

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.126

# ИЗУЧЕНИЕ СОБЫТИЙ С ЭЛЕКТРОНОМ, МЮОНОМ И ДВУМЯ АДРОННЫМИ СТРУЯМИ В КОНЕЧНОМ СОСТОЯНИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ СТАНДАРТНОГО БОЗОНА ХИГГСА В КАНАЛЕ РАСПАДА $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ В $pp$ -СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ 13 ТэВ НА СТАТИСТИКЕ $139 \text{ фб}^{-1}$ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ АТЛАС НА БАК

© 2021 г. Е. Н. Рамакоти<sup>a</sup>, \*, А. А. Гаврилюк<sup>a</sup>, И. И. Цукерман<sup>a</sup>

<sup>a</sup>НИИЦ “Курчатовский Институт” – ИТЭФ, Москва, 117218 Россия

\*E-mail: [ekaterina.ramakoti@itep.ru](mailto:ekaterina.ramakoti@itep.ru)

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.

После доработки 25.09.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Авторами в составе рабочей группы эксперимента АТЛАС на БАК по бозону Хиггса (HWW) исследованы события с электроном, мюоном и двумя адронными струями для изучения свойств стандартного бозона Хиггса в канале распада  $h \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ . Анализ проводился на полной статистике событий протон-протонных столкновений за 2015–2018 гг. при энергии в их системе центра масс 13 ТэВ. По сравнению с предыдущим нашим анализом, вчетверо увеличена статистика, обновлены программы реконструкции и образцы смоделированных событий сигнала и фона, отдельно исследованы экспозиции, набранные при высокой светимости БАК. За редким исключением, экспериментальные спектры для адронных струй на ранних стадиях отбора в области сигнала неплохо описываются Монте-Карло моделированием. Показано, что даже при высокой светимости нет серьезных проблем с регистрацией струй, летящих под малыми полярными углами. Кинематические распределения в контрольных областях основных фонов воспроизводятся МС.

**Ключевые слова:** бозон Хиггса, адронные, АТЛАС, БАК

DOI: 10.56304/S2079562920060470

## ВВЕДЕНИЕ

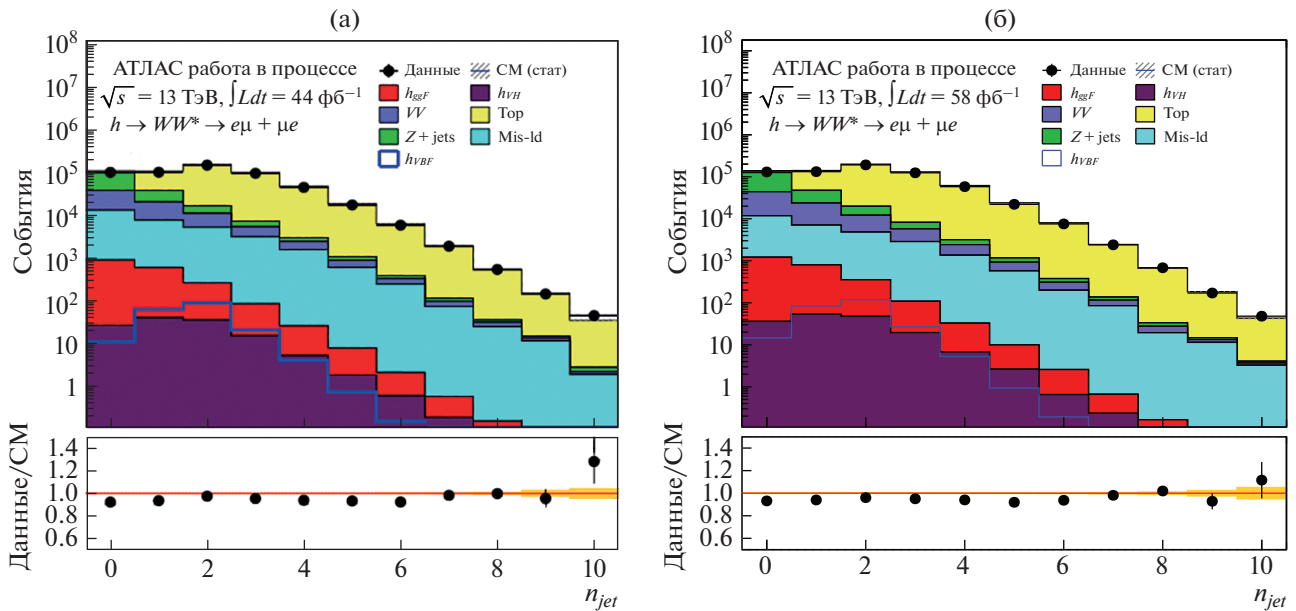
Более 7 лет назад в экспериментах АТЛАС и КМС на Большом адронном коллайдере (БАК) был открыт бозон Хиггса Стандартной Модели (СМ) [1]. Существенную роль в этом открытии сыграл канал распада  $h \rightarrow WW^*$ , который имеет относительную вероятность (BR) 21.6% [2] при массе бозона Хиггса около 125 ГэВ. Этот канал распада исследовался на БАК как при 8 ТэВ на полном образце событий [3], так и при 13 ТэВ на одной четверти данных [4]. Сейчас основной задачей является измерение констант связи, интегральных и дифференциальных сечений рождения бозона Хиггса СМ (СБХ) на основе полной статистики, набранной на БАК в 2015–2018 гг. при 13 ТэВ. В данной работе рассматривается канал распада  $h \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ , BR которого около  $0.5\%^1$  [5]. Достоинство этого канала распада с точки зрения экспериментального наблюдения —

наличие четкой сигнатуры в виде двух жестких изолированных лептонов с большим поперечным импульсом. Недостаток канала — возможность восстановления лишь поперечной массы искомой частицы, что связано с наличием двух нерегистрируемых нейтрино. Особенно интересен механизм рождения бозона Хиггса за счет слияния векторных бозонов (VBF), когда он сопровождается двумя жесткими адронными струями, летящими под малыми полярными углами. Для надежной регистрации и подавления фонов эти струи должны иметь поперечный импульс не менее 30 ГэВ, а также быть ассоциированы с вершиной жесткого взаимодействия.

## АНАЛИЗ СОБЫТИЙ В ОБЛАСТИ СИГНАЛА ОТ СБХ В МЕХАНИЗМЕ СЛИЯНИЯ ВЕКТОРНЫХ БОЗОНОВ

В данной работе представлены результаты предварительного анализа полного образца событий с электроном и мюоном, набранного на БАК в 2015–2018 гг., который соответствует интеграль-

<sup>1</sup> В конечном состоянии с двумя электронами и двумя мюонами велик фон от процессов Дрелла-Яна и оно в данной работе не рассматривается.



**Рис. 1.** Распределения по множественности адронных струй после отбора событий с электроном и мюоном в области сигнала от СБХ, данные (а) 2017(б) 2018 гг.

ной светимости коллайдера  $139 \text{ fb}^{-1}$ . Анализ проводился авторами в составе рабочей группы АТЛАС по бозону Хиггса (HWW). По сравнению с нашим предыдущим исследованием, опубликованным в [6], вчетверо увеличена статистика начальных данных, использована новая версия программы реконструкции, обновлены исходные образцы экспериментальных и смоделированных событий, улучшена оценка вклада ложных лептонов в суммарный фон, проанализированы характеристики адронных струй в зависимости от количества взаимодействий в одном пересечении пучков БАК. Кроме того, использовался новый алгоритм восстановления адронных струй PFlow [7], результаты валидации которого представлены нами в [8].

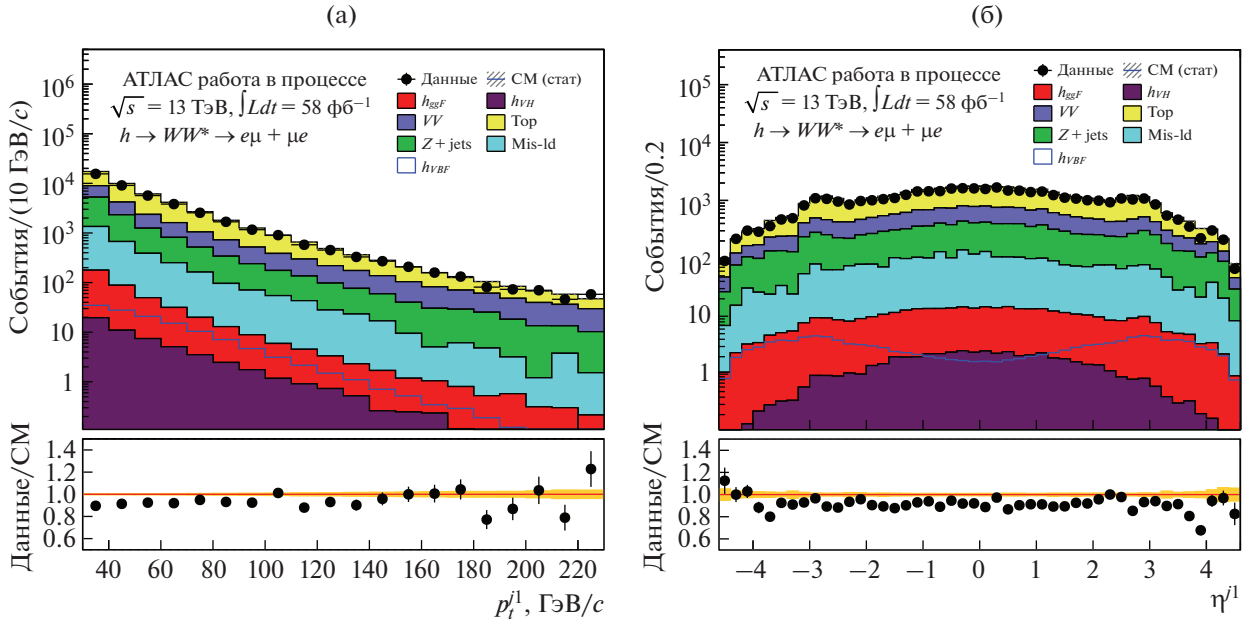
На рис. 1 показаны распределения по множественности адронных струй после предварительного отбора событий с жесткими изолированными электроном и мюоном. Видно, что экспериментальные данные неплохо описываются результата-

ми моделирования методами Монте-Карло (МС). Количество событий с двумя и более струями предсказывается правильно с процентной точностью. В табл. 1 приводится наблюдаемое количество событий в экспериментальных данных, а также предсказания для сигнала и фонов, на ранних этапах отбора полезных событий. Берутся только события с числом адронных струй  $n_{jets} \geq 2$  и запретом на струи с  $b$ -кварками ( $b$ -veto) для подавления доминирующего фона от рождения топ кварков. На рис. 2 показаны распределения по поперечному импульсу и псевдобыстроте второй струи в данных 2018 г. на этом этапе отбора. Видно, что оба распределения неплохо описываются результатами МС-моделирования. Незначительный дефицит данных, который виден также и в табл. 1, связан, в основном, с известной 5–7%-ной неточностью моделирования  $b$ -veto.

Для выделения механизма рождения бозона Хиггса VBF будут использоваться ограничения на

**Таблица 1.** Суммарное количество событий (в тыс.) с электроном и мюоном в конечном состоянии в данных 2017–2018 гг. на начальных этапах отбора. Приводятся также результаты МС-моделирования для сигнала и основных фонов

|                | VBF $h$ | $ggh + Vh$ | $VV$ | Топ  | $W + jets$ | $Z \rightarrow \tau\tau$ | Полный фон | Данные |
|----------------|---------|------------|------|------|------------|--------------------------|------------|--------|
| Предв. отбор   | 0.44    | 4.4        | 107  | 880  | 45.3       | 204                      | 1242       | 1184   |
| $\geq 2$ струи | 0.27    | 0.90       | 21.0 | 673  | 16.3       | 18.3                     | 729        | 721    |
| $b$ -veto      | 0.23    | 0.73       | 17.4 | 46.7 | 5.1        | 14.9                     | 84.8       | 77.9   |



**Рис. 2.** Распределения после отбора событий с электроном и мюоном с  $\geq 2$  адронных струй и запретом на  $b$ -струю в области сигнала от СБХ в данных 2018 г. (а) Поперечный импульс второй струи. (б) Псевдобыстрота второй струи.

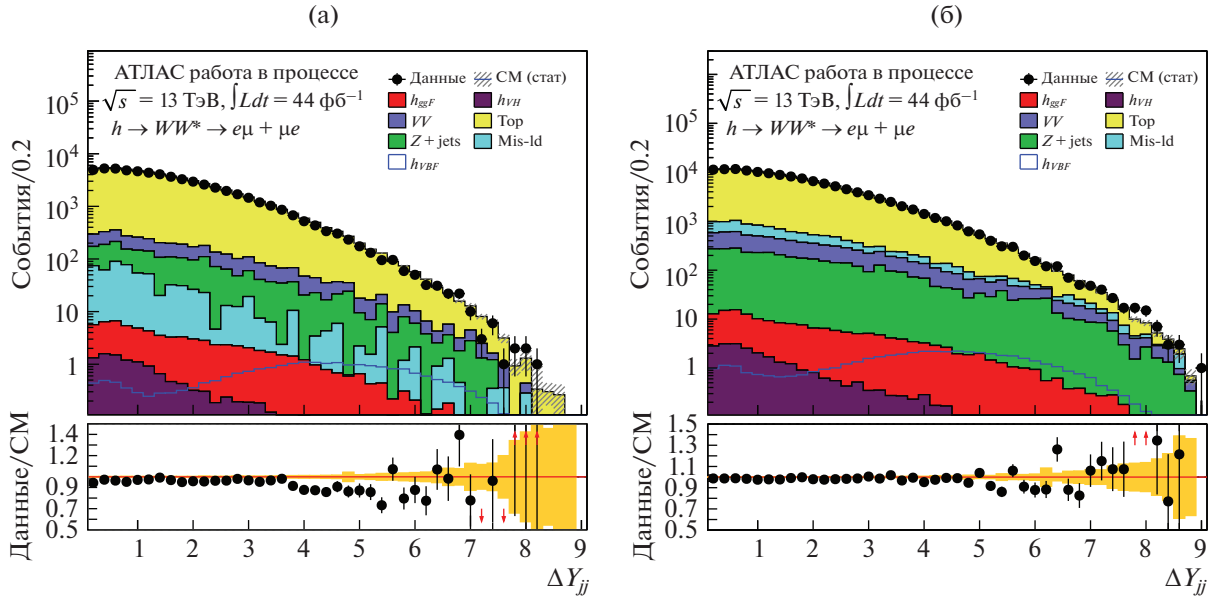
разность быстрот двух адронных струй ( $\Delta Y_{jj} > 3.6$ ) и на их инвариантную массу ( $m_{jj} > 600$  ГэВ), а также ряд других отборов, которые подробно рассматриваются в [6]. МС-моделирование предсказывает 47 событий сигнала в данных 2017–2018 гг. при суммарном фоне  $75 \pm 5$  событий на окончательном этапе отборов.

Характерная особенность экспериментов АТЛАС и КМС на БАК — наложение большого числа событий (pile-up) в одном пересечении. Их среднее число,  $\mu$ , составляет около сорока для данных 2017–2018 гг., что вдвое превышает аналогичную величину в обработанных нами ранее экспозициях 2015–2016 гг. Нами отдельно исследованы случаи с большим ( $\mu > 36$ ) и малым ( $\mu < 26$ ) pile-up. Оказалось, что в обоих случаях ключевые кинематические распределения по разнице быстрот  $\Delta Y_{jj}$  адронных струй неплохо воспроизводятся результатами моделирования (рис. 3). Отметим, что при  $\mu > 36$  количество событий с большим  $\Delta Y_{jj}$  значительно превышает наблюдаемое их число при  $\mu < 26$ . Ожидаемое отношение сигнала к фону на поздних стадиях отбора уменьшается лишь на 20% при больших  $\mu$ . Таким образом, эффект pile-up не должен приводить к существенному ухудшению статистической значимости сигнала от СБХ в механизме VBF. Однако было бы полезно в будущем применить алгоритм fJVT [9] для подавления сторонних передних струй. Кроме того, планируется также провести анализ событий с двумя мюонами и двумя электронами для выделения сигнала от

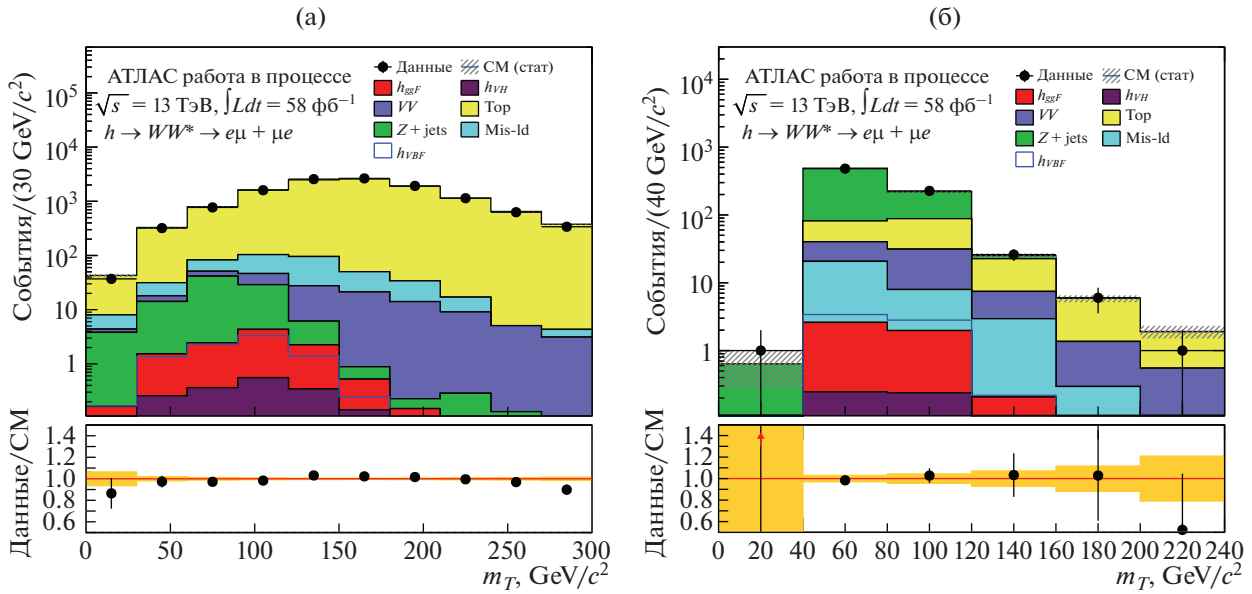
рождения СБХ в механизме VBF, что позволит несколько улучшить точность измерения его соответствующей константы связи.

## 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ПОПЕРЕЧНОЙ МАССЕ В КОНТРОЛЬНЫХ ОБЛАСТЯХ ОСНОВНЫХ ФОНОВ

Перед проведением анализа данных на поздних стадиях отбора обычно детально изучаются контрольные кинематические области основных фонов, которые выбираются ортогональными области сигнала. Например, в контрольной области фона от топ кварков вместо  $b$ -veto требуется ровно одна  $b$ -струя, а в случае фона  $Z \rightarrow \tau\tau$  вместо запрета на пару тау-лептонов с инвариантной массой, близкой к  $Z$ , необходимо их наличие. На рис. 4 показаны распределения по поперечной массе в указанных кинематических областях. Видно, что существенных расхождений экспериментальных данных с результатами их моделирования не наблюдается. Были проверены и распределения по другим кинематическим переменным. Оказалось, что и они правильно моделируются. Таким образом, измеренные в контрольных областях сечения фоновых процессов могут быть пересчитаны с помощью МС на область сигнала.



**Рис. 3.** Распределения по разнице быстрот адронных струй в событиях 2017 г. после событий с электроном и мюоном  $s \geq 2$  адронных струй в зависимости от величины количества взаимодействий в одном пересечении пучков,  $\mu$ : (а)  $\mu < 26$ , (б)  $\mu > 36$ .



**Рис. 4.** Распределения по поперечной массе в контрольных областях основных фонов. (а) Контрольная область фона от топ кварков. (б) Контрольная область фона от  $Z \rightarrow \tau\tau$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами в составе рабочей группы АТЛАС по изучению бозона Хиггса изучены характеристики адронных струй на ранних стадиях отбора в области сигнала от СБХ в канале  $h \rightarrow WW^* \rightarrow e\mu\nu$  при 13 ТэВ на полной статистике данных. Оказалось,

что их кинематика удовлетворительно описывается МС-моделированием, несмотря на большое количество событий в одном пересечении пучков БАК в 2017–2018 гг. Изучение контрольных кинематических областей основных фонов не показало существенных расхождений между данными и результатами их моделирования.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят своих коллег по рабочей группе сотрудничества АТЛАС по изучению бозона Хиггса в канале  $h \rightarrow WW$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *ATLAS Collaboration* // Phys. Lett. B. 2012. V. 716. P. 1; *CMS Collaboration* // Phys. Lett. B. 2012. V. 716. P. 30.
2. *D. De Florian et al.* // Report CERN-2017-002-M. <https://arxiv.org/pdf/1610.07922>
3. *ATLAS Collaboration* // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. P. 012006; *CMS Collaboration* // J. High Energy Phys. 2014. V. 1. P. 096.
4. *ATLAS Collaboration* // Phys. Lett. B. 2019. V. 789. P. 508; *CMS Collaboration* // Phys. Lett. B. 2019. V. 791. P. 96.
5. *Tanabashi M. et al.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. P. 030001.
6. *Рамакоти Е.Н., Гаврилюк А.А., Цукерман И.И.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9 (6). С. 585.
7. *ATLAS Collaboration* // Eur. Phys. J. C. 2017. V. 77. P. 466.
8. *Гаврилюк А.А., Рамакоти Е.Н., Цукерман И.И.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9 (6). С. 591.
9. *ATLAS Collaboration* // Eur. Phys. J. C. 2017. V. 77. P. 590.

**A Study of Events With Electron, Muon and Two Hadron Jetsi  
the Final State to Investigate Standard Model Higgs Boson Properties  
in the  $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$  Decay Channel in Pp-Collisions at 13 TeV Using  
139 Fb<sup>-1</sup> of Data in the ATLAS Experiment at the LHC**

**E. N. Ramakoti<sup>1, \*</sup>, A. A. Gavriluk<sup>1</sup>, and I. I. Tsukerman<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Alikhanov Institute of Theoretical and Experimental Physics, National Research Centre “Kurchatov Institute”,  
Moscow, 117218 Russia*

*\*e-mail: ekaterina.ramakoti@itep.ru*

Received September 25, 2020; revised September 25, 2020; accepted September 25, 2020

**Abstract**—Authors within the Higgs Boson Working Group (HWW) of the ATLAS experiment at the LHC performed an analysis of events with electron, muon and two hadron jets to study Standard Model Higgs boson properties in the  $h \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$  decay channel. The analysis is based on full statistics of proton-proton interactions taken during 2015–2018 year exposures at 13 TeV energy in their rest-frame. With respect to our previous analysis, the data sample used is four times larger, the reconstruction software as well as signal and background samples are updated. Exposures taken at high LHC luminosity are studied separately. It turned out that most of experimental spectra for hadron jets at early selection stages in the signal region are rather well modeled by Monte-Carlo simulations. Even at high luminosity, there are no serious problems with forward going hadron jets reconstruction. Kinematic distributions in the control regions of main backgrounds are reproduced by the Monte-Carlo.

**Keywords:** Higgs boson, hadron jets, ATLAS, LHC