

ИЗУЧЕНИЕ НЕЙТРИННЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ NOvA

© 2021 г. Л. Д. Колупаева^{1)*}, О. Б. Самойлов^{1)**}

Поступила в редакцию 23.07.2020 г.; после доработки 23.07.2020 г.; принята к публикации 23.07.2020 г.

NOvA — нейтринный эксперимент в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (США), предназначенный для изучения осцилляций, а именно появления электронного и выживания мюонного нейтрино. Два детектора, ближний и дальний, удалены друг от друга на 810 км и расположены под углом 14 мрад к пучку от ускорительного комплекса NuMI, обеспечивая оптимальное соотношение энергии и расстояния осцилляций нейтрино. Целями эксперимента являются измерение иерархии масс нейтрино, определение фазы нарушения CP -четности в лептонном секторе, уточнение значений параметров θ_{23} и Δm_{32}^2 , а также ряд других задач. В настоящей работе будут представлены результаты совместного анализа NOvA на статистике нейтринного и антинейтринного пучков $8.85 \times 10^{20} + 12.33 \times 10^{20}$ протонов на мишень (POT) и освещены дальнейшие перспективы эксперимента.

DOI: 10.31857/S0044002721010116

1. ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный нейтринный эксперимент с длинной базой NOvA [1] посвящен изучению нейтринных осцилляций. Он состоит из ближнего и дальнего детекторов, которые представляют собой два идентичных трековых калориметра. Для создания направленного пучка мюонных (анти-)нейтрино используется ускоритель NuMI [2]. Пучок протонов, взаимодействуя с углеродной мишенью, порождает преимущественно (анти)нейтрино мюонного аромата. Этот поток проходит расстояние 810 км сквозь земную кору по направлению к дальнему детектору эксперимента, который располагается в штате Миннесота на границе с Канадой.

Последние опубликованные результаты [3] используют для анализа статистику работы детекторов с 8.85×10^{20} POT для нейтринного пучка и 12.33×10^{20} для антинейтринного пучка. Эти данные были собраны в период с февраля 2014 г. до февраля 2019 г. Проектная мощность эксперимента 700 кВт, это подразумевает 6×10^{20} протонов, сброшенных на мишень (POT), за год работы ускорителя. Режим пучка нейтрино—антинейтрино определяется полем магнитных горнов, которые фокусируют вторичные мезоны нужного электрического заряда после мишени.

Детекторы эксперимента были сконструированы для регистрации электронных и мюонных нейтрино. Они располагаются под углом 14.6 мрад к оси пучка, что позволяет достигнуть узкого монокроматического пика с энергией примерно 2 ГэВ. Ближний детектор имеет геометрические размеры $4.2 \times 4.2 \times 16$ м и массу около 300 т. Он располагается на расстоянии 1 км после мишени и используется для измерения состава пучка нейтрино до осцилляций. Дальний детектор имеет существенно большие размеры ($15.6 \times 15.6 \times 60$ м) и массу (14 кт). Оба детектора имеют одинаковую структуру и состоят из большого числа ПВХ-ячеек [4] сечением 3.9×6.6 см, наполненных жидким сцинтиллятором [5] из смеси минерального масла с псевдокумолом. В каждой ячейке располагается петля спектросмещающего оптоволокна, которая соединяется с 32-канальным лавинным фотодиодом. Для трехмерной реконструкции событий детектор формируется из плоскостей ячеек чередующегося горизонтального и вертикального направления. Для определения типа нейтрино, зарегистрированного в детекторе, используется сверточная нейронная сеть CVN [6]. Идентичные ближний и дальний детекторы позволяют использовать процедуру экстраполяции событий. Она используется в дополнение к Монте-Карло-моделированию событий для реалистичного предсказания состава пучка в дальнем детекторе и позволяет существенно сократить систематические неопределенности.

Спектр событий электронных и мюонных нейтрино в дальнем детекторе чувствителен к определенным осцилляционным параметрам: атмосфер-

¹⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

*E-mail: ldkolupaeva@yandex.ru

**E-mail: samoylov@jinr.ru

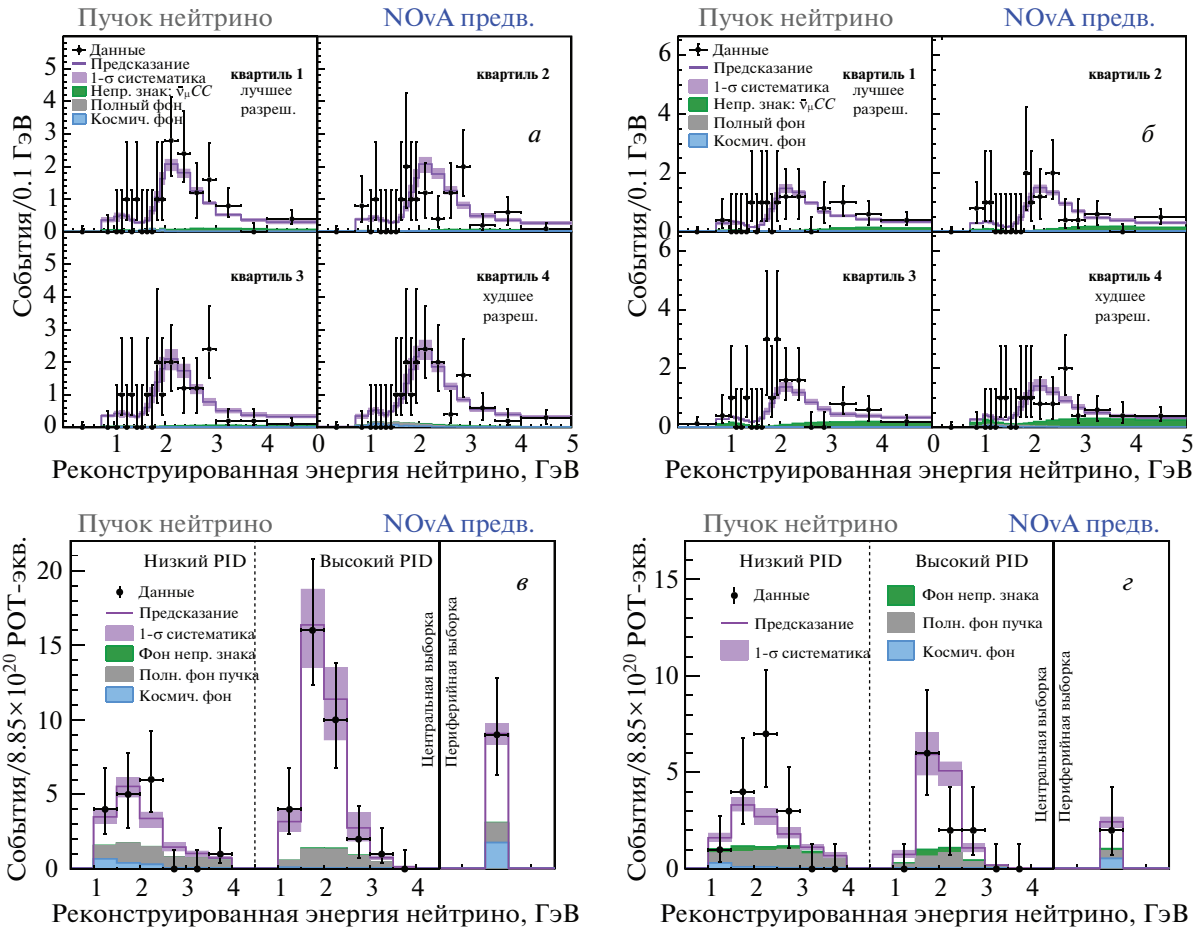


Рис. 1. Спектр событий по реконструированной энергии, отобранных в дальнем детекторе NOvA. На картинках также изображено Монте-Карло-предсказание для лучшего значения фита с экстраполяцией из ближнего детектора в дальний. События ν_μ и $\bar{\nu}_\mu$ разделены на кватили по реконструированной адронной энергии [7].

ной разнице квадратов масс Δm_{32}^2 , углу смешивания θ_{23} , фазе CP -нарушения в лептонном секторе δ_{CP} и иерархии масс нейтрино.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ СО СТАТИСТИКОЙ 2019 ГОДА

В дальнем детекторе эксперимента за весь срок набора данных было найдено 58 событий в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (ожидаемый фон 15.0), 27 событий в канале $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ (ожидаемый фон 10.3), 113 событий в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ (ожидаемый фон 4.2), 102 события в канале $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ (ожидаемый фон 2.2). Полученное количество $\bar{\nu}_e$ событий является 4.4σ свидетельством появления $\bar{\nu}_e$ в пучке $\bar{\nu}_\mu$. Измеренные спектры событий представлены на рис. 1. Подробные детали отбора событий и последующего анализа можно найти в [7].

Совместная подгонка полученных спектров ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$, ν_e и $\bar{\nu}_e$ событий-кандидатов позволила сделать следующие выводы об осцилляционных

параметрах. Лучшими значениями подгонки являются: $\Delta m_{32}^2 = 2.48_{-0.06}^{+0.11} \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$, $\sin^2\theta_{23} = 0.56_{-0.03}^{+0.04}$, $\delta_{CP} = 0.0_{-0.4}^{+1.3}\pi$. Это соответствует нормальной иерархии масс и верхнему октанту θ_{23} ($>\pi/4$). Доверительные контуры 1, 2, 3σ представлены на рис. 2. Обратная иерархия масс отвергается на уровне 1.9σ , а нижний октант θ_{23} на уровне 1.6σ , однако результат все еще согласуется с максимальным смешиванием θ_{23} на уровне 1.2σ . Большая область в обратной иерархии около $\delta_{CP} = \pi/2$ отвергается на уровне $>3\sigma$. Все значения δ_{CP} разрешены на уровне 1.1σ для нормальной иерархии и верхнего октанта θ_{23} .

3. ПЕРСПЕКТИВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА NOvA

Помимо увеличения статистики для анализа NOvA улучшает собственные средства обработки данных. В ближайшее время ожидаются изменения разных стадий в Монте-Карло-моделировании событий [8]. Это уточнения моделей сечения взаимодействия нейтрино с веществом детектора [9, 10],

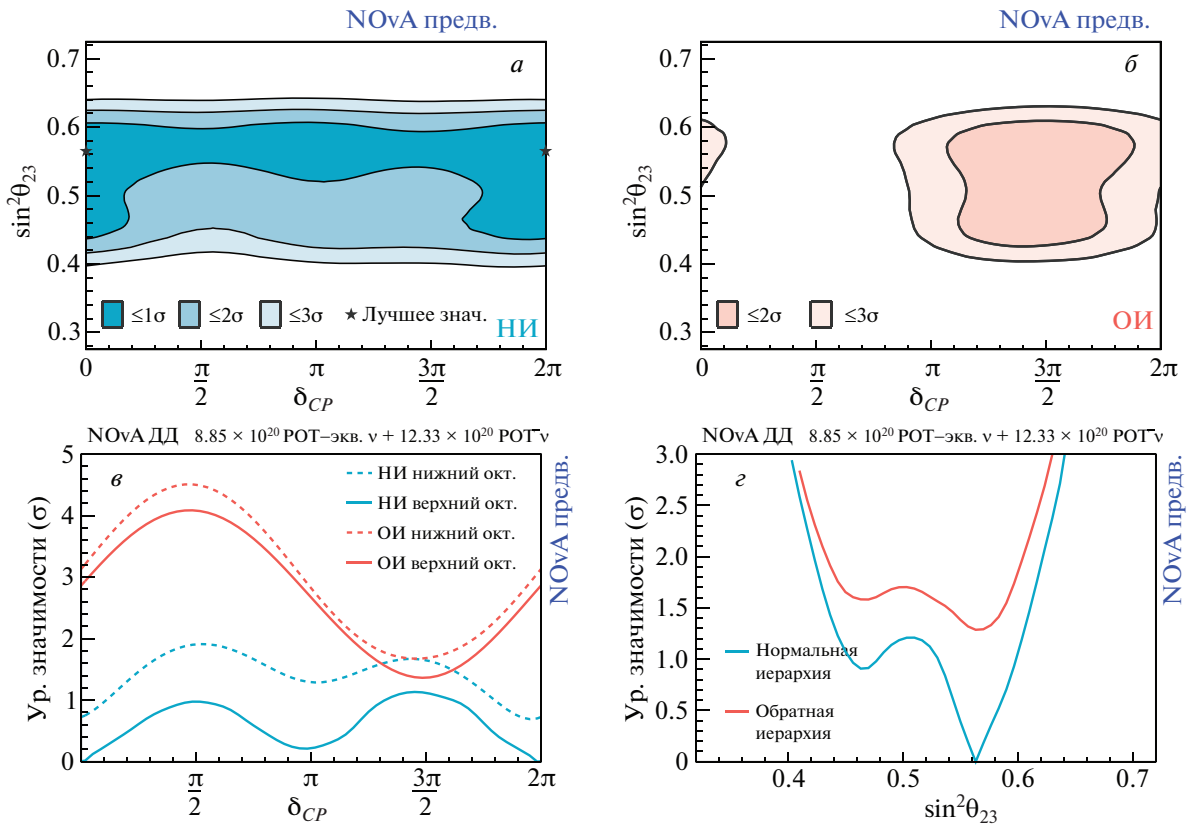


Рис. 2. Доверительные контуры 1, 2, 3σ для плоскости $\sin^2\theta_{23} - \delta_{CP}$ и уровни значимости, на которых отвергаются разные значения δ_{CP} и θ_{23} .

отклика сцинтиллятора на прохождение частиц [11, 12], калибровок детектора. В лаборатории им. Ферми был размещен тестовый пучок для уменьшенной копии детектора [13]. Он позволит улучшить представление о работе всех компонент детектора, а также его отклик на чистые пучки пробных частиц. Это важно для понимания топологии этих частиц в детекторе и будет использовано для тренировки нейронных сетей для их распознавания. Улучшается также реконструкция событий и активнее используются для этого нейронные сети [14, 15]. Техника анализа данных и статистические методы также модифицируются.

Эксперимент планирует продолжать работу до 2025 г., до тех пор, пока ускоритель не будет остановлен для финальных работ для эксперимента DUNE [16]. В течение этих лет планируется постепенное наращивание мощности ускорителя в соответствии с планом PIP-II [17]. Все это позволит NOvA набрать 36×10^{20} POT с нейтринным пучком и 36×10^{20} POT с антинейтринным пучком.

Ожидаемые чувствительности к иерархии масс нейтрино и фазе δ_{CP} представлены на рис. 3. Потенциально к концу набора данных NOvA будет способна измерить иерархию масс на уровне $0.5-5\sigma$ в зависимости от осцилляционных параметров,

реализованных в природе. На данный момент глобальные анализы данных нейтринных экспериментов склонны к нормальной иерархии масс и $\delta_{CP} = \sim 3\pi/2$ [18]. Для этих значений чувствительность NOvA к иерархии масс может составить максимальное значение около 5σ , а чувствительность к δ_{CP} примерно 2σ .

Помимо индивидуальных измерений эксперименты T2K и NOvA планируют проведение совместного анализа данных [19]. Это позволит улучшить ограничения на осцилляционные параметры и станет первой объединенной работой двух осцилляционных экспериментов.

В конце первого десятилетия XXI века нейтринные эксперименты вышли на фазу прецизионных измерений. Однако на данный момент все еще остаются белые пятна в физике осцилляций нейтрино, для которых будут строиться в следующее десятилетие большие детекторы и мощнейшие источники частиц.

Авторы выражают благодарность руководителю проекта NOvA в ОИЯИ А.Г. Ольшевскому за полезные обсуждения. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-12-00271) и при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 19-32-90058).

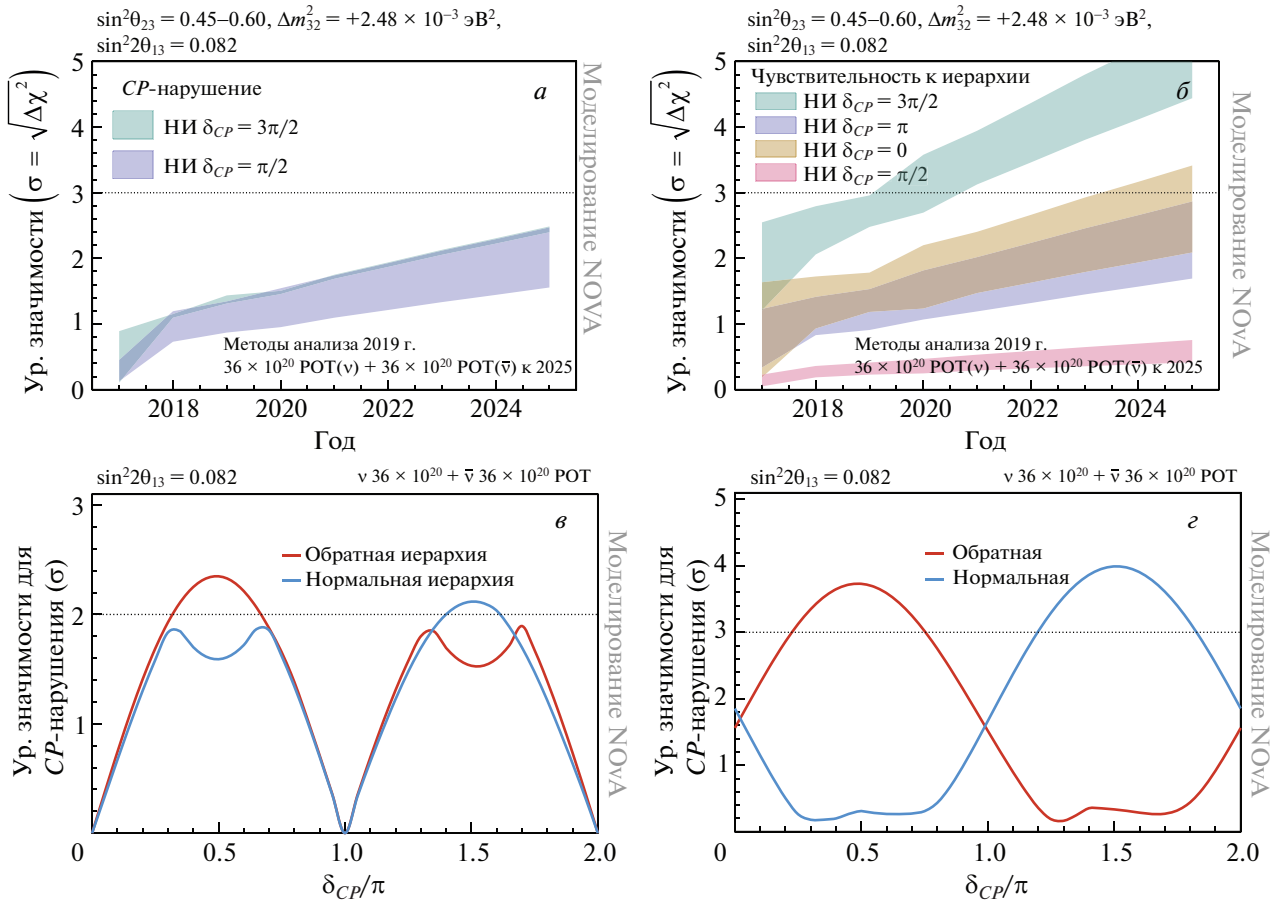


Рис. 3. Ожидаемые чувствительности NOvA к иерархии масс и δ_{CP} к 2025 г. с интегральной статистикой $36 \times 10^{20}(\nu) + 36 \times 10^{20}(\bar{\nu})$ POT. На нижних картинках представлены чувствительности с учетом значений нынешнего лучшего значения подгонки NOvA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- NOvA Collab. (D. S. Ayres *et al.*), hep-ex/0503053.
- P. Adamson *et al.* [NOvA Collab.], Nucl. Instrum. Methods A **806**, 279 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.08.063> [arXiv: 1507.06690 [physics.acc-ph]]
- M. A. Acero *et al.* [NOvA Collab.], Phys. Rev. Lett. **123**, 151803 (2019); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.151803> [arXiv: 1906.04907 [hep-ex]]
- R. L. Talaga, J. J. Grudzinski, S. Phan-Budd, A. Pla-Dalmau, J. E. Fagan, C. Grozis, and K. M. Kephart, Nucl. Instrum. Methods A **861**, 77 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.03.004> [arXiv: 1601.00908 [physics.ins-det]]
- S. Mufson, B. Baugh, C. Bower, T. E. Coan, J. Cooper, L. Corwin, J. A. Karty, P. Mason, M. D. Messier, A. Pla-Dalmau, and M. Proudfoot, Nucl. Instrum. Methods A **799**, 1 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.07.026> [arXiv: 1504.04035 [physics.ins-det]]
- A. Aurisano, A. Radovic, D. Rocco, A. Himmel, M. D. Messier, E. Niner, G. Pawloski, F. Psihas, A. Sousa, and P. Vahle, JINST **11**, P09001 (2016); <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/09/P09001> [arXiv: 1604.01444 [hep-ex]]
- M. A. Acero *et al.* [NOvA Collab.], Phys. Rev. D **98**, 032012 (2018); <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.032012> [arXiv: 1806.00096 [hep-ex]]
- A. Aurisano, C. Backhouse, R. Hatcher, N. Mayer, J. Musser, R. Patterson, R. Schroeter, and A. Sousa, J. Phys.: Conf. Ser. **664**, 072002 (2015); <https://doi.org/10.1088/1742-6596/664/7/072002>
- I. D. Kakorin, K. S. Kuzmin, and V. A. Naumov, Phys. Part. Nucl. Lett. **17**, 265 (2020), <http://theor.jinr.ru/NeutrinoOscillations/Papers/PEPANL2020.pdf>
- J. Wolcott [for the NOvA Collab.], PoS (NuFACT2018) 098; <https://doi.org/10.22323/1.341.0098> [arXiv:1812.05653 [hep-ex]]
- O. B. Samoylov, N. V. Anfimov, A. I. Antoshkin, and A. P. Sotnikov, in *Proceedings of the 27th International Symposium on Nuclear Electronics*

- and Computing (NEC'2019), Budva, Becici, Montenegro, Sept. 30–Oct. 4, 2019; <http://ceur-ws.org/Vol-2507/439-442-paper-81.pdf>*
12. S. Yu, arXiv: 1910.07035 [physics.ins-det].
 13. A. Sutton [on behalf of the NOvA Collab.], PoS (NuFACT2018) 058; <https://doi.org/10.22323/1.341.0058>
 14. F. Psihas, E. Niner, M. Groh, R. Murphy, A. Aurisano, A. Himmel, K. Lang, M. D. Messier, A. Radovic, and A. Sousa, Phys. Rev. D **100**, 073005 (2019); <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.073005> [arXiv: 1906.00713 [physics.ins-det]]
 15. P. Baldi, J. Bian, L. Hertel, and L. Li, Phys. Rev. D **99**, 012011 (2019); <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.012011> [arXiv: 1811.04557 [physics.ins-det]]
 16. B. Abi *et al.* [DUNE Collab.], Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Vol. I [arXiv: 2002.02967 [physics.insdet]].
 17. V. Lebedev [PIP-II Collab.], The PIP-II Reference Design Report, <https://doi.org/10.2172/1365571>
 18. I. Esteban, M. C. Gonzalez-Garcia, A. Hernandez-Cabezudo, M. Maltoni, and T. Schwetz, JHEP **1901**, 106 (2019), [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2019\)106](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2019)106) [arXiv: 1811.05487 [hep-ph]]
 19. Объявление: T2K and NOvA collaborations to produce joint neutrino oscillation analysis (2018), <https://t2k-experiment.org/2018/01/t2k-nova-announce/>

A STUDY OF NEUTRINO OSCILLATIONS IN THE NOvA EXPERIMENT

L. Kolupaeva¹⁾, O. Samoylov¹⁾

¹⁾*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

NOvA is a neutrino experiment at FNAL (USA) designed to study oscillations, in particular the appearance of electron and the survival of muon neutrinos. Two detectors, near and far, are 810 km away from each other and located at 14 mrad angle to the beam direction from the NuMI accelerator complex, which provides an optimal ratio of the energy and distance for neutrino oscillations. The goals of the experiment are to measure the neutrino mass hierarchy, determine the phase of CP violation in the lepton sector, define the values of the parameters θ_{23} and Δm_{32}^2 , as well as some other tasks. In this paper, we will discuss the results of NOvA joint analysis with the statistics of neutrino and antineutrino beams of $8.85 \times 10^{20} + 12.33 \times 10^{20}$ proton-on-target (POT) and highlight further perspectives of the experiment.