su,  
<https://orcid.org/0000-0001-8522-0499>

Виктория Дмитриевна Коновалова — аспирант, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: v.konovalova1@g.nsu.ru

Алексей Михайлович Кошкарев — младший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: kent\_brockman4@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-9471-7904>

Ксения Сергеевна Кузьмина — студент, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: k.kuzmina1@g.nsu.ru

Георгий Михайлович Остреинов — научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: wtfsnoo@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-6765-2391>

Сергей Сергеевич Савинов — научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: savinov89@gmail.com

Наталья Шавкатовна Сиингатулина — студент, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: ntsasht@gmail.com

Евгения Олеговна Соколова — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: buiya@bk.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-4493-5612>

Артем Евгеньевич Солдатов — инженер, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: A.E.Soldatov@inp.nsk.su

Игорь Николаевич Сорокин — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: I.N.Sorokin@inp.nsk.su,  
<https://orcid.org/0000-0002-2164-3318>

Юлия Сергеевна Таскаева — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: inabrite@yandex.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-2812-2574>

Татьяна Викторовна Шейн — научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: sychevatatyanav@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-7613-9952>

Yaroslav A. Kolesnikov — PhD in Physics and Mathematics, senior researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: Ya.A.Kolesnikov@inp.nsk.su,  
<https://orcid.org/0000-0001-8522-0499>

Victoriia D. Konovalova — PhD student, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: v.konovalova1@g.nsu.ru

Alexey M. Koshkarev — junior researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: kent\_brockman4@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-9471-7904>

Ksinia S. Kuzmina — student, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: k.kuzmina1@g.nsu.ru

Georgii M. Ostreinov — researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: wtfsnoo@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-6765-2391>

Sergey S. Savinov — researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: savinov89@gmail.com

Nataliia Sh. Singatulina — student, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: ntsasht@gmail.com

Evgeniia O. Sokolova — PhD in Physics and Mathematics, senior researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: buiya@bk.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-4493-5612>

Artem E. Soldatov — engineer, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: A.E.Soldatov@inp.nsk.su

Igor N. Sorokin — PhD in Technical, senior researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: I.N.Sorokin@inp.nsk.su,  
<https://orcid.org/0000-0002-2164-3318>

Iuliia S. Taskaeva — PhD in Medicine, senior researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: inabrite@yandex.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-2812-2574>

Tatiana V. Shein — researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: sychevatatyanav@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-7613-9952>

Анна Артёмовна Шуклина — студент, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: a.shuklina@g.nsu.ru

Иван Михайлович Щудло — научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: cshudlo.i.m@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-8130-5249>

Степан Владимирович Шукин — аспирант, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: S.V.Schukin@inp.nsk.su

Сергей Юрьевич Таскаев — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация,  
e-mail: taskaev@inp.nsk.su,  
<https://orcid.org/0000-0002-5313-2563>

Anna A. Shuklina — student, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: a.shuklina@g.nsu.ru

Ivan M. Shchudlo — researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: cshudlo.i.m@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-8130-5249>

Stepan V. Shchukin — PhD student, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: S.V.Schukin@inp.nsk.su

Sergey Yu. Taskaev — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, chief researcher, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation,  
e-mail: taskaev@inp.nsk.su,  
<https://orcid.org/0000-0002-5313-2563>

Поступила в редакцию 10.02.2026  
После доработки 20.02.2026  
Принята к публикации 25.02.2026

Received February 10, 2026  
Revised February 20, 2026  
Accepted February 25, 2026