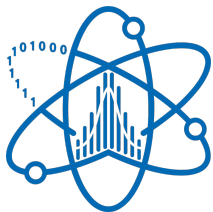




National Research  
**Tomsk  
State  
University**



**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.

# BBCI метод

.....

**BBCI** (*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:

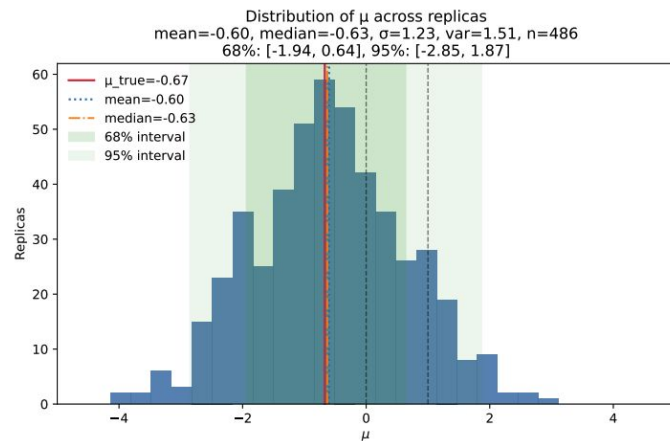
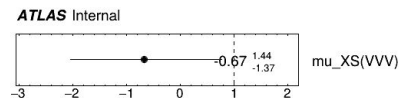
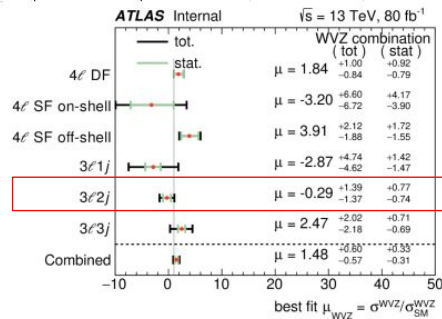
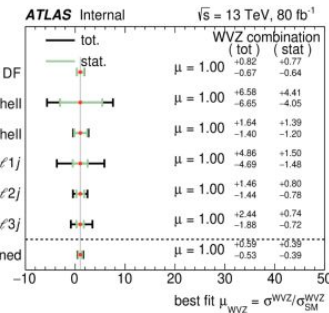
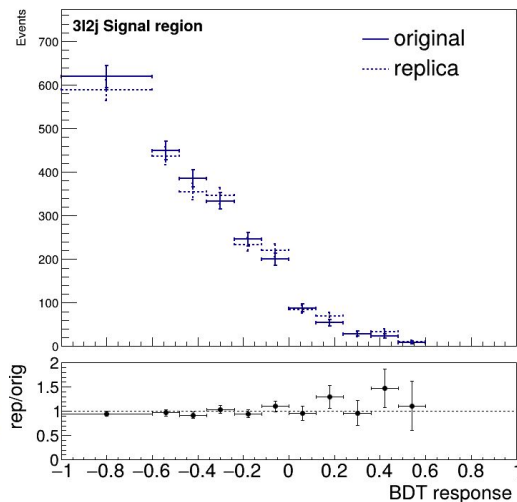
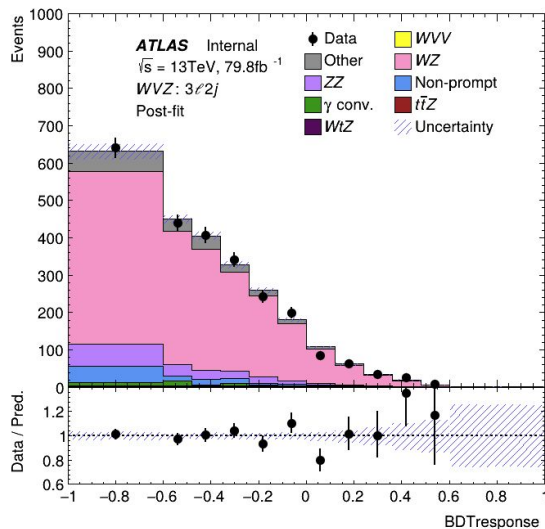
Проверить статистическую устойчивость и надёжность измерения силы сигнала ( $\mu$ ) в условиях ограниченной статистики.

## Идея:

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

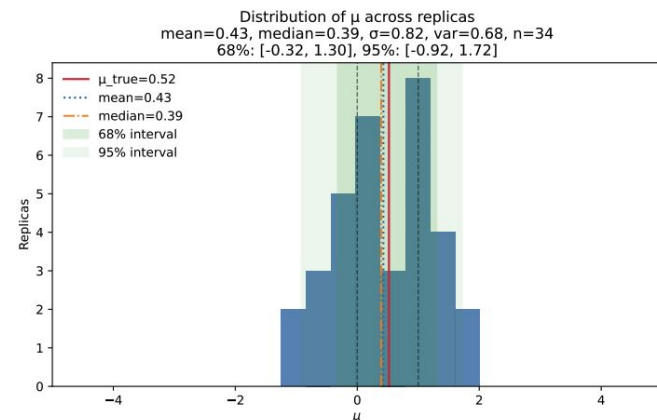
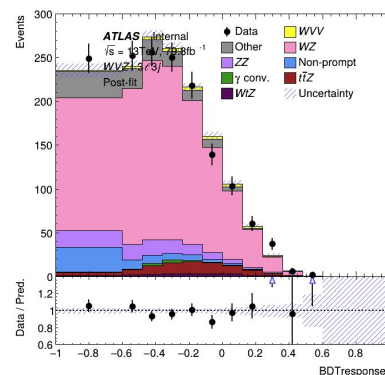
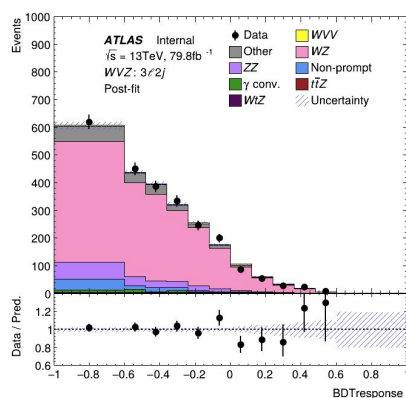
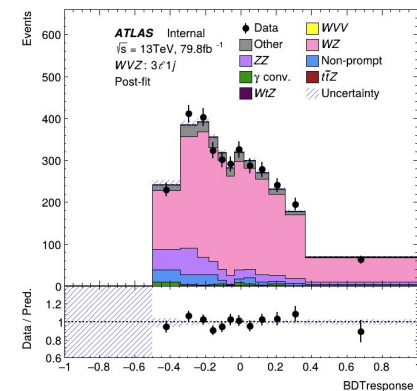
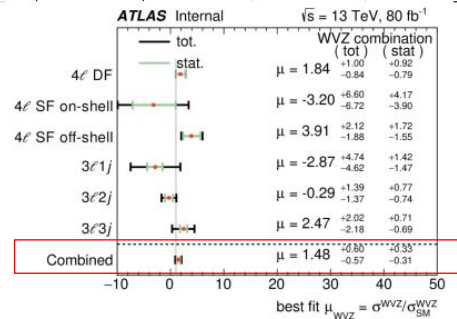
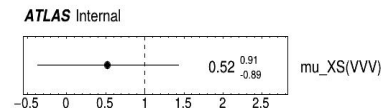
# Trexfitter: 3l2j SR

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



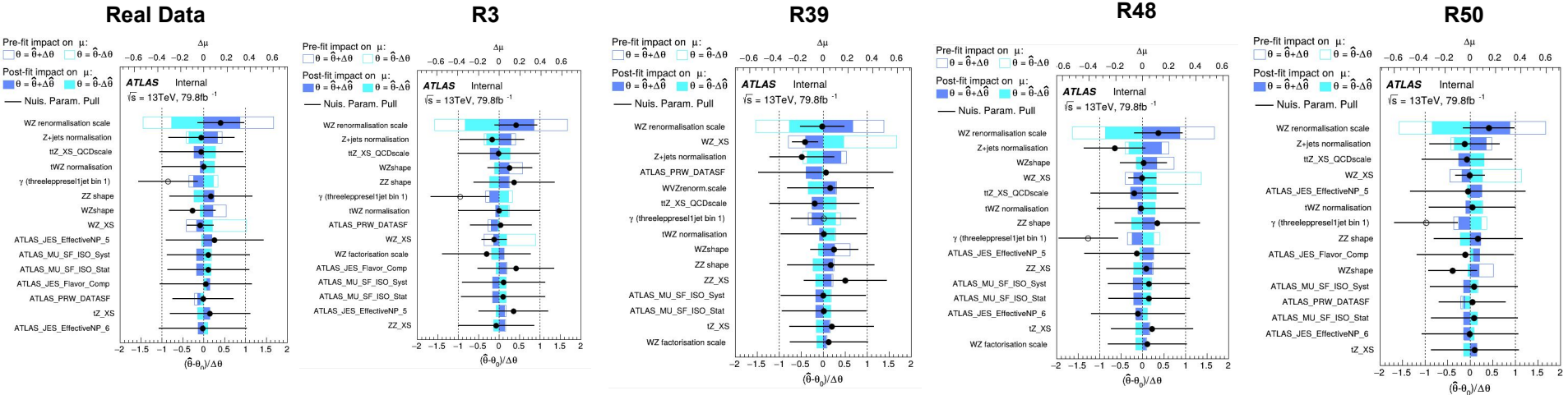
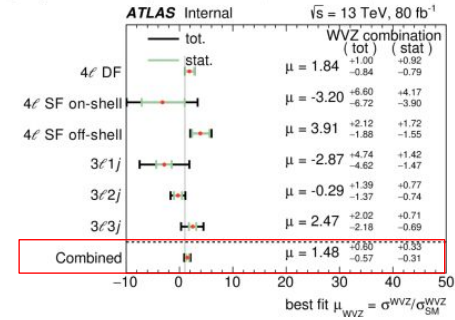
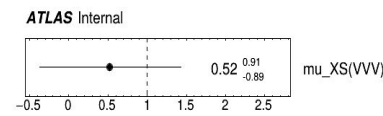
# Trexfitter: combined SRs

- 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 ( $\mu$ ) 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.



**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:

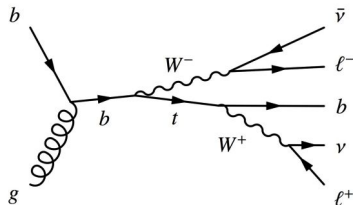
- [ATLAS Open Data \(2015–2016\)](#) — открытые данные эксперимента ATLAS.
- [HEPData Repository](#) — вспомогательные материалы и таблицы с реконструированными событиями.

## 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  $36.1 \text{ fb}^{-1}$  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 **tf** 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 стандартизированных 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 ( $pT(\ell\ell E_T^{miss})$ ,  $\Delta pT(\ell\ell bE_T^{miss})$ ) 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 $S (\times 10^{-2})$
$pT(\ell\ell E_T^{miss})$	4.1	5.38
$\Delta pT(\ell\ell bE_T^{miss})$	2.5	4.19
$\Sigma E_T$	2.3	0.24
$\eta(\ell\ell E_T^{miss} b)$	1.3	2.85
$\Delta pT(\ell\ell E_T^{miss})$	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.

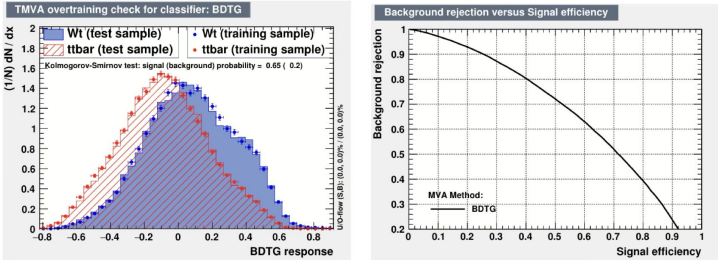
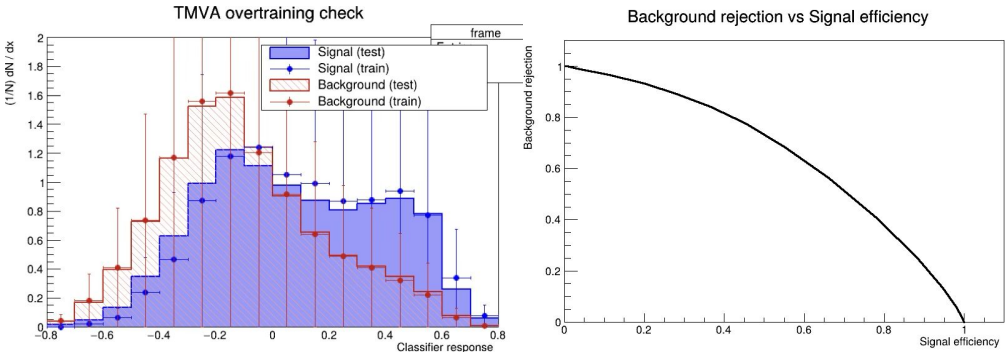


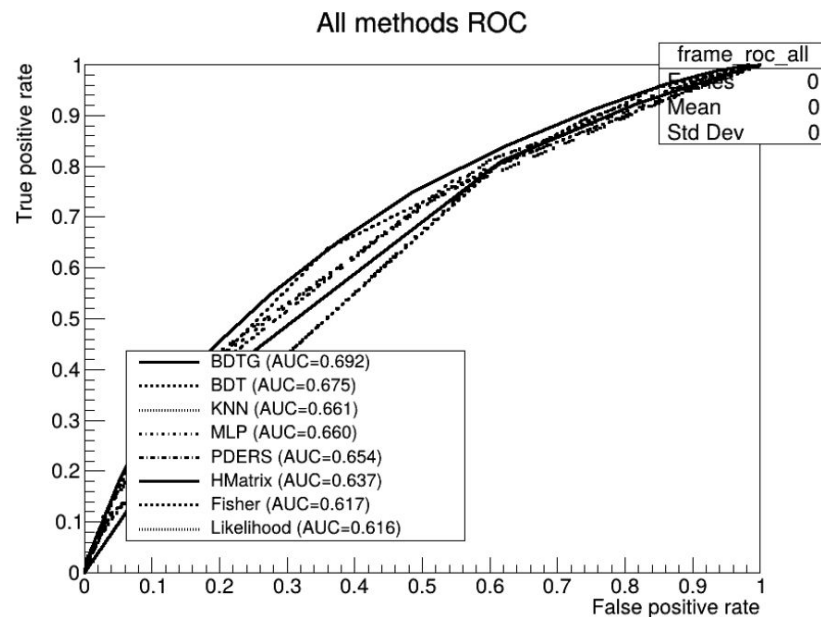
Figure 9: Comparison of test/training sample distributions and background rejection factor versus signal efficiency.



# 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.
- Тестировались 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.

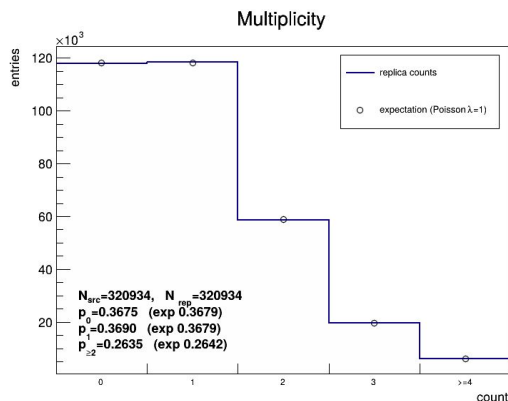


.....

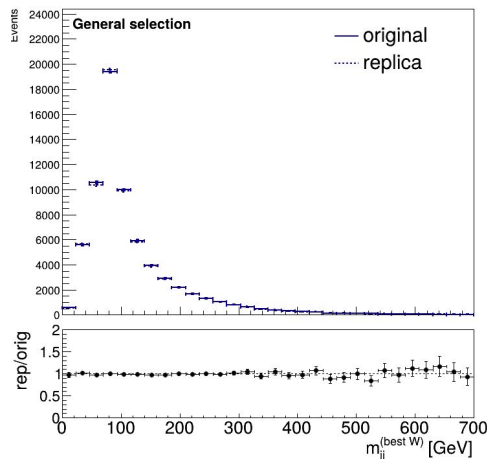
**Спасибо за внимание**

# Подготовка реплик

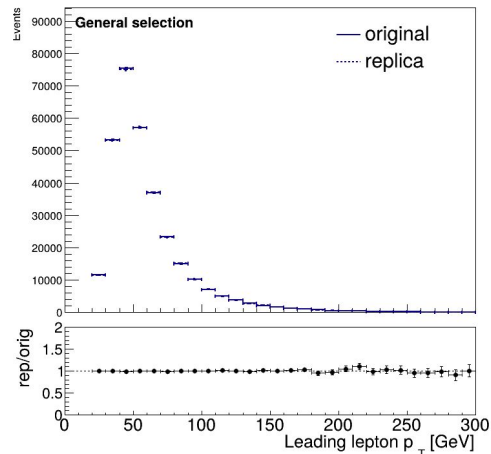
- Сгенерированы **1000 bootstrap-реплик** методом случайной повторной выборки с заменой:
  - для каждой реплики **фиксируется seed**, что обеспечивает **воспроизводимость результатов**.
- Каждая реплика сохраняет **общее количество событий** и **все корреляции между переменными**:
  - реплики формируются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



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



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 события
- **t $\bar{t}$** : 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
$tW$	$8\,300 \pm 1\,400$
$t\bar{t}$	$38\,400 \pm 6\,600$
$Z + \text{jets}$	$620 \pm 310$
Diboson	$230 \pm 58$
Fakes	$220 \pm 220$
Predicted	$47\,800 \pm 7\,300$
Observed	45 273

