

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию 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**

Возникновение и эволюция молекул во Вселенной связаны с выбросом вещества на поздних стадиях существования звезд в межзвездную среду и последующей физической и химической трансформацией этого вещества под воздействием излучения и высокоэнергетических частиц, а заканчивается гравитационным захватом этого вещества вновь образованными звездами и планетными системами. Понимание этой физико-химической эволюции звезд и планетарных систем является одной из ключевых задач астрофизики и астрохимии в последние десятилетия. Появившиеся уникальные обсерватории и космические телескопы увеличили объем спектральных данных на порядки, что дало новые возможности для моделирования астрохимических процессов.

Помимо спектральных наблюдений одним из важных направлений исследований в планетологии является выявление связи между классами метеоритов и типами космических объектов, от которых они произошли. В этом направлении ключевым способом изучения элементного состава комет, астероидов и метеоров стала регистрация и интерпретация оптического излучения радиационно-столкновительных процессов, происходящих в Солнечной системе, включая абляцию космических тел в верхних слоях земной атмосферы. Эту задачу невозможно решить без использования лабораторного моделирования возникающих при этом радиационных процессов.

Лазерно-индуцированная плазма безусловно является одним из перспективных объектов с этой точки зрения, так как дает возможность помимо температуры и электронной плотности варьировать давление и плотность частиц, а комплексная диагностика плазмы в контролируемой по

составу и давлению внешней атмосфере обеспечит определение её параметров в широком диапазоне значений с высокой точностью.

Диссертационное исследование Александра Сергеевича Закускина, посвящённое комплексному изучению физико-химических свойств лазерно-индуцированной плазмы с целью надежного моделирования радиационных процессов и характеристик удаленных, недоступных для контактного исследования физических объектов, включая высокоскоростные космические тела (метеоры) и летательные аппараты, несомненно, представляет собой **актуальную задачу**.

Диссертационная работа Закускина А.С. состоит из введения, трех основных глав; заключения, списков используемых сокращений и обозначений и цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 153 страницы, содержит 57 рисунков, 19 таблиц, список литературы включает 214 библиографических ссылок.

Литературный обзор содержит три раздела:

первый касается анализа лазерно-индуцированной плазмы, в котором достаточно подробно изложены как теоретические основы лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии, так и анализ современных проблем диагностики лазерной плазмы.

Во втором разделе рассмотрено лабораторное моделирование метеорных процессов, а третий раздел посвящен вопросу машинного обучения в задачах спектроскопии.

Экспериментальная часть работы состоит из 5 разделов.

В первом дана подробная информация о созданных экспериментальных установках для регистрации спектров лазерно-индуцированной плазмы и флуоресценции при пониженном давлении и для регистрации эмиссионных спектров плазмы и спектров томсоновского рассеяния при атмосферном давлении.

Во втором разделе представлены разработанные и практически реализованные в диссертации схемы атомной (Ca, Fe, Ti) и молекулярной

(CaO, FeO) флуоресценции, проведен теоретический анализ кинетики флуоресценции для разработки способа определения температуры плазмы. Надо отметить, обоснованность предложенных схем флуоресценции, что, безусловно, свидетельствует о высокой квалификации автора.

В следующем разделе рассмотрены методы диагностики лазерно-индуцированной плазмы. Это один из важнейших разделов диссертации, в котором предложен комплексный анализ лазерно-индуцированной плазмы, включающий определение температуры по эмиссионным спектрам, определение электронной плотности плазмы по штарковскому уширению линий и определение электронной плотности и электронной температуры плазмы по сигналу томсоновского рассеяния.

Данные для предсказания штарковских параметров методами машинного обучения, а также методы и подходы по обучению моделей машинного обучения рассмотрены в двух заключительных разделах.

В четвертой главе диссертационной работы представлены и обсуждаются полученные результаты, которые определяют научную новизну и практическую значимость проведенных Закускиным А.С. исследований.

Это прежде всего, комплексный подход к диагностике плазмы, предложенный и реализованный автором, который позволяет надежно моделировать спектральные характеристики плазмы в мульти-температурном приближении, что безусловно будет востребовано в дальнейшем для исследования различных плазмохимических объектов.

Особо следует подчеркнуть, использование автором современных подходов к обработке спектральных данных с использованием вейвлет-преобразований, предсказание параметров штарковского уширения и сдвига линий атомов и ионов с использованием ансамбля моделей машинного обучения.

Реализованная в работе диагностика плазмы с высоким пространственным разрешением по спектрам томсоновского рассеяния и по

данным атомной и молекулярной флуоресценции, позволяющая надежно определять градиент температуры в сечении плазмы .

Приведенные данные безусловно свидетельствуют о том, что **научные положения и выводы**, сформулированные в диссертации, логичны и обоснованы. Подробный анализ результатов и сопоставление их с имеющимися литературными данными подтверждают их **достоверность и надежность**.

Текст диссертации и автореферат полностью отражают содержание выполненной работы. Основные результаты, проведенных исследований, опубликованы в рецензируемых научных журналах с высоким импакт-фактором, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и RSCI. Материалы работы прошли апробацию и обсуждались на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях.

Вместе с тем, при в процессе знакомства с диссертационной работой Закускина А.С. у меня возникли следующие вопросы и замечания:

1. В работе предложены методики определения температуры плазмы в условиях ЛТР по интенсивностям линий атомной флуоресценции (раздел 3.3.1) и по данным томсоновского рассеяния (раздел 3.3.3), проанализированы возникающие градиенты температуры в сечении плазмы. Причем, в случае томсоновского рассеяния автор совершенно обоснованно подчеркивает, что определяется электронная температура. Однако, в работе явно не хватает анализа этой информации: как сопоставить между собой эти данные? Какие преимущества и ограничения есть у предложенных методик?
2. В связи с первым замечанием закономерно возникает вопрос о моделировании спектров лазерно-индуцированной плазмы при различных давлениях (Таблица 10) и сопоставлении со спектрами метеоров в выбранных температурных интервалах: насколько надежно такое моделирование и обоснован вывод о высоких давлениях в хвосте метеора?

3. В работе достаточно много жаргонных выражений, опечаток и стилистических неточностей, причем некоторые из них достаточно принципиальные: «определения температуры плазмы методом графика Больцмана», «термодинамическая модель», «кант молекулярной полосы», «населенности состояний», «оттенение всех трех ветвей».
4. Для ряда уравнений и таблиц не хватает расшифровки входящих туда величин (Ур.37, 46, 50, Таблица 4, 5). На некоторых рисунках не хватает информации (Рис.13, 22, 27, 28, 41). Отнесение сигнала с длиной волны ≈ 408.8 нм на Рис. 19а вызывает большие сомнения, отнесение спектров флуоресценции FeO базируются на достаточно старых справочных данных.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает 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 ее направлениям:

(5). 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, (10). 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 Закускин Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.4.4 – «Физическая химия».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент
профессор кафедры физической химии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова, Химический факультет

Пазюк Елена Александровна

Контактные данные:

тел., e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
02.00.04 – «Физическая химия».

Адрес места работы:

119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 3, ГСП-1, МГУ,
химический факультет
Тел.: (495) 939-16-71; e-mail: dekanat@chem.msu.ru

Подпись сотрудника Пазюк Елены Александровны.
удостоверяю:
кадровый работник