

На правах рукописи

Каменщиков Андрей Александрович

**Поиск лептокварков первого поколения при парном  
рождении в протон-протонных взаимодействиях в  
эксперименте ATLAS**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Протвино 2017

УДК 539.126.4

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт физики высоких энергий» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель – к. ф.-м. н., ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», Мягков Алексей Григорьевич.

Официальные оппоненты: к. ф.-м. н., ОИЯИ, Шматов Сергей Владимирович; д. ф.-м. н., ИЯИ РАН, Красников Николай Валерьевич.

Ведущая организация – НИЯУ МИФИ.

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2017 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [http://www.ihep.ru/files/KamenshchikovAA\\_thesis.pdf](http://www.ihep.ru/files/KamenshchikovAA_thesis.pdf)  
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» .

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю. Г. Рябов

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** После открытия бозона Хиггса одним из наиболее актуальных направлений фундаментальной науки стала проверка идей существования физики за пределами Стандартной Модели (SM). Одним из возможных проявлений такой физики являются лептокварки, предсказанные различными теориями, среди которых: Теория Великого Объединения (GUT), модели Бахмюллера-Рюкля-Уиллера  $SU(5)$  (mBRW), Пяти-Салама  $SU(4)$ , суперструн и техницвета. Поиск лептокварков осуществлялся ранее как при одиночном рождении, в экспериментах ускорителя HERA, так и при парном, в экспериментах на ускорителе Tevatron, что позволило наложить ограничения на параметры модели на доступных соответствующим анализам энергетических масштабах: константу кварк-лептонного смешивания и сечение парного рождения. Продолжается поиск лептокварков и в экспериментах ATLAS и CMS на Большом Адронном Коллайдере (LHC). При этом увеличение энергии протон-протонных,  $pp$ , столкновений и светимости на LHC дает возможность проверить модель лептокварков на недоступном ранее диапазоне энергий и соответствующей ему высокой статистической обеспеченности данных. Результат такого поиска интересен независимо от вытекающего из него обнаружения или необнаружения лептокварка: обнаружение является прямым свидетельством существования новой физики, тогда как необнаружение позволяет наложить более строгие экспериментальные ограничения на модель лептокварков, дающие возможность совершенствования теоретического аппарата современной физики высоких энергий (HEP).

Особый интерес представляет метод статистической проверки совместимости модели физики за пределами SM с данными в общем случае. В современной практике имеют место два альтернативных формализма для решения такой проблемы: частотный и Байесов-

ский. В связи с этим устойчивость результата проверки совместимости новой модели НЕР с данными по отношению к выбору того или иного формализма и к другим субъективным факторам формирования статистической модели в рамках отдельно взятого формализма представляется критическим аспектом широкого круга подобных задач.

**Цели и задачи диссертационной работы.** Целью диссертационной работы является проверка совместимости модели лептокварков первого поколения при парном рождении с данными, полученными экспериментом ATLAS при  $pp$  столкновениях с  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ<sup>1</sup> в 2012 году. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- Оптимизация условий первичного отбора объектов и событий для поиска лептокварков первого поколения при парном рождении с двумя заряженными лептонами и двумя кварками в конечном состоянии.
- Оценка вкладов фоновых и сигнальных процессов при поиске лептокварков первого поколения.
- Разработка стратегии статистического анализа для поиска лептокварков первого поколения.
- Оценка систематических неопределённостей при поиске лептокварков первого поколения.
- Разработка статистического метода проверки совместимости модели лептокварков первого поколения с данными эксперимента ATLAS при  $pp$  столкновениях с  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ.
- Исследование согласованности результатов проверки совместимости новой модели с данными в рамках частотного и Байесовского статистических формализмов, а также чувствительности результатов такой проверки к субъективным факторам построения статистической модели.

---

<sup>1</sup> В работе использована система единиц  $\hbar = c = 1$ .

- Оценка совместимости модели лептокварков первого поколения с данными эксперимента ATLAS.

**Научная новизна.** Поиск лептокварков первого поколения в протон-протонных взаимодействиях произведён при беспрецедентно высокой энергии  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ и интегральной светимости данных  $20.3 \text{ фб}^{-1}$ .

Впервые на одном примере подробно продемонстрирована процедура решения задачи проверки совместимости новой модели в НЕР с данными в рамках частотного и Байесовского статистических формализмов, произведено сопоставление получаемых результатов и исследован эффект выбора статистической модели для систематической неопределённости.

**Теоретическая и практическая значимость.** Результаты поиска лептокварков первого поколения, изложенные в диссертации, являются практической верификацией теоретической модели лептокварков и представляют интерес для её дальнейшей разработки. Опубликованные материалы работы по поиску лептокварков первого поколения в протон-протонных взаимодействиях при  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ в эксперименте ATLAS позволяют производить повторную интерпретацию полученных оценок и проверять другие модели НЕР не проходя всю последовательность этапов физического анализа, а основываясь на опубликованных материалах. Опыт, накопленный в процессе выполнения поиска лептокварков первого поколения, лёг в основу следующей работы коллаборации ATLAS по поиску скалярных лептокварков в протон-протонных взаимодействиях при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ [7] и критически важен для направления поиска лептокварков в эксперименте ATLAS в целом и для поиска лептокварков первого поколения в частности.

Исследование статистического метода проверки совместимости новой модели в НЕР с данными представляет интерес для работ, связанных с проверкой совместимости произвольной новой модели НЕР с данными, а публикация данного исследования подробно освещает соответствующую методическую сторону работы по поиску лептокварков первого поколения в протон-протонных взаимодействиях при  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ в эксперименте ATLAS.

### Положения, выносимые на защиту:

1. Условия первичного отбора объектов и событий для поиска лептокварков первого поколения при парном рождении с двумя заряженными лептонами первого поколения и двумя кварками в конечном состоянии.
2. Оценки вкладов фоновых и сигнальных процессов при поиске лептокварков первого поколения.
3. Стратегия статистического анализа для поиска лептокварков первого поколения.
4. Оценки систематических неопределённостей при поиске лептокварков первого поколения.
5. Метод статистической проверки совместимости модели лептокварков первого поколения с данными, полученных экспериментом ATLAS при  $pp$  столкновениях с  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ.
6. Выводы исследования согласованности результатов проверки совместимости новой модели с данными в рамках частотного и Байесовского статистических формализмов, а также чувствительности результатов такой проверки к субъективным факторам построения статистической модели.
7. Результат проверки совместимости модели лептокварков первого поколения с данными эксперимента ATLAS, полученными при  $pp$  столкновениях с  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные результаты диссертации доложены диссертантом лично на семинарах ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», на собраниях коллаборации ATLAS и на профильных международных научных конференциях по физике высоких энергий:

- 23rd International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions, Tahoe, California, Ca, USA, 23 - 29 Aug 2015 (SUSY 2015) [1];

- 3rd Annual Large Hadron Collider Physics Conference, St. Petersburg, Russia, 31 Aug - 5 Sep 2015 (LHCP 2015) [2].

Кроме того, научные результаты, полученные диссертантом и включённые в диссертацию, в явном виде входят в доклады, представленные от имени коллаборации ATLAS её членами на конференциях “European Physical Society Conference on High Energy Physics 2015, Vienna, Austria, 22 - 29 Jul 2015 (EPS-HEP 2015) [8; 9]” и “4th International Conference on New Frontiers in Physics, Kolymbari, Crete, Greece, 23 - 30 August 2015 (ICNFP 2015) [10]”.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 4 научных статьях, из которых 2 в рецензируемых научных журналах [3; 4], 1 в виде препринта ИФВЭ [5] и 1 по материалам доклада на конференции LHCP 2015 в виде препринта CERN [6].

Материалы докладов на профильных международных конференциях SUSY 2015 и LHCP 2015, содержащие основные результаты диссертации, опубликованы в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» [1; 2]. Данные материалы докладов и статья по материалам доклада на конференции LHCP 2015 подготовлены диссертантом лично.

Помимо этого, научные результаты, полученные диссертантом и включённые в диссертацию, в явном виде содержатся в материалах докладов (и соответствующих им статьях для сборников трудов конференций), представленных от имени коллаборации ATLAS её членами на конференциях EPS-HEP 2015 [8; 9] ([11; 12]), LHCP 2015 [13] и ICNFP 2015 [10] ([14]).

**Личный вклад автора.** Диссертант обеспечил определяющий вклад в работу коллаборации ATLAS «Search for scalar leptoquarks in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ with the ATLAS detector», опубликованную в виде одноимённой научной статьи [3]. Являясь главным и единственным специалистом по анализу в программе поиска скалярных лептокварков первого поколения, диссертант выполнял и функции редактора статьи для журнала и внутренней документации коллаборации ATLAS. Наконец, диссертантом произведена разработка статистического метода для получения конечных результатов поиска скалярных лептокварков первого поколения в протон-протонных

взаимодействиях при  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ в эксперименте ATLAS. Таким образом, личный вклад диссертанта является критически важным для всего направления поиска лептокварков в эксперименте ATLAS.

В процессе работы над диссертацией автором лично проведено научное исследование статистического метода проверки совместимости новой модели НЕР с данными. В результате данной работы диссертантом смоделирована характерная экспериментальная конфигурация, предложены решения задачи проверки совместимости расширения Стандартной Модели с данными в рамках частотного и Байесовского статистических формализмов, произведено сопоставление соответствующих результатов и рассмотрен эффект от выбора статистической модели для систематической неопределённости. Исследование опубликовано в виде научной статьи «A new model test in high energy physics in frequentist and Bayesian statistical formalisms» при единоличном авторстве диссертанта [4].

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6-ти глав и заключения. Общий объем диссертации 186 страниц, включая 155 рисунков и 23 таблицы. Библиография включает 123 наименования.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи и аргументирована научная новизна исследований, показаны теоретическая и практическая значимость полученных результатов, перечислены выносимые на защиту научные положения. Приведены сведения о степени достоверности и апробации результатов, публикациях, а также информация о личном вкладе автора.

**В первой главе** указаны основные свойства модели лептокварков (LQ), важные для осуществления проверки её совместимости с данными протон-протонных взаимодействий эксперимента ATLAS, и перечислены предшествующие и последующие работы по поиску LQ в эксперименте ATLAS и в других экспериментах. Среди теоретических моделей, предсказывающих LQ, присутствуют: GUT, ограни-

ченая модель  $SU(5)$ , mBRW, модель  $SU(15)$ , модель Пати-Салама  $SU(4)$ , модель суперструн, композитная модель, модель техницвета и другие модели. LQ вводятся в качестве бозонов цветового триплета с дробным значением электрического заряда и ненулевыми значениями барионного и лептонного чисел одновременно. Распад LQ происходит напрямую в кварк-лептонную пару, где лептон может быть либо заряженным, либо нейтральным. Вероятность распада на заряженный лептон обозначена литерой  $\beta$ , где  $0 \leq \beta \leq 1$ . В рамках mBRW накладываются дополнительные ограничения на свойства LQ, а именно: условие исключительно кирального характера взаимодействия и предположение о существовании трёх поколений LQ (первого, второго и третьего), взаимодействующих с SM лептонами и кварками только соответствующих поколений. Сила взаимодействия между скалярным LQ и кварк-лептонной парой описывается единственной Юкавской константой,  $\lambda_{LQ \rightarrow \ell q}$ . Основной механизм парного рождения скалярных LQ в  $pp$  столкновениях с энергией в системе центра масс  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ — глюонный синтез (рисунки с 1, a по 1, e); дополнительный вклад даёт кварк-антикварковая аннигиляция (рисунок 1, d), влияние которой возрастает с ростом массы LQ. Процесс парного рождения LQ полностью определяется постоянной сильного взаимодействия,  $\alpha_S$ , и не зависит от неизвестной  $\lambda_{LQ \rightarrow \ell q}$ .

Данная работа посвящена поиску парно рождённых скалярных LQ первого поколения (LQ1), распадающихся на кварк, образующий струю в результате адронизации, и заряженный лептон первого поколения. Поскольку в данной работе различие между электроном (мюоном) и позитроном (антимюоном) не имеет значения, то далее по тексту в отсутствие специальной оговорки электроном (мюоном) называется заряженный лептон первого (второго) поколения. Таким образом, конечная топология поиска представлена двумя электронами и двумя струями,  $eejj$ .

Дано краткое описание детектора ATLAS, представленного тремя основными подсистемами: трековым (внутренним) детектором, системой калориметров и мюонным спектрометром. Триггерная система эксперимента ATLAS реализована на трёх последовательных уровнях, где триггер первого уровня выполнен аппаратными сред-

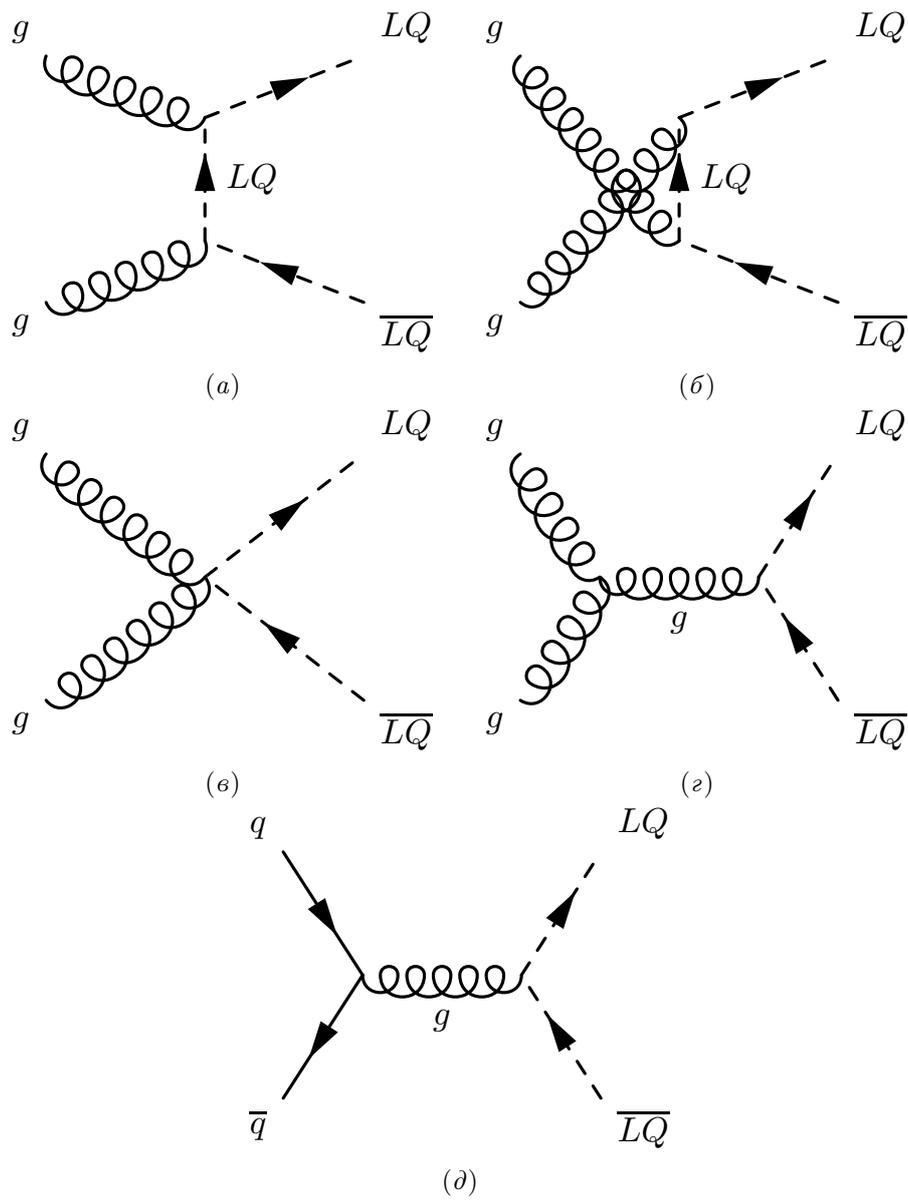


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана лидирующего порядка парного рождения  $LQ$ .

ствами, а два следующих — программными.

В настоящей работе использованы данные  $pp$  столкновений, полученные экспериментом ATLAS (далее по тексту — данные) при  $\sqrt{s} = 8$  TeV в 2012 году, характеризующиеся интегральной светимостью  $20.3 \text{ фб}^{-1}$ .

Указаны основные фоновые процессы для  $eejj$  сигнатуры парного рождения LQ1: рождение  $Z$ -бозона или процесс Дрелла-Яна (DY) (далее коллективно  $Z/\gamma^*$ ) с образованием электронной пары в сопровождении струй, рождение  $t\bar{t}$ , где среди продуктов распада и  $t$ , и  $\bar{t}$  присутствует электрон, рождение пары векторных бозонов, среди продуктов распада которой присутствуют два электрона, ассоциированное рождение  $t$ -кварка и  $W$ -бозона ( $Wt$ -канал) с последующим распадом каждого из них в электронном канале и рождение  $Z$ -бозона с последующим распадом в  $\tau$ -канале ( $Z \rightarrow \tau\tau$ ) в сопровождении струй. Перечисленные фоновые процессы, как и сигнальные, оценены с помощью образцов, смоделированных методами Монте-Карло (MC). При этом в каждом индивидуальном случае использовался MC генератор, рекомендованный коллаборацией ATLAS в качестве оптимального для моделирования соответствующего процесса. В данной главе диссертации указаны MC генераторы, использованные для моделирования процессов, вместе с соответствующими настройками. Кроме того, имеют место события, в которых по меньшей мере одна подлинная струя ошибочно идентифицирована как электрон — фон ложных электронов. Вклад таких событий оценён управляемым данными матричным методом (MM), привлекающим MC оценки вкладов процессов рождения  $W$ -бозона ( $\rightarrow e\nu_e$ ) и одиночного  $t$ -кварка в  $s$ -канале и  $t$ -канале.

В последних разделах главы приведены условия первичного отбора электронов, мюонов и струй, а также условия первичного отбора событий для анализа.

Результаты первой главы опубликованы в статьях [3; 6] и материалах конференций [1; 2].

**Во второй главе** приведены характеристики MC образцов, использованных для оценок вкладов процессов.

Проведена специальная проверка надёжности методов симуля-

ции, привлекающих функциональную аппроксимацию отклика калориметра. Проиллюстрирована качественная совместимость кинематических распределений для основных объектов топологии  $eejj$  МС образца процесса  $Z/\gamma^*$  ( $\rightarrow ee$ ) с учётом статистических неопределённостей и флуктуаций.

Приведены результаты коррекции МС образца процесса  $t\bar{t}$  с помощью зависящих от абсолютного значения поперечного импульса ( $p_T$ ) системы  $t\bar{t}$  поправок и продемонстрировано повышение качества моделирования хвостовых частей спектров.

Описана процедура оценки фона ложных лептонов с помощью ММ. Введены множества наблюдаемых топологий (категорий) событий, основанные на ослаблении условий идентификации и изоляции для электрона по отношению к первичному отбору. Описаны методы оценки вероятностей корректной и ошибочной идентификации электрона, измеренных в зависимости от величин абсолютного значения псевдобыстроты ( $|\eta|$ ) и  $p_T$  электрона, уровень которых по результатам измерений составляет  $\sim 95\%$  и  $\sim 10\%$  соответственно. Приведены результаты оценки фона ложных лептонов.

Построена полная композиция фоновых процессов, вклад которых оценивался как с помощью МС образцов, так и с помощью ММ. Спектры  $p_T$  лидирующих (характеризующихся наибольшим  $p_T$  в событии) электрона и струи приведены на рисунках 2 и 3 соответственно. В нижней части рисунков приведено отношение числа событий в бине для данных к соответствующему полному ожидаемому числу фоновых событий после фита модели, включающей контрольные области  $Z/\gamma^*$  и  $t\bar{t}$  и только фоновые процессы. Показанная статистическая неопределённость соответствует Пуассоновскому частотному 68% доверительному интервалу. Заштрихованная область отражает статистическую и систематические неопределённости оценки числа фоновых событий. Последний бин включает переполнение. Данная форма представления относится ко всем аналогичным рисункам.

В заключительном разделе главы приведены оценки акцептанса первичного отбора для сигнала, меняющегося от 67 % до 79 % и имеющего тенденцию к росту с увеличением массы LQ1.

Результаты второй главы опубликованы в статьях [3; 6] и мате-

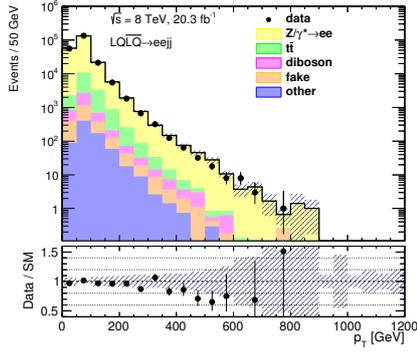


Рис. 2.  $p_T$  лидирующего электрона.

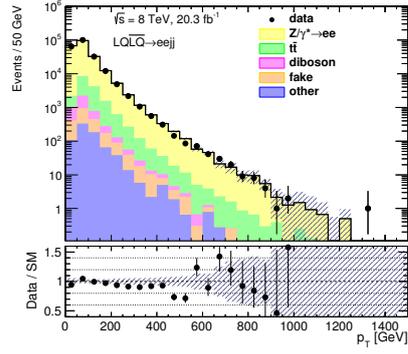


Рис. 3.  $p_T$  лидирующей струи.

риалах конференций [1; 2].

**Третья глава** начинается с описания дискриминирующих переменных анализа, позволяющих выделить область фазового пространства, чувствительную к проявлению сигнала от LQ1 в условиях присутствия вкладов фоновых процессов. В рамках данной работы выделены 3 дискриминирующие переменные: инвариантная масса пары лептонов ( $m_{\ell\ell}$ ), сумма абсолютных значений поперечных импульсов двух лептонов и двух лидирующих струй ( $S_T$ ), приведённая в уравнении (1), и меньшая из пары реконструированных масс LQ ( $m_{LQ}^{\min}$ ) в событии, вычисленная для такой комбинации лептонов и струй, при которой разница между меньшим значением,  $m_{LQ}^{\min}$ , и большим,  $m_{LQ}^{\max}$ , является наименьшей.

$$S_T = p_T^{l_1} + p_T^{l_2} + p_T^{j_1} + p_T^{j_2}. \quad (1)$$

Распределения величин  $m_{\ell\ell}$ ,  $m_{LQ}^{\min}$  и  $S_T$  после применения условий первичного отбора, для данных, фоновых и трёх сигнальных образцов,  $m_{LQ1} = 300, 600$  и  $1000$  ГэВ, в предположении  $\beta = 1.0$  приведены на рисунке 4.

В следующем разделе главы определены контрольные области (CR) для основных фоновых процессов анализа,  $Z/\gamma^*$  и  $t\bar{t}$ .  $Z/\gamma^*$  CR введена с помощью дополнительного условия отбора для инвариантной массы пары лептонов,  $60 < m_{\ell\ell} < 120$  ГэВ, после применения

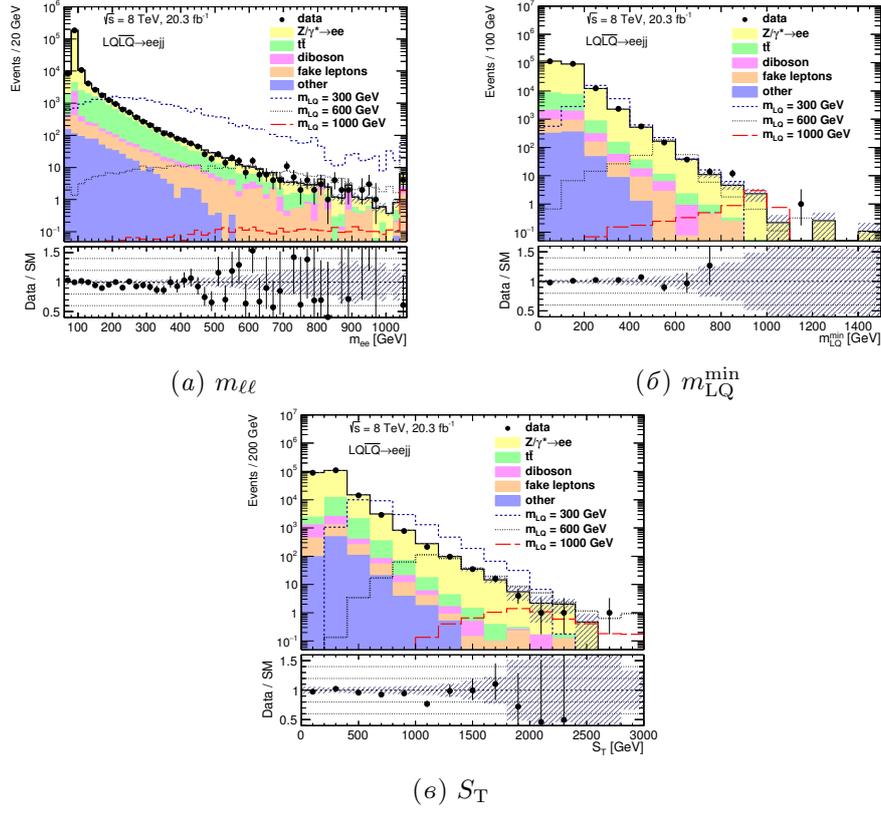


Рис. 4. Распределения дискриминирующих величин  $m_{\ell\ell}$ ,  $m_{LQ}^{\min}$  и  $S_T$  после применения условий первичного отбора. Рисунки опубликованы в статье [3].

первичного отбора. В такой CR преобладают вклады событий ассоциированного рождения  $Z$ -бозона и струй.  $t\bar{t}$  CR построена путём изменения условий первичного отбора событий: в событии присутствует строго один электрон и один мюон, проходящие условия первичного отбора и имеющие  $p_T > 30$  ГэВ. Требования отбора для струй сохранены без изменений. Рисунок 5 отражает согласие между данными и композицией фоновых процессов в  $Z/\gamma^*$  CR, тогда как

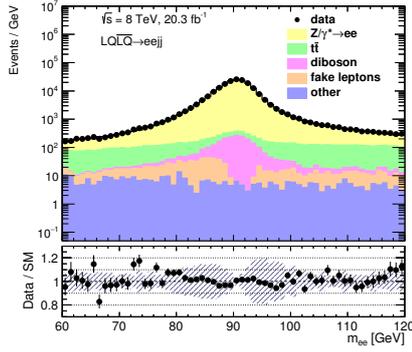


Рис. 5.  $m_{\ell\ell}$  в  $Z/\gamma^*$  CR.

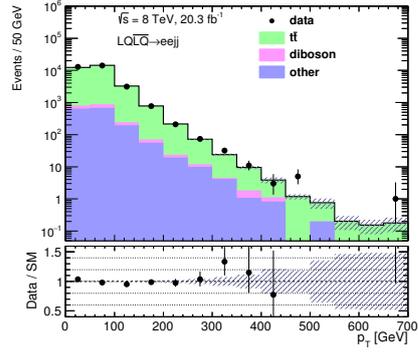


Рис. 6.  $p_T$  мюона в  $t\bar{t}$  CR.

рисунок 6 — в  $t\bar{t}$  CR.

Для проверки корректности оценки фона ложных лептонов, произведённой с помощью ММ, построена специальная проверочная область (VR). Требования VR помимо условий первичного отбора включают требование  $m_{\ell\ell} > 160$  ГэВ, с целью устранить вклад от распадов  $Z$ -бозона, и требование одинакового знака заряда пары лептонов в событии. VR не входит в статистическую модель и выполняет задачу иллюстрации качества оценки фона ложных лептонов.

После применения условий первичного отбора осуществлён специальный отбор событий с использованием дискриминирующих кинематических переменных для повышения значимости проявления ожидаемого сигнального процесса при наличии различных источников фоновых вкладов. Система таких специальных требований называется сигнальной областью (SR) и оптимизирована для каждого рассматриваемого значения  $m_{LQ1}$ , используя величину статистической значимости сигнала в качестве критерия. Проведено дополнительное исследование возможности сокращения количества SR в целях упрощения общей процедуры анализа без потери его чувствительности к модели LQ. SR данной работы приведены в таблице 1.

Результаты третьей главы опубликованы в статьях [3; 6] и материалах конференций [1; 2].

**Четвёртая глава** посвящена систематическим неопределённо-

Таблица 1. Оптимизированные условия отбора для SR. Таблица опубликована в статье [3].

| В гигаэлектронвольтах |           |                  |         |                   |
|-----------------------|-----------|------------------|---------|-------------------|
|                       | $m_{LQ1}$ | $m_{\ell\ell} >$ | $S_T >$ | $m_{LQ}^{\min} >$ |
| SR1                   | 300       | 130              | 460     | 210               |
| SR2                   | 350       | 160              | 550     | 250               |
| SR3                   | 400       | 160              | 590     | 280               |
| SR4                   | 450       | 160              | 670     | 370               |
| SR5                   | 500–550   | 180              | 760     | 410               |
| SR6                   | 600–650   | 180              | 850     | 490               |
| SR7                   | 700–750   | 180              | 950     | 580               |
| SR8                   | 800–1300  | 180              | 1190    | 610               |

стям (s.u.) работы. S.u. введены в качестве эффекта от изменения состояния источника s.u., s.s., описываемого мешающим параметром (NP).

Для оценки вкладов процессов использовано измеренное значение интегральной светимости, для которого учтена консервативная величина s.u. 3.9%. Данная s.u. вносит в статистический анализ (SA) единый для всех соответствующих ей процессов s.s. S.u. в оценке фона ложных лептонов обусловлены аспектами ММ, среди которых преобладающий вклад вносят процедуры оценки вероятности ошибочной идентификации электрона. Исходя из этого, оценка s.u. ММ в данной работе произведена вариацией величины вероятности ошибочной идентификации электрона на 20 %. Данная s.u. вносит в SA соответствующий s.s., влияющий на оценку вклада исключительно фона ложных лептонов. Статистическая ограниченность оценок вкладов процессов вносит в SA по одному s.s. для каждой CR и SR.

Описаны экспериментальные s.u., связанные с реконструкцией ( $\sim 1\%$ ), идентификацией ( $\sim 1\%$ ) и изоляцией ( $\sim 0.1\%$ ) электронов, а также двухфотонным триггером ( $\sim 0.1\%$ ), использованном при отборе событий. Учтены s.u. энергетической калибровки и энергетиче-

ского разрешения электронов. Экспериментальные систематические неопределённости, связанные со струями, обусловлены, в первую очередь, процедурой калибровки, вносящей 15 s.s. в SA. Кроме того, учтено энергетическое разрешение струи (JER). Наибольший эффект от отдельных компонент JES (JER) s.s. для оценки вклада процесса  $Z/\gamma^* (\rightarrow ee)$  меняется от  $\sim 5\%$  ( $\sim 1\%$ ) до  $\sim 20\%$  ( $\sim 7\%$ ) в зависимости от SR.

Для двух главных фоновых процессов анализа,  $Z/\gamma^*$  и  $t\bar{t}$ , во внимание принята теоретическая неопределённость моделирования MC образцов, приводящая к s.u. в соотношении ожидаемых чисел событий в CR и SR. Оценка данной s.u. произведена при использовании абсолютной величины отклонения от единицы соотношения числа событий в данных и образцах фоновых процессов в бинах распределений по величине  $S_T$ ,  $1 + |1 - \text{data}/\text{MC}|$ , в  $Z/\gamma^*$  и  $t\bar{t}$  CR. Полученная зависимость такой абсолютной величины от  $S_T$  аппроксимирована линейной функцией в области  $S_T > 400$  ГэВ. Соответствующие распределения приведены на рисунке 7. Величина s.u. меняется от 8% до 25% для образца  $Z/\gamma^*$  и от 6% до 24% для образца  $t\bar{t}$ , увеличиваясь от SR1 к SR8.

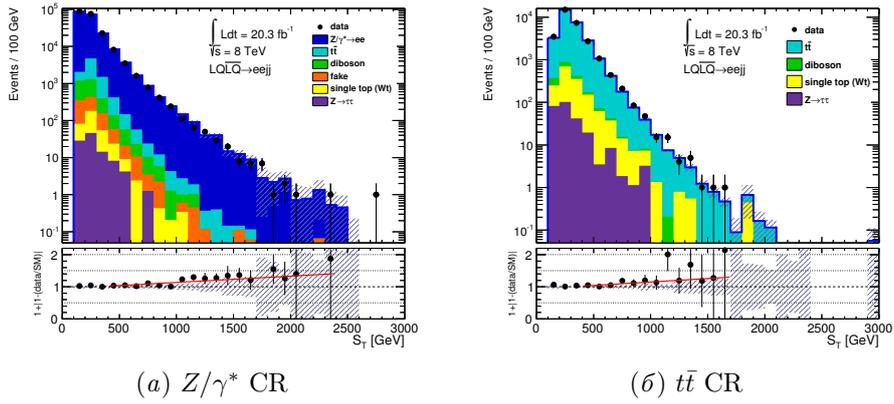


Рис. 7. Аппроксимация величины  $1 + |1 - \text{data}/\text{MC}|$  как функции переменной  $S_T$  в CR.

Учтена s.u. оценки акцептанса процесса, обусловленная функци-

ей распределения партонов (PDF), s.u. в оценках сечений второстепенных фоновых процессов и s.u. сигнального процесса.

Результаты четвертой главы опубликованы в статьях [3; 6] и материалах конференций [1; 2].

**В пятой главе** описано исследование решения задачи проверки совместимости новой модели НЕР с данными в рамках частотного и Байесовского статистических формализмов. На начальном этапе исследования смоделирована характерная конфигурация статистического анализа: получены MC образцы фоновых и сигнальных процессов, а также набор псевдоданных в предположении присутствия только фоновых процессов. Введены s.s. и s.u.

Детально описан механизм проверки совместимости новой модели с данными. Приведено подробное аналитическое выражение для функции правдоподобия (модели), LF, включая параметризацию влияния s.s. на оценки вкладов процессов и другие особенности включения s.s./s.u. в модель. Разобрана процедура проверки гипотезы, выписано выражение для использованного критерия и численными методами получены функции распределения критерия. Дано описание применения метода  $CL_s$  и процедуры инвертирования результатов проверки гипотезы. Решение задачи проверки совместимости новой модели с данными получено в виде зависимости верхних пределов на число сигнальных событий ( $N^{\text{sig}}$ ) от массы сигнального резонанса ( $m^{\text{sig}}$ ). Приведена иллюстрация величины отклонения от SM в терминах  $p_0$ -значений при использовании модифицированного критерия.

Показана чувствительность результата проверки совместимости новой модели с данными по отношению к выбору статистической модели для s.s. на примере перехода от нормальной к равномерной функции плотности вероятности (p.d.f.) для источника значительной s.u. Иллюстрация изменения частотных верхних пределов на  $N^{\text{sig}}$  при таком изменении p.d.f. для s.s. приведена на рисунке 8.

Дано описание альтернативного решения задачи проверки совместимости новой модели с данными в рамках Байесовского статистического формализма. Получена аналогичная зависимость верхних пределов для числа сигнальных событий ( $N^{\text{sig}}$ ) от массы сиг-

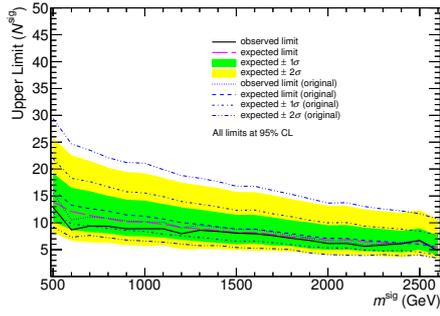


Рис. 8. Частотные верхние пределы на  $N^{\text{sig}}$  как функция  $m^{\text{sig}}$ . Рисунок опубликован в статье [4].

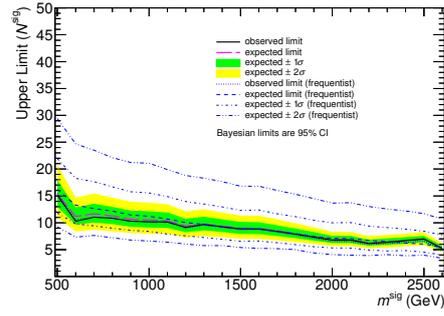


Рис. 9. Байесовские верхние пределы на  $N^{\text{sig}}$  как функция  $m^{\text{sig}}$ . Рисунок опубликован в статье [4].

нального резонанса ( $m^{\text{sig}}$ ) и сопоставлена с соответствующим результатом в рамках частотного формализма, что показано на рисунке 9. Как показано на рисунке 9, кривые Байесовского и частотного верхних пределов совместимы, а, соответственно, совместимы и их физические интерпретации. Ожидаемые интервалы различаются, но расхождение не является информативным: Байесовские интервалы более узкие, чем частотные, но в то же время располагаются ближе к наблюдаемой кривой. Значимость отклонений от модели, включающей только фоновые процессы, совместима в обоих формализмах: наблюдаемые кривые находятся внутри интервала  $1\sigma$ . Следовательно, совместимы и физические выводы.

Выбор между двумя, частотным и Байесовским, подходами предлагается делать после исследования производительности статистических процедур в каждом индивидуальном анализе НЕР, учитывая его общую сложность. Показано, что выбор способа включения систематической неопределённости в статистический анализ влияет на результаты проверки совместимости новой модели НЕР с данными и, таким образом, детали, связанные с обработкой неопределённостей, следует подробно документировать при публикации результатов таких работ.

Результаты пятой главы опубликованы в статьях [4; 5].

Таблица 2. Наблюдаемые числа событий в CR и оценки вкладов фоновых процессов после фита.

|                               | В числах событий            |                           |
|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|                               | $Z/\gamma^*$ CR             | $t\bar{t}$ CR             |
| Наблюдаемые события           | 204361                      | 31200                     |
| Композиция фоновых событий    | $(2044 \pm 12) \times 10^2$ | $(312 \pm 2) \times 10^2$ |
| $Z/\gamma^* \rightarrow ee$   | $(1951 \pm 12) \times 10^2$ | —                         |
| $t\bar{t}$                    | $(602 \pm 9) \times 10$     | $(291 \pm 3) \times 10^2$ |
| Одиночный $t$ -кварк ( $Wt$ ) | $(26 \pm 3) \times 10$      | $(135 \pm 14) \times 10$  |
| Пара векторных бозонов        | $(22 \pm 3) \times 10^2$    | $(43 \pm 11) \times 10$   |
| $Z \rightarrow \tau\tau$      | $(11 \pm 2) \times 10$      | $(27 \pm 5) \times 10$    |
| Ложные лептоны                | $(69 \pm 12) \times 10$     | —                         |

В шестой главе приведены основные положения статистического анализа поиска LQ1 при парном рождении в эксперименте ATLAS с использованием данных протон-протонных взаимодействий с  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ и интегральной светимости  $20.3 \text{ fb}^{-1}$ . Построена модель простого счётного эксперимента, использован принцип максимального правдоподобия, с помощью псевдоэкспериментов получены p.d.f. критерия и, используя метод  $CL_s$ , оценены верхние пределы на величины  $\sigma \times \beta^2$  и  $\beta$  как функций  $m_{LQ1}$ . Для каждого проверявшегося значения  $m_{LQ1}$  использована соответствующая SR из таблицы 1 и CR для процессов  $t\bar{t}$  и  $Z/\gamma^*$ . S.s. введены в модель посредством нормальной p.d.f., исключая эффект статистической ограниченности MC образцов, описываемый Пуассоновским ограничивающим членом. Приведено полное описание всех измерений из данных, статистических неопределённостей и оценок вкладов фоновых процессов при различных состояниях s.s. В случае, когда эффект (s.u.) измерен только для одного направления изменения s.s., эффект для противоположного направления положен симметричным.

Важным этапом SA является фит LF, включающей  $Z/\gamma^*$  и  $t\bar{t}$  CR

и только фоновые процессы. Таблица 2 содержит наблюдаемые числа событий в CR и оценки вкладов фоновых процессов после такого фита. По качеству данного фита можно оценить степень согласия данных и модели, включающей только процессы SM, в CR и за их пределами. Результаты такого фита практически не зависят от наличия SR в SA вследствие подавляющего превосходства статистической обеспеченности CR, а также от возможного присутствия или отсутствия вклада сигнального процесса и определяются статистической конфигурацией CR.

Наблюдаемые и ожидаемые числа событий в трёх репрезентативных SR (SR1, SR6, SR8) после максимизации LF, включающей две CR и одну соответствующую SR, приведены в таблице 3. Значимого превышения наблюдаемого числа событий над ожидаемым исходя из SM не обнаружено ни в одной SR, что позволило оценить верхние пределы на сечение и  $\beta$  для каждого рассматривавшегося значения  $m_{LQ1}$ . Более того, во всех SR работы наблюдались флуктуации вниз<sup>2</sup>.

Пределы на величину  $\sigma \times \beta^2$  как функция  $m_{LQ1}$  представлены на рисунке 10, включающем теоретическое сечение NLO при  $\beta = 1.0$  совместно с теоретической неопределённостью оценки сечения сигнального процесса. Повсеместное расположение кривой с наблюдаемыми пределами ниже медианы ожидаемых пределов является следствием флуктуаций вниз. Тем не менее, кривые всегда совместимы в пределах полосы неопределённости  $2\sigma$ .

Рисунок 11 представляет пределы на величину  $\beta$  как функцию  $m_{LQ1}$  и содержит для сравнения и аналогичные результаты поиска LQ1 при парном рождении в  $pp$  взаимодействиях в эксперименте ATLAS при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ и  $1.03 \text{ фб}^{-1}$  [15]. Важно отметить, что в отличие от данной работы, основанной исключительно на анализе топологии  $eejj$ , предшествующий анализ привлекал комбинацию с результатами поиска в канале  $e\nu jj$ . Данное обстоятельство влияет на чувствительность эксперимента к модели в области малых значений параметра  $\beta$ . Как видно из рисунка 10, при  $\beta = 1.0$  на 95 % CL

<sup>2</sup> Флуктуации вниз (вверх) — дефицит (профицит) наблюдаемого числа событий по отношению к предсказываемому SM.

Таблица 3. Наблюдаемые числа событий и оценки вкладов фоновых и сигнальных процессов в трёх SR после фита. Таблица опубликована в статье [3].

|                               | SR1                         | SR6                           | SR8                          |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Наблюдаемые события           | 627                         | 8                             | 1                            |
| Сигнальные события            | $(-1 \pm 5) \times 10$      | $-3 \pm 3$                    | $(-5 \pm 11) \times 10^{-1}$ |
| Композиция фоновых событий    | $(64 \pm 4) \times 10$      | $11 \pm 2$                    | $(15 \pm 4) \times 10^{-1}$  |
| $Z/\gamma^* \rightarrow ee$   | $(32 \pm 4) \times 10$      | $7 \pm 2$                     | $(13 \pm 4) \times 10^{-1}$  |
| $Z \rightarrow \tau\tau$      | $(21 \pm 3) \times 10^{-1}$ | $< 1 \times 10^{-2}$          | $< 1 \times 10^{-2}$         |
| $t\bar{t}$                    | $(24 \pm 2) \times 10$      | $(23 \pm 5) \times 10^{-1}$   | $(12 \pm 4) \times 10^{-2}$  |
| Одиночный $t$ -кварк ( $Wt$ ) | $19 \pm 3$                  | $< 1 \times 10^{-2}$          | $< 1 \times 10^{-2}$         |
| Пара векторных бозонов        | $22 \pm 3$                  | $(8 \pm 3) \times 10^{-1}$    | $< 1 \times 10^{-2}$         |
| Ложные лептоны                | $34 \pm 6$                  | $(410 \pm 10) \times 10^{-3}$ | $(33 \pm 6) \times 10^{-3}$  |

исключена область масс  $m_{LQ1} < 1050$  ГэВ. Ожидаемая исключённая область совместима с наблюдаемой. Согласно рисунку 11, для  $\beta = 0.2$  исключены массы  $m_{LQ1} < 650$  ГэВ, а для  $\beta = 0.5$  —  $m_{LQ1} < 900$  ГэВ.

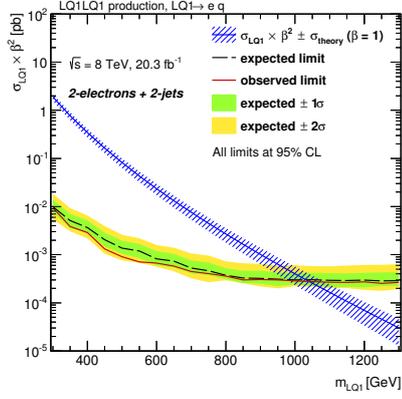


Рис. 10. Пределы на величину  $\sigma \times \beta^2$  как функция  $m_{LQ1}$ . Рисунок опубликован в статье [3].

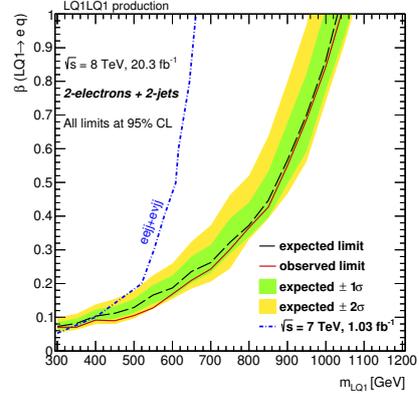


Рис. 11. Пределы на величину  $\beta$  как функция  $m_{LQ1}$ . Рисунок опубликован в статье [3].

Степень отклонения наблюдаемых данных от ожидаемых исходя из SM оценок проиллюстрирована с помощью  $p_0$ -значения. Для данного построения использован двусторонний критерий, позволяющий интерпретировать флуктуации и вверх, и вниз как отклонения от SM. Отклонения связаны с флуктуациями вниз и никогда не пересекают уровень  $2\sigma$ .

Результаты шестой главы опубликованы в статьях [3; 6] и материалах конференций [1; 2].

**В заключении** приведены основные результаты работы:

1. Оптимизированы условия первичного отбора объектов и событий для поиска лептокварков первого поколения при парном рождении с двумя заряженными лептонами и двумя кварками в конечном состоянии в протон-протонных взаимодействиях с  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ в эксперименте ATLAS.

2. Получены оценки вкладов фоновых и сигнальных процессов при поиске лептокварков первого поколения в протон-протонных взаимодействиях с  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ в эксперименте ATLAS.
3. Разработана стратегия статистического анализа для поиска лептокварков первого поколения в протон-протонных взаимодействиях с  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ в эксперименте ATLAS.
4. Получены оценки систематических неопределённостей при поиске лептокварков первого поколения в протон-протонных взаимодействиях с  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ в эксперименте ATLAS.
5. Разработан метод статистической проверки совместимости модели лептокварков первого поколения с данными, полученными экспериментом ATLAS при протон-протонных взаимодействиях с  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ.
6. Проведено сопоставление результатов проверки совместимости новой физической модели с данными в рамках частотного и Байесовского статистических формализмов, продемонстрирован уровень совместимости получаемых результатов и выявлены чувствительные аспекты построения статистической модели, влияющие на конечный результат.
7. Проведена проверка совместимости модели лептокварков первого поколения при парном рождении с конечной топологией  $eejj$  в протон-протонных взаимодействиях с  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ с данными эксперимента ATLAS интегральной светимости  $20.3 \text{ фб}^{-1}$ . Статистически значимых отклонений от стандартной модели не обнаружено. Результаты данной работы значительно превосходят чувствительность предшествующего аналогичного результата ATLAS [15]. Получены верхние пределы на сечение парного рождения лептокварков первого поколения как функция массы лептокварка и на 95 % CL исключена область масс  $m_{LQ1} < 1050$  ГэВ при  $\beta = 1.0$ . Получены верхние пределы на параметр  $\beta$  как функция массы лептокварка.

## Основные публикации по теме диссертации

1. *Kamenshchikov A.* Searches for leptoquarks and similar signatures with the ATLAS detector at the LHC. — Geneva, 09/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2048137>.
2. *Kamenshchikov A.* Search for scalar leptoquarks in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with ATLAS detector. — Geneva, 09/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2049844>.
3. *Aad G.* [et al.]. Searches for scalar leptoquarks in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector // Eur. Phys. J. — 2016. — Vol. C76, no. 1. — P. 5. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3823-9](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3823-9). — arXiv: [1508.04735](https://arxiv.org/abs/1508.04735) [hep-ex].
4. *Kamenshchikov A.* A new model test in high energy physics in frequentist and Bayesian statistical formalisms // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2017. — Vol. 14, no. 1. — Pp. 227–238. — DOI: [10.1134/S1547477117010137](https://doi.org/10.1134/S1547477117010137). — arXiv: [1607.04141](https://arxiv.org/abs/1607.04141) [physics.data-an].
5. *Kamenshchikov A.* A new model test in high energy physics in classical and Bayesian statistical formalisms: tech. rep. / IHEP. — Protvino, 05/2016. — URL: <http://web.ihep.su/library/pubs/2016/ps/2016-8.pdf>.
6. *Kamenshchikov A.* Search for scalar leptoquarks in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with ATLAS detector: tech. rep. / CERN. — Geneva, 12/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2113437>.

## Цитированная литература

7. *Aaboud M.* [et al.]. Search for scalar leptoquarks in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS experiment // *New J. Phys.* — 2016. — Vol. 18, no. 9. — P. 093016. — DOI: [10.1088/1367-2630/18/9/093016](https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/9/093016). — arXiv: [1605.06035](https://arxiv.org/abs/1605.06035) [[hep-ex](#)].
8. *Grancagnolo S.* Searches for leptoquarks and heavy leptons with the ATLAS detector at the LHC. — Geneva, 08/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2039905>.
9. *Fedoroko W. T.* Searches for resonant and non-resonant new phenomena in ATLAS. — 07/2015. — URL: <https://indico.cern.ch/event/356420/contributions/1764542>.
10. *Madar R.* Searches for new physics with lepton flavours and multi-lepton final states in ATLAS. — Geneva, 08/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2047820>.
11. *Grancagnolo S.* Searches for leptoquarks and heavy leptons with the ATLAS detector at the LHC // *Proceedings, 2015 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2015): Vienna, Austria, July 22-29, 2015.* EPS-HEP2015. — 2015. — P. 096. — tech. rep. / CERN. — Geneva, 11/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2056805>.
12. *Fedoroko W. T.* Searches for resonant and non-resonant new phenomena in ATLAS // *Proceedings, 2015 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2015): Vienna, Austria, July 22-29, 2015.* EPS-HEP2015. — 2015. — P. 147. — tech. rep. / CERN. — Geneva, 11/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2065149>.
13. *Zhu J.* LHC exotics search results. — Geneva, 12/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2112047>.

14. *Madar R.* Searches for New Physics with Lepton Flavours and Multi-lepton Final States in ATLAS // Proceedings, 4th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2015): Kolymbari, Greece, August 23-30, 2015. Vol. 126. — 2016. — P. 04028. — DOI: [10.1051/epjconf/201612604028](https://doi.org/10.1051/epjconf/201612604028). — tech. rep. / CERN. — Geneva, 10/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2066742>.
15. *Aad G.* [et al.]. Search for first generation scalar leptoquarks in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector // Phys. Lett. — 2012. — Vol. B709. — Pp. 158–176. — DOI: [10.1016/j.physletb.2012.03.023](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.03.023), [10.1016/j.physletb.2012.02.004](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.02.004). — arXiv: [1112.4828](https://arxiv.org/abs/1112.4828) [hep-ex].

*Рукопись поступила 16 марта 2017 года.*

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

Каменщиков Андрей Александрович  
Поиск лептокварков первого поколения при парном рождении в протон-протонных взаимодействиях в эксперименте ATLAS.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**.

---

Подписано к печати 17.03.2017. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.  
Печ.л. 1,8. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 100. Заказ 2. Индекс 3649.

---

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»  
142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1

[www.ihep.ru](http://www.ihep.ru); библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ "Курчатовский институт", 2017

---