

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН,
академик РАН

Петрукович
Анатолий Алексеевич



«10» октября 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного
учреждения науки
Института космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН)

Диссертация «Плазменно-пылевая система в ионосфере Марса» выполнена в отделе «Космогеофизики» № 51 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

В период подготовки диссертации с 2021 г. по настоящее время соискатель Резниченко Юлия Сергеевна работала в лаборатории плазменно-пылевых процессов в космических объектах (№513) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук в должности младшего научного сотрудника и на кафедре высшей математики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» в должности ассистента.

В 2021 году Резниченко Ю.С. окончила федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика. С 2021 по 2025 обучалась в очной аспирантуре МФТИ по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2025 году Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтom космических исследований

Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Попель Сергей Игоревич. Основное место работы – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, заведующий лабораторией плазменно-пылевых процессов в космических объектах (№513).

По итогам обсуждения диссертации «Плазменно-пылевая система в ионосфере Марса» *принято следующее заключение.*

Тема диссертации является актуальной, что обусловлено, с одной стороны, общим интересом к изучению планетных ионосфер, с другой – необходимостью теоретического осмысления значительного объема экспериментальных данных, накопленных в ходе исследований Марса. Интерес к исследованиям Марса сильно возрос в последние два десятилетия. Атмосфера Марса на сегодняшний день успешно изучается такими миссиями, как Mars Express, ExoMars Trace Gas Orbiter и др. В ходе экспериментальных исследований было доказано наличие на Марсе пылевых облаков. Так, например, инфракрасный спектрометр SPICAM (установлен на космическом аппарате Mars Express) регистрировал на высотах около 100 км облака, состоящие из частиц с характерным размером около 100 нм. На более низких высотах (около 80 км над поверхностью планеты) миссией Mars Express с помощью спектрометра OMEGA были обнаружены облака, состоящие из микрометровых частиц. Детектировались облака и непосредственно над поверхностью планеты, а также на высотах около 4 км. Комплексное изучение общих ионизационных свойств запыленных планетных ионосфер невозможно без обращения к физике пылевой плазмы. Помимо общетеоретического интереса, такие исследования могут иметь и сугубо прикладное значение, поскольку полезны для физики космоса, астрономии, физики атмосферы, экологии, геофизики. Для изучения различных процессов в атмосфере Марса, однако, плазменно-пылевой подход пока еще не применялся.

Целью диссертационной работы Резниченко Ю.С. является представление самосогласованного описания плазменно-пылевой системы ионосферы Марса на высотах около 100 км, рассмотрение в рамках представленного описания процессов формирования мезосферных пылевых облаков, а также исследование возможности распространения в условиях ионосферы Марса пылевых звуковых возмущений.

Для реализации цели диссертационной работы Резниченко Ю.С. с использованием методов физики плазмы, физической кинетики и теории неравновесных систем были решены следующие *задачи*:

1. описать условия в ионосфере Марса на высотах около 100 км, важные для рассмотрения плазменно-пылевых процессов;
2. выявить особенности, существенные для ионосферы Марса, но не учитываемые при описании плазменно-пылевой системы в ионосфере Земли;
3. представить самосогласованную модель динамики запыленной плазмы ионосферы Марса на высотах около 100 км;
4. рассмотреть в рамках представленной модели процессы формирования плазменно-пылевых облаков;
5. исследовать динамику электрон-ионной подсистемы запыленной ионосферы Марса;
6. рассмотреть процессы дестабилизации нижней (резкой) границы плазменно-пылевого мезосферного облака;
7. исследовать процессы генерации и распространения в условиях ионосферы Марса пылевых звуковых возмущений.

Основные результаты диссертации:

1. разработана самосогласованная теоретическая модель динамики запыленной плазмы ионосферы Марса на высотах около 100 км, учитывающая такие специфические особенности атмосферы Марса, как неупругое взаимодействие пылевых частиц плазмы с налипающими молекулами конденсата и эффективное снижение силы вязкого кнудсеновского трения в зоне пересыщенных паров углекислого газа;
2. показано, что в рамках представленной модели оказывается возможным формирование слоистого плазменно-пылевого облака микрометровых частиц конденсата углекислого газа с характерной резкой нижней границей, время формирования и существования которого (аналогично серебристым облакам мезосферы Земли) определяется временем седиментации пылевой компоненты плазмы сквозь зону пересыщенных паров атмосферного газа;
3. показано, что в результате взаимодействия с электрон-ионной подсистемой ионосферы, а также под действием фотоэффекта (при его наличии) микрочастицы пылевых облаков ионосферы Марса приобретают существенный электрический заряд, что, в свою очередь, приводит к заметному возмущению равновесных концентраций электронов и ионов плазмы аналогично ситуации в окрестности серебристых облаков мезосферы Земли;

4. продемонстрировано, что важным фактором, влияющим на процесс формирования слоистой структуры плазменно-пылевого облака в условиях ионосфер Марса и Земли, является развитие на нижней (резкой) границе облака неустойчивости Рэлея-Тейлора, действие которой ограничивает (сверху) допустимые размеры микрочастиц, составляющих облако;

5. показано, что в условиях ионосферы Марса в результате развития кинетической неустойчивости оказывается возможной генерация линейных и нелинейных пылевых звуковых возмущений, в т.ч. пылевых звуковых солитонов и нелинейных периодических волн;

6. найдены закон дисперсии и инкремент раскачки 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.

Все *результаты диссертации получены лично соискателем* при научном руководстве доктора физико-математических наук, профессора Попеля С.И.

Научная новизна результатов исследования:

1. впервые представлено комплексное исследование пылевой плазмы ионосферы Марса на высотах около 100 км, которое включает в себя описание процессов седиментации и зарядки пылевых частиц, их роста в пересыщенных парах атмосферных газов и динамики электрон-ионной подсистемы ионосферы;

2. впервые описан возможный механизм образования пылевых облаков мезосферы Марса, рассчитаны теоретически предсказываемые значения размеров и зарядов пылевых частиц облака, а также исследовано влияние пылевой компоненты плазмы на значения равновесных электрон-ионных концентраций;

3. впервые показано, что в условиях ионосфер Марса и Земли принципиально невозможно стабильное существование пылевых облаков крупных частиц, поскольку нижняя граница плазменно-пылевого облака нестабильна в смысле развития на ней неустойчивости Рэлея-Тейлора;

4. впервые исследованы такие пылевые звуковые возмущения ионосферы Марса, как линейные волны, пылевые звуковые солитоны и нелинейные периодические волны, рассчитаны характерные значения параметров пылевых звуковых возмущений, показана важность учета адиабатического захвата электронов (ионов) плазмы стенками возмущения.

Практическая значимость результатов диссертации определяется возможностью их использования широким кругом специалистов, занимающихся

изучением физических свойств пылевой плазмы в лаборатории и природе. Результаты диссертации соискателя могут быть использованы для дальнейшего развития методов исследования природных и лабораторных плазменно-пылевых систем, обработки и интерпретации экспериментальных данных и данных наблюдений космических объектов, проектирования будущих космических миссий.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

Научные положения и выводы, содержащиеся в диссертации, являются новыми, обоснованными и достоверными. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением использованных методов, а также сопоставлением теоретических результатов исследования с имеющимися экспериментальными данными.

Материалы диссертации опубликованы соискателем в следующих работах:

1. Дубинский А.Ю., Резниченко Ю.С., Попель С.И. К вопросу о формировании и эволюции плазменно-пылевых структур в ионосферах Земли и Марса // *Физика плазмы*. 2019. Т. 45. № 10. С. 913-921.
2. Yu S Reznichenko, A Yu Dubinskii and S I Popel. On dusty plasma formation in Martian ionosphere // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. 1556. 012072.
3. Извекова Ю.Н., Резниченко Ю.С., Попель С.И. О возможности существования пылевых звуковых возмущений в ионосфере Марса // *Физика плазмы*. 2020. Т. 46. № 12. С. 1119-1124.
4. Резниченко Ю.С., Дубинский А.Ю., Попель С.И. Плазменно-пылевая система в марсианской ионосфере // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. № 1. С. 57-66.
5. Резниченко Ю.С., Дубинский А.Ю., Попель С.И. К вопросу о формировании облаков в запыленной ионосфере Марса. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2023. Т. 117. № 6. С. 420-427.
6. Дубинский А.Ю., Резниченко Ю.С., Попель С.И. О кинетических особенностях седиментации пылевых частиц в атмосфере Марса // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. 2023. Т. 57. № 3. С. 225-231.
7. Резниченко Ю.С., Дубинский А.Ю., Попель С.И. Ионосферные плазменно-пылевые облака: влияние неустойчивости Рэлея-Тейлора // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2024. Т. 166. № 3(9). С. 422-433.
8. Резниченко Ю.С., Дубинский А.Ю., Попель С.И. О влиянии неустойчивости Рэлея-Тейлора на формирование пылевых облаков в мезосфере Марса // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. 2024. Т. 58. № 3. С. 269-275.
9. Резниченко Ю.С., Извекова Ю.Н., Попель С.И. К вопросу о нелинейных пылевых звуковых возмущениях в ионосфере Марса // *Физика плазмы*. 2024. Т. 50. № 11. С. 1388-

Все работы опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, базы данных RSCI и Scopus. Все основные положения исследований изложены в данных статьях.

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем:

[1-2] – представлена самосогласованная модель формирования и эволюции плазменно-пылевых структур в ионосферах Земли и Марса. Проиллюстрировано, что в рамках данной модели удастся показать образование слоистой структуры в результате эволюции пылевого облака в ионосфере Земли, обусловленной расщеплением первичного облака и характеризуемой скоплением пылевых частиц на высотах, соответствующих серебристым облакам и полярным мезосферным радиоотражениям. Показана возможность существования в марсианской ионосфере облаков, сформированных в пересыщенном углекислом газе и аналогичных серебристым облакам в земной ионосфере.

[3] – показано, что горизонтальные ветры в ионосфере Марса на начальном этапе их взаимодействия с плазменно-пылевыми облаками на высотах около 100 км могут приводить к появлению условий для возбуждения пылевых звуковых волн за счет развития кинетической неустойчивости. Найдены закон дисперсии пылевых звуковых волн и инкремент их раскачки в рассматриваемых условиях. Отмечается, что время генерации пылевых звуковых волн оказывается достаточно большим, для того чтобы оказалось возможным формирование нелинейных плазменных волновых структур, например, солитонов;

[4] – представлена теоретическая модель, описывающая возможный механизм формирования и эволюции плазменно-пылевых облаков в мезосфере Марса. Показано, что в рамках данной модели оказывается возможным проиллюстрировать образование слоистой структуры пылевого облака, характерное время седиментации которого составляет несколько минут. Рассчитаны характерные размеры и заряды пылевых частиц облака. Показано, что при отсутствии фотоэффекта пылевые частицы приобретают отрицательный заряд и, кроме того, наблюдается понижение концентраций ионов и электронов плазмы. В случае наличия фотоэффекта частицы с металлическими примесями несут на себе положительный заряд, концентрация электронов плазмы при этом повышается при сохранении понижения ионной концентрации;

[5] – перечислены особенности запыленной ионосферы Марса по сравнению с запыленной ионосферой Земли. Приведены уравнения модели, описывающей самосогласованным образом плазменно-пылевые структуры в ионосфере Марса. Приведен пример высотного распределения частиц, составляющих марсианские мезосферные

облака, вычисленный на основе самосогласованной модели. Показывается, что важным фактором, влияющим на формирование плазменно-пылевых облаков в ионосфере Марса, является действие неустойчивости Рэлея-Тейлора;

[6] – исследован режим оседания слоистых структур в ионосфере Марса с учетом особенностей состава марсианской атмосферы. Рассчитаны характерные скорости оседания пылевых частиц, их размеры и заряды, а также время седиментации слоистых структур. Показано, что тормозящее воздействие атмосферы, в отличие от земного случая, существенно различается для режимов конденсации и сублимации паров углекислого газа;

[7] – рассмотрены серебристые облака и полярные мезосферные радиоотражения ионосферы Земли. Представлена самосогласованная модель, описывающая возможный механизм образования пылевых облаков мезосферы Земли, показано, что, в отличие от ионосферы Марса, на Земле снижается влияние таких факторов, как взаимодействие пылевых частиц с налипающими молекулами водяного конденсата и снижение силы вязкого кнудсеновского трения в области конденсации. Кроме того, показано, что важным фактором, влияющим на формирование плазменно-пылевых облаков земной мезосферы, является неустойчивость Рэлея-Тейлора, которая приводит к тому, что имеется ограничение (сверху) на допустимый размер микрочастицы облака;

[8] – представлена теоретическая модель, описывающая режим оседания плазменно-пылевых облаков в мезосфере Марса. Рассчитаны значения характерных размеров пылевых частиц облака, предсказываемые моделью. Исследовано развитие неустойчивости Рэлея-Тейлора на нижней границе облака для условий мезосферы Марса. Показано, что её действие ограничивает (сверху) допустимый размер микрочастицы облака и обосновывает принципиальную невозможность существования облаков с частицами микрометровых размеров, что соответствует данным наблюдений;

[9] – рассмотрены пылевые звуковые солитоны и нелинейные периодические волны, распространяющиеся в ионосфере Марса в плазменно-пылевых облаках на высотах около 100 км. Исследована зависимость амплитуды солитона от величины заряда пылевых частиц и концентрации электронов плазмы. Показано, что важным фактором, влияющим на параметры солитона, является адиабатический захват электронов (ионов) плазмы. Исследована возможность существования в ионосфере Марса нелинейных периодических волн. Показано, что величина пространственного периода волны может быть достаточной для её регистрации космическими аппаратами.

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Scientific-Coordination Workshop "Non-ideal Plasma Physics" (Moscow, 2018);

2. 17th International Workshop "Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation" (Moscow, 2019);
3. 18th International Workshop "Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation" (Moscow, 2022);
4. 19th International Workshop "Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation" (Moscow, 2023);
5. The eleventh Moscow Solar System symposium 11M-S3 (Moscow, 2020);
6. The twelfth Moscow Solar System symposium 12M-S3 (Moscow, 2021);
7. The thirteenth Moscow Solar System symposium 13M-S3 (Moscow, 2022);
8. The fourteenth Moscow Solar System symposium 14M-S3 (Moscow, 2023);
9. XVI конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования" (Москва, 2019);
10. XVII конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования" (Москва, 2020);
11. XVIII конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования" (Москва, 2021);
12. 63-я всероссийская научная конференции МФТИ (МФТИ, 2020);
13. 64-ая всероссийская научная конференция МФТИ (МФТИ, 2021);
14. 65-ая всероссийская научная конференция МФТИ (МФТИ, 2023);
15. 43rd COSPAR Scientific Assembly (Sydney, 2021);
16. The 9th international conference on the physics of dusty plasmas (Moscow, 2022);
17. Девятнадцатая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе" (Москва, 2024);
18. Конференция памяти С.С. Моисеева к 95-летию со дня его рождения "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность (MSS-24)" (Москва, 2024);
19. Научный семинар ИКИ РАН, 29 января 2025 г.
20. Научный семинар отдела физики планет ИКИ РАН, 24 апреля 2025 г.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности

1.3.1. Физика космоса, астрономия, в частности, пунктам:

п. 2 – «Исследования движения, физических и физико-химических свойств космических объектов, межпланетной, околозвездной, межзвездной и межгалактической среды, базирующиеся на астрономических наблюдениях и физических измерениях» в части «Исследования физических и физико-химических свойств космических объектов».

п. 5 – «Теоретические и экспериментальные исследования движения, строения и

эволюции тел Солнечной системы. Строение, состав планетных атмосфер, поверхности и недр планет и малых тел Солнечной системы» в части «Строение, состав планетных атмосфер».

п. 11 – «Магнитосферы и ионосферы Земли, планет и экзопланет. Геомагнитная активность» в части «Магнитосферы и ионосферы Земли, планет и экзопланет».

п. 12 – «Теоретические и экспериментальные исследования космической плазмы».

Диссертация «Плазменно-пылевая система в ионосфере Марса» **Резниченко Юлии Сергеевны** рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности *1.3.1. Физика космоса, астрономия*.

Заключение принято на заседании НТС отдела «Космогеофизики» ИКИ РАН. Присутствовало на заседании 10 человек. Результаты голосования: «за» – 10 человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол б/н от 10 октября 2025 года.



Пулинец Сергей Александрович,
председатель НТС отдела № 51,
д.ф.-м.н.