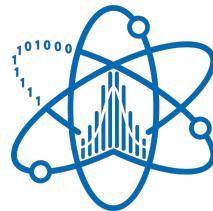




National Research
Tomsk
State
University



Лаборатория
анализа данных
физики высоких энергий

Томского
государственного
университета

Физический анализ данных

Томский Государственный Университет

10.11.2025

Направления работы

Повторение анализа ATLAS Open Data

Воспроизведение измерения сечений $t\bar{t}$ и Z на данных 2015 года ($\sqrt{s} = 13$ ТэВ)

Цель: валидация цепочки анализа и инфраструктуры.

Верификация методов анализа

Пример: WVZ в pp -столкновениях

Цель: отработка методологии повышения точности.

Алгоритмы машинного обучения

Пример: tW при 13 ТэВ, ATLAS

Цель: сравнение BDT, NN, Transformers, GNN и др. по метрикам качества классификации.

BCCI метод

BCCI (Bias-Corrected Bootstrap for Confidence Intervals) — модифицированный бутстрэп-метод, который улучшает оценку доверительных интервалов параметров за счёт коррекции смещения и нестабильности, возникающих при малых выборках.

Применение к результатам анализа **WVZ** позволяет проверить, насколько устойчивы оценки силы сигнала и систематических параметров по сравнению с классическим подходом.

Цель:

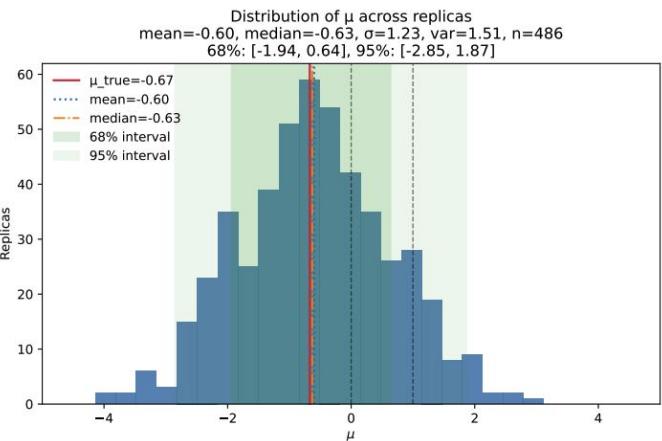
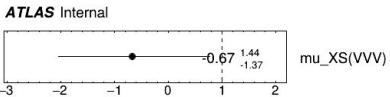
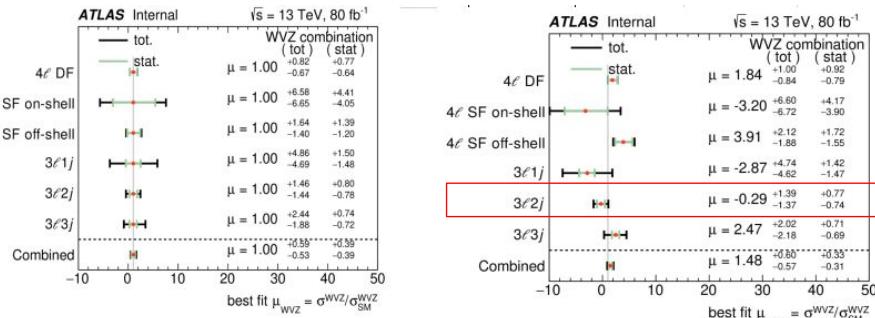
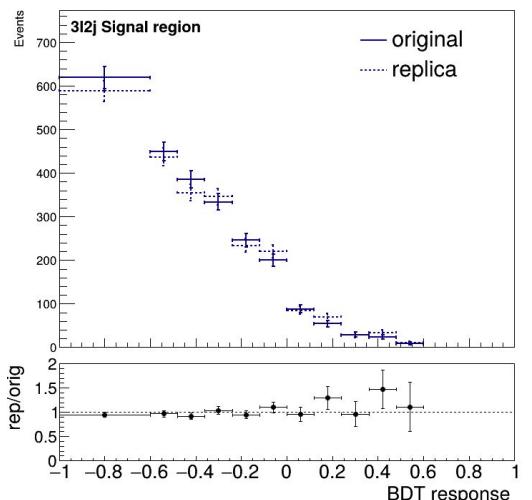
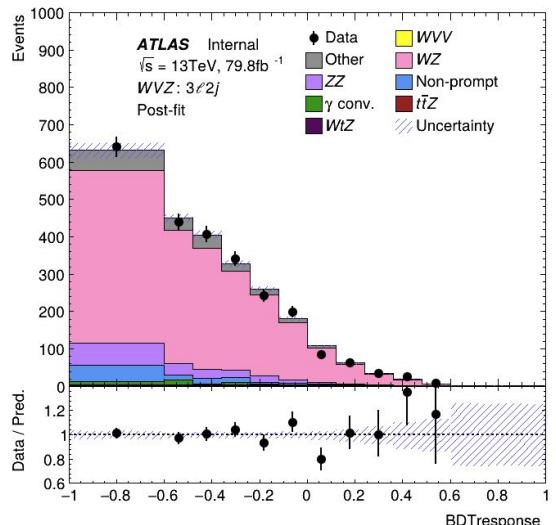
Проверить статистическую устойчивость и надёжность измерения силы сигнала (μ) в условиях ограниченной статистики.

Идея:

Сгенерировать множество бутстрэп-реплик данных (случайная повторная выборка с заменой) и провести независимую аппроксимацию для каждой из них, чтобы получить распределение оценок μ и его дисперсию.

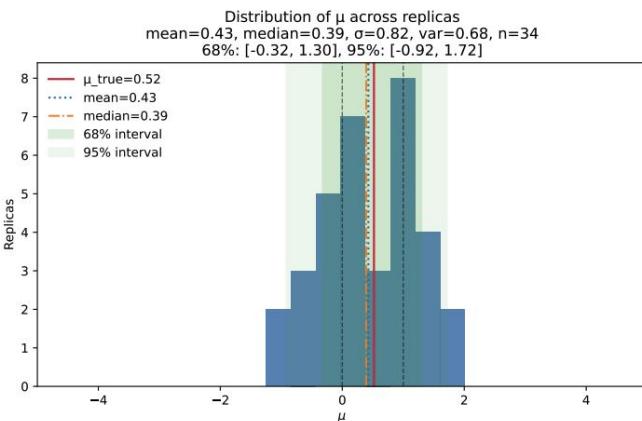
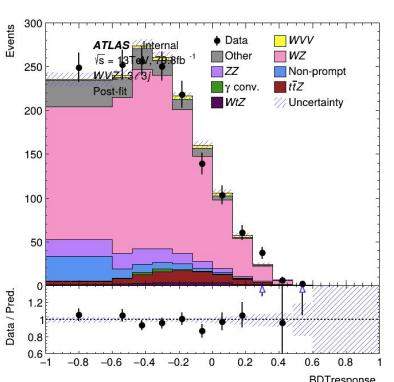
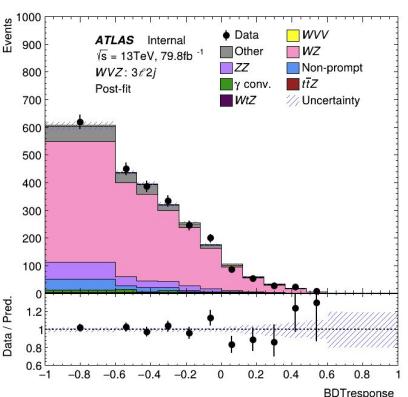
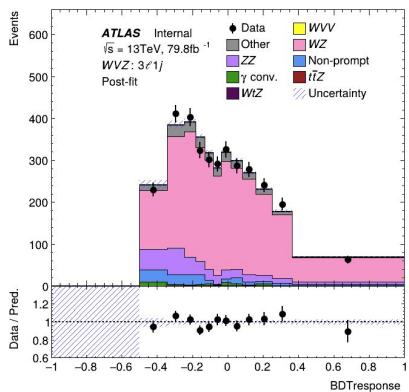
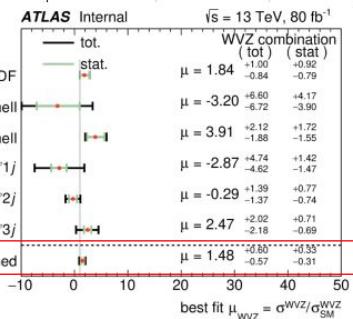
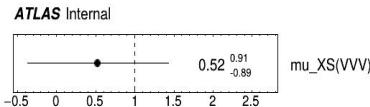
Trexfitter: 3l2j SR

- На данном этапе расширение анализа на наиболее **чувствительный регион 3l2j**
- Потеря статистики** составляет **около 1 %**, что находится в пределах ожидаемых флюктуаций метода bootstrap.
 - 3l2j: orig = 2438, repl = 2407
- Метод подтверждает стабильность оценки μ и отсутствие смещения в пределах ожидаемых статистических флюктуаций



Trexfitter: combined SRs

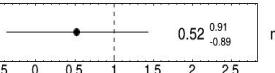
- Объединение всех сигнальных областей $3\ell 1j + 3\ell 2j + 3\ell 3j$ для финальной оценки стабильности метода
- Согласие между результатами оригинального анализа и бутстрэп-реплик.
- Среднее значение силы сигнала (μ) совпадает с номинальным в пределах статистических неопределённостей, что подтверждает стабильность и корректность метода при комбинировании регионов.



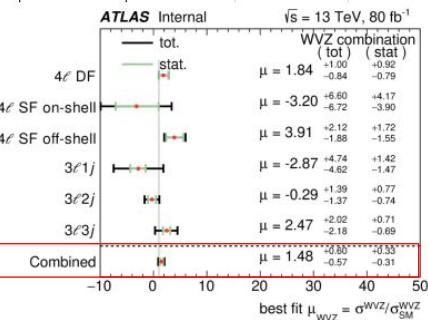
Combined regions (replicas)

Impact-параметры и pull-распределения для реальных данных и нескольких бутстрэп-реплик показывают согласие в пределах статистических флуктуаций.

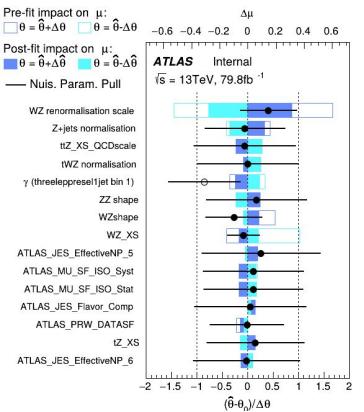
ATLAS Internal



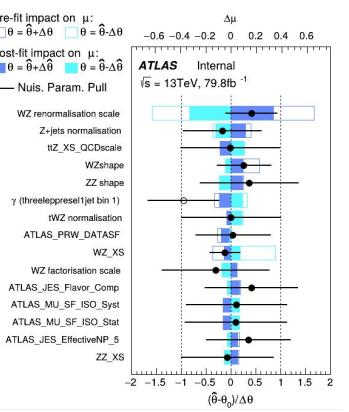
mu_XS(VVV)



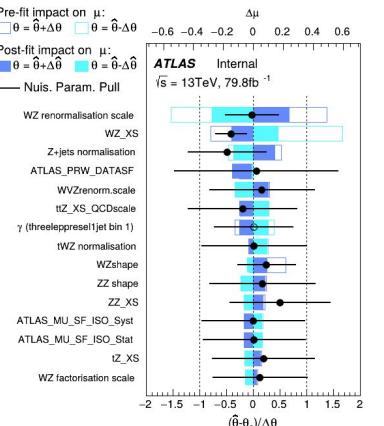
Real Data



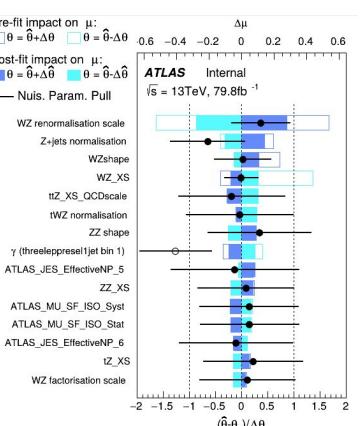
R3



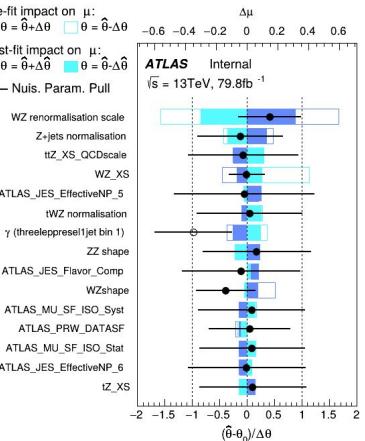
R39



R48



R50



Планы

Финализировать результаты на текущих данных WVZ и подготовить внутренний отчёт о валидации метода.

Перейти к работе с новыми анализами, доступными через публичные каналы HEPData, учитывая ограничения на использование данных ATLAS.

Проверить универсальность метода — применить бутстрэп-подход к другим анализам (включая измерения с ограниченной статистикой и разные физические процессы).

Изучить влияние систематических неопределённостей, включая корреляции между параметрами, и провести количественную оценку поведения систематик в бутстрэп-репликах

Сравнение методов ML на HEP-данных

Цель:

Оценить эффективность современных алгоритмов машинного обучения для задач классификации в физике высоких энергий (HEP). Особое внимание уделено сравнению традиционных методов (BDT, Random Forest) и нейросетевых моделей.

Данные:

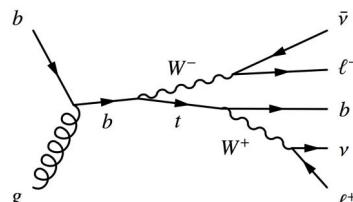
- [ATLAS Open Data \(2015–2016\)](#) — открытые данные эксперимента ATLAS.
- [HEPData Repository](#) — вспомогательные материалы и таблицы с реконструированными событиями.

Физический процесс:

Производство **топ-кварка** в ассоциации с **W-бозоном** при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ (анализ ATLAS).

Требуется:

- Ровно **один b-tag джет**,
- И **два лептона**



Measurement of differential cross-sections of a single top quark produced in association with a W boson at $\sqrt{s} = 13$ TeV with ATLAS

The differential cross-section for the production of a W boson in association with a top quark is measured for several particle-level observables. The measurements are performed using 36.1 fb^{-1} of pp collision data collected with the ATLAS detector at the LHC in 2015 and 2016. Differential cross-sections are measured in a fiducial phase space defined by the presence of two charged leptons and exactly one jet matched to a b -hadron, and are normalised with the fiducial cross-section. Results are found to be in good agreement with predictions from several Monte Carlo event generators.

5 December 2017

Contact: [Top conveners](#)

internal

[Eur. Phys. J. C 78 \(2018\) 186](#)

e-print [arXiv:1712.01602](#) - pdf from arXiv - Physics Briefing

[Inspire record](#)

[Data points](#)

[Figures](#) | [Tables](#) | [Auxiliary Material](#)

Детали тренировки BDT

Цель:

Разделить процессы **tW** (top+anti-top) и **tt** в области **1j1b** с помощью градиентного BDT.

Используемый инструмент:

Анализ выполнялся в пакете **TMVA (ROOT)** с использованием метода **BDTG** — Gradient Boosted Decision Trees.

Основные настройки и особенности:

- **Feature scaling:** применяется стандартная нормализация **z-score**, чтобы обучение шло на стандартизованных входных данных.
- **Разделение и нормировка:** используется случайное разбиение событий TMVA и нормировка по числу событий.
- **Оценка модели:** для применения обученной модели и построения распределений использовались **TMVA Reader + TTreeReader**.

Результаты обучения BDTG

- Основные переменные ($pT(\ell\ell E_T^{\text{miss}} b)$, $\Delta pT(\ell\ell b E_T^{\text{miss}})$) демонстрируют близкие значения значимости S .
- Незначительные различия (<10 %) возможно связаны с вариациями весов и параметров обучения.
- Проверка переобучения (overtraining check) показывает совпадение распределений обучающей и тестовой выборок, что подтверждает корректность тренировки модели.

Variable	Reference Article $S \times 10^{-2}$	Produced BDT $S \times 10^{-2}$
$pT(\ell\ell E_T^{\text{miss}} b)$	4.1	5.38
$\Delta pT(\ell\ell b E_T^{\text{miss}})$	2.5	4.19
$\sum E_T$	2.3	0.24
$\eta(\ell\ell E_T^{\text{miss}} b)$	1.3	2.85
$\Delta pT(\ell\ell E_T^{\text{miss}})$	1.1	0.93
$pT(\ell\ell b)$	1.0	0.62
$C(\ell\ell)$ (centrality)	0.9	0.46
$m(\ell_2, b)$	0.2	0.24
$m(\ell_1, b)$	0.1	0.08

Сравнение результатов обучения BDT с данными из референсной статьи показывает согласие в пределах статистических флуктуаций.

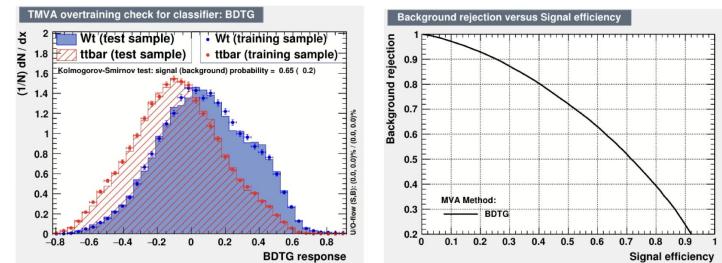
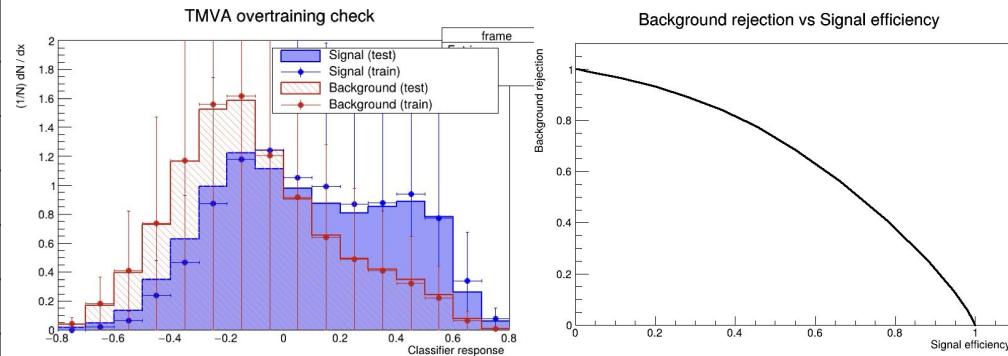


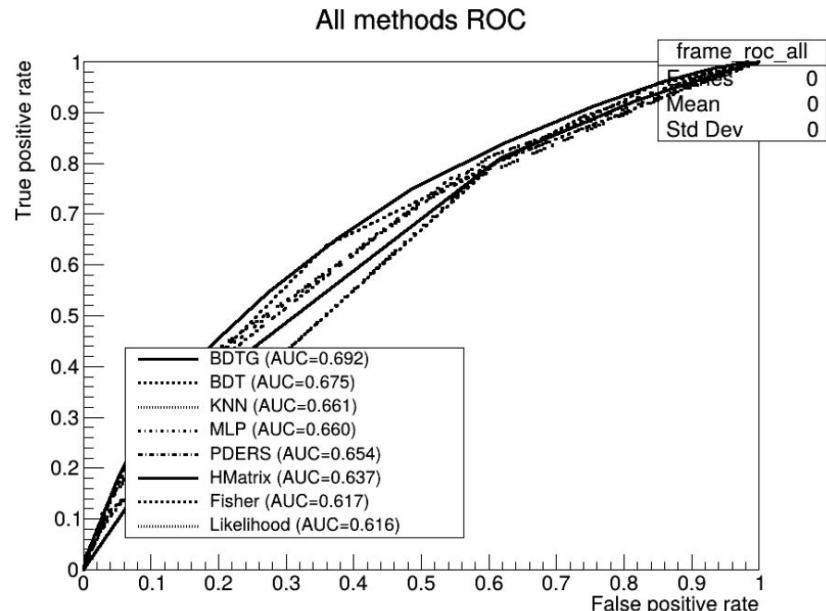
Figure 9: Comparison of test/training sample distributions and background rejection factor versus signal efficiency.



Результаты обучения

ROC-кривая демонстрирует, что BDT и BDTG показывают наилучшую производительность среди протестированных методов ($AUC \approx 0.69$).

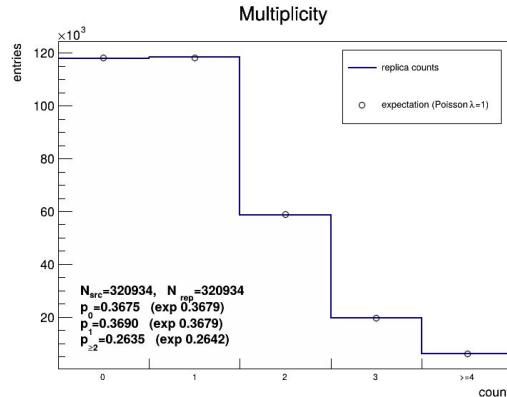
- Проведена перекрёстная проверка выбора переменных и стратегии обучения.
- Тестились альтернативные классификаторы (MLP, SVM, PCA в TMVA) для оценки относительной эффективности BDT.
- Начата работа по оптимизации гиперпараметров и порогов классификации с помощью **R** для увеличения эффективности сигнала при фиксированном уровне фона.
- Готовятся новые ntuple-файлы с увеличенной статистикой, что позволит улучшить качество обучения и стабилизировать результаты в следующих итерациях.



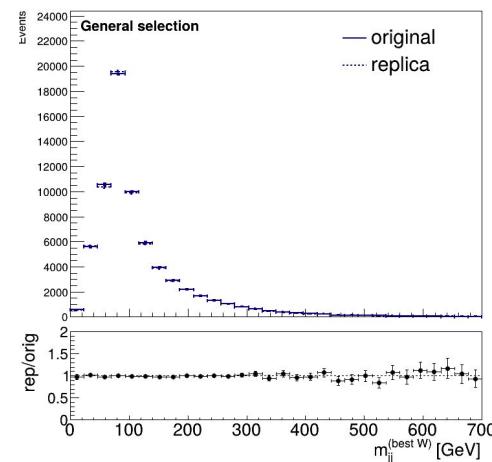
Спасибо за внимание

Подготовка реплик

- Сгенерированы **1000 bootstrap-реплик** методом случайной повторной выборки с заменой:
 - для каждой реплики **фиксируется seed**, что обеспечивает **воспроизводимость результатов**.
- Каждая реплика сохраняет **общее количество событий** и **все корреляции между переменными**:
 - реплики формируются до разбиения на SR/CR/VR.



Распределение числа вхождений событий в репликах **согласуется** с теоретическим распределением Пуассона ($\lambda = 1$). Это подтверждает **корректность** бутстрэп-процедуры.



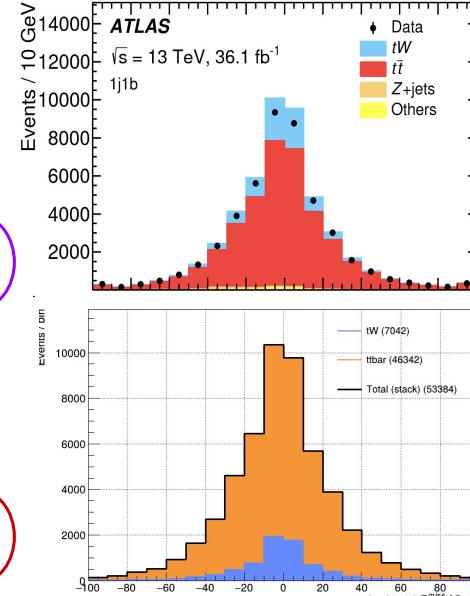
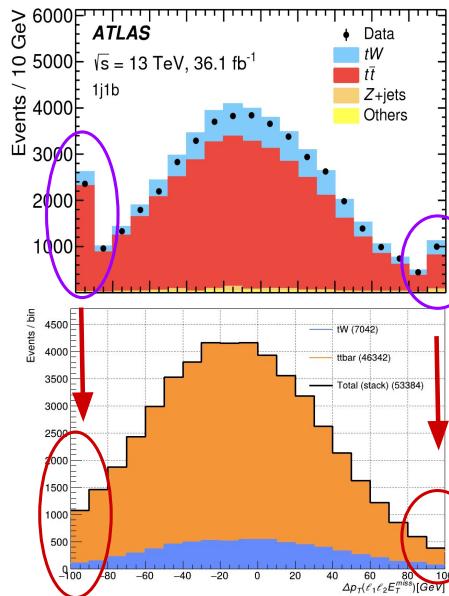
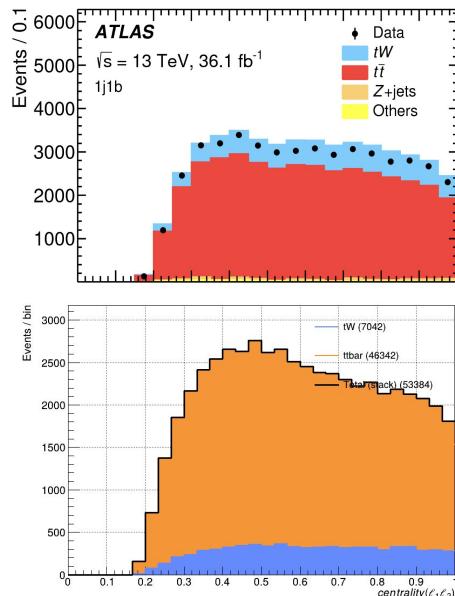
Сравнение форм распределений между оригинальными данными и репликами показывает **согласие** в пределах статистических флуктуаций.

Подготовка ntuples

Cutflow:

Все события нормализованы к одинаковой интегральной светимости.

- **tW**: 7042 событий
- **t̄t**: 46342 события



Отмечается различие в распределениях переменных, использованных для обучения BDT, в первую очередь в крайних бинах (первом и последнем).

- может означать проблемы с отбором.

События в области сигнала 1j1b

Process	Events
tW	8300 ± 1400
t̄t	38400 ± 6600
Z + jets	620 ± 310
Diboson	230 ± 58
Fakes	220 ± 220
Predicted	47800 ± 7300
Observed	45273