



Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова



РНФ 19-79-00203

# Методы машинного обучения для быстрой оптической диагностики плазмы в процессах осаждения функциональных углеродных материалов

**Бабин С.Д.<sup>1a)</sup>, Кударенко И.П.<sup>1</sup>, Малыхин С.А.<sup>1,2</sup>, Логинов А.Б.<sup>1</sup>,  
Исмагилов Р.Р.<sup>1</sup>, Образцов А.Н.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

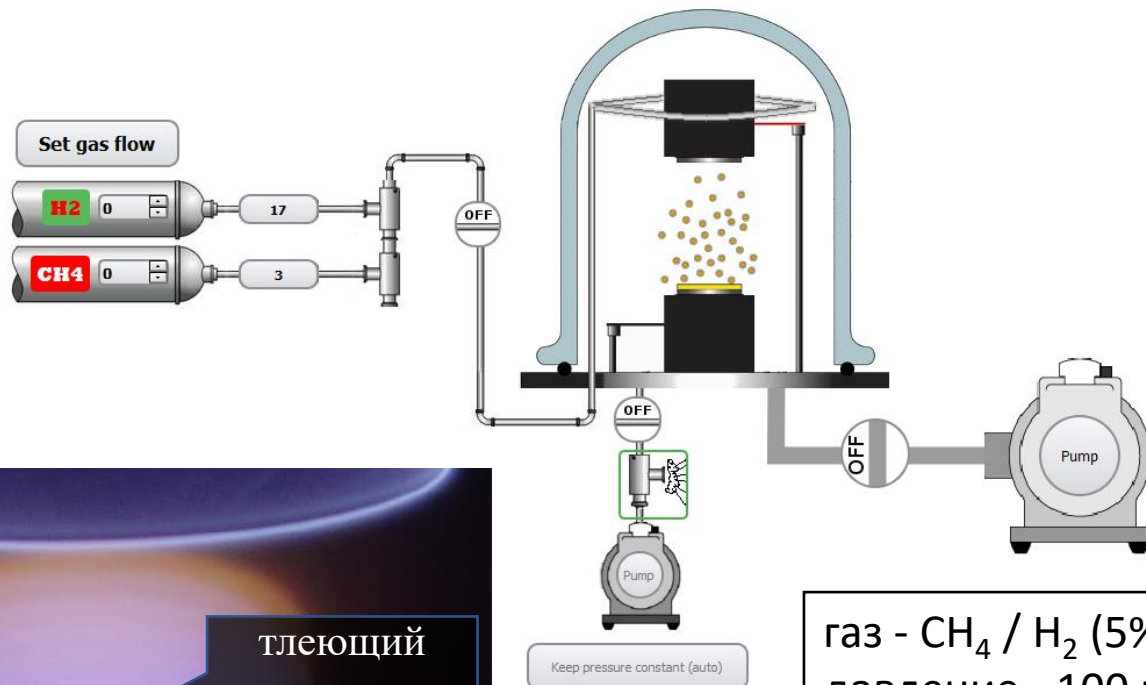
<sup>2</sup>*University of Eastern Finland, Department of Physics and Mathematics, Joensuu, Finland*

<sup>a)</sup>*babin@polly.phys.msu.ru*

# Методика и техника эксперимента.

## Установка по плазмохимическому осаждению углеродных пленок

Desirable pressure: 9.5  
Current pressure: 11.68



Mo катод

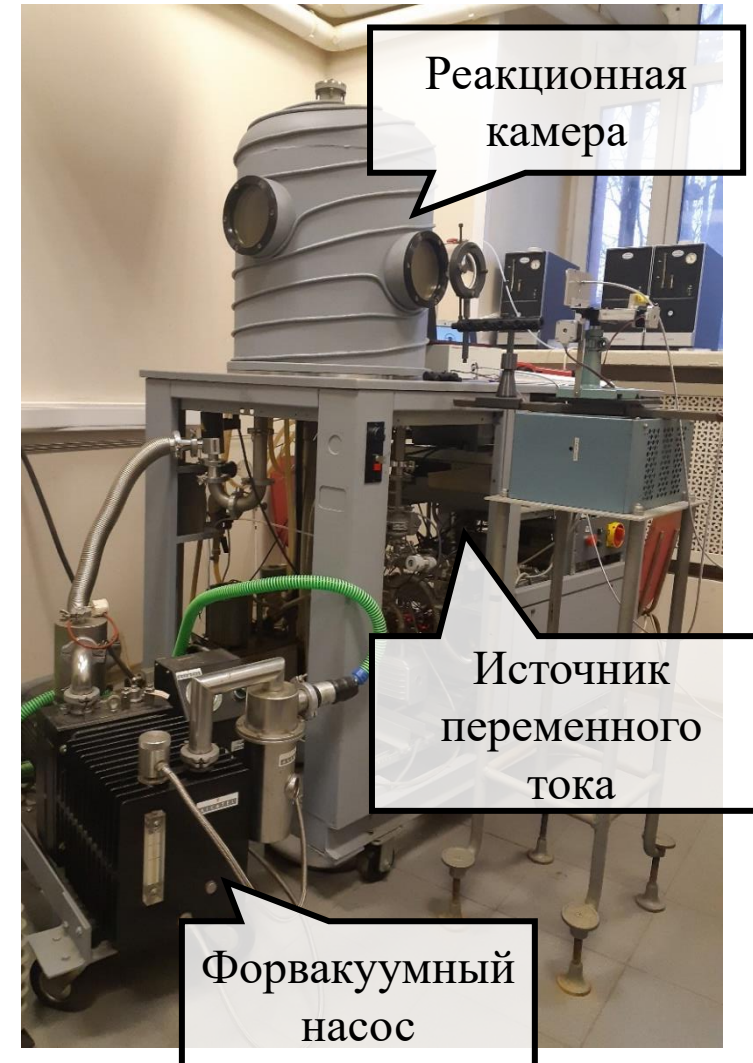
тлеющий разряд

подложка

Mo анод

газ -  $\text{CH}_4 / \text{H}_2$  (5% метана);  
давление - 100 mbar;  
поток - 140 sccm;

подложка - Si (100), Ni;  
Т подложки ~ 1000 °C;  
сила тока ~ 7A



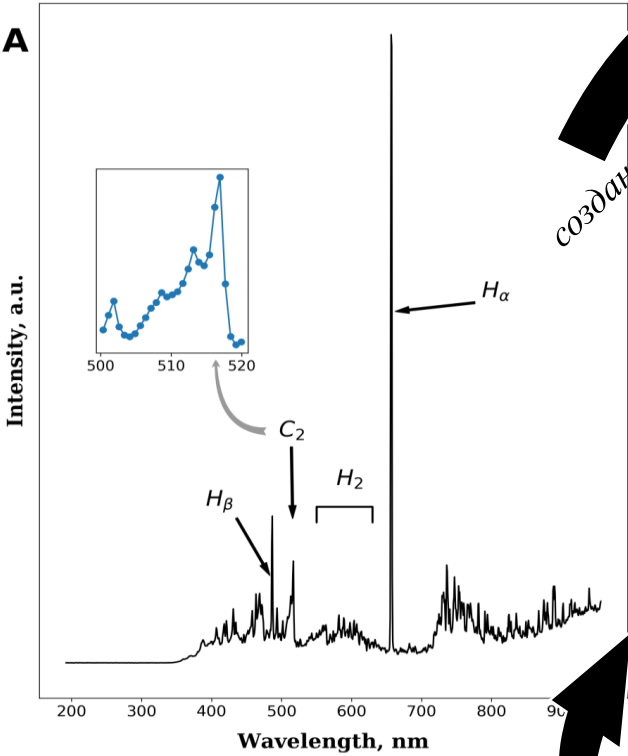
Реакционная камера

Источник переменного тока

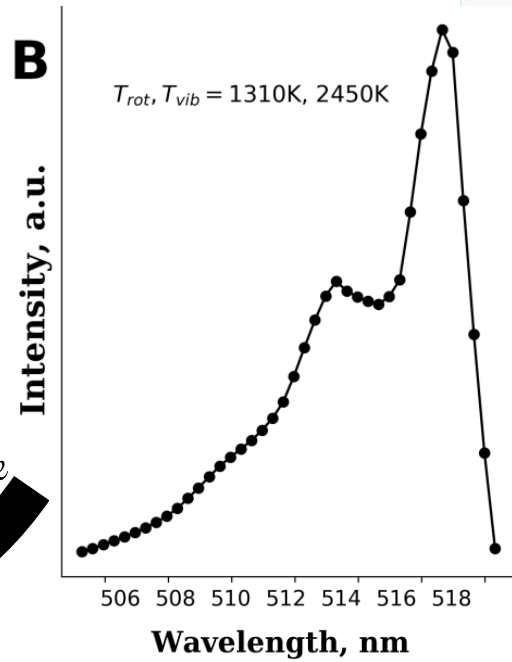
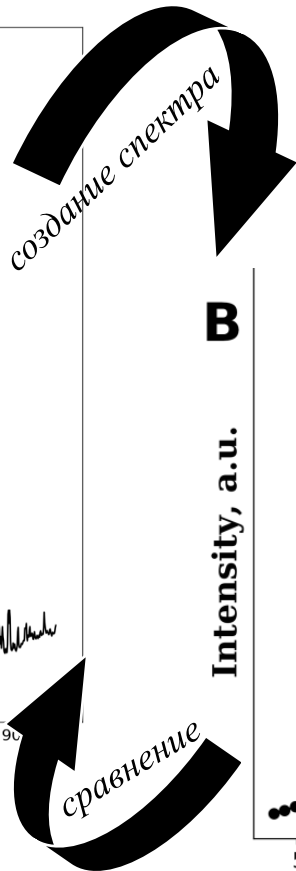
Форвакуумный насос

\*Исмагилов Р. Р., Получение и свойства углеродных тубулярных наноструктур, дисс., к.ф.м.н. Д 501.002.01

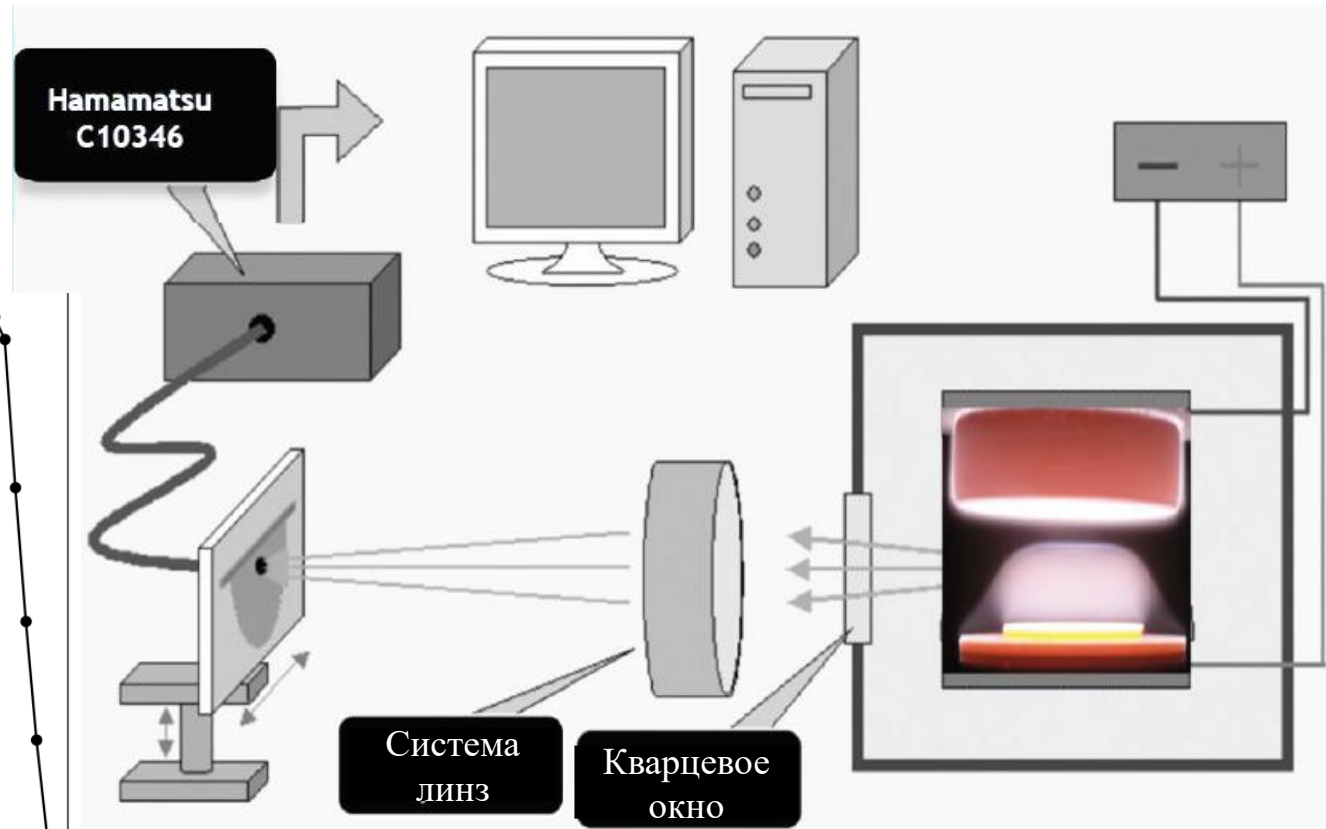
# Методика и техника эксперимента. Оптическая эмиссионная спектроскопия.



(A) Типичный спектр OES, полученный с помощью Hamamatsu Plasma Process Monitor C10346 из активированной газовой смеси  $H_2 / CH_4$  в ходе процесса CVD

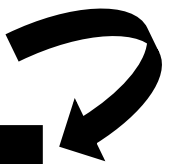


(B) Синтетически созданный спектр для случаев  $T_{rot} = 1310K$ ,  $T_{vib} = 2450K$



Ручное приближение: 2 часа на спектр

Решение: внедрение машинного обучения



### **Цель работы:**

Внедрение алгоритмов машинного обучения для исследования оптических эмиссионных спектров. Выявление особенностей пространственного распределения электронной и газовой температур, пространственного распределения интенсивности излучения в процессах осаждения углеродных материалов из газовой фазы.

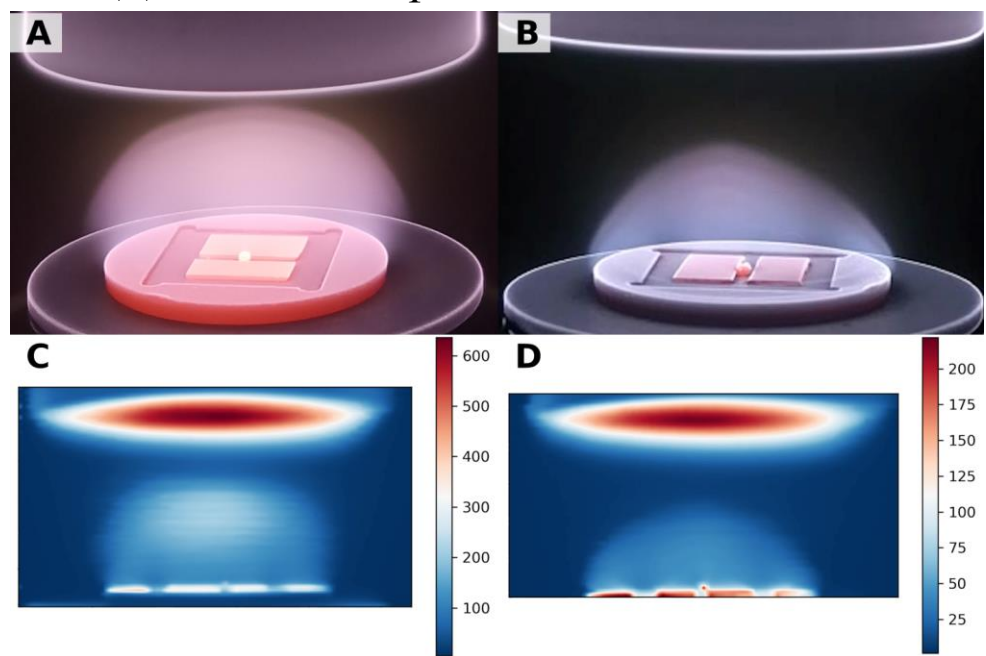
### **Мотивация:**

1. Сокращение времени проведения термометрии плазмы с помощью искусственного интеллекта
2. Возможность создания температурной карты в реакционной камере
3. Проведение анализа корреляции между температурным распределением плазмы и формированием углеродных наноматериалов



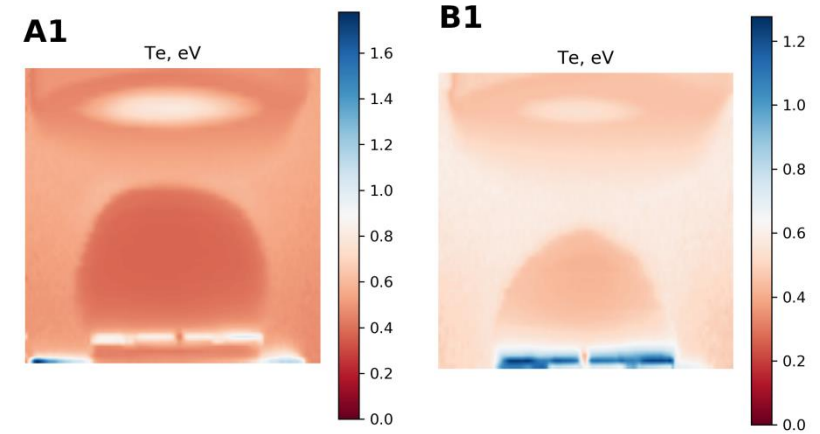
# Результаты. Получение карты температур

Данные спектров холодной плазмы



(A, B) Фотографии зоны активации газовой смеси  $H_2 / CH_4$  для двух различных экспериментов по (A) росту углеродных наностенок (CNW), (B) росту алмазных игл. (C, D) Пространственное распределение интенсивности излучения в произвольных единицах спектральной линии 516,5 нм, соответствующей компонентам  $C_2$ , для двух типичных параметров процесса, обеспечивающих нанесение углеродных наностенок (C) и алмазных игл (D).

$$T_e = \frac{W_\beta - W_\alpha}{kLn \left( \frac{I_\alpha g_\beta \lambda_\alpha A_\beta}{I_\beta g_\alpha \lambda_\beta A_\alpha} \right)}$$

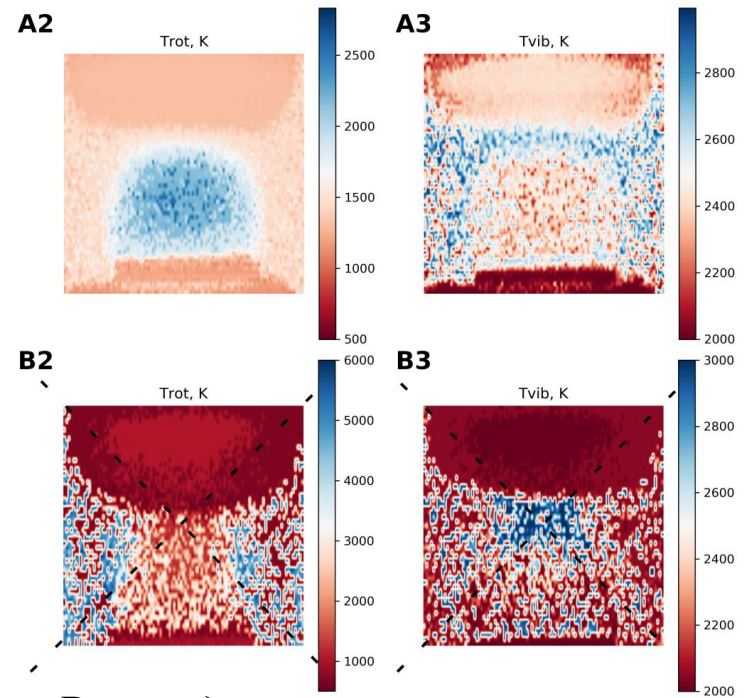


Температурное распределение электронов

### Random Forest

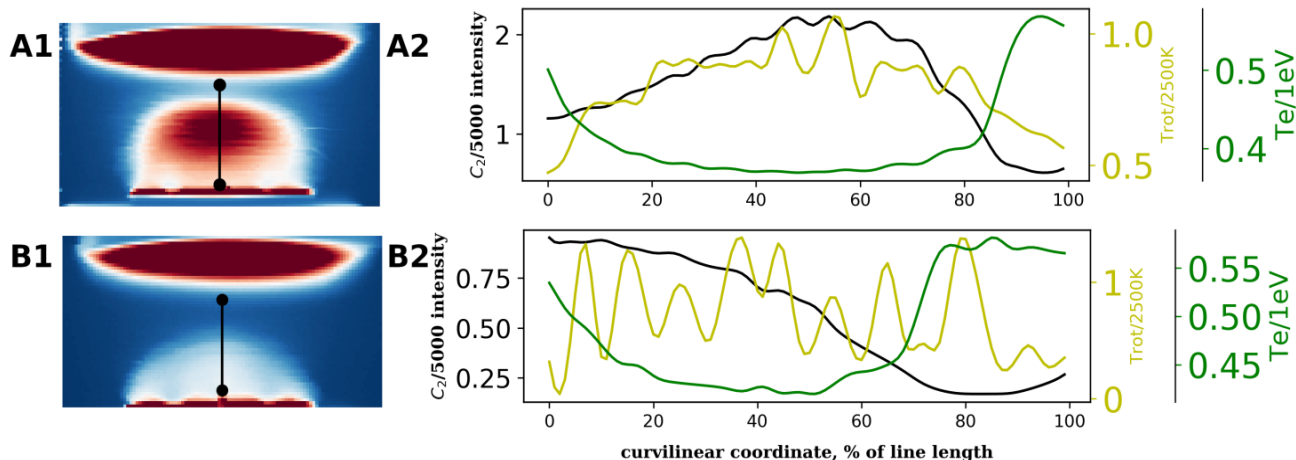
обучение

Набор данных синтетического спектра излучения  $C_2$  для различных  $T_{rot}$  [500, 6000] с шагом 1К и  $T_{vib}$  [2000, 3000] с шагом 50К

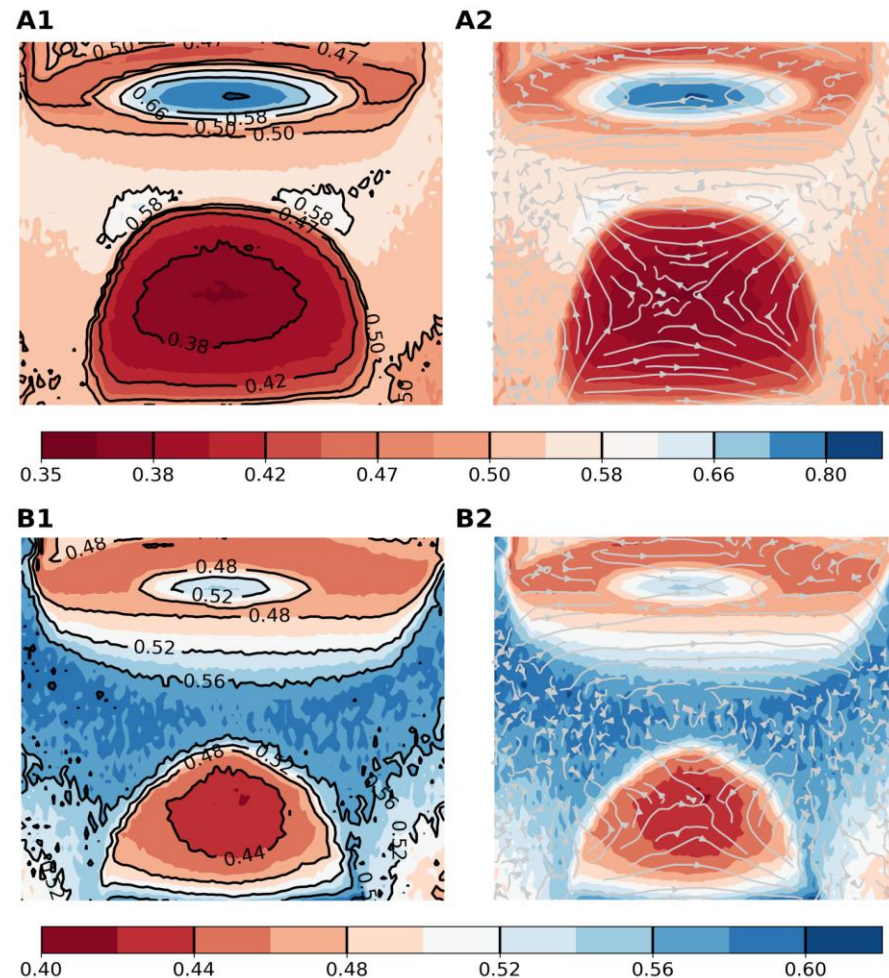


Распределение вращательных и колебательных температур

# Результаты. Анализ распределений интенсивности излучения и карт температур



Пространственное распределение интенсивности излучения спектральной линии 516,5 нм, соответствующей компонентам C2, для двух типичных параметров процесса CVD, обеспечивающих осаждение углеродных наностенок (A1) и алмазных игл (B1). Профили в (A2, B2) указывают абсолютную интенсивность спектральной линии 516,5 нм [левая ось],  $T_{rot}$  в масштабе 2500K [первая правая ось] и  $T_e$  в эВ [вторая правая ось]



Пространственное распределение рассчитанного  $T_e$  с контурами (A1, B1) и  $T_e$  с линиями «минус градиент» (A2, B2) для двух типичных параметров процесса CVD, обеспечивающих осаждение углеродных наностенок (A1, A2) и алмазные иглы (B1, B2).

# Выводы:

1. Представлен быстрый оптический метод определения вращательной и колебательной температур в больцмановском распределении возбужденного состояния с использованием алгоритмов машинного обучения.
2. Определена карта распределения температуры и градиентов с помощью метода Random Forest. Выявлены особенности пространственного распределения электронной и газовой температур, пространственного распределения интенсивности излучения, соответствующие углеродным димерам C<sub>2</sub>, которые являются строительными элементами некоторых углеродных материалов.
3. Установлена взаимосвязь между параметрами активированной метан-водородной смеси и структурно-морфологическими характеристиками осаждаемых из нее углеродных пленок.