

Пример исследования с использованием интервальной статистики

А.Н. Баженов

ФТИ им. А.Ф.Иоффе

a_bazhenov@inbox.ru

26.05.2025

- Физическая задача
- Современный статус
- Решение системы
- Регрессия
- Планы

В ФТИ им. А.Ф.Иоффе ведутся работы по управляемому термоядерному синтезу.

Одним из направлений является создание диагностики определения температуры и плотности плазмы.

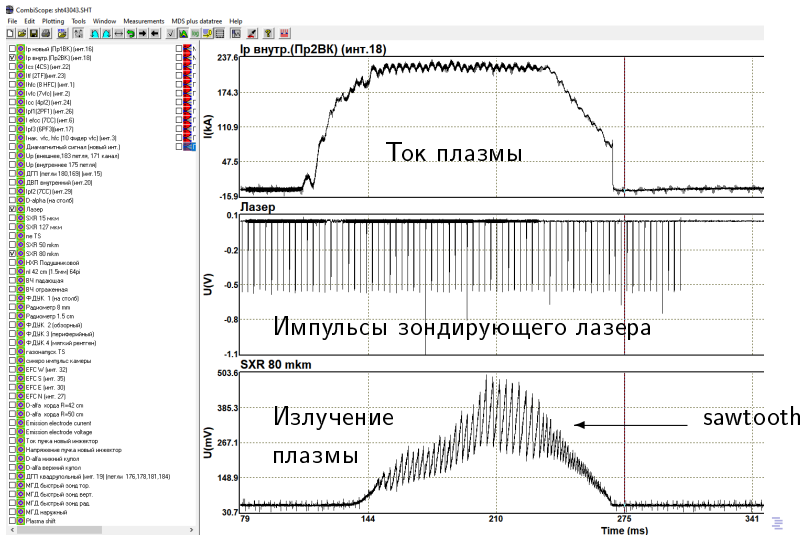
Статья [1] посвящена недавно разработанной для сферического токамака Глобус-М2 диагностике томсоновского рассеяния (TS) и прототипированию TS-диагностики дивертора ИТЭР.

Отличительными особенностями системы являются использование спектрометров, системы сбора данных и лазеров, которые отвечают базовым требованиям для TS-диагностики ИТЭР.

В статье описывается диагностическая система, позволяющая проводить точные измерения сигналов TS, а также результаты первых измерений температуры и плотности электронов как в центральной области плазменного столба, так и в слое соскабливания.

Пилообразные колебания

При накоплении энергии в плазме начинаются пилообразные колебания (sawtooth)



Пилообразные колебания

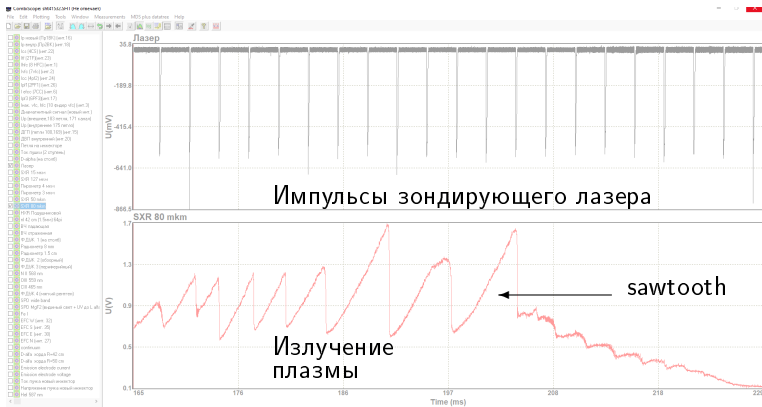


Рис.: Импульсы зондирующего лазера и пилообразные колебания

Пилообразные колебания

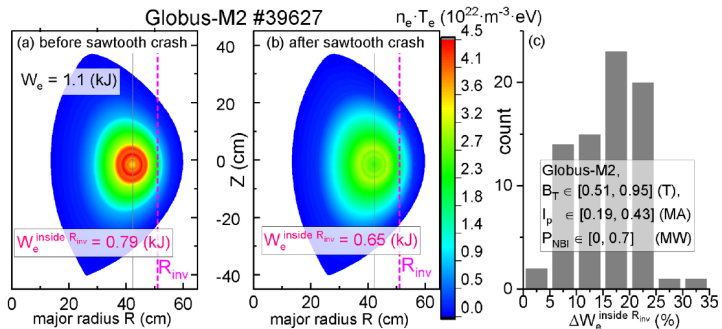


Рис.: Графики давления в плазме до и после пилообразных колебаний

Радиус инверсии и распределение температуры

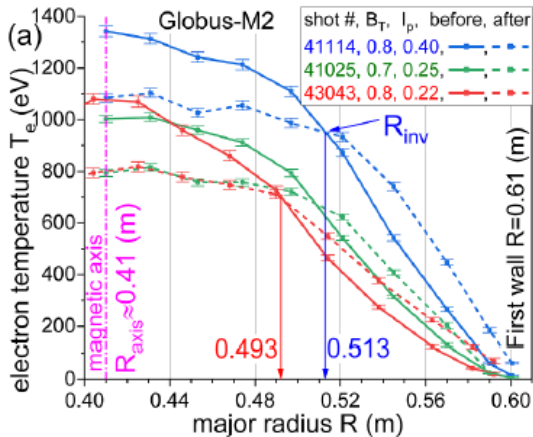


Рис.: Распределение температуры до и после колебаний

Радиус инверсии и параметры токамака

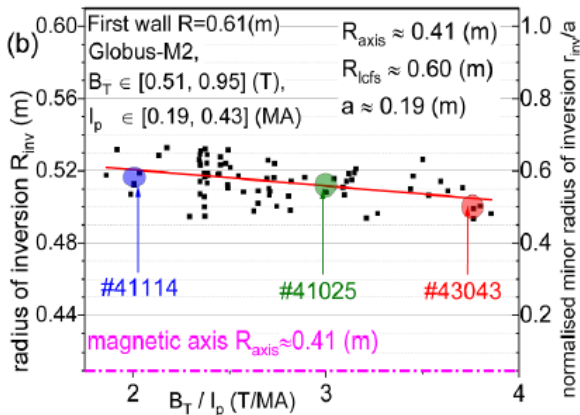


Рис.: Радиус инверсии и параметры токамака

Исходные данные и задачи

`inversion radius.csv` — 80 разрядов

Номер разряда, время до и после колебания

`normalised_export.csv` — 1500 разрядов за 5 лет, 300000+ записей
данные T_e и других величин до и после колебания для разных радиусов

- Найти оценки радиуса инверсии, точечную и твинную
- Построить зависимость радиуса инверсии от магнитного поля, сделать прогноз

Данные для оценки радиуса инверсии

inversion radius.csv

Shot = 43043

Time1 = 164.23

Time2 = 167.26

Рис.: Данные "до-после" пилообразных колебаний

Система ограничений для нахождения оценок радиуса инверсии

inversion radius.csv

Shot = 43043

Рис.: "Полосы" данных

Шаги алгоритма — укрупнённо

- Нахождение начального приближения R_{inv}
- Нахождение областей мажорирования T_{before} , T_{after}
- задание подробной сетки
- интерполяция T_{before} , T_{after} на подробной сетке
- вычисление $J_i(T_{before}, T_{after})$
- уточнение точечного значения R_{inv}
- вычисление R_{inv} как твина

Метрики

$$\max J_i := \max_R J_i(T_{before}, T_{after}) \quad (1)$$

$$\hat{R}_{inv} := \arg \max_R J_i(T_{before}, T_{after}) \quad (2)$$

$$R_{INN} := R \mid J_i(T_{before}, T_{after}) \geq \max J_i / 2 \quad (3)$$

$$R_{OUT} := R \mid J_i(T_{before}, T_{after}) \geq 0 \quad (4)$$

Решение системы ограничений

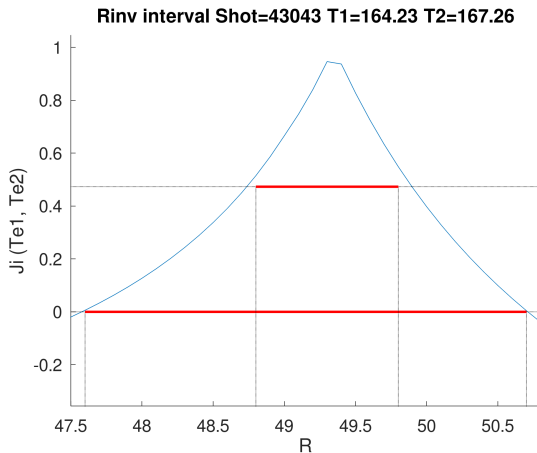


Рис.: Индекс Жаккара $J_i(T_{\text{before}}, T_{\text{after}})$ на подробной сетке

Решение системы ограничений

inversion radius.csv

Shot = 43043

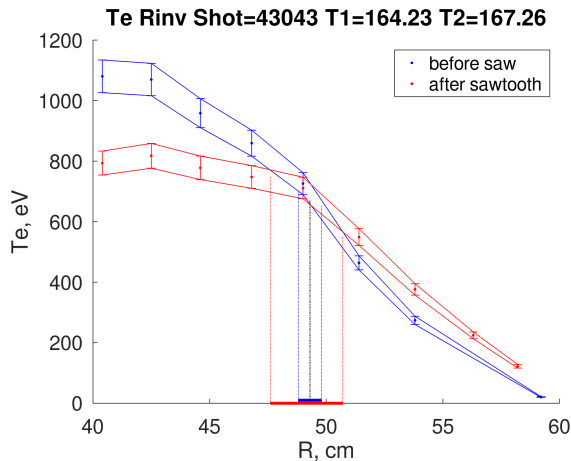


Рис.: Оценки радиуса инверсии

Экспериментальные работы дорогостоящие — желательно максимально использовать накопленные данные для предсказания работы будущих установок

Цель — получить прогноз для больших значений магнитного поля (в единицах тока плазмы) B_T/I_p

- регрессия по внешним (гарантия совместности) и внутренним (выше точность) оценкам данных
- коррекция в случае несовместности по методике [2]

- расширение набора данных по парам (T_{before} , T_{after}) "до-после" пилообразных колебаний
- в значительной степени ручная работа из-за трудности формализации требований



N.S. Zhiltsov, G.S. Kurskiev, S.Yu. Tolstyakov et al
Thomson scattering diagnostics at the Globus-M2 tokamak
Fusion Engineering and Design 211 (2025) 114753
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114753>



T.lavoruk, A.Bazhenov. 2025 15th International Conference on Applied
Physics and Mathematics (ICAPM 2025) Tokyo April 10-12 2025