

**ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Закускина Александра
Сергеевича на тему: «Лабораторное моделирование и диагностика
газоплазменных сред, представляющих астрофизический интерес»
по специальности 1.4.4. «Физическая химия»**

Представленная диссертационная работа Закускина Александра Сергеевича относится к области лазерной химии. Основной фокус исследования сосредоточен на лабораторном моделировании спектров удаленных плазменных объектов, диагностике плазмы по спектрам томсоновского рассеяния и лазерно-индуцированной флуоресценции. Особое внимание уделено применению методов машинного обучения для предсказания параметров штарковского уширения и сдвига спектральных линий атомов и ионов.

Актуальность темы диссертации

Лазерно-индуцированная плазма является перспективным источником для моделирования в лабораторных условиях физико-химических свойств недоступных для прямого исследования плазменных источников, например, космические объекты и метеоры, входящие в плотные слои атмосферы. В частности, большой интерес представляет анализ спектров излучения основных элементов состава метеоров (Fe, Ca, Si, Al и др.) и простых молекул с их участием (FeO, CaO, CN). Однако, несмотря на большой объем накопленных экспериментальных фактов, их теоретический анализ и осмысление пока явно недостаточны. Для оценки параметров плазмы или изучения динамики изменения концентрации частиц в ходе эволюции метеорной плазмы требуется разработка подходов для сопоставления условий в лазерно-индуцированной плазме с условиями в удаленном плазменном объекте. Поэтому исследования по лабораторному моделированию плазменных источников и создание модели машинного обучения для предсказания параметров штарковского уширения и сдвига атомных и ионных переходов, выполненные в диссертационной работе А.С. Закускина, имеют несомненную актуальность.

Структура и содержание работы

Диссертация включает в себя семь разделов: введение, три главы, заключение, список сокращений и обозначений и список цитируемой литературы. Полный объем диссертации составляет 153 страницы. Библиографический список цитируемой литературы содержит 214 наименований.

Во **введении** обозначена актуальность, показана научная новизна, а также сформулированы цели и задачи проведенного исследования, представлены научные положения, выносимые на защиту, указан личный вклад автора.

В первой главе диссертационной работы (**обзор литературы**) представлено описание основ формирования лазерно-индуцированной плазмы, принципов формирования эмиссионных спектров, уширения спектральных линий, теоретических основ диагностики плазмы по спектрам томсоновского рассеяния, а также наблюдению лазерно-индуцированной флуоресценции атомов и молекул в лазерно-индуцированной плазме. Представлен обзор подходов к моделированию «метеорных процессов» в условиях лаборатории. Рассмотрено применение методов машинного обучения для решения задач в области спектроскопии.

Вторая глава (**экспериментальная часть**) посвящена созданной экспериментальной установке, разработанным схемам атомной и молекулярной лазерно-индуцированной флуоресценции, методам диагностики плазмы по спектрам эмиссии и томсоновского рассеяния, моделям машинного обучения. Представлены схемы двух модификаций экспериментальной установки: сочетание лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии и лазерно-индуцированной флуоресценции при пониженном давлении и регистрация спектров эмиссии и томсоновского рассеяния при атмосферном давлении. Показаны разработанные схемы возбуждения и регистрации лазерно-индуцированной флуоресценции Ca, Fe, Ti, CaO и FeO. Описан алгоритм предобработки спектров для диагностики плазмы по

спектрам томсоновского рассеяния и представлена процедура определения температуры и электронной плотности. Особый интерес представляет раздел об описании структуры собранных данных для предсказания штарковских параметров методами машинного обучения и описание использованных подходов по обучению моделей машинного обучения.

В третьей главе (**обсуждение результатов**) обсуждается лабораторное моделирование спектров болида Бенешев, алгоритм предсказания штарковских параметров и диагностика плазмы с высоким пространственным разрешением. Анализируются найденные экспериментальные условия, при которых эмиссионные спектры лазерно-индуцированной плазмы при испарении мишени из Fe_3O_4 наилучшим образом совпадают со спектрами плазмы следа метеора (болид Бенешов) в верхних слоях земной атмосферы. Для нескольких комбинаций давления и задержки, обеспечивающих наилучшее подобие спектров, были определены температура и электронная плотность плазмы. Представлены результаты применения методов машинного обучения для предсказания параметров штарковского уширения и сдвига спектральных линий атомов и ионов. Предложенный Закускиным А.С. подход по предсказанию штарковских параметров не имеет аналогов как по возможности охвата всех известных в базах данных линий, так и по ожидаемой точности предсказаний.

В **заключении** сформулированы основные результаты проведенных исследований. Содержание работы в полной мере отражает достижение поставленных целей и задач.

Достоверность описанных в диссертации результатов обеспечена применением наиболее надежных методов диагностики плазмы и высокоэффективных алгоритмов машинного обучения.

Научная значимость и научная новизна представленных исследований не вызывают сомнений. В диссертационной работе впервые разработана модель машинного обучения для предсказания параметров штарковского уширения и сдвига атомных и ионных переходов с

экспериментальной точностью. На созданной экспериментальной установке достигнуто высокое пространственное разрешение при регистрации спектров атомной и молекулярной лазерно-индуцированной флуоресценции в лазерной плазме. Предложена оригинальная методика обработки слабых спектральных сигналов с высоким уровнем шумов с использованием вейвлет преобразований в условиях лазерной плазмы. Предложен новый подход по поиску условий в лазерной плазме, в которых эмиссионные спектры плазмы наилучшим образом совпадают со спектрами плазмы метеора в верхних слоях земной атмосферы.

Публикации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 7 статьях в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Scopus, Web of Science, RSCI, включая такие высокорейтинговые издания как *Astronomy and Astrophysics*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Plasma Sources Science and Technology*. Автореферат корректно и с необходимой полнотой отражает содержание диссертации.

Замечания

1. В первом из Положений, выносимых на защиту, стоило указать количественные значения по пространственному разрешению и по «пониженному давлению».

2. На представленной на рисунке 14 (стр. 61) зависимости интенсивности флуоресценции от энергии возбуждающего импульса представляется правильным поставить доверительные интервалы на каждой точке и провести физически понятную плавную кривую.

3. Хотелось бы увидеть обсуждение локального максимума на зависимости интенсивности флуоресценции от значения латеральной координаты (рисунок 16, стр. 62) даже в оптимальном режиме.

4. Сравнение спектра спонтанной эмиссии лазерно-индуцированной плазмы и спектра флуоресценции, представленных на рисунке 18 (стр. 63), плохо коррелирует с комментариями к этому рисунку на стр. 62. С учетом

линейности шкалы Y интенсивность эмиссии на рисунке не настолько меньше интенсивности флуоресценции, чтобы ею можно было пренебрегать.

Сделанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Общая оценка диссертационной работы

Рассматриваемая диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны схемы нерезонансной флуоресценции и измерения с высоким пространственным разрешением, которые позволили выявить закономерности распределения Ca , Fe , Ti и CaO в объёме плазмы при различном давлении окружающей среды, предложен критерий на основе отношений интенсивности атомных линий и молекулярных полос в эмиссионных спектрах для поиска параметров окружающей среды, в которых достигается наилучшее совпадение спектров хвоста болида и лазерно-индуцированной плазмы. Предсказываемые методами машинного обучения параметры штарковского уширения и сдвига линий атомов и ионов обладают точностью, сопоставимой с точностью экспериментальных данных, а их включение в алгоритм моделирования спектров плазмы в приближении ЛТР значительно повышает точность определения ее температуры и электронной плотности. Полученные в диссертационной работе результаты обладают научной новизной и вносят вклад в развитие физической химии в части изучения физико-химических свойств газоплазменных объектов различного происхождения.

Заключение

Диссертация отвечает всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.4.4. «Физическая химия» (по физико-математическим наукам), а именно следующим её направлениям: «изучение физико-химических свойств изолированных молекул и молекулярных соединений при воздействии на них

внешних электромагнитных полей, потока заряженных частиц, а также экстремально высоких/низких температурах и давлениях», «создание и разработка методов компьютерного моделирования строения и механизмов превращений химических соединений на основе представлений квантовой механики, различных топологических и статистических методов, включая методы машинного обучения, методов молекулярной механики и молекулярной динамики, а также подходов типа структура-свойства», а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Закусин Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.4.4. «Физическая химия».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
зам. директора по научной работе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт спектроскопии Российской
академии наук (ИСАН)

Сурин Леонид Аркадьевич

28.05.2025

Контактные данные:

тел.: , e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.05 – «Оптика»

Адрес места работы:

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5
ФГБУН «Институт спектроскопии РАН», дирекция
Тел.: +7(495)851-05-79; e-mail: isan@isan.troitsk.ru

Подпись сотрудника Института спектроскопии РАН

Сурина Л.А. удостоверяю:

Ученый секретарь

Р.Р. Кильдиярова

28.05.2025