

Семинар памяти Б. С. Ишханова «Фотоядерные исследования. Состояние и перспективы»

## Исследование спектра и структуры нуклонных резонансов в коллаборации МГУ/JLAB

А.В. Голда,<sup>1</sup> Е.Л. Исупов,<sup>2,\*</sup> А.А. Русова,<sup>1,2</sup> В.Б. Рыжков<sup>1</sup><sup>1</sup>*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики**Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скobelевына (НИИЯФ МГУ)**Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5*

(Поступила в редакцию 27.11.2025; после доработки 20.01.2026; подписана в печать 28.01.2026)

Реакции фото- и электророждения одиночных пионов на протоне, а также состояния  $\pi^+ \pi^- p$  предоставляют наиболее обширный массив информации о спектре и структуре нуклонных резонансов ( $N^*$ ). Изучение процессов электромагнитного возбуждения  $N^*$  важно для понимания динамики сильного взаимодействия, ответственного за генерацию доминирующей части видимой массы во Вселенной. Эксперименты, проведённые на детекторе CLAS (Лаборатория Т. Джейферсона, США), существенно расширили наше понимание физики нуклонных резонансов, было измерено более чем 150 000 точек дифференциальных сечений и различных поляризационных наблюдаемых. В статье представлены избранные результаты программы изучения  $N^*$  в Лаборатории Т. Джейферсона, а также направление будущих исследований с фокусом на сотрудничестве МГУ/JLAB.

PACS: 14.20.Gk, 13.60 Le. УДК: 539.1, 53.02

Ключевые слова: нуклонные резонансы, электророждение мезонов.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.81.2610204](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.81.2610204)

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование электромагнитного возбуждения нуклонных резонансов ( $N^*$ ) является одним из ключевых элементов в изучении генерации доминирующей составляющей видимой массы во Вселенной — одной из наиболее фундаментальных нерешённых проблем в субъядерной физике [1].

Электророждение состояний  $\pi^0 p$ ,  $\pi^+ n$  и  $\pi^+ \pi^- p$  на детекторе CLAS [2] позволило получить уникальные данные для спиральных амплитуд перехода для большинства нуклонных резонансов с массами ниже 1.8 ГэВ и виртуальностями фотона вплоть до  $Q^2 = 5.0$  ГэВ<sup>2</sup>. Все опубликованные данные CLAS, включающие более 150000 точек по дифференциальным сечениям и поляризационным наблюдаемым, доступны в базе данных CLAS Physics Database [3]. Результаты по амплитудам электровозбуждения  $N^*$  показывают сложную внутреннюю структуру возбужденных состояний нуклона, включающую как «одетое» кварковое ядро, так и внешнее мезон-барионное облако [4]. Независимое изучение упругих формфакторов пиона, нуклона, а также амплитуд электровозбуждения резонансов  $\Delta(1232)3/2^+$ ,  $N(1440)1/2^+$  и  $\Delta(1600)3/2^+$  дают согласующиеся результаты для массовой функции одетого кварка, демонстрируя возможность изучения её импульсной зависимости и связи массовой

функции одетого кварка с механизмами генерации массы адронов. Модернизированный для работы с электронным пучком с энергией 12 ГэВ детектор CLAS12 [5] — единственный в мире детектор, способный расширить результаты CLAS, обеспечивая доступ к области больших  $Q^2$  ( $Q^2 > 5.0$  ГэВ<sup>2</sup>), где ожидается переход от сильной к пертурбативной КХД. Данное направление исследований позволит ответить на ключевые вопросы о генерации массы адронов, конфайнменте и их происхождении из КХД [6].

### 1. ЭЛЕКТРОРОЖДЕНИЕ ОДИНОЧНОГО ПИОНА НА ПРОТОНЕ

Электророждение конечного состояния  $\pi N$  — важнейший инструмент для исследования структуры нуклонных резонансов [4, 6–9]. Спектрометр большого аксептанса CEBAF (CLAS) в Лаборатории Т. Джейферсона позволил измерить огромный массив наблюдаемых  $\pi N$  реакций, охватывая инвариантные массы конечных адронов  $W < 1.8$  ГэВ и виртуальности фотона  $Q^2 < 5.0$  ГэВ<sup>2</sup> [10–14]. Измеренные наблюдаемые позволяют определить амплитуды электровозбуждения  $\gamma_v p N^*$  нуклонных резонансов для большинства возбужденных состояний в данном кинематическом диапазоне [4, 7, 9, 13]. Амплитуды электровозбуждения  $N^*$  дают возможность оценивать резонансный вклад в инклюзивное рассеяние электронов, используя доступные

\* E-mail:isupov@jlab.org

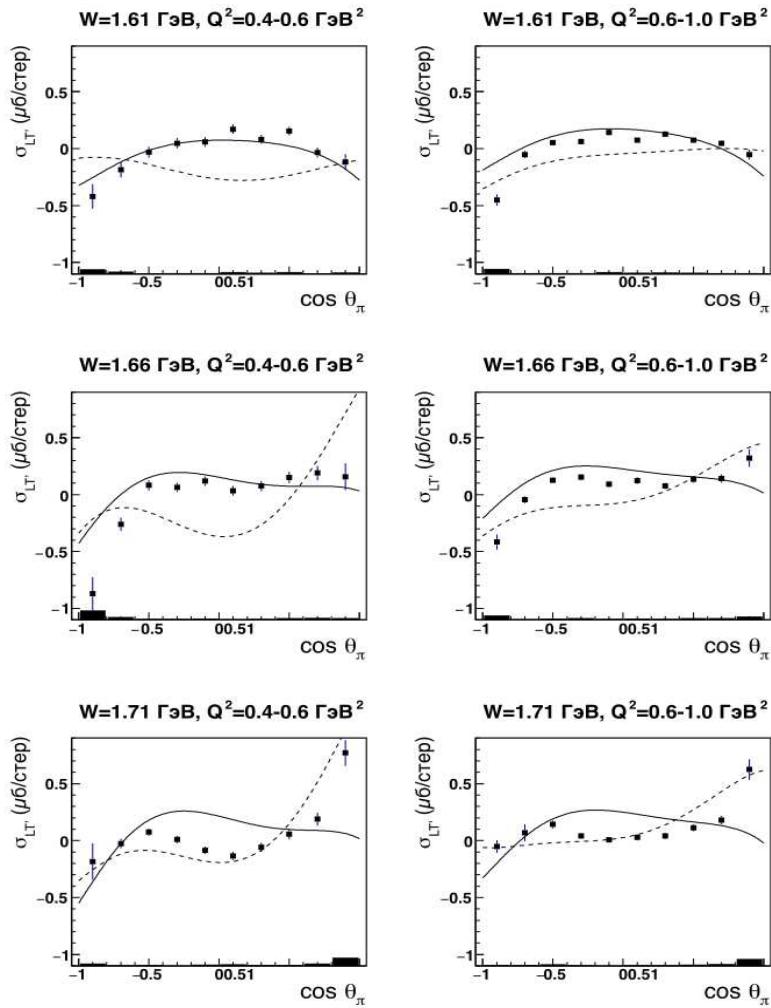


Рис. 1. Структурная функция  $\sigma_{LT'}$  электророждения  $\pi^0 p$  на протонах при  $W > 1.6$  ГэВ,  $Q^2$  от 0.4 ГэВ $^2$  до 0.6 ГэВ $^2$  (левая панель) и от 0.6 ГэВ $^2$  до 1.0 ГэВ $^2$  (правая панель) [29]. Линии представляют расчёты в рамках модели MAID [30] с амплитудами  $\gamma_v p N^*$ , полученными из анализа реакции  $\pi N$  [31] (сплошная линия), а также данных CLAS по эксклюзивному электророждению мезонов (штриховая линия) [15, 32, 33]

амплитуды  $\gamma_v p N^*$ , полученные из экспериментальных данных. Подобные оценки предоставляют важные сведения о партонных распределениях нуклона в области возбуждения резонансов [15, 16].

Исследования амплитуд  $\gamma_v p N^*$  выявили сложную структуру нуклонных резонансов, которая определяется совместным вкладом внутреннего ядра из трёх одетых кварков и внешнего мезон-барийонного облака [4, 7, 8]. Амплитуды электровозбуждения  $N^*$  важны для изучения вопроса происхождения массы адронов [4, 6, 17, 18], а также для моделирования структуры  $N^*$  в различных кварковых моделях [19–24].

Измерение спиновой асимметрии пучка (BSA) и связанной с ней структурной функции  $\sigma_{LT'}$  даёт важные ограничения на извлечение амплитуд  $\gamma_v p N^*$  при совместном использовании с данными по дифференциальным сечениям. Структурная функция  $\sigma_{LT'}$  изолирует мнимую часть билинейных произведений между продольными и поперечными ам-

плитудами. Малые вклады от мнимых компонент продольных амплитуд резонансов усиливаются из-за их интерференции с действительными частями нерезонансных амплитуд, что делает BSA особенно чувствительной наблюдаемой для определения продольных амплитуд  $S_{1/2}$ . Предыдущие измерения BSA в каналах  $\pi^+ n$  и  $\pi^0 p$  [25–28], проведённые в области  $W < 1.5$  ГэВ, продемонстрировали значительное влияние BSA на извлечение продольной амплитуды  $S_{1/2}$  для резонансов  $\Delta(1232)3/2^+$  и  $N(1440)1/2^+$ , как показано в [9].

Новые результаты по измерению структурной функции  $\sigma_{LT'}$  [29] в эксклюзивном электророждении  $\pi^0 p$  при инвариантных масах конечного состояния 1.5 ГэВ  $< W <$  1.8 ГэВ (рис. 1) и в диапазоне виртуальностей фотона  $0.4 \text{ ГэВ}^2 < Q^2 < 1.0 \text{ ГэВ}^2$  были получены на основе данных по спиновой асимметрии пучка и дифференциальных сечений, измеренных на детекторе CLAS в Лаборатории Т. Джефферсона.

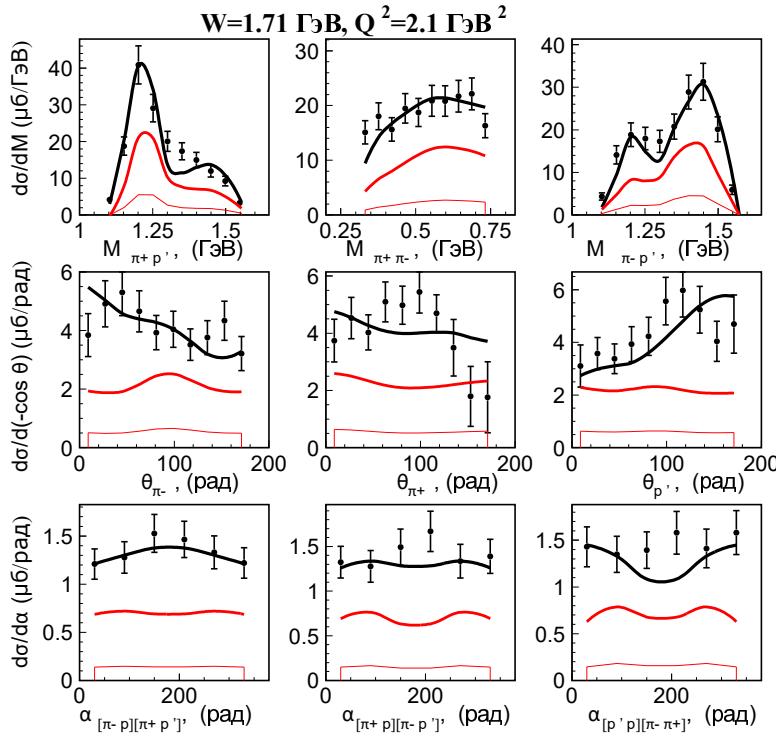


Рис. 2. Девять одномерных дифференциальных сечений электророждения состояния  $\pi^+\pi^-p$  при  $W = 1.71$  ГэВ,  $Q^2 = 2.1$  ГэВ<sup>2</sup> из данных CLAS [35]. Чёрная линия соответствует подгонке в рамках модели JM [36, 37], красная линия — резонансный вклад, тонкая красная линия показывает модельные неопределённости резонансного вклада

Из рис. 1 хорошо видно, что спиральные резонансные амплитуды  $\gamma_vpN^*$ , используемые в модели реакции MAID [30], не способны описать экспериментальные данные при  $W > 1.7$  ГэВ. Также были извлечены Лежандровские моменты структурной функции  $\sigma_{LT'}$ , которые чувствительны к вкладам нуклонных резонансов во второй и третьей резонансных областях. Таким образом, новые данные по поляризационным наблюдаемым в канале  $\pi^0p$  расширяют возможности по извлечению амплитуд электровозбуждения нуклонных резонансов в области масс выше 1.6 ГэВ.

## 2. ЭЛЕКТРОРОЖДЕНИЕ СОСТОЯНИЯ $\pi^+\pi^-p$

Большинство нуклонных возбуждений в области масс выше 1.6 ГэВ, как известно, сильно связаны с каналом  $\pi\pi N$ . Поэтому исследования эксклюзивного электророждения  $\pi^+\pi^-p$  являются важнейшим источником информации о внутренней структуре этих состояний. Изучение эксклюзивного электророждения  $\pi^+\pi^-p$  особенно важно для извлечения амплитуд электровозбуждения  $N^*$  на протонах для всех наиболее выраженных резонансов в области масс до 2.0 ГэВ и при виртуальностях фотона  $Q^2 < 5.0$  ГэВ<sup>2</sup>.

Извлечение амплитуд электровозбуждения осуществляется в рамках моделей реакции, которые должны включать все хорошо установленные резонансы, а также амплитуды соответствующих нере-

зонансных механизмов. Одной из таких моделей является подход, разработанный в коллегии Jefferson Lab–MSU (JM) [36–38]. Модель включает все механизмы реакции с образованием  $\pi^+\pi^-p$  в конечном состоянии, которые дают существенный вклад в сечение в резонансной области, включая мезон-барионные каналы  $\pi^-\Delta^{++}$ ,  $\pi^+\Delta^0$ ,  $\rho p$ ,  $\pi^+N(1520)3/2^-$  и  $\pi^+N(1685)5/2^+$ , так же как и прямое рождение  $\pi^+\pi^-p$  без образования нестабильных адронов в промежуточном состоянии. Все хорошо установленные  $N^*$  с массами до 2.0 ГэВ были включены в амплитуды мезон-барионных каналов  $\pi\Delta$  и  $\rho p$ . Резонансные амплитуды описываются в рамках параметризации Брейта–Вигнера с учетом ограничений, налагаемых на резонансные амплитуды условием унитарности.

На детекторе CLAS были получены данные по дифференциальным сечениям реакции  $e + p \rightarrow e\pi^+\pi^-p'$  в области инвариантных масс конечных адронов  $W < 2.0$  ГэВ и при виртуальностях фотона  $2.0$  ГэВ<sup>2</sup>  $< Q^2 < 5.0$  ГэВ<sup>2</sup> [34, 35].

Девять одномерных дифференциальных сечений электророждения состояния  $\pi^+\pi^-p$  при  $W = 1.71$  ГэВ,  $Q^2 = 2.1$  ГэВ<sup>2</sup> вместе с подгонкой в рамках модели JM показаны на рис. 2.

Работа по извлечению амплитуд  $\gamma_vpN^*$  в настоящее время продолжается, и результаты будут представлены в будущей публикации по данной теме.

### 3. CLAS12

Спектрометр большого аксептанса CLAS12 [5], расположенный в Зале Б лаборатории Т. Джейферсона (JLab), предназначен для изучения ядерных и адронных реакций под действием электронного пучка. Спектрометр обеспечивает эффективную регистрацию как заряженных, так и нейтральных частиц в значительной части полного телесного угла. CLAS12 использует конфигурацию с двумя магнитами, включающую сверхпроводящий торoidalный магнит в области переднего детектора (ПД), покрывающий полярные углы от  $5^\circ$  до  $35^\circ$  и создающий преимущественно азимутальное магнитное поле, и сверхпроводящий соленоид в области центрального детектора (ЦД), охватывающий полярные углы от  $35^\circ$  до  $125^\circ$  с полным азимутальным перекрытием.

В августе 2025 г. были опубликованы [39] результаты по измерениям инклюзивных сечений рассеяния электронов на водородной мишени при энергии пучка 10.6 ГэВ, используя данные, собранные спектрометром CLAS12 в лаборатории Т. Джейферсона. Это первые абсолютные измерения сечений, выполненные на CLAS12; они охватывают широкий кинематический диапазон инвариантной массы  $W$  конечных адронов — от порога рождения пионов до 2.5 ГэВ для каждого значения квадрата четырёхим-

пульса виртуального фотона  $Q^2$  в диапазоне от 2.55 до 10.4 ГэВ $^2$ , что стало возможным благодаря большому угловому аксептансу детектора CLAS12.

Сравнение измеренных сечений с резонансными вкладами, вычисленными на основе предыдущих результатов CLAS по амплитудам электровозбуждения нуклонных резонансов, демонстрирует перспективную возможность расширить информацию об их эволюции по  $Q^2$  вплоть до 10 ГэВ $^2$ . Совместные результаты CLAS и CLAS12 позволяют исследовать партонные распределения нуклона при больших  $x$  для  $W < 2.5$  ГэВ, охватывая масштабы расстояний, где ожидается переход от сильно связанного режима к пертурбативной КХД.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В лаборатории Т. Джейферсона реализуется широкая исследовательская программа, направленная на изучение спектра и структуры возбуждённых состояний нуклона с использованием эксклюзивного электророждения мезонов на протонах в области возбуждения нуклонных резонансов ( $N^*$ ). Ожидаемые данные CLAS12 об амплитудах электровозбуждения резонансов позволят исследовать импульсную зависимость массовой функции одетого кварка в областях изменения импульсов夸ков, соответствующих генерации около половины массы нуклона [40].

- 
- [1] Carman D.S., Gothe R.W., Mokek V.I., Roberts C.D. // *Particles*. **6**(1). 416 (2023).
  - [2] Mecking B.A. et al. // *Nucl. Inst. and Meth. A* **503**. 513 (2003)
  - [3] CLAS Physics Database. <http://clasweb.jlab.org/physicsdb>
  - [4] Carman D.S., Joo K., Mokek V.I. // *Few Body Syst.*, **61** 29 (2020).
  - [5] Burkert V.D., Elouadrhiri L., Adhikari K.P. et al. // *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* **959**. 163419 (2020).
  - [6] Brodsky S.J. et al. // *Int. J. Mod. Phys. E* **29**. 2030006 (2020).
  - [7] Aznauryan I.G., Burkert V.D. // *Progr. Part. Nucl. Phys.* **67**. 1 (2012).
  - [8] Burkert V.D., Roberts C.D. // *Rev. Mod. Phys.* **91**, 011003 (2019).
  - [9] Aznauryan I. et al. // *Phys. Rev. C* **80**, 055203 (2009).
  - [10] Joo K. et al. (CLAS Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* **88**. 122001 (2002).
  - [11] Ungaro M. et al. (CLAS Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* **97**. 112003 (2006).
  - [12] Biselli A. et al. (CLAS Collaboration) // *Phys. Rev. C* **78**. 045204 (2008).
  - [13] Park K. et al. (CLAS Collaboration) // *Phys. Rev. C* **91**. 045203 (2015).
  - [14] Markov N.S. et al. (CLAS Collaboration) // *Phys. Rev. C* **101**. 015208 (2020).
  - [15] Hiller Blin A.N. et al. // *Phys. Rev. C* **100**. 035201 (2019).
  - [16] Hiller Blin A.N. et al. // *Phys. Rev. C* **104**. 025201 (2021).
  - [17] Segovia J. // *Few Body Syst.* **60**. 34 (2019).
  - [18] Roberts C.D. // *EPJ Web Conf.* **241**. 02008 (2020).
  - [19] Aznauryan I.G., Burkert V.D. // *Phys. Rev. C* **92**. 015203 (2015).
  - [20] Aznauryan I.G., Burkert V.D. // *Phys. Rev. C* **95**. 065207 (2017).
  - [21] Obukhovsky I.T. et al. // *Phys. Rev. D* **100**, 094013 (2019).
  - [22] Lyubovitskij V.E. et al. // *Phys. Rev. D* **102**. 094008 (2020).
  - [23] Ramalho G., Pena M.T. // *Phys. Rev. D* **89**. 094016 (2014).
  - [24] Giannini M., Santopinto E. // *Chin. J. Phys.* **53**. 020301 (2015).
  - [25] Joo K. et al. (CLAS Collaboration) // *Phys. Rev. C* **72**. 058202 (2005).
  - [26] Joo K. et al. (CLAS Collaboration) // *Phys. Rev. C* **70**. 042201 (2004).
  - [27] Biselli A.S. et al. (CLAS Collaboration) // *Phys. Rev. C* **68**. 035202 (2003).
  - [28] Joo K. et al. (CLAS Collaboration) // *Phys. Rev. C* **68**. 032201(R) (2003).
  - [29] Isupov E.L. et al. CLAS Collaboration // *Phys. Rev. C* **105**. L022201 (2022).
  - [30] Drechsel D., Kamalov S.S., Tiator L. // *Eur. Phys. J. A* **34**, 69 (2007).
  - [31] Tiator L. // *Eur. Phys. J. ST* **198**. 141 (2011).

- [32] Fit of the Resonance Electrocouplings, <https://userweb.jlab.org/~isupov/couplings>
- [33] Mokeev V.I. // EPJ Web Conf. **241**. 03003 (2020).
- [34] Trivedi A. // Few Body Syst. **60** 5 (2019).
- [35] Isupov E.L. et al. CLAS Collaboration // Phys. Rev. C **96**, 2. 025209 (2017).
- [36] Mokeev V.I. et al. (CLAS Collaboration) // Phys. Rev. C **86**, 035203 (2012).
- [37] Mokeev V.I. et al. // Phys. Rev. C **93**. 025206 (2016).
- [38] Mokeev V.I. et al. // Phys. Rev. C **108**. 025204 (2023).
- [39] Klimentko V.A. et al. (CLAS Collaboration) // Phys. Rev. C **112**. 025201 (2025).
- [40] Achenbach P. et al. // Symmetry. **17**(7). 1106 (2025).

## Study of the Spectrum and Structure of Nucleon Resonances in the MSU/JLAB Collaboration

**A.V. Golda<sup>1</sup>, E.L. Isupov<sup>2,a</sup>, A.A. Rusova<sup>1,2</sup>, V.B. Ryzhkov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics. Moscow 119991, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>[e.l.isupov@gmail.com](mailto:e.l.isupov@gmail.com)*

Processes of photo- and electroproduction of single pions on the proton, as well as the  $\pi^+\pi^-p$  states, provide the most extensive body of information on the spectrum and structure of nucleon resonances ( $N^*$ ). The electromagnetic transitions from the ground state of the nucleon to the  $N^*$  can shed light on the dynamics of the strong interaction responsible for generating the dominant portion of the visible mass in the Universe. Experiments conducted with the CLAS detector (Jefferson Lab, USA) have significantly expanded our understanding of nucleon resonance electro-excitation, with more than 150,000 data points of differential cross sections and various polarisation observables measured. The paper presents selected results from the  $N^*$  research programme at Jefferson Lab, as well as directions for future research with a focus on the MSU/JLAB collaboration.

PACS: 14.20.Gk, 13.60 Le.

Keywords: nucleon resonances, meson electroproduction.

Received 27 November 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2026. **81**, No. 1. Pp. .

### Сведения об авторах

- Голда Андрей Васильевич — аспирант; e-mail: [golda.av15@physics.msu.ru](mailto:golda.av15@physics.msu.ru).
- Исупов Евгений Леонидович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: [e.l.isupov@gmail.com](mailto:e.l.isupov@gmail.com).
- Русова Анна Александровна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 939-16-97, e-mail: [anya@jlab.org](mailto:anya@jlab.org).
- Рыжков Виталий Борисович — студент; e-mail: [vitalikryjkov@gmail.com](mailto:vitalikryjkov@gmail.com).