

Ядерная физика

Научная статья

УДК 539.1.03

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15206>

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОТОПА МЕДИ-64 НА ЦИКЛОТРОНЕ МГЦ-20 САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

**А. Тиба [✉], П. А. Карасев, Я. А. Бердников,
А. Ю. Егоров, С. Ю. Миронова**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
[✉] alitiba1991@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается технология получения изотопа ^{64}Cu путем циклотронного облучения протонами никелевой фольги природного изотопного состава. С целью наработки изотопа ^{64}Cu , три образца тонкой никелевой фольги в виде дисков были облучены протонами с энергией 13 МэВ (ток пучка – 4 мкА) на циклотроне МГЦ-20 СПбПУ в течение трех часов. По окончании облучения эти образцы подвергали многоэтапной радиохимической обработке, направленной на получение химической формы, удобной для измерения активности примесей и изотопа ^{64}Cu , образованных в результате облучения. По данным гамма-спектрометрического анализа значение активности этого изотопа составило 30 МБк. Сравнение данных эксперимента с результатами выполненных расчетов наведенной активности изотопа ^{64}Cu , базирующихся на исходных данных и учитывающих условия эксперимента, показало хорошее согласие между ними.

Ключевые слова: изотоп меди-64, циклотронное облучение, природные никелевые фольги, сравнение.

Для цитирования: Тиба А., Карасев П. А., Бердников Я. А., Егоров А. Ю., Миронова С. Ю. Особенности получения изотопа меди-64 на циклотроне МГЦ-20 Санкт-Петербургского политехнического университета // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2022. Т. 15. № 2. С. 56–63 DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15206>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15206>

FEATURES OF THE COPPER-64 ISOTOPE PRODUCTION USING THE MGC-20 CYCLOTRON AT ST. PETERSBURG POLYTECHNICAL UNIVERSITY

**A. Tiba [✉], P. A. Karasev, Ya. A. Berdnikov,
A. Yu. Egorov, S. Yu. Mironova**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
[✉] alitiba1991@gmail.com

Abstract. The article deals with the technology of ^{64}Cu isotope production by cyclotron proton irradiation of nickel foil of natural isotopic composition. In order to produce the ^{64}Cu isotope, three nickel samples were irradiated with 13 MeV protons (beam current was 4 μA) for three hours using the MGC-20 cyclotron at SPbPU. After irradiation the samples were subjected to multistage radiochemical treatment aimed at refining the chemical form suitable for measuring the activities of ^{64}Cu isotope and impurities. According to gamma spectrometric analysis, the ^{64}Cu activity value was 30 MBq. The performed calculations of induced ^{64}Cu isotope activity were based on the initial data and took into account the experimental conditions. A comparison of the experimental data with calculation results showed a good agreement between them.

Keywords: copper-64 isotope, cyclotron irradiation, natural nickel foil, comparison

For citation: Tiba A., Karaseov P. A., Berdnikov Ya. A., Egorov A. Yu., Mironova S. Yu., Features of the copper-64 isotope production using the MGC-20 cyclotron at St. Petersburg Polytechnical University, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 15 (2) (2022) 56–63 DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15206>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Молекулярная визуализация стала важным инструментом в лечении ряда заболеваний, в том числе раковых. Она не только обеспечивает возможности для неинвазивной визуализации физиологических процессов в живых организмах на клеточном и молекулярном уровнях, но также дает полезную информацию для раннего выявления и определения стадии заболевания, понимания его биологии, а также для оценки терапевтической эффективности. В настоящее время различные методы визуализации, такие как однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) и позитронная эмиссионная томография (ПЭТ), используются для оценки конкретных молекулярных мишеней в биомедицинских и клинических областях. Среди различных методов молекулярной визуализации, ПЭТ-визуализация особенно быстро развивалась в течение последнего десятилетия. Это обусловлено тем, что технология ПЭТ в сочетании с использованием радиофармацевтических препаратов, излучающих позитроны, предоставляет возможности визуализации живых систем с высокой пространственной чувствительностью измерения и точной количественной оценкой [1].

Выбор радиоизотопа для разработки ПЭТ радиофармпрепаратов зависит от его физико-химических характеристик, возможностей производства, доступности и временных масштабов биологического процесса, который планируется исследовать. Среди различных исследованных радиоизотопов, изотоп меди-64 (^{64}Cu), обладающий периодом полураспада, равным 12,7 ч, уникален по своим свойствам. Для него характерен распад тремя различными путями: захватом электронов (3ϵ), а также β^- - и β^+ -распадами. Соответствующие выходы процессов составляют (%): 43,5 (3ϵ), 17,5 (β^+) и 38,4 (β^-). Благодаря испусканию как β^+ -, так и β^- -частиц, этот изотоп можно использовать как для ПЭТ-визуализации, так и для направленной радионуклидной терапии [2 – 4].

За последние два десятилетия наблюдается повышенный интерес к разработке новых радиофармпрепаратов на основе изотопа ^{64}Cu , в основном благодаря хорошо известной химии меди. Этот изотоп присоединяли к различным молекулам, образующим радиофармпрепараты, которые используются как для визуализации, так и для терапии. Ниже в качестве примера приведен краткий перечень ^{64}Cu -радиофармпрепаратов и их применение в медицине [5, 6]:

^{64}Cu -ATSM – для визуализации гипоксии и рака легких;

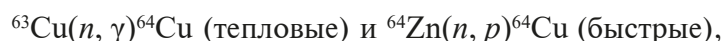
^{64}Cu -Trastuzumab – для визуализации и терапии рака молочной железы;

^{64}Cu -PSMA-617 – для визуализации рака простаты;

^{64}Cu -AE105 – для визуализации рака легких, рака толстой кишки и рака мочевого пузыря.

Рассматриваемый изотоп имеет, в частности, еще одно свойство, полезное для его медицинского применения. В своей ионной форме (в виде ионов $^{64}\text{Cu}^{2+}$) его можно использовать для ПЭТ-визуализации различных видов рака. В отличие от большинства обычных радиофармпрепаратов, применение ионов $^{64}\text{Cu}^{2+}$ не требует присоединения радиоизотопа к дорогостоящим молекулам-носителям, что значительно удешевляет технологию процесса. Отсутствие стадии радиомаркировки обеспечивает уникальное преимущество перед традиционной процедурой, поскольку после облучения мишени, обычной лабораторной радиохимической обработки достаточно для получения радиотрейсера в желаемой форме для ПЭТ-визуализации [7, 8].

Изотоп ^{64}Cu обладает еще одной важной особенностью: его можно получать как на циклотроне, так и на ядерном реакторе. В основе второй технологии лежат две ядерные реакции захвата нейтронов n :



где γ – гамма-кванты, p – протоны.

Крупномасштабное производство изотопа ^{64}Cu базируется на первой из этих реакций (захват тепловых нейтронов). Основным ограничением этого подхода является низкая удельная активность изотопа на фоне других активных примесей мишени, что делает такую технологию практически непригодной для приготовления радиофармпрепаратов.

Использование реакции захвата быстрых нейтронов также имеет множество ограничений. Поток быстрых нейтронов в активной зоне реактора, как правило, недоступен для производства изотопов. Работа большинства исследовательских реакторов в мире ограничивается также требованиями к объему мишени, что, в свою очередь, ограничивает активность получаемого изотопа ^{64}Cu [8].

Однако имеется возможность производства радиоизотопа ^{64}Cu путем ядерной реакции $^{64}\text{Ni}(p, n)^{64}\text{Cu}$ через облучение протонами обогащенного либо природного никеля на циклотроне. В настоящее время доступны автоматизированные модули для быстрого и высокоэффективного отделения изотопа ^{64}Cu от изотопа ^{64}Ni и от других радиоизотопов с помощью ионообменной хроматографии. В большинстве доклинических и клинических исследований, которые известны на сегодняшний день, использовался изотоп ^{64}Cu , полученный на циклотроне таким путем. Для развитых стран, обладающих циклотронным оборудованием высокого уровня, это, вероятно, наиболее целесообразный вариант производства требуемого изотопа для регулярного использования в клинических условиях [9, 10]. В то же время, все подобные публикации описывают получение меди на мишени из обогащенного изотопа никеля ^{64}Ni , обладающего чрезвычайно высокой стоимостью. Работа с природной смесью изотопов никеля может быть существенно выгоднее с экономической точки зрения.

Цель данной работы – получение информации об активации никелевых мишеней естественного изотопного состава.

В связи с указанной целью решались следующие задачи:

облучение фольги из природного никеля протонами с энергией 13 МэВ на циклотроне МГЦ-20 Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ);

радиохимическая обработка этой облученной фольги для разделения полученных радиоизотопов;

измерение активности изотопа ^{64}Cu ;

сравнение экспериментальных данных с расчетными результатами.

Методическая часть

Облучение фольги. Для получения изотопа ^{64}Cu достаточно использовать энергию протонов от 10 до 15 МэВ [11]. Нами была выбрана энергия 13 МэВ на циклотроне МГЦ-20 СПбПУ. В качестве мишени применяли три слоя никелевой фольги естественного изотопного состава (природная смесь) толщиной 100 мкм каждый; их суммарная толщина составляла 300 мкм, вес каждого образца – 0,09 г. Образцы имели форму дисков диаметром 12 мм (площадь – 1,13 см²).



Перед облучением с целью дополнительной очистки никелевая фольга была сперва трижды промыта в гептане C_7H_{16} (предельный углеводород), а затем трижды в изопропиловом спирте.

Чтобы закрепить три никелевых диска, подвергаемых радиации, использовали медный держатель мишени (рис. 1). Выбор меди был обусловлен ее высокой теплопроводностью, обеспечивающей отвод тепла. Диаметр поля облучения определялся геометрией держателя и составлял 10 мм. Держатель закрепляли на водоохлаждаемой подложке во избежание перегрева мишени.

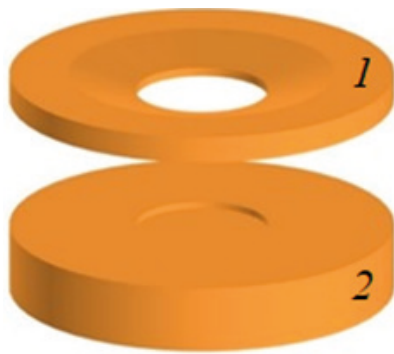


Рис. 1. Медный держатель мишени; три диска фольги закрепляли между кольцом (1) и подложкой (2)

Для облучения использовался пучок протонов с энергией 13 МэВ, ток пучка составлял 4 мкА, время облучения – 3 ч.

Радиохимическая обработка образцов. По окончании облучения процедура работы с образцами никелевой фольги для получения изотопа ^{64}Cu включала следующие этапы:

выдержка образцов в течение 12 ч, необходимая для распада короткоживущих изотопов; после этого облученную фольгу извлекали из циклотрона и помещали в бокс со свинцовой защитой;

растворение трех образцов фольги в 5 мл водного раствора соляной кислоты HCl (молярная концентрация раствора – 11,7 М) в течение 4 ч при температуре 100°C ;

выпаривание раствора на глицериновой бане в течение 1 ч при температуре $185 - 200^\circ\text{C}$ до сухого осадка; полученный осадок остужали до комнатной температуры в течение 20 мин;

растворение твердого осадка в 4 мл водного раствора соляной кислоты HCl (концентрация раствора – 6,0 М) в течение 20 мин при комнатной температуре 25°C ;

отбор аликвоты объемом 20 мкл из раствора известного объема (получен по окончании предыдущего этапа) для проведения гамма-спектрометрического анализа.

Спектрометрический анализ объекта. Его проводили еще через 1 ч 14 мин на спектрометре гамма-излучения, который оснащен полупроводниковым детектором на основе сверхчистого германия серии GEM-FX5825 и многоканальным цифровым анализатором типа DSPec-50.

Экспериментальные результаты

На энергетическом спектре (рис. 2) имеется пик при значении энергии 1345,77 кэВ, который относится к изотопу ^{64}Cu , что свидетельствует о его присутствии в образце. Установлено, что активность изотопа ^{64}Cu в аликвоте объемом 20 мкл составила 45 кБк (с погрешностью 30 %), тогда как полный раствор (4 мл) содержит изотоп ^{64}Cu с активностью 9 МБк. Эта активность достигается через 21 ч после облучения. Таким образом, можно заключить, что активность ^{64}Cu сразу по окончании облучения составляла 30 ± 9 МБк. Проведенный дальнейший анализ данных показал, что полученный результат измерения не противоречит результатам расчета (представлены далее).

Моделирование выхода изотопа ^{64}Cu при облучении природного никеля пучком протонов

С целью моделирования были использованы решение уравнения прохождения протонов через вещество (формула Бете – Блоха) и уравнение образования изотопа при облучении протонами мишени из природного никеля на циклотроне для определения выхода реакции $^{64}\text{Ni}(p, n)^{64}\text{Cu}$ [12]. Природный никель содержит следующие изотопы [13]:

^{58}Ni (68,00 %), ^{60}Ni (26,00 %), ^{61}Ni (1,14 %), ^{62}Ni (3,71 %) и ^{64}Ni (0,93 %).

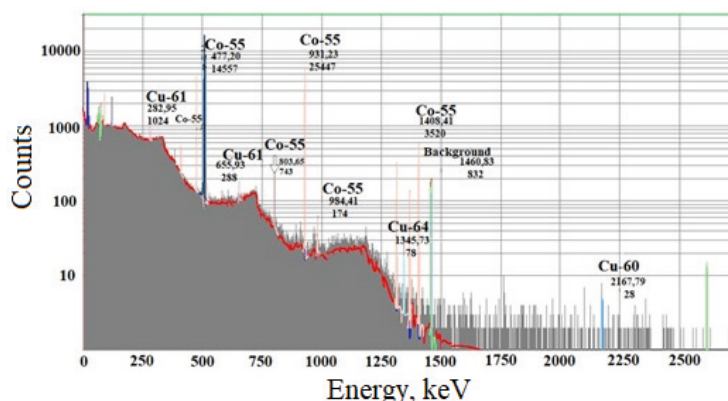


Рис. 2. Спектр от аликвоты (20 мкл), полученной из облученного препарата природной смеси изотопов никеля

На рис. 3 показана зависимость наработанной активности изотопа ^{64}Cu от толщины мишени из природного никеля при использовании протонов с начальной кинетической энергией 13 МэВ. Линия показывает зависимость, а полоса отражает погрешность ее определения, которая обусловлена погрешностью нахождения сечения реакции. Видно, что при данном значении энергии оптимальная толщина мишени для получения максимальной активности изотопа составляет 300 – 350 мкм.

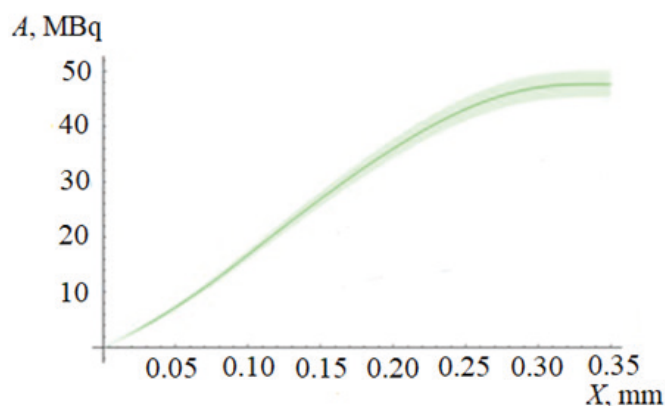


Рис. 3. Расчетная зависимость наработанной активности изотопа ^{64}Cu от толщины мишени из природного никеля при использовании протонов с начальной кинетической энергией 13 МэВ (время облучения – 3 ч)

Из результата вычисления можно определить активность изотопа ^{64}Cu при облучении мишени толщиной 300 мкм в течение 3 ч протонами с энергией 13 МэВ (ток пучка – 4 мкА). Результат проведенного моделирования показал, что активность изотопа ^{64}Cu составила 47 ± 3 МБк. Из статистического анализа данных измерений (30 ± 9 МБк) и результата расчета (47 ± 3 МБк) следует, что достигаемый уровень значимости наблюдаемого отклонения результата расчета от измерения составляет 0,07 (7 %). Достигаемый уровень значимости есть вероятность того, что отклонение результатов расчета от данных измерений за счет статистических флуктуаций составляет 7 % для проверки нулевой гипотезы. Согласно данной гипотезе, наблюдаемое различие между результатами расчетов и измерений связано со статистическими флуктуациями; тогда следует сравнивать достигаемый уровень значимости с уровнем значимости, который на практике выбирается 0,05. Поскольку достигаемый уровень значимости 0,07 превышает значение 0,05, нулевая гипотеза подтверждается, т. е. наблюдаемое различие связано со статистическими флуктуациями.



Таким образом, результаты измерения и расчета находятся в согласии при уровне значимости 0,05. Следует признать хорошее согласие экспериментальных данных с расчетными результатами.

Заключение

В данной работе описана процедура наработки изотопа ^{64}Cu на циклотроне МГЦ-20. Три фольги из природного никеля были облучены пучком протонов с энергией 13 МэВ, после чего подвергнуты радиохимической обработке. По измеренной активности изотопа ^{64}Cu было получено значение активности на момент окончания облучения, которое составило 30 ± 9 МБк. Выполненный расчет активности изотопа ^{64}Cu в условиях, соответствующих экспериментальным, дал значение 47 ± 3 МБк. Достигнутый уровень значимости наблюдаемого отклонения результата расчета от измерения составил 0,07. Таким образом установлено, что результаты расчета и измерения находятся в согласии при уровне значимости 0,05, т. е. согласие хорошее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gambhir S. S.** Molecular imaging of cancer with positron emission tomography // *Nature Reviews Cancer*. 2002. Vol. 2. No. 9. Pp. 683–693.
2. **Asabella A. N., Cascini G. L., Altini C., Paparella D., Notaristefano A., Rubini G.** The copper radioisotopes: A systematic review with special interest to ^{64}Cu // *BioMed Research International*. 2014. Vol. 2014. May. P. 786463.
3. **Amiot M. N., Be M. M., Branger T., Cassette P., Lepy M. C., Menesguen Y., DaSilva I.** Standardization of ^{64}Cu using an improved decay scheme // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2012. Vol. 684. 21 August. Pp. 97–104.
4. **Anderson C. J., Riccardo F.** Copper-64 radiopharmaceuticals for PET imaging of cancer: Advances in preclinical and clinical research // *Cancer Biotherapy and Radiopharmaceuticals*. 2009. Vol. 24. No. 4. Pp. 379–393.
5. **Holland J. P., Riccardo F., Anderson C. J., Lewis J. S.** Copper-64 radiopharmaceuticals for oncologic imaging // *PET Clinics*. 2009. Vol. 4. No. 1. Pp. 49–67.
6. **Zhou Y., Li J., Xu X., Zhao M., Zhang B., Deng S., Wu Y.** ^{64}Cu -based radiopharmaceuticals in molecular imaging // *Technology in Cancer Research & Treatment*. 2019. Vol. 18. February 14. doi10.1177/1533033819830758.
7. **Boschi A., Martini P., Janevik-Ivanovska E., Duatti A.** The emerging role of copper-64 radiopharmaceuticals as cancer theranostics // *Drug Discovery Today*. 2018. Vol. 23. No. 8. Pp. 1489–1501.
8. **Chakravarty R., Chakraborty S., Dash A.** $^{64}\text{Cu}^{2+}$ ions as PET probe: An emerging paradigm in molecular imaging of cancer // *Molecular Pharmaceutics*. 2016. Vol. 13. No. 11. Pp. 3601–3612.
9. **Xie Q., Zhu H., Wang F., Meng X., Ren Q., Xia Ch., Yang Zh.** Establishing reliable Cu-64 production process: From target plating to molecular specific tumor micro-PET imaging // *Molecules*. 2017. Vol. 22. No. 4. P. 641.
10. **Szűcs Z., Takács S., Alirezapour B.** Development of cost-effective method for production of ^{64}Cu from ^{nat}Ni // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 302. No. 2. Pp. 1035–1038.
11. **Aslam M. N., Sudár S., Hussain M., Malik A. A., Shah H. A., Qaim S. M.** Charged particle induced reaction cross section data for production of the emerging medically important positron emitter ^{64}Cu : A comprehensive evaluation // *Radiochimica Acta*. 2009. Vol. 97. No. 12. Pp. 669–686.
12. **Тйба А., Бердников Я. А.** Оптимизация получения изотопа меди-64 из природного никеля на циклотроне // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2021. Т. 14. № 2. С. 81–89.
13. **Rosman K. J. R., Taylor P. D. P.** Isotopic compositions of the elements // *Pure and Applied Chemistry*. 1998. Vol. 70. No. 1. Pp. 217–235.

REFERENCES

1. **Gambhir S. S.**, Molecular imaging of cancer with positron emission tomography, *Nat. Rev. Cancer*. 2 (9) (2002) 683–693.
2. **Asabella A. N., Cascini G. L., Altini C., et al.**, The copper radioisotopes: A systematic review with special interest to ^{64}Cu , *BioMed Res. Int.* 2014 (May) (2014) 786463.
3. **Amiot M. N., Be M. M., Branger T., et al.**, Standardization of ^{64}Cu using an improved decay scheme, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*. 684 (21 August) (2012) 97–104.
4. **Anderson C. J., Riccardo F.**, Copper-64 radiopharmaceuticals for PET imaging of cancer: Advances in preclinical and clinical research, *Cancer Biother. Radiopharm.* 24 (4) (2009) 379–393.
5. **Holland J. P., Riccardo F., Anderson C. J., Lewis J. S.**, Copper-64 radiopharmaceuticals for oncologic imaging, *PET Clinics*. 4 (1) (2009) 49–67.
6. **Zhou Y., Li J., Xu X., et al.**, ^{64}Cu -based radiopharmaceuticals in molecular imaging, *Technol. Cancer Res. Treat.* 18 (February 14) (2019) doi10.1177/1533033819830758.
7. **Boschi A., Martini P., Janevik-Ivanovska E., Duatti A.**, The emerging role of copper-64 radiopharmaceuticals as cancer theranostics, *Drug Discov. Today*. 23 (8) (2018) 1489–1501.
8. **Chakravarty R., Chakraborty S., Dash A.**, $^{64}\text{Cu}^{2+}$ ions as PET probe: An emerging paradigm in molecular imaging of cancer, *Molecul. Pharmaceut.* 13 (11) (2016) 3601–3612.
9. **Xie Q., Zhu H., Wang F., et al.**, Establishing reliable Cu-64 production process: From target plating to molecular specific tumor micro-PET imaging, *Molecules*. 22 (4) (2017) 641.
10. **Szűcs Z., Takács S., Alirezapour B.**, Development of cost-effective method for production of ^{64}Cu from ^{nat}Ni , *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 302 (2) (2014) 1035–1038.
11. **Aslam M. N., Sudár S., Hussain M., et al.**, Charged particle induced reaction cross section data for production of the emerging medically important positron emitter ^{64}Cu : A comprehensive evaluation, *Radiochim. Acta*. 97 (12) (2009) 669–686.
12. **Tiba A., Berdnikov Ya. A.**, Optimization of the copper-64 isotope production from natural nickel target at a cyclotron, *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*. 14 (2) (2021) 81–89.
13. **Rosman K. J. R., Taylor P. D. P.**, Isotopic compositions of the elements, *Pure Appl. Chem.* 70 (1) (1998) 217–235.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТИБА Али – аспирант Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
alitiba1991@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1320-6166

КАРАСЕВ Платон Александрович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
platon.karaseov@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-2511-0188

БЕРДНИКОВ Ярослав Александрович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
berdnikov@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-0309-5917

ЕГОРОВ Анатолий Юрьевич – ассистент Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
egorov.a@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-4936-6962

МИРОНОВА Светлана Юрьевна – инженер Научно-технологического комплекса «Ядерная физика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Scaremonger@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-2114-716X

THE AUTHORS

TIBA Ali

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
alitiba1991@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1320-6166

KARASEOV Platon A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
platon.karaseov@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-2511-0188

BERDNIKOV Yaroslav A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
berdnikov@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-0309-5917

EGOROV Anatoliy A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
egorov.a@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-4936-6962

MIRONOVA Svetlana Yu.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
Scaremonger@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-2114-716X

*Статья поступила в редакцию 04.04.2022. Одобрена после рецензирования 26.04.2022.
Принята 26.04.2022.*

Received 04.04.2022. Approved after reviewing 26.04.2022. Accepted 26.04.2022.