Применение машинного обучения для определения температуры электронов в токамаке Глобус-М2 по данным диагностик Томсоновского Рассеяния и мягкого рентгеновского излучения [[1]](#footnote-1)\*)

Ткаченко Е.Е., Курскиев Г.С., Жильцов Н.С., Воронин А.В., Горяинов В.Ю., Мухин Е.Е., Толстяков С.Ю., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Минаев В.Б., Новохацкий А.Н., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Киселёв Е.О., Чернаков Ал.П.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, [erina.tkachenko@yandex.ru](mailto:erina.tkachenko@yandex.ru)

Важной частью исследования высокотемпературной плазмы является определение температуры электронов (*Те*) в экспериментах на токамаке. Для этой цели в сферических токамаках можно использовать как диагностику Томсоновского рассеяния, так и диагностику интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Первая диагностика дает точные локальные измерения температуры и плотности электронов, но ее временное разрешение ограничено частотой следования зондирующих импульсов лазера и их количеством. Таким образом, с ее помощью нельзя исследовать быстрые, зависящие от времени процессы. С другой стороны, диагностика мягкого рентгена обладает высоким временным разрешением, поэтому с ее помощью можно получить эволюцию *Те* во время всего эксперимента.

Однако есть сложности в определении *Те* с помощью обработки данных об интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Регистрируемый из плазмы сигнал включает в себя непрерывное тормозное, рекомбинационное излучение и линейчатое излучение примесей. Только первые два несут информацию о *Те*, поэтому, когда в сигналы попадает линейчатое излучение, по ним становится затруднительно определять температуру. С помощью металлических фильтров и естественного ограничения спектральной чувствительности детектора отсекают область спектра, в которой преобладает линейчатое излучение примесей, однако часть линейчатого излучения все же попадает в область детектирования. Исследования показывают, что влиянием излучения примесей нельзя пренебречь [1]. Это значительно усложняет задачу оценки температуры, заставляя учитывать процессы перемещения примесей в плазме.

Чтобы избежать сложного моделирования, можно использовать методы машинного обучения (МО) для обработки сигналов мягкого рентгена. В таком случае локальные результаты диагностики Томсоновского рассеяния можно использовать в качестве меток для МО с учителем, поэтому применимы данные с каким угодно временным разрешением. Кроме того, такой способ обработки дает возможность использовать данные других диагностик, предоставляющих информацию о примесях или источниках нагрева плазмы. Таким образом, с помощью уже обученного алгоритма МО можно получить с хорошей точностью временной ход температуры электронов в эксперименте на токамаке.

В данной работе приводится результат применения машинного обучения для оценки электронной температуры с помощью совместного действия двух диагностик. Показано, что использование МО позволяет существенно улучшить точность определения *Те* по сравнению с традиционным методом обработки интенсивности мягкого рентгеновского излучения в различных спектральных диапазонах [2] без учета влияния примесей на токамаке Глобус-М2.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект No 17-72-20076).

Литература

1. S. von Goeler et al., 1995 Nucl. Fusion 15 301
2. Delgado-Aparicio L F et al., 2007 J. Appl. Phys. 102 073304

1. \*) [DOI – тезисы на английском](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVIII/Mu/en/AQ-Tkachenko_e.docx) [↑](#footnote-ref-1)