

На правах рукописи



Рамакоти Екатерина Николаевна

Изучение бозона Хиггса Стандартной модели в механизме рождения VBF в распаде $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в эксперименте ATLAS

Специальность 1.3.15. –
«Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

Научный руководитель:	Цукерман Илья Ильич доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нейтринной физики Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.
Официальные оппоненты:	Друцкой Алексей Георгиевич доктор физико-математических наук, начальник лаборатории тяжелых кварков и лептонов Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва; Кодолова Ольга Леонидовна кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сильных взаимодействий Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, г. Москва.
Ведущая организация:	Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится 19 июня 2024 г., начало в 16 ч. 30 мин., на заседании диссертационного совета 02.1.003.05 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 02.1.003.05, д. ф.-м. н, доцент

Б.р.Ск

А.Л. Барабанов

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Стандартная модель (СМ) – успешно завершенная теория, описывающая фундаментальные частицы и силы, посредством которых они взаимодействуют. Открытие в 2012 г. сотрудничествами ATLAS [1] и CMS [2] на Большом адронном коллайдере (БАК) новой частицы и последующее изучение ее свойств на большей статистике данных позволили сделать первые выводы о бозоне Хиггса (H) – последней частице, которая завершила СМ. Были измерены масса нового бозона, его сечение рождения в четырех основных механизмах и относительные вероятности в пяти ключевых каналах распада [3–4]. Результаты всех измерений с учетом погрешностей соответствуют предсказаниям СМ. В настоящее время бозон Хиггса является новым инструментом для ее изучения, а также физики за ее пределами. В частности, углубленное изучение констант связи бозона Хиггса позволит сделать вывод о том, какова структура физики за пределами СМ. Поэтому в рамках СМ важной задачей является улучшение точности экспериментальных измерений. Исследованный в настоящей работе механизм рождения H через слияние векторных бозонов (VBF) имеет второй по величине вклад в его сечение на БАК [5] и обладает характерной особенностью – летящими под малыми углами двумя энергичными адронными струями. В рамках этого механизма изучаемый канал распада бозона Хиггса на WW^* с дилептонным конечным состоянием – один из наиболее перспективных с точки зрения экспериментальной эффективности и значимости сигнала. Этот канал был одним из трех (наряду с $H \rightarrow ZZ^*$ и $H \rightarrow \gamma\gamma$), на основе комбинированного анализа которых был сделан вывод об обнаружении бозона Хиггса на БАК в 2012 г. Важно также отметить, что для механизма VBF и в вершине рождения, и в вершине распада бозона Хиггса на WW^* присутствует одна и та же константа его связи с тяжелыми векторными бозонами.

Целью данной работы является измерение константы связи бозона Хиггса СМ с W -бозонами в механизме рождения VBF в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в эксперименте ATLAS, что ставит перед собой следующие **задачи**:

1. Проверка качества моделирования кинематики адронных струй в событиях с двумя лептонами в конечном состоянии в условиях повышенной светимости БАК.
2. Изучение влияния эффекта наложения событий в одном пересечении пучков на кинематические спектры адронных струй.
3. Оптимизация критериев отбора событий, их классификация по сигнальным и контрольным областям, оценка вкладов фоновых процессов и расчет ожидаемой значимости сигнала.
4. Разработка и применение глубокой нейронной сети в анализе для увеличения эффективности разделения сигнальных и фоновых событий.

5. Измерение полного сечения рождения бозона Хиггса в механизме слияния векторных бозонов с применением нейронной сети для улучшения точности.

6. Применение новой методики расчета дифференциальных сечений на основе независимых от канала распада вычислений для улучшенного согласования измеренных величин и теоретических предсказаний СМ.

Личный вклад автора. С 2017 г. в составе рабочей группы HWW эксперимента ATLAS автор проводит анализ данных с двумя лептонами в конечном состоянии для существенного улучшения точности измерений в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в механизме рождения через слияние векторных бозонов. Ею проанализирована полная статистика данных, набранных при энергии столкновений протонов $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, которая соответствует светимости 139 фбн^{-1} . Ключевые распределения согласуются с моделированием методом Монте-Карло (MC), а чувствительность анализа стала выше по сравнению с результатами при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ. Эти исследования проводились с помощью инструментов официального программного обеспечения (ПО) эксперимента ATLAS, разработкой и отладкой которого занимался и сам автор. В частности, ею был разработан алгоритм мониторинга калибровочных данных с жидкоаргонового калориметра.

С учетом упомянутых особенностей изучаемого механизма рождения бозона Хиггса и его канала распада на два W -бозона была исследована кинематика адронных струй в области сигнала и в контрольных кинематических областях фонов для трех экспозиций на БАК при разных его светимостях: 36 фбн^{-1} , 44 фбн^{-1} и 59 фбн^{-1} для 2015 – 2016 гг., 2017 г. и 2018 г., соответственно. Ключевую роль в восстановлении адронных струй, сопровождающих рождение бозона Хиггса в механизме VBF, играет передний калориметр, созданный силами группы НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ совместно с партнерами.

При достаточно большой светимости БАК число протон-протонных (pp) взаимодействий в одном пересечении сгустков пучка намного больше единицы, т. е. события накладываются на интересующее нас столкновение. За счет этого эффекта возникают проблемы с реконструкцией и идентификацией событий в детекторе ATLAS, что было исследовано автором и представлено в данной диссертации.

На основе известной методики анализа при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ автором было проделано исследование с использованием кинематических критериев отбора для конечного состояния с электроном и мюоном, оценены измеренная и ожидаемая значимости сигнала. Это исследование дополнило анализ на основе глубоких нейронных сетей, в котором диссертант принимал непосредственное участие. Важным вкладом автора также стал анализ каналов распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$ на полной статистике при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Ею были разработаны критерии отбора событий сигнала, выбрана контрольная кинематическая область для доминирующего фона от процессов Дрелла-Яна, модернизированы и затем

успешно применены алгоритмы на основе глубоких нейронных сетей для существенного увеличения чувствительности анализа.

Автор внес определяющий вклад в публикации [A1–A5], и существенный вклад в публикацию сотрудничества ATLAS [A6], будучи соавтором трех сопровождающих отчетов группы HWW и нескольких внутренних отчетов ATLAS. После успешно завершенной квалификационной работы, связанной с разработкой мониторинга для проверки качества данных с жидкоаргонового калориметра, она стала полноправным соавтором всех работ сотрудничества ATLAS с февраля 2022 г., и неоднократно выступала с докладами на международных и российских конференциях по тематике диссертации.

Кроме того, автор лично принимал участие в многочисленных работах по контролю качества данных, включая экспертные работы, занимался проверкой и исправлением основного ПО эксперимента ATLAS для оцифровки и симуляции данных установки.

Научная новизна. Диссертационная работа выполнена в рамках участия НИЦ «Курчатовский институт» в международном эксперименте ATLAS в составе рабочей группы HWW, а тема входит в программу эксперимента по изучению бозона Хиггса SM и поиску новых частиц. Все результаты, представленные в диссертационной работе, являются новыми. Впервые обнаружен сигнал от рождения бозона Хиггса в механизме VBF со значимостью, существенно большей, чем 5σ . Изучение свойств бозона Хиггса в механизме рождения через слияние векторных бозонов в канале $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ проводилось лишь в эксперименте CMS на БАК. Конечное состояние с двумя мюонами и двумя электронами при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ не рассматривалось в эксперименте ATLAS.

Практическая значимость. Полученные и представленные в диссертации результаты заложили основу для новых исследований по улучшению точности измеренных характеристик в данном канале распада в последующих экспозициях на БАК. В частности, алгоритмы выделения малого сигнала при большом фоне на основе нейронных сетей, использованные в работе, могут применяться и в других областях науки и техники.

Положения, выносимые на защиту. На защиту диссертации выносятся следующие положения:

1. Разработана и детально проверена методика моделирования кинематики адронных струй и распределений по поперечной массе для задачи исследования бозона Хиггса в канале распада $H \rightarrow WW^*$ в механизме рождения VBF на основе анализа полной статистики событий с двумя лептонами и двумя струями в конечном состоянии при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в эксперименте ATLAS без использования нейросетей [A1–A4].

2. Измерены полное сечение бозона Хиггса $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ в механизме рождения VBF с точностью 25%, а также упрощенные шаблонные сечения в нескольких областях фазового пространства по результатам анализа

полной статистики событий при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в эксперименте ATLAS с использованием нейросетей [А6].

3. Доказана эффективность нейросетей для поиска каналов распада бозона Хиггса $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu e\nu$ и $H \rightarrow WW^* \rightarrow \mu\nu\mu\nu$ при тех же условиях на основе анализа с предложенными и оптимизированными автором критериями отбора событий [А4–А5].

Апробация работы. Данные материалы регулярно обсуждались на рабочих совещаниях международного сотрудничества ATLAS, лично представлялись автором на различных конференциях и семинарах:

1. Молодежные конференции по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ) (г. Москва, Россия, 2017 – 2021 г.).

2. 53-я Зимняя Школа Петербургского Института Ядерной Физики НИЦ «Курчатовский Институт» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2018 г.).

3. International Conferences on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA) (г. Москва, Россия, 2018, 2020 и 2022 гг.).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в шести статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК, индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus.

Достоверность результатов исследования. Данные, используемые в диссертационной работе, были набраны в период стабильного функционирования детектора ATLAS. В анализе использовалось стандартное программное обеспечение ATLAS, в том числе средства реконструкции событий и моделирования детектора и физических процессов на основе математического моделирования методом Монте-Карло. Результаты находятся в согласии с аналогичными измерениями в эксперименте CMS. Достоверность результатов и выводов, полученных в диссертации, также обусловлена дополнительными независимыми исследованиями внутри содружества ATLAS.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и благодарностей. Ее объем составляет 92 страницы, куда включены 10 формул, 43 рисунка и 15 таблиц. Список литературы содержит 89 ссылок.

Во **введении** приводятся актуальность темы исследования, изложенного в диссертации, личный вклад автора в это исследование, научная новизна и практическая ценность работы, положения, выдвигаемые на защиту, публикации и апробация работы, а также достоверность результатов.

Первая глава посвящена СМ, роли бозона Хиггса в ней, его механизмам рождения и каналам распада на БАК.

В **первом разделе первой главы** кратко описывается СМ и ее основные составляющие. Стандартная модель – завершенная теория, описывающая элементарные частицы природы и три типа взаимодействия: сильное, слабое и

электромагнитное, каждое из которых возникает в результате обмена частицами-переносчиками, имеющими целый спин (бозонами). Элементарными частицами СМ, составляющими материю, являются фундаментальные фермионы – с полуцелым спином – шесть кварков и шесть лептонов; все указанные фермионы и бозоны были ранее открыты экспериментально. В основе Стандартной модели лежат две теории: квантовая хромодинамика (КХД), описывающая сильное взаимодействие кварков и глюонов, и объединенная теория электрослабого (EW) взаимодействия, описывающая электромагнитные и слабые взаимодействия лептонов и кварков.

Во **втором разделе первой главы** дается краткое пояснение о возникновении масс у фундаментальных частиц в СМ. В СМ массовые члены для полей фермионов и калибровочных бозонов не включены, поскольку они нарушили бы калибровочную инвариантность, сделав все частицы безмассовыми. Чтобы решить эту проблему, вводят механизм Браута-Энглерта-Хиггса, являющийся спонтанным нарушением электрослабой симметрии, таким образом придавая массу бозонам-носителям слабого взаимодействия и оставляя фотон безмассовым, а также вводя дополнительное физическое скалярное поле, которое назвали полем Хиггса, а его бозон-переносчик – бозоном Хиггса. Впоследствии эта частица с массой около 125 ГэВ была обнаружена сотрудничествами ATLAS и CMS на БАК в июле 2012 г.

В **третьем разделе первой главы** кратко описываются механизмы рождения бозона Хиггса СМ при массе 125 ГэВ, включая соответствующие сечения при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в механизме слияния векторных бозонов (VBF). Затем рассматриваются моды его распада и приводятся их ожидаемые относительные вероятности (\mathcal{B}) [5]. Конечное состояние $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ является одним из наиболее перспективных с точки зрения экспериментального исследования, поскольку имеет значительную \mathcal{B} и достаточно чистую сигнатуру. Присутствие двух адронных струй с малыми полярными углами помогает выделить статистически значимый сигнал. Однако из-за наличия двух нейтрино возможно восстановить лишь т. н. “поперечную” массу бозона Хиггса.

Во **второй главе** даётся описание коллайдера БАК и экспериментальной установки ATLAS на нём, формулируются их цели и задачи, приводятся их параметры, физические характеристики, текущий статус и планы развития.

В **первом разделе второй главы** представлена схема коллайдера БАК, его основные характеристики и история эксплуатации; обсуждаются и дальнейшие планы его работы.

Во **втором разделе второй главы** дается подробное описание эксперимента ATLAS на БАК [6], цель которого – изучение процессов СМ при рекордных энергиях сталкивающихся протонов и ионов в системе центра масс, прежде всего, свойств бозона Хиггса, прецизионные измерения важнейших параметров СМ и поиск новых тяжелых частиц вне СМ. Многоцелевая установка ATLAS (Рисунок 1) имеет симметричную цилиндрическую геометрию вперед-

назад и перекрывает диапазон полярных углов от 0.8 до 179.2 градусов. В нее входит внутренний трекер, окруженный сверхпроводящим соленоидом с магнитным полем 2 Тл, система электромагнитных и адронных калориметров и мюонный спектрометр, в который входит три больших сверхпроводящих тороидальных магнитов. Внутренний детектор состоит из многослойных пиксельных, микростриповых детекторов и детектора переходного излучения, перекрывая область псевдобыстрот $|\eta| < 2.5$. Система калориметров расположена в области $|\eta| < 4.9$. В состав мюонного спектрометра входят триггерные ($|\eta| < 2.4$) и трековые ($|\eta| < 2.7$) камеры, измеряющие отклонение мюонов в магнитном поле от сверхпроводящих воздушных тороидов.

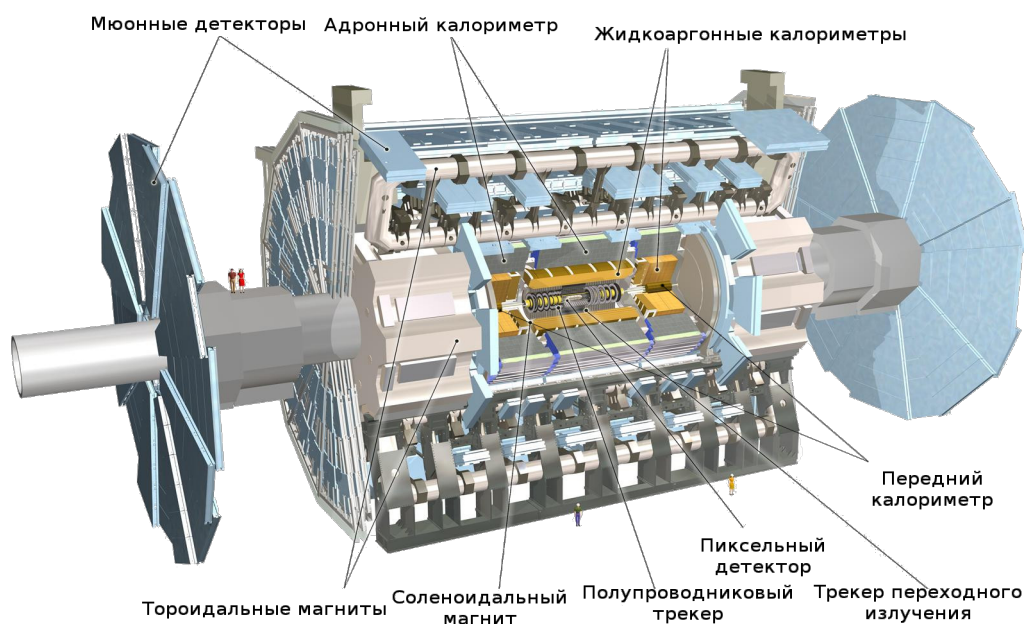


Рисунок 1 — Общая схема детектора ATLAS на коллайдере БАК [6]

Также кратко описаны процедуры сбора, моделирования и анализа данных, поступающих с установки ATLAS. Перечисляются основные этапы каждой из этих процедур.

Третья глава посвящена алгоритмам восстановления «объектов» детектора ATLAS таким, как электроны, фотоны, мюоны, струи и недостающая поперечная энергия E_T^{miss} . Особое внимание уделяется адронным струям, поскольку их реконструкция в переднем и торцевом калориметрах играет ключевую роль в выделении событий рождения бозона Хиггса в механизме VBF.

В **первом разделе третьей главы** представлено краткое описание процедуры реконструкции электронов, которая производится в центральной области детектора ATLAS из энергетических кластеров в электромагнитном калориметре, согласованных с реконструируемыми треками во внутреннем детекторе.

Во **втором разделе третьей главы** рассматриваются различные алгоритмы реконструкции мюонов на основе информации о треках, собранных с внутреннего детектора и мюонного спектрометра, и информации о кластерах, выделенных с помощью калориметров.

В **третьем разделе третьей главы** подробно описана процедуры реконструкции, калибровки и мечения адронных струй в эксперименте ATLAS. Адронные струи в течение долгого времени реконструировались из т. н. топологических калориметрических кластеров с использованием алгоритма «анти- k_T ». Новая методика заключается в использовании лучших характеристик калориметра и трекера внутреннего детектора, поскольку частицы с низкой энергией лучше восстанавливаются в трекаре, а для частиц с высокой энергией калориметр имеет лучшее энергетическое разрешение. Адронные струи проходят многоступенчатую процедуру калибровки, откалиброванные струи имеют $p_T > 20$ ГэВ и $|\eta| < 4.5$. Также рассматривается процедура мечения струй, содержащих b -кварки, для эффективного разделения подобных струй от обычных.

В **четвертом разделе третьей главы** описывается процедура реконструкции недостающей поперечной энергии E_T^{miss} . В ее вычислении используются как мюоны, электроны, фотоны, τ -лептоны и струи, так и мягкая составляющая, не связанная с этими объектами (например, топологические кластеры в калориметре, из которых не удалось сформировать адронную струю). Значение E_T^{miss} , несовместимое с нулем, может указывать на образование нейтрино SM или образование новых частиц, которые не взаимодействуют с детектором.

Четвертая глава представляет собой непосредственное описание физического анализа и его результатов для данных 2015 – 2016 гг.

В **первом разделе четвертой главы** рассматриваются предварительные отборы полезных событий для выделения сигнала от бозона Хиггса SM в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ в механизме рождения VBF. Дается также краткое описание фоновых процессов и описывается методика их нормировки. Основными источниками фона для рождения бозона Хиггса SM в механизме VBF являются рождение H в других механизмах (прежде всего, ggF), процессы парного и одиночного рождения t -кварка, парного рождения векторных бозонов (VV , т.е., WW , WZ и ZZ), процесс Дрелла-Яна $Z/\gamma^* \rightarrow ee/\mu\mu/\tau\tau$ (DY) и $W \rightarrow \ell\nu + \text{jets}$ (если в струях присутствует дополнительный лептон от распада тяжелого кварка).

Во **втором разделе четвертой главы** представлены результаты оригинального исследования дилептонных событий, набранных в сеансах 2015 и 2016 гг., в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ в механизме рождения VBF [A1–A2]. Анализ проведен на основе кинематических отборов, заимствованных из предыдущего анализа данных при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ [7] и оптимизированных под новые методики и условия работы эксперимента.

Основная задача автора – изучение кинематики адронных струй с малыми полярными углами, которые имеет ключевое значение для исследования бозона Хиггса в механизме рождения VBF. Для их детального исследования были

выбраны дилептонные события распада Z -бозона в силу их огромной статистики (40 млн.) и незначительной доли фоновых процессов. На Рисунке 2 для примера показана множественность адронных струй в событиях $Z \rightarrow \mu\mu$ и $Z \rightarrow ee$ [A1]. Множественность от 0 до 3 струй воспроизводится моделированием с точностью 3%. Дальнейшие исследования производились на данных с двумя лептонами и с двумя струями с $p_T > 30$ ГэВ.

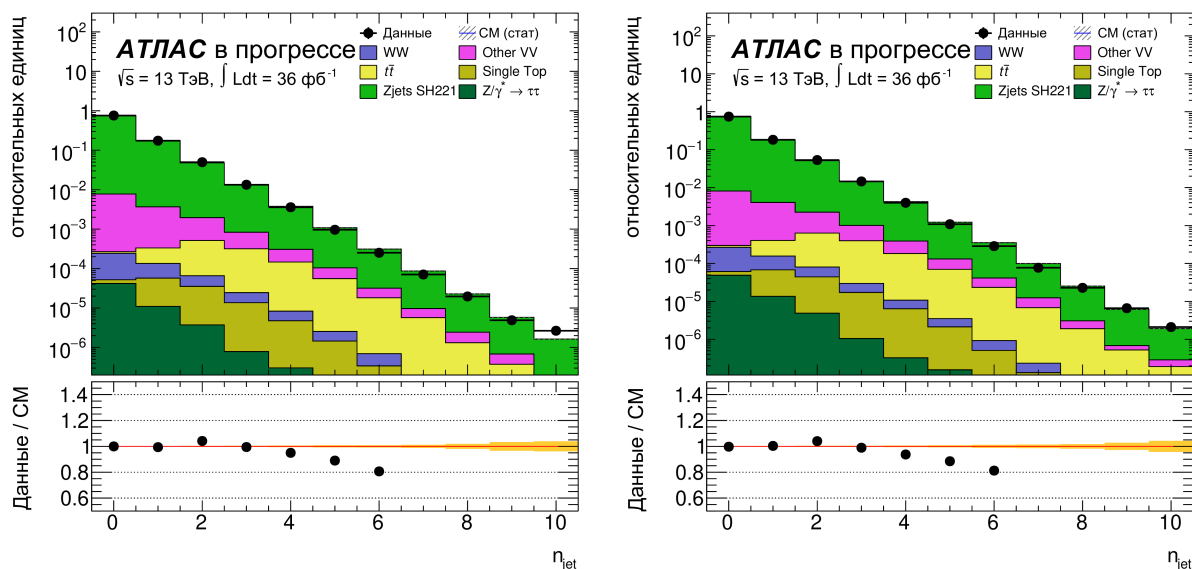
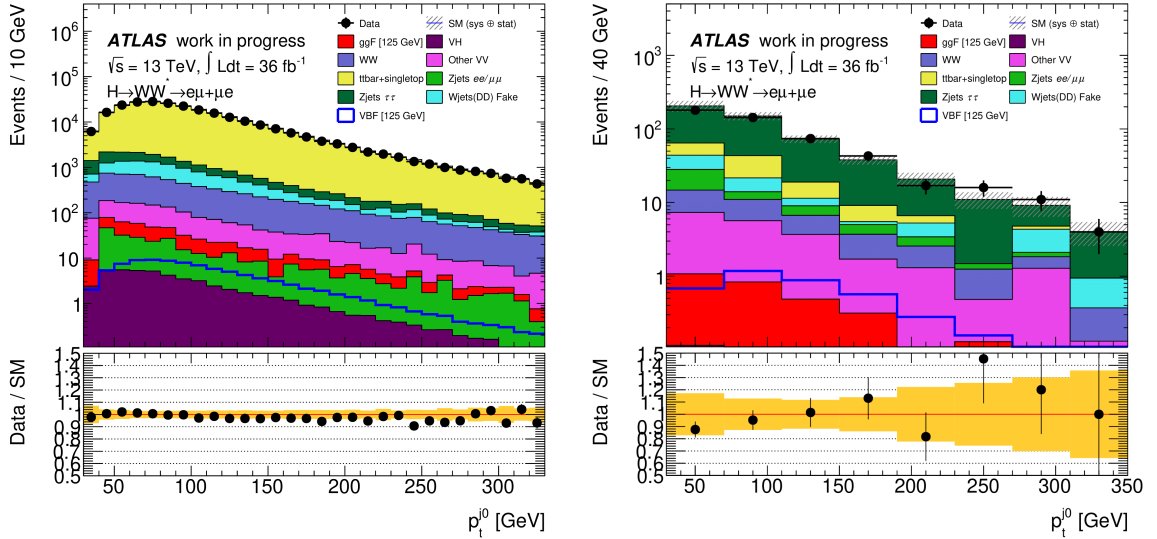


Рисунок 2 — Множественность адронных струй в событиях $Z \rightarrow \mu\mu$ и $Z \rightarrow ee$ [A1]

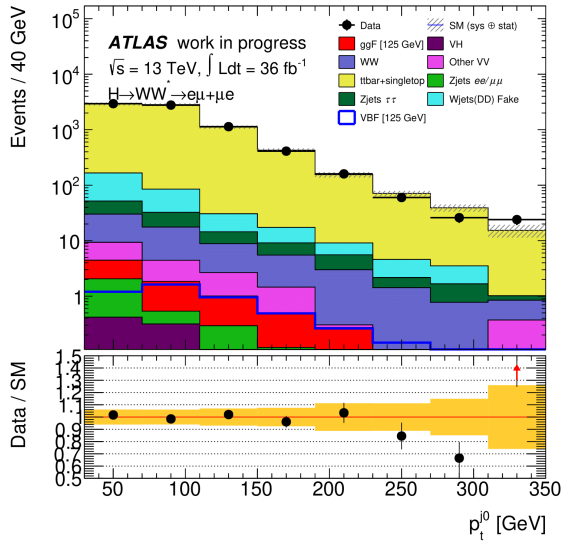
Усложненный многомерный анализ с применением алгоритма «ансамбль деревьев решений» (BDT), является основным базовым анализом рабочей группы HWW для изучения H в механизме VBF. Задачей автора было исследование особенности распределений кинематических переменных, применяемых в указанном алгоритме BDT, с помощью простого и независимого проверочного анализа на основе кинематических отборов. Примеры распределений поперечного импульса первой струи в сигнальной области на этапе предварительного отбора событий показаны на Рисунке 3(а). Доминирует фон от рождения t -кварков, а сигнал на несколько порядков величины меньше суммарного фона. Для оценки основных фоновых процессов были выделены контрольные области, в которых также были исследованы распределения адронных струй. Примеры распределения поперечного импульса первой адронной струи в контрольных областях фонов от процессов Дрелла-Яна ($Z\tau\tau$) и t -кварков представлены на Рисунке 3 (б, в). Экспериментальные распределения описываются MC-моделированием в пределах погрешностей [A2]

Особенностью работы эксперимента ATLAS в условиях высокой светимости БАК является наличие эффекта наложения событий в одном пересечении пучков, т. е. в одном акте столкновения протонов помимо основного «жесткого» события также регистрируются десятки «мягких» неупругих событий, что усложняет



(a)

(б)



(в)

Рисунок 3 — Распределения по поперечному импульсу лидирующей адронной струи в сигнальной области (а) и в контрольных областях: $Z\tau\tau$ (б) и t -кварка (в). Систематические ошибки включены [A2]

восстановление объектов эксперимента, в частности адронных струй, и затрудняет анализ данных. Изучение влияния этого эффекта на распределения адронных струй также являлось задачей автора. Исследование распределений в сигнальной области для данных 2015 – 2016 гг. при большом ($\mu \geq 21$) и малом ($\mu < 22$) числе наложенных событий (μ) представлены в работе [A2]. Отношение сигнала к фону слабо (в пределах 5%) зависит от μ на ранних этапах отбора данных и лишь немного (в пределах 15%) ухудшается при больших μ после отборов по Δy_{ij} и m_{jj} . На Рисунке 4 продемонстрированы примеры распределений по псевдобыстроте второй адронной струи для $\mu < 22$ и $\mu \geq 21$. Данные согласуются с MC-моделированием в пределах погрешности. Эффект наложения описывается MC-моделированием и не влияет на качество восстановления объектов эксперимента.

Исследования эффекта на большей статистике данных рассматриваются во втором разделе главы 5.

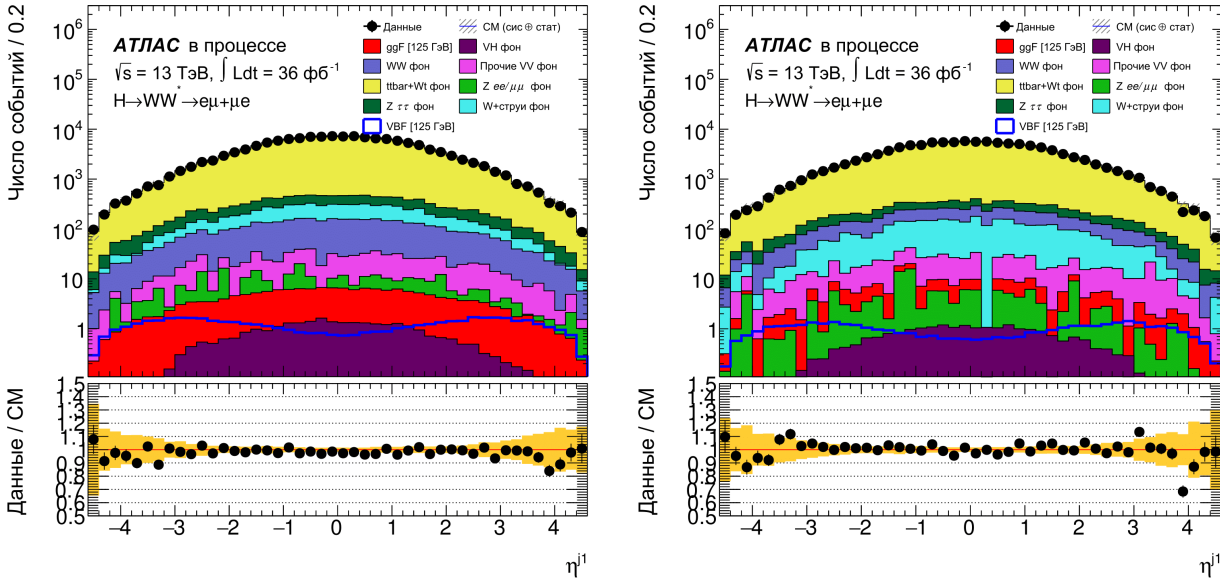


Рисунок 4 — Распределения по псевдобыстроте второй адронной струи для малого ($\mu < 22$, слева) и большого ($\mu \geq 22$, справа) числа наложений. Включены систематические погрешности [A2]

Пятая глава посвящена анализу событий с двумя лептонами в конечном состоянии на основе полной статистики 2015–2018 гг. в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в механизме рождения VBF.

В **первом разделе пятой главы** приведены результаты основного анализа событий в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\mu\nu$ [A6]. Для эффективного выделения сигнала применялся метод на основе глубоких нейронных сетей (DNN) [8, 9].

Первоначальный образец событий содержал электрон и мюон разных знаков с ограничениями на лидирующий (второй) лептон $p_T > 22$ ГэВ ($p_T > 15$ ГэВ), соответственно, и на их инвариантную массу $m_{\ell\ell} > 10$ ГэВ. Для уменьшения фона от t -кварков применялся запрет на b -струи, также отбрасывались события с инвариантной массой двух тау-лептонов, близкой к массе Z . Затем события систематизировались с помощью классификатора DNN, при этом рождение бозона Хиггса в механизме VBF рассматривалось как сигнал, а остальные процессы – как фон. На основе топологии VBF было выбрано большое число переменных, связанных со струями и лептонами, в качестве входных параметров DNN, но наилучшее разделение между сигналом и фоном обеспечивалось с помощью переменных m_{jj} и $\Delta\eta_{jj}$, распределения по которым показаны на Рисунке 5.

Выходной параметр DNN отражает совместимость события с кинематикой VBF и служит классификатором события, принимая значение от 0 (чистый фон) до 1 (чистый сигнал). Рисунок 6 показывает измеренные распределения по

классификатору DNN в области сигнала, а в Таблице 1 показано итоговое число событий в той же области. Наблюдаемая (ожидаемая) значимость сигнала от рождения бозона Хиггса составляет 5.8 (6.2) σ , соответственно.

Измеренное произведение сечения рождения бозона Хиггса в единицах СМ для механизма рождения VBF, помноженное на относительную вероятность распада в канале WW^* , оказалось равным: $\sigma_{VBF} \cdot B_{H \rightarrow WW} = 0.75^{+0.19}_{-0.16}$ пбн, что согласуется с величиной, предсказанной в СМ, 0.81 ± 0.02 пбн, а та же величина, нормированная на предсказания СМ — $\mu_{VBF} = 0.93^{+0.23}_{-0.20}$, т.е. она померена с точностью около 25%. Аналогичные измерения были проделаны в эксперименте CMS на сходной статистике данных с чуть меньшей точностью — $\mu_{VBF} = 0.71^{+0.28}_{-0.25}$.

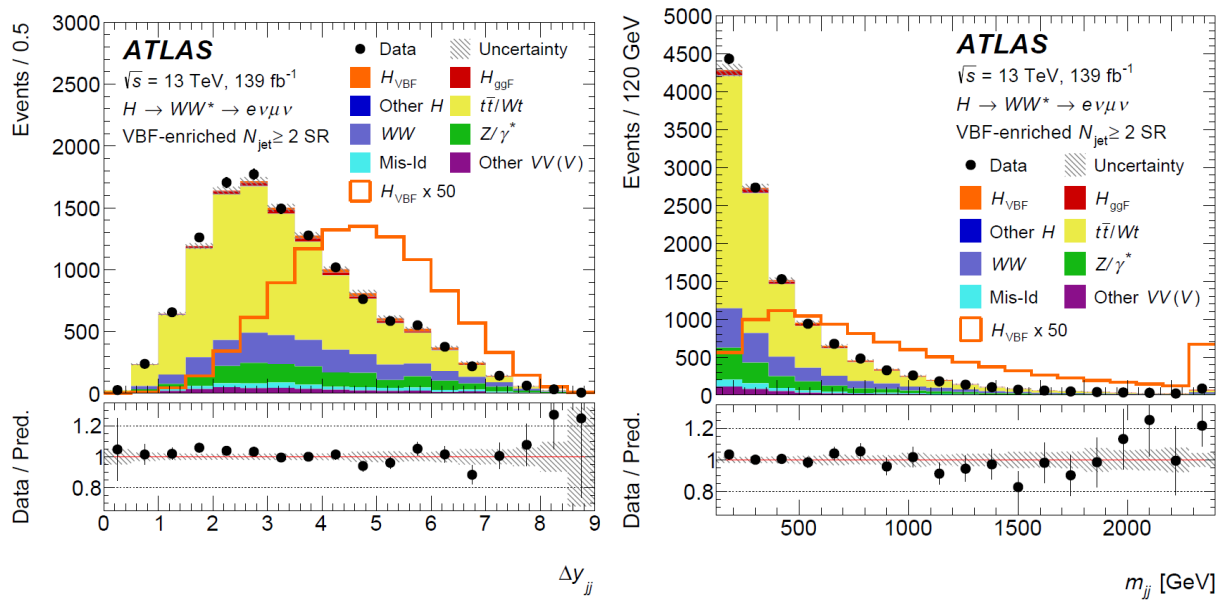


Рисунок 5 — Распределения по m_{jj} (слева) и Δy_{jj} (справа) в области сигнала от бозона Хиггса в механизме рождения VBF. Сплошной линией показан смоделированный сигнал, увеличенный в 50 раз для наглядности. Систематические ошибки включены [A6]

	H_{VBF}	H_{other}	VV	Топ	DY	W +jets	Всего	Данные
Все	180 ± 40	238 ± 43	2480 ± 350	7600 ± 370	1300 ± 300	330 ± 40	12200 ± 180	12189
DNNoutput [0.87 – 1.00]	28.8 ± 5.5	2.6 ± 0.9	5.2 ± 1.2	2.6 ± 0.8	0.6 ± 0.1	1.7 ± 0.2	42.0 ± 5.1	38

Таблица 1 — Количество событий в сигнальной области VBF H . Отдельно показано число событий в интервале [0.87 – 1.00] по выходной переменной DNN [A6]

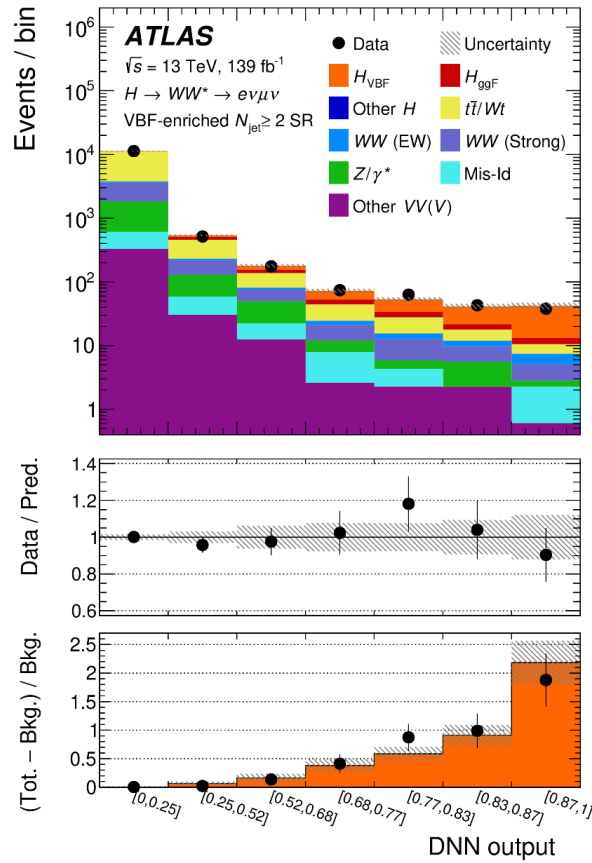


Рисунок 6 — Распределение по выходному дискриминанту DNN в сигнальной области VBF H . Средняя картинка показывает отношение данных к сумме подогнанных сигнала и фона. Нижняя картинка показывает разницу между данными и оцененным фоном по сравнению с распределением сигнала [A6]

Во втором разделе пятой главы представлены результаты дополнительного исследования, проведенного автором, к основному анализу на основе нейронных сетей [A3–A4].

Во-первых, проведено исследование влияния эффекта наложения событий на распределения адронных струй в условиях повышенной светимости для данных 2017 и 2018 гг. по аналогии с исследованиями для данных 2015 – 2016 гг., которые были представлены во втором разделе главы 4. Среднее число наложений для данных 2017 – 2018 гг. – около 40, что в 1.5 раза больше, чем в обработанных ранее сеансах 2015 – 2016 гг. Были отдельно исследованы экспозиции с большим ($\mu > 36$), средним ($26 < \mu \leq 36$) и малым ($\mu \leq 26$) числом наложений [A3]. На Рисунке 7 в качестве примера представлены распределения для данных 2017 г. по наиболее важной кинематической переменной – разнице быстрот струй Δ_{ij} для $\mu > 36$ и $\mu \leq 26$. Данные согласуются с MC-моделированием в пределах погрешности. Эффект наложения описывается MC-моделированием и не влияет на качество восстановления объектов эксперимента. Результаты для данных 2018 г. близки к результатам для данных 2017 г. из-за схожих условий

светимости. Отметим, что на полной статистике данных отношение сигнала к фону немного (в пределах 16%) уменьшается с ростом числа наложенных событий μ .

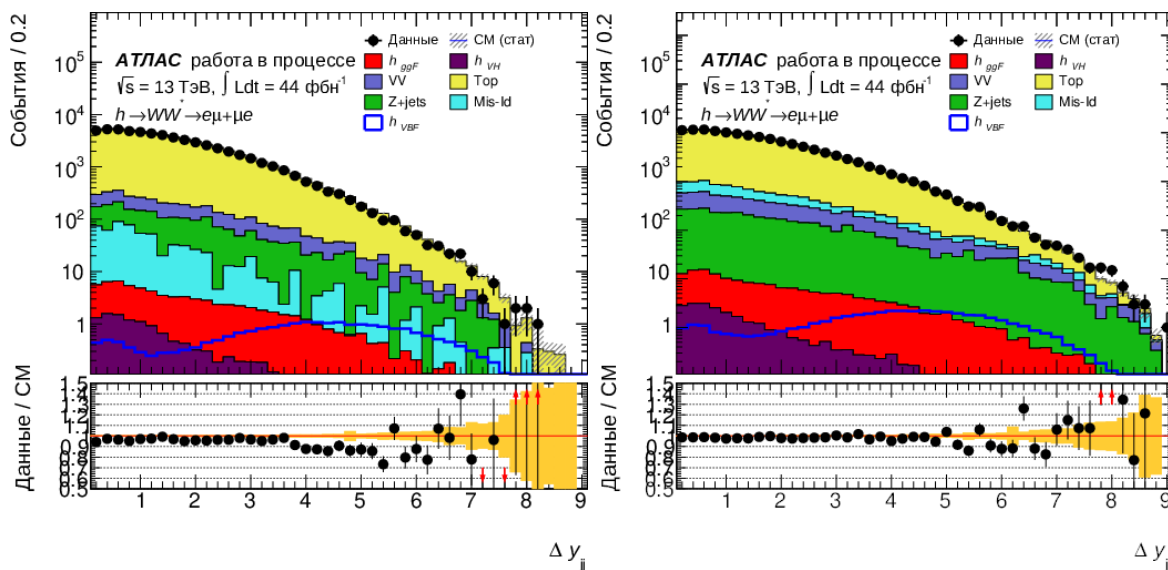


Рисунок 7 — Распределение по разнице быстрот адронных струй в событиях 2017 г. в зависимости от числа наложений, μ : слева – $\mu \leq 26$, справа – $\mu > 36$ [A3]

Во-вторых, представлены результаты анализа на основе кинематических отборов полного образца событий с электроном, мюоном и двумя струями [A4]. В дополнение к отборам, использованным в основном анализе, ограничивался модуль векторной суммы недостающего поперечного импульса, поперечных импульсов лептонов и струй ($|p_T^{tot}| < 15$ ГэВ). Кроме того, вместо DNN применялись критерии отбора на основе топологии механизма VBF, т.е. по разности быстрот и инвариантной массе адронных струй ($\Delta y_{jj} > 3.6$ и $m_{jj} > 600$ ГэВ, “VBF” в Таблице 2). Дополнительно использовался критерий на

Отбор	VBF H	H_{other}	VV	Топ	$W+jets$	$Z \rightarrow \tau\tau$	Фон	Данные
Предв. отбор	0.60	6.1	146	1164	32.9	257	1607	1586
2 струи	0.36	1.2	27.9	905	11.7	23.8	970	967
VBF	0.102	0.034	0.43	0.88	0.040	0.27	1.72	1.60
m_T	0.067	0.013	0.029(2)	0.036(2)	0.012(3)	0.014(3)	0.104(5)	0.156

Таблица 2 — Суммарное количество событий (в тыс.) с электроном и мюоном в конечном состоянии в данных 2015 – 2018 гг. Показаны только часть критериев отбора событий. Указаны статистические погрешности в последних значащих цифрах [A4]

запрет третьей струи с $p_T > 20$ ГэВ в центральной области псевдобыстрот, а также требовалось, чтобы лептоны находились между двумя основными струями, с дополнительными ограничениями $\Delta\varphi_{\ell\ell} < 1.8$ и $m_{\ell\ell} < 50$ ГэВ. На последнем этапе брались события с $m_T < 1.2 m_H$. На Рисунке 8 представлены распределения по поперечной массе m_T на ранних и поздних стадиях отбора. Экспериментальные данные согласуются с МС-моделированием в пределах ошибок. На ранних стадиях отбора (Рисунок 8(а, б)) и «VBF» стадии (Рисунок 8(в)) сигнал еще четко не виден, то на последней стадии отбора он уже хорошо заметен (Рисунок 8(г)).

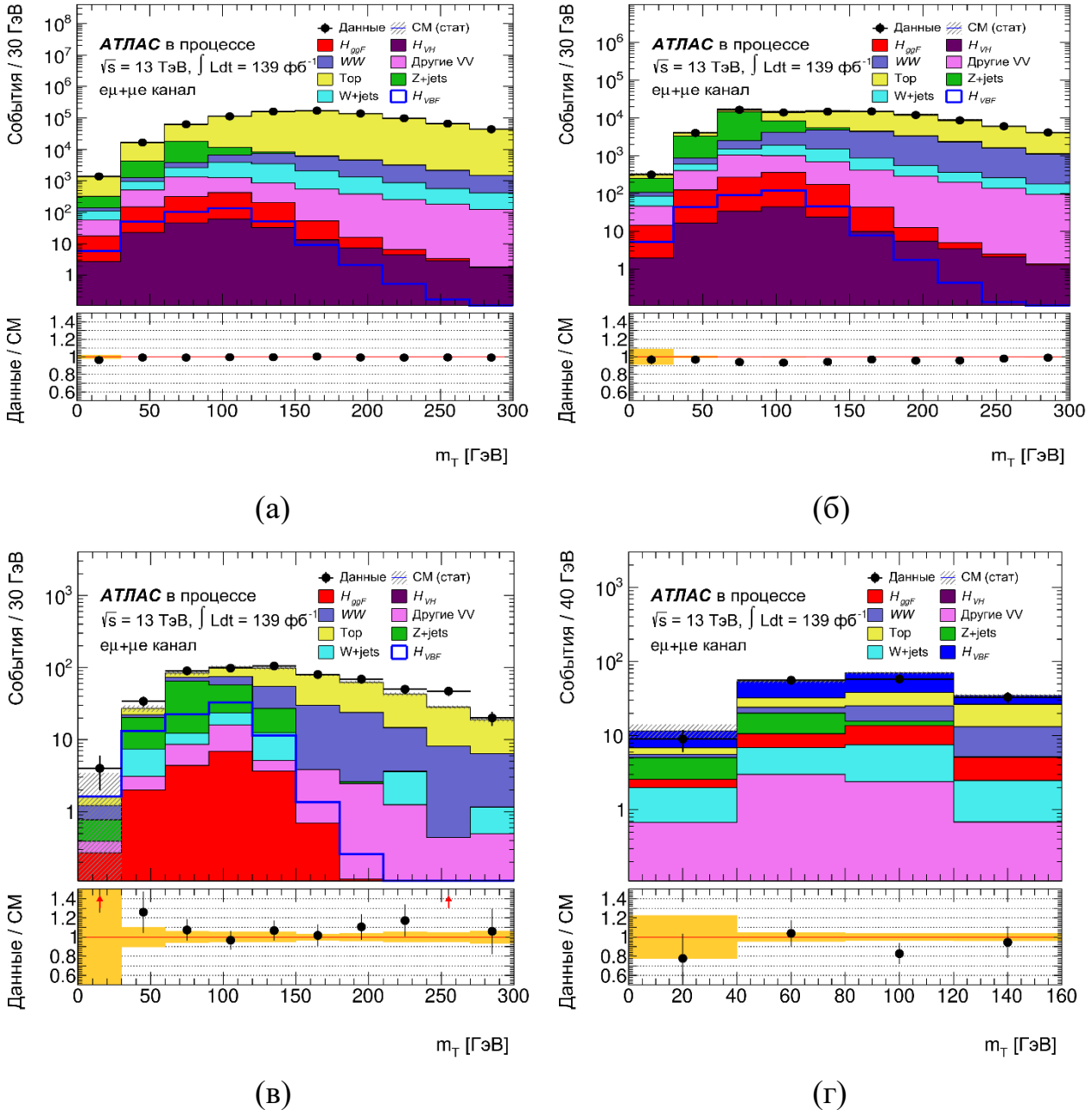


Рисунок 8 — Распределения по поперечной массе в области сигнала для канала распада бозона Хиггса $SM H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ на следующих стадиях отбора: 2 струи (а), запрет на b -струю (б), стадия отбора VBF (в) и последняя стадия отборов (г) [A4]

Число событий в доминирующих фоновых процессах – $Z \rightarrow \tau\tau$ и рождения t -кварков – пересчитывались в сигнальную область с учетом нормировочных коэффициентов, которые были получены из оценки контрольных областей. Примеры распределений по поперечной массе в этих контрольных областях представлены на Рисунке 9. Спектры согласуются с результатами МС-моделирования.

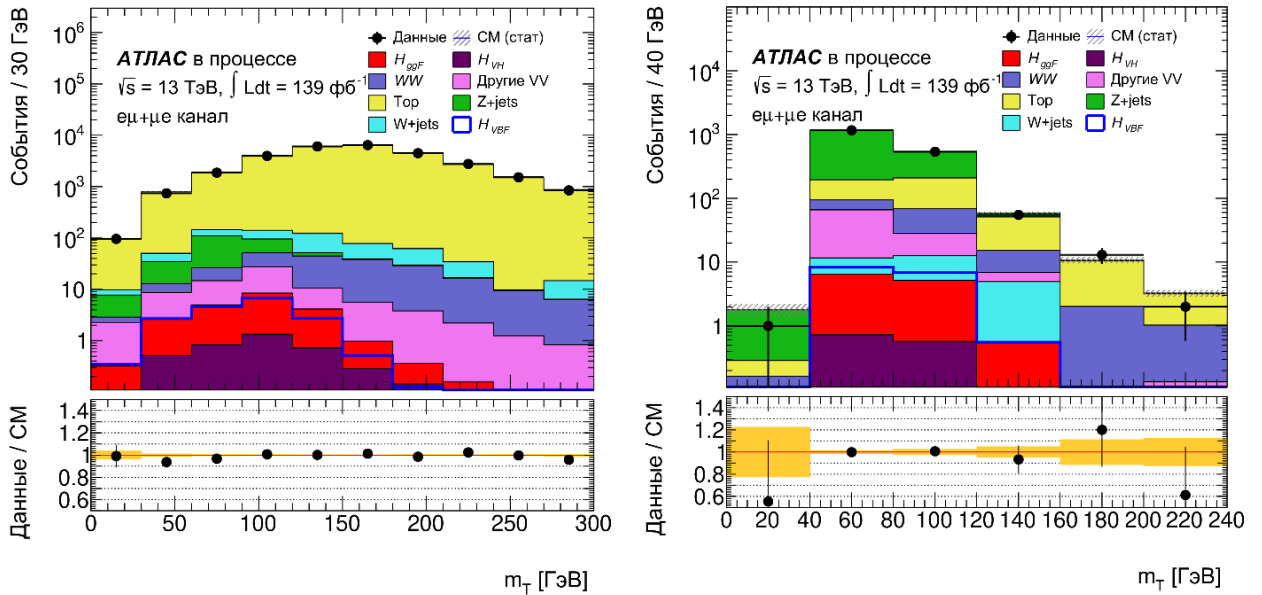


Рисунок 9 — Распределения по поперечной массе в контрольных областях фонов для канала распада бозона Хиггса СМ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$. Слева – контрольная область фона от t -кварков, справа – контрольная область фона от $Z \rightarrow \tau\tau$ [A4]

Итоговое число событий на разных этапах отбора приводится в упомянутой выше Таблице 2. Последний этап отбора проходят 156 событий, при этом предсказывается 67 событий сигнала при фоне 104 ± 5 событий, что соответствует наблюдаемой (ожидаемой) статистической значимости 4.6 (5.9) σ .

В третьем разделе пятой главы представлен анализ стандартного бозона Хиггса в механизме рождения VBF на полной статистике, набранной при 13 ТэВ, для канала с одинаковым ароматом лептонов [A4–A5].

В анализе данных с конечным состоянием с двумя электронами или мюонами основным фоном является процесс Дрелл-Яна ($Z/\gamma^* \rightarrow ee/\mu\mu$), для подавления которого требуется многомерный анализ на основе алгоритмов типа DNN. В диссертации впервые представлено исследование конечных состояний $e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$ при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, частично основанное на опыте сотрудничества ATLAS при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ. Отбор событий в сигнальной области схож с представленным выше для $e\nu$ -состояний, но дополнительно применялись критерии $E_T^{miss} > 50$ ГэВ и $|M_{e\ell} - M_Z| > 15$ ГэВ для подавления фона от процессов Дрелла-Яна. В результате оптимизации был также добавлен новый отбор по недостающему поперечному импульсу, измеренному в трекаре, $p_T^{miss} > 50$ ГэВ. С учетом предсказанных 23

событий сигнала при фоне 195 ± 42 (в основном от процессов Дрелла-Яна) на последней стадии отбора в Таблице 3, была посчитана ожидаемая значимость сигнала, которая составила всего 0.5σ без учета систематических ошибок [A4]. Для ее увеличения была предварительно настроена и затем применена DNN, ранее успешно использованная в анализе событий с электроном и мюоном в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$. Натренированная на таком образце событий DNN не способна эффективно разделить сигнал и DY-фон, поэтому для его подавления дополнительно был применен предварительный отбор. В результате ожидаемая значимость сигнала увеличилась в 4 раза и достигла значения 2σ (Рисунок 10(a)). После применения новой нейронной сети, натренированной на образцах событий с двумя электронами или двумя мюонами в конечном состоянии, значимость сигнала достигла значения 3σ (Рисунок 10(б) [A5]).

Отбор	VBF	ggF+VH	VV	Топ	W+jets	DY	Полный фон	Data
Сигнальная область								
Пред. Отбор	0.55	5.3	1496	892	29.5	10263	12686	12361
2 струи	0.33	1.1	163	695	4.4	1017	1881	1912
b-запр.	0.29	0.9	135	48.1	-	855	1037	1038
VBF	0.092	0.030	1.8	0.69	-	16.6	18.9	-
m_T	0.023	0.004	0.025(4)	0.013(1)	0.007(6)	0.145(41)	0.195(42)	-
Контрольные области								
DY CR	0.050	0.041	3.5	0.55	0.040	27.1	31.2	30.959
Топ CR	0.002	0.003	0.068	7.2	0.045	0.087	7.5	7.444

Таблица 3 — Суммарное количество событий (в тыс.) с двумя электронами или двумя мюонами в конечном состоянии в данных 2015 – 2018 гг. на разных этапах отбора. Приводятся результаты моделирования для сигнала и основных фонов со статистическими погрешностями в последних цифрах (в скобках) [A4]

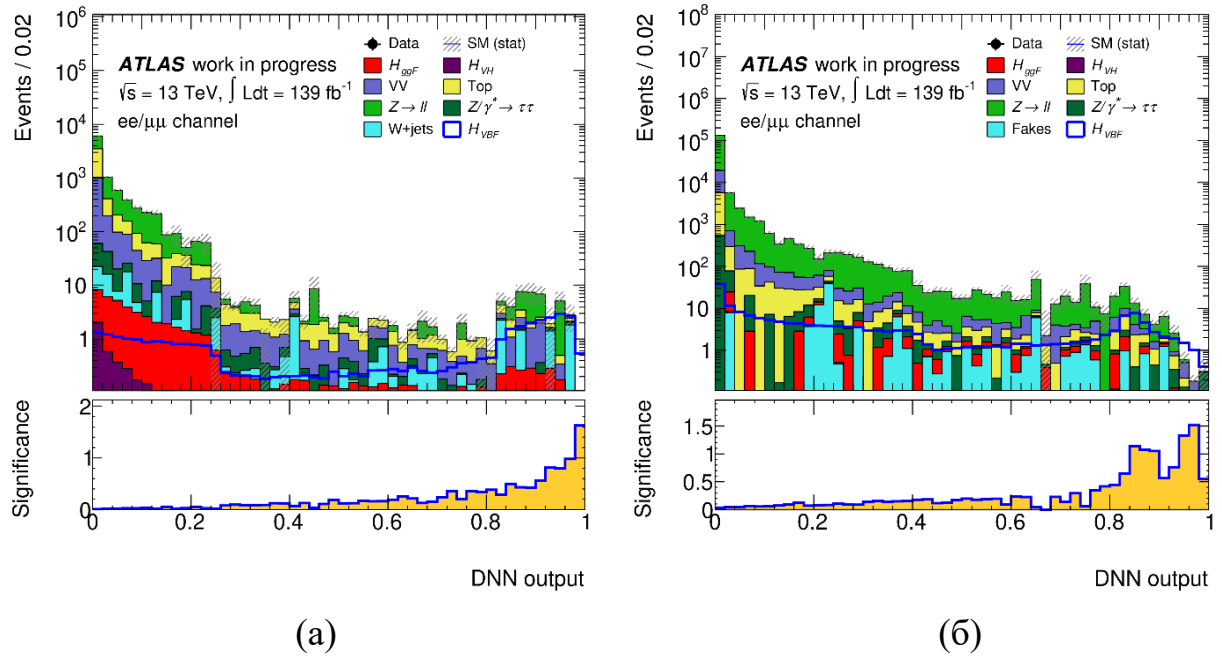


Рисунок 10 — Распределение классификатора DNN: натренированной на событиях с одним электроном и мюоном в конечном состоянии и с применением дополнительного отбора для подавления DY (а); натренированной на событиях с двумя электронами или двумя мюонами в конечном состоянии (б) [A5]

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы, которые сводятся к следующему:

1. Показано, что влияние эффекта наложения событий в одном пересечении пучков на распределения адронных струй описывается MC-моделированием и не сказывается на качестве восстановления и идентификации объектов эксперимента. Это исследование было проведено для данных 2015 – 2016 гг. и 2017 – 2018 гг. с электроном и мюоном в конечном состоянии.

2. Проведен анализ конечного состояния с электроном и мюоном на полной статистике при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, измерено число событий и на каждом этапе их отбора построены кинематические распределения по различным переменным, и проведено их сравнение с результатами MC-моделирования, оценены измеренная и ожидаемая значимости сигнала.

3. Измерено полное сечение рождения бозона Хиггса в механизме VBF в канале его распада на два W-бозона, которое оказалось равным $0.93_{-0.20}^{+0.23}$ в единицах SM, при впервые достигнутой статистической значимости сигнала 5.8σ благодаря использованию глубоких нейронных сетей DNN в анализе. Также были измерены упрощенные шаблонные сечения в пяти разных областях фазового пространства.

4. Проведен анализ конечного состояния с двумя электронами или двумя мюонами в данных 2015 – 2018 гг., рассмотрены новые критерии отбора событий для выделения сигнальных и контрольных областей основных фоновых процессов, также измерено число этих событий, построены кинематические распределения по различным переменным и проведено их сравнение с

результатами МС-моделирования, а также оценена ожидаемая статистическая значимость сигнала.

5. Осуществлена тренировка глубокой нейронной сети DNN на событиях с двумя электронами или двумя мюонами и показано, что ее применение в анализе позволило в шесть раз увеличить значимость сигнала по сравнению с кинематическими отборами.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. *Рамакоти Е.Н., Гаврилюк А.А., Цукерман И.И.*, Анализ двухлептонных событий для изучения свойств стандартного бозона Хиггса в канале $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ в эксперименте АТЛАС на БАК при 13 ТэВ [Текст] // Ядерная Физика и Инжиниринг. – 2018. – 9, 488.
- A2. *E.N. Ramakoti, A.A. Gavriilyuk, I.I. Tsukerman*, An Investigation of Signal Kinematical Region to Study Standard Model Higgs Boson Properties in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ Decay Channel in the ATLAS Experiment at the Large Hadron Collider at 13 TeV [Text] // Phys. At. Nucl. – 2019. – 82, 1696.
- A3. *E.N. Ramakoti, A.A. Gavriilyuk, I.I. Tsukerman*, Study of events with an electron, muon, and two hadron jets in the final state with an integrated luminosity of a 139 fb^{-1} in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector at the LHC [Text] // Phys. At. Nucl. – 2021. – 84, 1776.
- A4. *E.N. Ramakoti, A.A. Gavriilyuk, I.I. Tsukerman*, A study of the standard model Higgs boson in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ decay channel in the ATLAS experiment at the LHC [Text] // Phys. At. Nucl. – 2021. – 84, 2055.
- A5. *E.N. Ramakoti, A.A. Gavriilyuk, I.I. Tsukerman*, Search for the Standard Model Higgs boson and a heavy resonance in the $WW^* \rightarrow (e\nu e\nu + \mu\nu\mu\nu)$ decay channel in the ATLAS experiment [Text] // Phys. At. Nucl. – 2022. – 85, 1587.
- A6. *G.Aad... E. Ramakoti [et al.] (ATLAS Collaboration)*, Measurement of Higgs boson production by gluon-gluon fusion and vector-boson-fusion using $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector [Text] // Phys. Rev. D. – 2023. – 108, 032005, arXiv: 2207.00338.

Список литературы

1. *ATLAS Collaboration*, Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC [Текст] // *Phys. Lett.* – 2012. – B 716, 1.
2. *CMS Collaboration*, Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC [Text] // *Phys. Lett.* – 2012. – B 716, 30.
3. *ATLAS Collaboration*, A detailed map of Higgs boson interactions by the ATLAS experiment ten years after the discovery [Text] // *Nature.* – 2022. – 607, 52.
4. *CMS Collaboration*, A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery [Text] // *Nature.* – 2022. – 607, 60.
5. *D. de Florian* [et al.], Handbook of LHC Higgs Cross Section: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector [Text] : tech. rep. // CERN. – Geneva, 2016. – arXiv:1610.07922, 2016.
6. *ATLAS Collaboration*, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider [Текст] // *J. Instrum.* – 2008. – 3, S08003.
7. *ATLAS Collaboration*, Observation and measurement of Higgs boson decays to WW^* with the ATLAS detector [Text] // *Phys. Rev.* – 2015. – D92, 012006.
8. *F. Chollet* [et al.], Keras [Text] : tech. rep. – 2015. – url: // keras.io.
9. TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems // Software available from tensorflow.org. – 2015. – url: // www.tensorflow.org.