



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИОФ РАН,
академик РАН

Гарнов С.В.

« 26 » ноября 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки
Федерального исследовательского центра
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»
(ИОФ РАН)

на диссертационную работу Резниченко Юлии Сергеевны «Плазменно-пылевая система в ионосфере Марса», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Диссертационная работа Резниченко Юлии Сергеевны посвящена исследованию плазменно-пылевой системы ионосферы Марса на высотах около 100 км. В диссертации выявляется ряд особенностей, специфических для условий ионосферы Марса; разрабатывается теоретическая модель, самосогласованным образом описывающая динамику запыленной плазмы ионосферы Марса на высотах около 100 км; рассматриваются процессы формирования и эволюции ионосферных плазменно-пылевых облаков; анализируется поведение электронной и ионной компонент плазмы в окрестностях пылевых структур; исследуется устойчивость нижней границы ионосферного плазменно-пылевого облака; обсуждается возможность распространения в пылевых облаках ионосферы Марса линейных и нелинейных пылевых звуковых возмущений. Тема диссертационной работы Резниченко Ю.С. безусловно является **актуальной**, поскольку на сегодняшний день, несмотря на систематический интерес к всесторонним исследованиям планетных атмосфер, физико-математическое моделирование запыленной ионосферы Марса с применением методов физики пылевой плазмы не проводилось.

Полный объем диссертации Резниченко Ю.С. составляет 117 страниц с 7 таблицами и 41 рисунком, текст диссертации состоит из введения, четырех глав и

заклучения. Список литературы включает 118 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования и описывается степень её разработанности; формулируются цели и задачи исследования; перечисляются используемые методы и доказываются достоверность полученных результатов; приводится список основных положений, выносимых на защиту; обосновываются теоретическая и практическая значимость работы, а также её новизна; приводятся основные сведения о публикациях автора по теме диссертации и апробации полученных результатов; описываются структура диссертации и её объем.

В **первой главе** дается обзор ряда экспериментальных исследований в атмосфере Марса, важных для настоящей работы. К ним относятся исследования химического состава и температурного режима нейтральной атмосферы, вертикального распределения аэрозолей, высотных профилей электронов и ионов плазмы, а также световых условий в дневной ионосфере. Отдельное внимание уделяется случаям регистрации в атмосфере Марса пылевых облаков. Показывается, что имеющихся на сегодняшний день сведений достаточно, для того чтобы было возможно комплексное изучение атмосферы Марса с применением методов физики пылевой плазмы.

Во **второй главе** разрабатывается самосогласованная теоретическая модель динамики запыленной плазмы ионосферы Марса на высотах около 100 км. Автор подробно описывает условия ионосферы Марса, важные для физики рассматриваемых процессов; исследует процесс взаимодействия пылевой частицы с атмосферой, который в условиях ионосферы Марса приобретает некоторые особенности; приводит основные уравнения модели, самосогласованным образом описывающей динамику запыленной ионосферной плазмы; обсуждает результаты, полученные в рамках представленной модели; проводит сравнение полученных результатов с запыленной ионосферой Земли. Показывается, что в условиях атмосферы Марса в зоне конденсации пересыщенного углекислого газа происходит эффективное снижение силы вязкого кнудсеновского трения, в связи с чем торможение частицы в этой области обусловлено неупругим взаимодействием с налипающими молекулами конденсата; напротив, в зоне сублимации тормозящее воздействие на микрочастицу оказывает именно вязкое трение, в то время как фактор неупругого взаимодействия исчезает. Демонстрируется, что в рамках представленной модели динамики запыленной плазмы ионосферы Марса возможно формирование слоистого плазменно-пылевого облака частиц конденсата углекислого газа с характерной резкой нижней границей. Пылевые частицы облака во время седиментации приобретают некоторый заряд, знак и абсолютная величина которого зависят от их химического состава и световых условий в ионосфере. Наличие в ионосфере заряженной

пылевой компоненты, в свою очередь, приводит к заметному возмущению её электрон-ионной подсистемы. Так, например, в условиях ионосферы Марса можно ожидать снижение равновесных концентраций ионов и электронов плазмы в области пылевых облаков либо же повышение электронной концентрации без значительных изменений в концентрации ионов. Отмечается, что представленная модель с некоторыми поправками может быть применена к условиям ионосферы Земли.

В **третьей главе** исследуются процессы дестабилизации нижней границы плазменно-пылевого облака. Показывается, что на нижней границе мезосферного пылевого облака в условиях ионосфер Марса и Земли естественным образом может развиваться неустойчивость Рэлея-Тейлора. Инкремент неустойчивости уже при малых значениях волнового числа выходит на асимптотически стационарный максимум, величина которого растет вместе с ростом размеров и концентраций пылевых частиц плазмы, тогда как время развития неустойчивости, наоборот, уменьшается. Это приводит к наличию верхнего ограничения на допустимый размер микрочастицы облака. Действительно, если неустойчивость развивается быстрее, чем протекают процессы, определяющие формирование облака (в том числе его резкой границы), существование облака становится принципиально невозможным (облако в таком случае вообще не будет сформировано). Действие неустойчивости, таким образом, должно быть одним из тех факторов, которые препятствуют стабильному существованию облаков крупной моды, что согласуется с данными наблюдений.

В **четвертой главе** исследуется возможность возбуждения в пылевой плазме ионосферы Марса на высотах около 100 км пылевых звуковых возмущений. Показывается, что в результате действия горизонтальных ветров в пылевых облаках ионосферы Марса на высотах около 100 км оказывается возможным развитие кинетической неустойчивости, действие которой может приводить к появлению условий для возбуждения линейных и нелинейных пыле-акустических волн. Для линейных волн находятся закон дисперсии и инкремент раскачки. Исследуются такие типы нелинейных пылевых звуковых возмущений, как пылевые звуковые солитоны и нелинейные периодические волны. Показывается, что параметры солитона существенным образом зависят от значений таких параметров плазмы, как заряд пылевых частиц и равновесная концентрация электронов плазмы. Другим важным фактором, влияющим на параметры солитона, является адиабатический захват одной из заряженных компонент плазмы: учет адиабатического захвата увеличивает область существования солитонов, снижает значение солитонной амплитуды при фиксированной величине числа Маха и, с другой стороны, увеличивает предельное значение амплитуды солитона в расширенной области

его существования. Кроме того, показывается, что в условиях ионосферы Марса оказывается возможным распространение нелинейных периодических волн с достаточно большими пространственными периодами.

В **заключении** подводятся итоги работы и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в работах, **опубликованных** в ведущих научных журналах. Так, по результатам диссертации были опубликованы 9 статей в рецензируемых журналах: Физика плазмы, Астрономический вестник, Журнал экспериментальной и теоретической физики, Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, Journal of Physics: Conference Series. Кроме того, результаты диссертации были **апробированы** на 18 российских и международных конференциях, а также на 2 научных семинарах в Институте космических исследований РАН. **Личный вклад** автора не вызывает сомнений. **Автореферат** полностью соответствует содержанию диссертации.

Результаты диссертации соответствуют поставленным целям, являются **новыми** и интересными. Так, в диссертации впервые была разработана теоретическая модель запыленной ионосферы Марса на высотах около 100 км, которая включает в себя кинетическое описание пылевой компоненты плазмы, описание динамики электрон-ионной подсистемы ионосферы, зарядки пылевых микрочастиц и процессов конденсации пересыщенного углекислого газа. Модель учитывает ряд особенностей, специфических для условий ионосферы Марса, в т.ч. взаимодействие пылевой компоненты плазмы с молекулами конденсата углекислого газа и эффективное снижение силы вязкого кнудсеновского трения в зоне пересыщения. Показано, что в рамках разработанной модели в результате перемешивания пылевых слоев первичного облака зародышей оказывается возможным формирование слоистого плазменно-пылевого облака с характерной резкой нижней границей. Процесс формирования слоистого облака сопровождается ростом пылевых частиц в пересыщенных парах углекислого газа и их зарядкой, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние на динамику электрон-ионной составляющей ионосферы. Другим важным фактором, влияющим на процесс формирования слоистой структуры облака, является развитие в газопылевой системе марсианской ионосферы неустойчивости Рэлея-Тейлора. Расчеты показывают, что в случае крупных микрочастиц процессы разрушения слоистой структуры облака вследствие турбулизации газа атмосферы, возникающей за счет развития неустойчивости Рэлея-Тейлора, оказываются эффективнее процессов, приводящих к образованию слоистой структуры, вследствие чего принципиально невозможно существование

пылевых облаков, составленных частицами крупной моды. Аналогичное явление имеет место и в случае серебристых облаков атмосферы Земли. Показано, что в условиях ионосферы Марса в результате развития кинетической неустойчивости оказывается возможной генерация линейных и нелинейных пылевых звуковых возмущений, например, солитонов и нелинейных периодических волн. Найдены закон дисперсии и инкремент расщепления линейных волн запыленной ионосферы Марса, показано, что определяющее воздействие на свойства пылевых звуковых солитонов и нелинейных периодических волн оказывает адиабатический захват электронов (ионов) плазмы стенками возмущения.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений вследствие адекватного применения используемых методов и широкого сравнения теоретически предсказываемых выводов с данными наблюдений.

Результаты, полученные в диссертации, имеют существенную **теоретическую значимость**, поскольку могут быть полезны для развития таких научных дисциплин, как физика космоса, астрономия, физика плазмы, физика атмосферы, акустика, теоретическая физика. Кроме того, результаты, полученные в диссертации, имеют **практическую значимость** для специалистов, занимающихся изучением природных и лабораторных плазменно-пылевых систем, сбором экспериментальных данных, космическим приборостроением. Изложенные в диссертации результаты представляют интерес для исследователей из Института космических исследований РАН, Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Объединенного института высоких температур РАН, ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Института астрономии РАН, Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Московского физико-технического института (Научно-исследовательского университета) и др.

Диссертация написана достаточно ясно, существенных замечаний к оформлению работы нет.

К **недостаткам** работы можно отнести следующее:

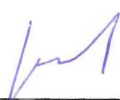
1. Как следует из изложенного на страницах 62–67, время развития неустойчивости Рэлея-Тейлора при определенных значениях размеров и концентраций пылевых частиц плазмы может составлять около суток или больше. Условия в планетных ионосферах в течение столь длинного промежутка времени должны неизбежно варьироваться, что, однако, никак не учитывается автором работы.
2. Заряды пылевых частиц плазмы в Главе 2 рассчитываются согласно зондовой модели, однако границы её применимости не обсуждаются. Следовало бы обратить

отдельное внимание на возможность использования зондовой модели именно в условиях планетных ионосфер, в частности, в условиях ионосферы Марса.

Указанные замечания никоим образом не снижают ценности работы и не влияют на её положительную оценку. Диссертация «Плазменно-пылевая система в ионосфере Марса» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу и полностью удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013г., а её автор, Резниченко Юлия Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Диссертационная работа была обсуждена и одобрена на научном семинаре им А.А. Рухадзе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН) № 1688 12 ноября 2025 года. Отзыв составил главный научный сотрудник теоретического отдела Центра Плазменных и микроволновых технологий Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, доктор физико-математических наук, профессор Игнатов Александр Михайлович.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании Ученого совета Центра плазменных и микроволновых технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» 19 ноября 2025 г. (протокол № 2).



Председатель Учёного совета теоретического отдела
д.ф.-м.н., проф.

Секретарь Учёного совета теоретического отдела

Игнатов Александр Михайлович,
д.ф.-м.н., г.н.с., проф.



19 ноября 2025 г.
/ Гусейн-заде Н.Г.



/ Воронова Е.В.