УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН

акад. РАН _____ А.А. Петрукович

«___» сентября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук

Диссертационная работа «Внутренние гравитационные волны и их активность в атмосферах Марса и Сатурна по данным затменных экспериментов» выполнена в отделе 53 Физики планет и малых тел Солнечной системы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Стариченко Екатерина Дмитриевна работала в ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника.

Справки о сдаче кандидатских экзаменов выданы в 2026 г. в ИКИ РАН.

Научный руководитель, кандидат физико-математических наук, Беляев Денис Анатольевич, работает старшим научным сотрудником отдела 53 в ИКИ РАН.

По результатам рассмотрения диссертации «Внутренние гравитационные волны и их активность в атмосферах Марса и Сатурна по данным затменных экспериментов» принято следующее заключение:

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена необходимостью углубления понимания процессов и динамики атмосфер планет, а также уточнения входных данных для глобальных моделей циркуляции атмосфер.

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) представляют собой колебания водных/воздушных масс под действием силы тяжести. ВГВ играют важную роль в динамике планетных атмосфер, влияя на атмосферную циркуляцию при переносе своей энергии и импульса из нижних слоев атмосферы в

верхние. Параметры, характеризующие распространение ВГВ и их энергию можно получить из анализа вертикального профиля температуры атмосферы планеты.

До сих пор проводимые в атмосфере Марса эксперименты измеряли температурные профили лишь в ограниченном диапазоне высот и времени в отдельных слоях атмосферы. Эксперимент Atmospheric Chemistry Suite (ACS), работающий на борту орбитального аппарата Trace Gas Orbiter (TGO) с апреля 2018 г. по настоящее время, позволяет восстанавливать вертикальные профили температуры и концентрации в диапазоне высот от 10 до 170 км. При наличии таких высотных профилей, одновременно охватывающих тропосферу, мезосферу и термосферу Марса с вертикальным разрешением около 1 км, актуальной задачей является их анализ на предмет активности ВГВ вдоль всего столба атмосферы. Статистика параметров волн с их вариациями по высоте, географии и марсианским сезонам является уникальной по покрытию данных и позволяет существенно улучшить современные модели циркуляции атмосферы. Дополнительной мотивацией изучения ВГВ на Марсе стала возможность исследовать их активность в период глобальной пылевой бури, поскольку наблюдения ACS застали это событие в июне 2018 г. (середина 34-го Марсианского года).

В атмосфере Сатурна ВГВ исследуются детальные профили температуры в диапазоне высот 600-1600 км (над уровнем давления 1 бар) с вертикальным разрешением 38 км, полученные в результате звездного просвечивания в УФ диапазоне спектрометром Ultraviolet Imaging Spectrograph (UVIS) с борта аппарата Cassini во время финальной стадии миссии Grand Finale (апрель-сентябрь 2017 года). Полученные значения ускорения ВГВ позволяют объяснить перенос тепла из полярных регионов в экваториальные и тем самым - расхождение в несколько сотен кельвинов между наблюдаемой и рассчитанной по радиационным моделям температурой верхней атмосферы планет-гигантов.

Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации

Разработка и применение алгоритма сглаживания вертикального профиля температуры/плотности были проведены лично автором.

Также автором проведен весь расчет и анализ многочисленных параметров ВГВ, построение карт распределений, оформление, представление и интерпретация полученных результатов.
Все работы из списка публикаций по теме диссертации выполнены в соавторстве. Основные результаты диссертации и выносимые на защиту положения основаны на работах (Starichenko et al., 2021; Starichenko et al., 2024; Starichenko et al., 2025). В этих работах автору принадлежит ключевая роль.
В работе (Brown et al., 2022) использовались разработанный автором алгоритм сглаживания вертикальных профилей, адаптированный для атмосферы Сатурна, а также полученные автором значения параметров ВГВ. Кроме того, для статьи автором были предоставлены несколько рисунков.
В работе (Belyaev et al., 2022) представлен анализ спектральных данных ACS по восстановлению исходных высотных профилей температуры и плотности, которые в дальнейшем используются автором диссертации для анализа ВГВ на Марсе. Выводы, полученные в работе (Belyaev et al., 2022), в диссертационной работе не используются и на защиту не выносятся.

Степень достоверности результатов проведенного исследования

Результаты, изложенные в данной работе, были неоднократно представлены в докладах на семинарах Отдела физики планет и малых тел Солнечной системы ИКИ РАН, на регулярных рабочих встречах по эксперименту ACS проекта “ЭкзоМарс” в 2020-2025 годах, на Всероссийских научных конференцях МФТИ (2019, 2020), а также на международных конференциях: конференциях молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (2019-2025), на Московском симпозиуме по исследованиям Солнечной системы (MS3) (2019-2025), конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (2019-2025), Международных симпозиумах по атмосферной радиации и динамике (2021, 2023, 2025), Генеральных Ассамблеях COSPAR (2024, 2026), на конференции по моделированию и наблюдениям атмосферы Марса MAMO (2022).

По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых изданиях.

Научная новизна полученных результатов

1. Впервые экспериментально получено распределение параметров ВГВ, покрывающее высоты тропосферы, мезосферы и термосферы Марса (от 10 до 160 км) за 7 лет наблюдений (3,5 марсианских года). Рекордная для Марса статистика за более 12000 сеансов наблюдений охватывает все марсианские сезоны, а также глобальную пылевую бурю: (i) показано влияние пылевой бури на энергию волн в мезосфере; (ii) исследованы высоты диссипации ВГВ, преимущественно приходящиеся на зону мезопаузы; (iii) установлена взаимосвязь между ускорением ВГВ и вектором скорости зонального ветра.
2. Впервые экспериментально исследованы ВГВ в термосфере Сатурна на высотах 600-1600 км над уровнем давления 1 бар с высоким для планеты вертикальным разрешением ~38 км на средних и высоких широтах (больше 30 градусов), вычислены их параметры и сделаны выводы об их влиянии на динамику атмосферы.

Научная и практическая значимость результатов исследования

Разработанный и апробированный алгоритм сглаживания профилей температуры и плотности может быть использован при аналогичном анализе ВГВ как на Земле, так и на других планетах. Этот инструмент может быть адаптирован для использования в качестве сглаживающей функции при обработке различных рядов данных, содержащих осцилляции в широком диапазоне частот.
Статистика по активности ВГВ как на Марсе, так и на других планетах, может в дальнейшем дополняться и совершенствоваться новыми данными, валидироваться с другими исследованиями, а также исследоваться на взаимосвязь с динамикой планетных атмосфер. Кроме того, полученные в настоящей работе данные могут быть использованы для уточнения глобальных моделей циркуляции атмосферы планет как в качестве входных данных, так и в качестве образца для сравнения с результатами моделирования.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

1. Starichenko E. D., Belyaev, D. A., Medvedev, A. S., Fedorova, A. A., Korablev, O. I., Trokhimovskiy, A., Yiğit E., Alday J., Montmessin F., Hartogh, P.. Gravity wave activity in the Martian atmosphere at altitudes 20–

160 km from ACS/TGO occultation measurements // Journal of Geophysical Research: Planets, 2021. 126, e2021JE006899. DOI: 10.1029/2021JE006899.

2. Brown, Z. L., Medvedev, A. S., Starichenko, E. D., Koskinen, T. T., & Müller-Wodarg, I. C. F. Evidence for gravity waves in the thermosphere of Saturn and implications for global circulation // Geophysical Research Letters, 2022, *49*, e2021GL097219. DOI: 10.1029/2021GL097219.

3. Belyaev, D. A., Fedorova, A. A., Trokhimovskiy, A., Alday, J., Korablev, O. I., Montmessin, F., Starichenko E. D., Olsen K. S., and Patrakeev A. S. Thermal structure of the middle and upper atmosphere of Mars from ACS/TGO CO2 spectroscopy // Journal of Geophysical Research: Planets, 2022, 127, e2022JE007286. DOI: 10.1029/2022JE007286.

4. Starichenko E. D., Medvedev, A. S., Belyaev, D. A., Yiğit E., Fedorova, A. A., Korablev, O. I., Trokhimovskiy, A., Montmessin F., Hartogh, P. Climatology of gravity wave activity based on two Martian years from ACS/TGO observations // Astronomy & Astrophysics, 2024, 683, A206. DOI: 10.1051/0004-6361/202348685.

5. Starichenko E. D., Medvedev, A. S., Belyaev, D. A., Fedorova, A. A., Trokhimovskiy, A., Hartogh, P., Montmessin F., Korablev, O. I. Vertical damping of gravity waves evaluated from ACS-TGO solar occultation measurements on Mars // Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2025, 12:1672283. DOI: 10.3389/fspas.2025.1672283.

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все основные положения диссертационной работы опубликованы в указанных статьях.

Соответствие содержания диссертации специальности «1.3.1 – физика космоса, астрономия»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующему разделу паспорта специальности «1.3.1 – физика космоса, астрономия»: «Исследования физических свойств космических объектов (планет, звезд, галактик и их систем) межпланетной, околозвездной, межзвездной и галактической среды, базирующиеся на астрономических наблюдениях».

ВЫВОД. Кандидатская диссертация Стариченко Екатерины Дмитриевны «Внутренние гравитационные волны и их активность в атмосферах Марса и Сатурна по данным затменных экспериментов» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация 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 «Физики планет» ИКИ РАН. Присутствовало на заседании 15 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 15 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «26» марта 2026 г.

Председатель НТС отдела 53 ИКИ РАН,

д.ф.-м.н., чл.корр. РАН



О.И.Кораблев

Секретарь НТС отдела 53 ИКИ РАН,

к.ф.-м.н.



А.А.Федорова