

На правах рукописи



Стариченко Екатерина Дмитриевна

**ВНУТРЕННИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И
ИХ АКТИВНОСТЬ В АТМОСФЕРАХ МАРСА И
САТУРНА ПО ДАННЫМ ЗАТМЕННЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Специальность:

1.3.1 — Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в отделе Физики планет и малых тел Солнечной системы
Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Научный руководитель: **Беляев Денис Анатольевич**
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник Института Космических
Исследований (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты: **Репина Ирина Анатольевна**
доктор физико-математических наук, профессор РАН, главный
научный сотрудник, заместитель директора ФГБУ Институт
физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук
(ИФА РАН)

Родин Александр Вячеславович
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий
лабораторией прикладной инфракрасной спектроскопии
Московского физико-технического института (национального
исследовательского университета) (МФТИ)

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет

Защита диссертации состоится **18 декабря 2026 г. в 13 ч 00 мин**
на заседании диссертационного совета Д 24.1.481.01 при ИКИ РАН по адресу:
Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и на сайте
<http://www.iki.rssi.ru/diss/2026/starichenko.htm>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просьба направлять по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32,
ученому секретарю диссертационного совета 24.1.481.01.

Автореферат разослан 16 ноября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.481.01
кандидат физико-математических наук



Ткаченко А.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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.

Роль ВГВ в динамике земной атмосферы исследуется на протяжении многих десятилетий как экспериментально, так с помощью моделей циркуляции, что отражено в многочисленных работах (например, Lindzen, 1981; Fritts & Alexander 2003; Gavrilov et al., 2018 и другие). ВГВ также наблюдаются в атмосферах других планет и спутников: на Венере (Tellmann et al., 2012), Юпитере (Young et al. 1997), Сатурне (Brown et al. 2022), Титане (Hinson & Tyler, 1983). Детальный обзор по изучению ВГВ в планетных атмосферах приведен в работе Medvedev & Yiğit (2019). На Марсе, несмотря на его относительно разреженную атмосферу, внутренние гравитационные волны периодически регистрировались как контактными методами при спусках и аэро-торможении аппаратов (Vals et al., 2019), так и дистанционно при орбитальных затменных экспериментах (Gubenko et al., 2015; Nakagawa et al., 2020; Starichenko et al., 2021).

Для изучения влияния ВГВ на атмосферы планет исследуются такие параметры волн, как амплитуда, потенциальная энергия, ускорение, вертикальный поток горизонтального импульса, а также такой параметр атмосферы, как частота Брента-Вяйсяля, характеризующая стабильность атмосферы и возможность распространения в ней ВГВ. Данные величины вычисляются из анализа вертикального профиля температуры атмосферы планеты, измеренного с высотным разрешением не хуже, чем половина характерной длины ВГВ. Затменные эксперименты по радио, солнечному или звездному просвечиванию атмосферы подходят под этот критерий и могут обеспечить регулярную и многолетнюю статистику наблюдений.

До сих пор проводимые в атмосфере Марса эксперименты измеряли температурные профили лишь в ограниченном диапазоне высот. Например, радиозатменное зондирование осуществлялось в тропосфере, ниже 60 км (15–32 км в исследовании Gubenko et al., 2015), а звездное просвечивание ультрафиолетового (УФ) диапазона (90–140 км, Nakagawa et al., 2020) и эксперименты по аэро-торможению (95–190 км, Vals et al., 2019) чувствительны к высотам верхней мезосферы (90–120 км) и термосферы (120–220 км). Несмотря на суммарный охват исследований, они не позволяют изучить статистику активности ГВ по всем марсианским сезонам, охватывая несколько марсианских лет (МУ) и одновременно все слои атмосферы. В частности, исследования уровня насыщения и диссипации ВГВ, его корреляции с высотами и температурами мезосферы и термосферы, не проводились до сих

пор для Марса. Это ограничивало возможности существующих моделей циркуляции по учету влияния ВГВ на вертикальный перенос воздушных масс.

Новые возможности для исследования Марса открылись с началом российского эксперимента по солнечному просвечиванию, проводимого с помощью спектрометрического комплекса Atmospheric Chemistry Suite (ACS) (Korablev et al., 2018), работающего на борту орбитального аппарата Trace Gas Orbiter (TGO) с апреля 2018 г. по настоящее время. ACS в числе своих задач измеряет спектры пропускания атмосферы в сильных инфракрасных (ИК) полосах поглощения CO_2 , 1,58 мкм и 2,7 мкм, что позволяет восстанавливать вертикальные профили температуры и концентрации в диапазоне высот от 10 до 170 км (Belyaev et al., 2022). 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 вышеперечисленных 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, МУ34).

В атмосфере Сатурна ВГВ были исследованы как с помощью наземных телескопов (Cooray et al., 1998), так и с помощью дистанционных наблюдений с бортов аппаратов “Вояджер” и “Кассини” (Vervack & Moses, 2015; Koskinen et al., 2015). Также проводились контактные измерения масс-спектрометром Ion Neutral Mass Spectrometer (INMS) на высотах 1400–2700 км над уровнем давления 1 бар (Yelle et al., 2018). В настоящей работе 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 (Brown et al. 2022) во время финальной стадии миссии Grand Finale (апрель–сентябрь 2017 года).

Данная диссертационная работа включает в себя определение параметров и анализ активности ВГВ в атмосферах Марса и Сатурна. Отдельно исследуется влияние глобальной пылевой бури на Марсе, механизмы обрушения волн и делаются выводы о влиянии ВГВ на циркуляцию планетных атмосфер.

Цели и задачи работы

Целью настоящей диссертационной работы является исследование активности ВГВ в атмосферах Марса и Сатурна. Данную цель можно разделить на два пункта:

- 1) Получение параметров ВГВ по высотным профилям температуры и плотности атмосферы;
- 2) Исследование данных параметров в различных пространственно-временных координатах.

Для достижения поставленных целей в работе решаются следующие задачи:

- 1) Разработка и реализация алгоритма сглаживания вертикального профиля температуры (а также плотности) с целью выявления фонового профиля для каждого измеренного массива данных;
- 2) Анализ высотных профилей флуктуации температуры относительно фонового с целью определения параметров ВГВ: волновых чисел, амплитуды, частоты Брента-Вяйсяля, энергии;
- 3) Построение пространственно-временных карт параметров ВГВ, характеризующих их активность в зависимости от высоты, географического положения и сезона, а также от пылевой активности на Марсе;
- 4) Валидация результатов с другими исследованиями, включая модели циркуляции атмосферы.

Научная новизна

- 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°), вычислены их параметры и сделаны выводы об их влиянии на динамику атмосферы.

Научная и практическая ценность

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.

Положения, выносимые на защиту:

1. В атмосфере Марса амплитуда колебаний температуры, вызванных ВГВ, с вертикальной длиной волны от 10 до 35 км растет с высотой и в области мезопаузы достигает 10 К. Основной зоной разрушения/диссипации ВГВ является мезопауза (100–120 км).
2. Максимальные значения ускорения ВГВ в атмосфере Марса, достигающие $300 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$, наблюдаются в областях слабого зонального ветра, где происходит смена его направления. При этом в периоды солнцестояний активность волн по амплитуде и ускорению в среднем в 2 раза больше в зимнем полушарии, чем в летнем.
3. Глобальная пылевая буря 34-го марсианского года сопровождается повышением потенциальной энергии ВГВ в 2–3 раза по сравнению с беспылевыми периодами 35–37-го марсианских годов: в северном полярном регионе на высотах выше 80 км ее значения достигают $300 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$, а в южном полярном регионе на высотах ниже 80 км — $100 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$.
4. В атмосфере Марса на всех высотах выше 20 км наблюдается выраженная отрицательная корреляция между коэффициентом ослабления волн β и фоновой температурой: коэффициент корреляции Пирсона находится в диапазоне от $-0,8$ до -1 . Положительная корреляция между относительными колебаниями температуры и квадратом частоты Брента-Вайсяля, характерная для разрушения ВГВ вследствие конвективной неустойчивости, проявляется в области мезопаузы.
5. В атмосфере Сатурна активность ВГВ с вертикальной длиной от 120 до 330 км проявлена на всем исследуемом промежутке термосферы: от 600 до 1600 км над уровнем давления 1 бар. Амплитуда волн, в среднем, составляет $30 \pm 20 \text{ К}$, а в некоторых наблюдениях достигает 60 К. Потенциальная энергия ВГВ на единицу массы достигает значений $6 \cdot 10^4 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$, вертикальный поток горизонтального импульса (на единицу массы) — $2000 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$. Ускорение ВГВ достигает значений порядка $100 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ и замедляет зональные потоки ветра, что позволяет объяснить перенос тепла из полярных регионов в экваториальные.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов основана на:

- 1) их публикации в 5 статьях в высокорейтинговых международных рецензируемых научных журналах квартилей Q1 и Q2: Journal of Geophysical Research, Geophysical Research Letters, Astronomy & Astrophysics, Frontiers in Astronomy and Space Sciences;
- 2) их представлении на российских и международных конференциях (27 докладов);

- 3) их представлении на научных семинарах в ИКИ РАН, кафедре физики колебаний Физического факультета МГУ, кафедре физики атмосферы Физического факультета СПбГУ;
- 4) их представлении и обсуждении на регулярных рабочих встречах по эксперименту ACS проекта “ЭкзоМарс” в 2020–2026 годах;
- 5) сравнении с результатами, полученными другими методами и другими авторами, а также валидации с современными моделями циркуляции атмосферы (см. Главы диссертации 3.2, 3.3 и 4.1).

Результаты диссертационной работы были представлены на Всероссийских научных конференциях 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).

Список публикаций по теме диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в международных рецензируемых журналах квартилей Q1 и Q2:

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. V. 126. e2021JE006899. DOI: 10.1029/2021JE006899. **(WOS, Scopus)**

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. V. 49. e2021GL097219. DOI: 10.1029/2021GL097219. **(WOS, Scopus)**

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. V. 127. e2022JE007286. DOI: 10.1029/2022JE007286. **(WOS, Scopus)**

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. V. 683. A206. DOI: 10.1051/0004-6361/202348685. **(WOS, Scopus)**

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 //

Личный вклад автора

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.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, трех приложений, списка сокращений и списка литературы. Работа содержит 135 страниц, 36 рисунков и 2 таблицы. Список литературы насчитывает 191 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обозначены основные положения, выносимые на защиту, описаны достоверность и апробация результатов, личный вклад автора, а также приведены структура и объем диссертации.

Глава 1 — обзорная, в ней содержится информация о ВГВ, причинах их образования и их характеристиках; также приведена история их открытия и исследования в атмосферах Земли и других планет (разделы 1.1–1.2).

Разделы 1.3 и 1.4 посвящены описанию атмосфер Марса и Сатурна соответственно. Приведены основные характеристики и особенности состава и структуры исследуемых атмосфер, описаны механизмы смены сезонов и климата на Марсе, влияние пылевых бурь. Рассмотрены параметры,

обуславливающие распространение ВГВ как в разреженной углекислотной атмосфере Марса, так и в протяженной водородно-гелиевой атмосфере Сатурна: температурный градиент и устойчивость атмосферы, шкала высот. Приведен обзор моделей глобальной циркуляции марсианской атмосферы, а также рассмотрены результаты предыдущих исследований ВГВ в атмосферах Марса и Сатурна.

Глава 2 — методическая, она посвящена описанию экспериментов и алгоритму обработки вертикальных профилей температуры/плотности для определения из них параметров ВГВ. Основное внимание уделено обработке данных для атмосферы Марса. Для Сатурна процедура аналогична, но используемые параметры численно отличаются (более подробно в Главе 5).

В разделе 2.1 описан метод солнечного (и звездного) просвечивания атмосферы (по-другому, затменный эксперимент), представлен обзор предшествующих затменных экспериментов в атмосфере Земли и других планет.

Раздел 2.2 посвящен описанию эксперимента по солнечному просвечиванию ACS с борта орбитального аппарата TGO. Спутник был отправлен к Марсу в 2016 году и начал научную программу наблюдений с марсианской орбиты в апреле 2018 года в рамках российско-европейской миссии “Экзомарс-2016”.

ACS представляет собой комплекс из трех спектрометров ближнего, среднего и теплового ИК-диапазонов спектра, предназначенных для исследования состава и структуры атмосферы Марса (Korablev et al., 2018). В диссертационной работе используются данные двух из них — эшелле-спектрометров ACS-NIR (Near-InfraRed) диапазона длин волн 0,7–1,7 мкм и ACS-MIR (Middle-InfraRed) диапазона 2,2–4,2 мкм. Спектрометры работают на орбите в режиме солнечного просвечивания атмосферы, измеряя спектры атмосферного пропускания с разрешающей способностью $\lambda/\Delta\lambda$, превышающую 20000. Это позволяет детектировать молекулярное поглощение в крайне тонких спектроскопических линиях различных газовых составляющих.

Для анализа вертикальных ВГВ были отобраны сеансы затмений в сильных полосах поглощения CO₂ — 1,58 мкм для ACS-NIR и 2,7 мкм для ACS-MIR. Количество таких наблюдений за период анализа данных с 2018 по 2024 гг. (3,5 MY) составило 12324 сеанса в полосе NIR и всего 1189 в полосе MIR, ввиду особенности селективности между дифракционными порядками у эшелле-спектрометра ACS-MIR. Высотные профили температуры и плотности CO₂, восстановленные по измеренным спектрам пропускания, простираются от 10 до 100 км в канале NIR (Fedorova et al., 2023) и от 20 до 160–180 км в канале MIR (Belyaev et al., 2022). Это делает наблюдения в более сильной полосе 2,7 мкм уникальными, несмотря на меньшую статистику, поскольку они чувствительны к поглощению CO₂ от тропосферы до верхней термосферы. Вертикальное разрешение анализируемых высотных профилей составляет 1–3 км.

В Таблице 1 приведены основные сравнительные характеристики в каналах NIR и MIR в применении к анализу ВГВ по высотным профилям температуры. Для сравнения также показан столбец в аналогичными параметрами эксперимента по звездному просвечиванию UVIS миссии “Кассини” на Сатурне, который описан в Главе 5.

Таблица 1. Сравнительные характеристики анализируемых в работе затменных экспериментов ACS-NIR и ACS-MIR на Марсе и UVIS-EUV на Сатурне.

	ACS-NIR	ACS-MIR	UVIS-EUV
Метод измерений	солнечное просвечивание	солнечное просвечивание	звездное просвечивание
Время измерений	апрель 2018 г. – декабрь 2022 г.	апрель 2018 г. – ноябрь 2024 г.	июнь – август 2017 г.
Диапазон длин волн и разрешающая способность $\lambda/\Delta\lambda$	0,73–1,6 мкм, $\lambda/\Delta\lambda=25000$	2,3–4,2 мкм, $\lambda/\Delta\lambda=25000$	56–118 нм, $\lambda/\Delta\lambda=47–430$
Измеряемый газ и его полоса поглощения	CO ₂ (1,58 мкм)	CO ₂ (2,7 мкм)	H ₂ (91,1–118 нм)
Вертикальное разрешение	0,5–2,5 км	0,5–2,5 км	~38 км
Диапазон высот регистрации ВГВ	от 10 до 100 км	от 20 до 160–180 км	от 600 до 1600 км (над уровнем давления 1 бар)
Диапазон атмосферных давлений	$10^{-3} - 10^{-8}$ бар	$10^{-4} - 10^{-11}$ бар	$10^{-7} - 10^{-10}$ бар
Статистика сеансов затмений	12324	1189	18

Раздел 2.3 содержит метод определения фоновой температуры из измеренных профилей и дальнейших расчет параметров ВГВ. Прежде всего, аргументируется выбор метода сглаживания измеренного вертикального профиля температуры $T(z)$ с целью разделения его на фоновый (средний) профиль $\bar{T}(z)$, не содержащий волновых возмущений, и профиль колебаний температуры $T'(z) = T(z) - \bar{T}(z)$. Проведено сравнение трех методов сглаживания: метода спектральной фильтрации с помощью фурье-анализа (где фоновая температура — нулевой коэффициент фурье-разложения), приближения скользящим полиномом и приближения полиномом большого порядка (Рисунок 1). По итогу исследования выбран метод скользящих полиномов, который представляет собой пошаговое вписывание полиномов третьей степени в скользящее окно размером 60 км. Для учета значимости

величин были использованы веса, рассчитанные из погрешностей измеренной температуры. На каждом шаге окно сдвигается снизу вверх на определенную высоту (эмпирически был выбран шаг 7 км), затем процедура повторяется для сдвига сверху вниз. После, перекрывающиеся значения полиномов усредняются, и полученный результат сглаживается скользящим средним.

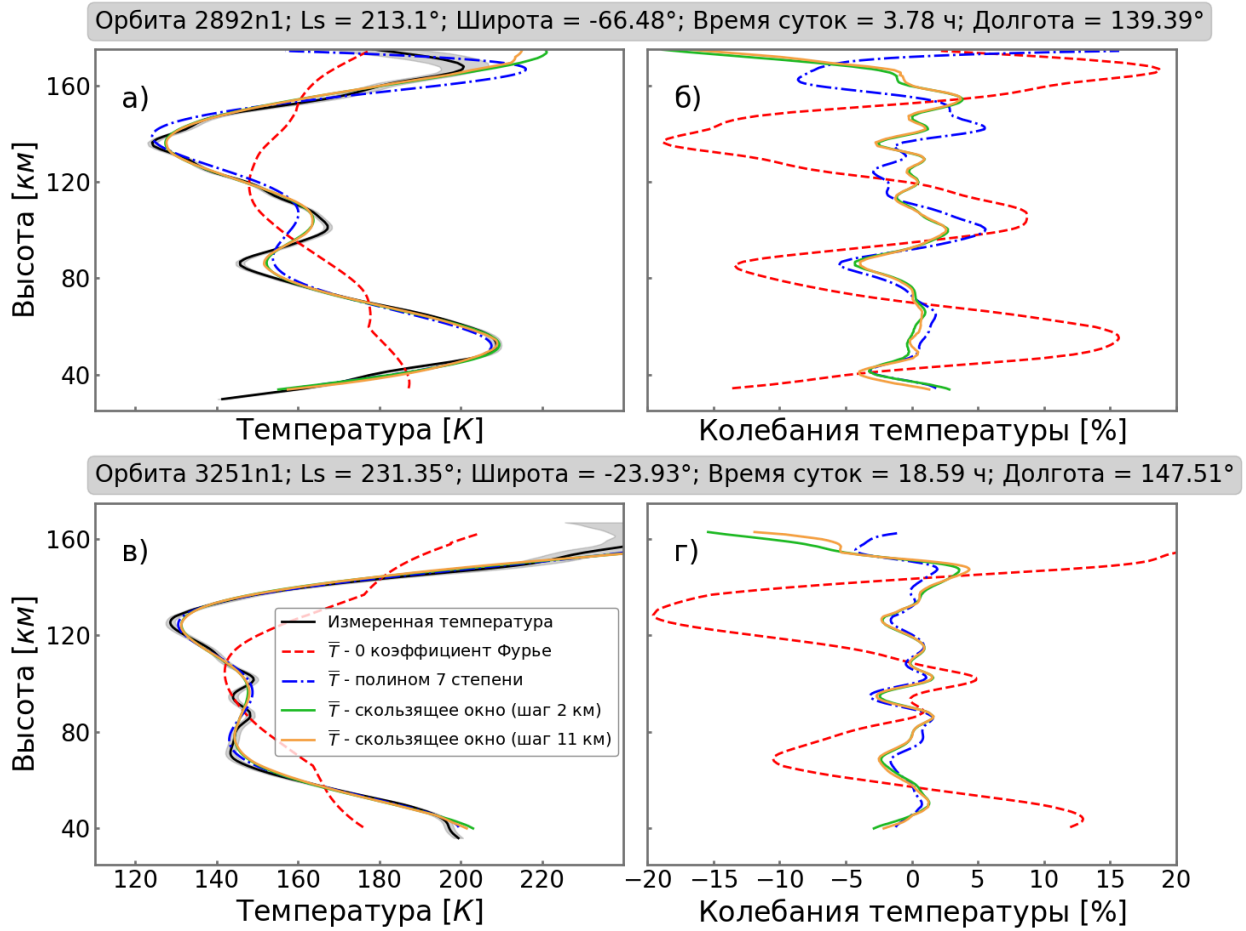


Рисунок 1. Разделение измеренного профиля температуры на фоновую и волновую компоненты для двух орбит с разной волновой структурой. Левая колонка (а, в) отображает фоновую температуру $\bar{T}$, правая (б, г) — относительные флуктуации температуры $T'/\bar{T}$ (в %). В легенде обозначены методы построения фоновой температуры. Серая закрашенная область соответствует ошибкам индивидуальных измерений.

Далее приводится расчет параметров ВГВ.

Частота Брента-Вяйсяля характеризует конвективную устойчивость атмосферы и ее квадрат равен:

$$N^2 = \frac{g}{\bar{T}} \left(\frac{d\bar{T}}{dz} + \frac{g}{c_p} \right),$$

где g — ускорение свободного падения, а c_p — удельная теплоёмкость при постоянном давлении, а величина g/c_p представляет собой адиабатический вертикальный градиент температуры и для Марса составляет $4,5 \text{ К} \cdot \text{км}^{-1}$

(0,714 K·км⁻¹ для Сатурна). При $N^2 < 0$ атмосфера становится конвективно неустойчивой и не поддерживает распространение ВГВ.

Амплитуда волн $|T'|$ определяется как огибающая разности наблюдаемой и фоновой температуры. Она рассчитывается с помощью разложения Фурье в каждом скользящем окне размером 60 км и суммирования вкладов всех гармоник.

Потенциальная энергия ВГВ на единицу массы определяется как:

$$E_p = \frac{1}{2} \left(\frac{g}{N} \right)^2 \left(\frac{|T'|}{\bar{T}} \right)^2,$$

а абсолютное значение вертикального потока горизонтального импульса на единицу массы:

$$F = \sum_{k_h, m} \frac{1}{2} \cdot \frac{k_h}{m} \left(\frac{g}{N} \right)^2 \left(\frac{|T'_{k,m}|}{\bar{T}} \right)^2,$$

Здесь k_h и m — это горизонтальное и вертикальное волновые числа соответственно, $|T'_{k,m}|$ — амплитуда соответствующей гармоники. Для вычисления потока проводится суммирование по всем k_h и m . В настоящем исследовании используемые вертикальные профили плотности и температуры измеряются в течение короткого промежутка времени и не содержат информации о периоде или горизонтальной длине волны. Характеристика k_h была выбрана с учетом того, что при солнечном просвечивании на Марсе самый плотный атмосферный слой в тангенциальной точке составляет 400–500 км по горизонтальной составляющей, следовательно, гармоники с более короткими длинами волн остаются пространственно неразрешенными. В итоге, была выбрана горизонтальная длина волны $\lambda_h = 2\pi / k_h = 300$ км, принятая в моделях циркуляции (Yiğit et al., 2018). С другой стороны, согласно данным ACS, Фурье-анализ вертикальных температурных возмущений показывает преобладание ВГВ с вертикальной длиной 10–35 км.

При разрушении ВГВ передают импульс окружающему атмосферному потоку, вызывая его ускорение или замедление. Это воздействие характеризуется ускорением ВГВ:

$$a_h = \frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{d\bar{\rho}F}{dz},$$

где $\bar{\rho}$ — фоновая плотность атмосферы; индекс h указывает на горизонтальное направление ускорения.

Далее приводится анализ параметров ВГВ на примере одного сеанса затмения, соответствующего одной паре высотных профилей (температуры и плотности).

Раздел 2.4 посвящен анализу совместных наблюдений каналами ACS-NIR и MIR, поля зрения которых сонаправлены. Несмотря на более широкий высотный охват MIR (20–180 км против 10–100 км для NIR), количество

сеансов затмений NIR примерно в 10 раз больше. Поэтому используются данные обоих спектрометров. Более чем в 90% случаев одновременных наблюдений профили температуры согласуются с точностью до 5–10 К (Belyaev et al., 2022; Starichenko et al., 2024). При этом параметры ВГВ могут различаться, что связано с разницей высотных диапазонов профилей, особенно в области 80–100 км, где алгоритм сглаживания данных ACS-NIR может быть неустойчивым. Таким образом, данные NIR используются для дополнения данных MIR при отсутствии одновременных измерений.

В Главе 3 анализируются сезонные и широтные распределения параметров ВГВ в атмосфере Марса, а также рассмотрено влияние глобальной пылевой бури.

В разделе 3.1 показаны сезонные вариации следующих параметров ВГВ: относительных колебаний температуры, потенциальной энергии, ускорения волн и квадрата частоты Брента-Вяйсяля. Первые три параметра характеризуют активность ВГВ. Полученные результаты показывают ее увеличение в зимние периоды: зимой в Южном полушарии (сезон афелия) активность ВГВ опускается в более низкие слои атмосферы (50–125 км), тогда как зимой в Северном полушарии (сезон перигелия) — в более высокие (70–130 км).

В разделе 3.2 приведены широтные распределения параметров ВГВ для четырех различных сезонов на Марсе, где $L_s=0^\circ$, 180° представляют собой сезоны весеннего и осеннего равноденствия (для Северного полушария) соответственно, а $L_s=90^\circ$, 270° — летнего и зимнего солнцестояния.

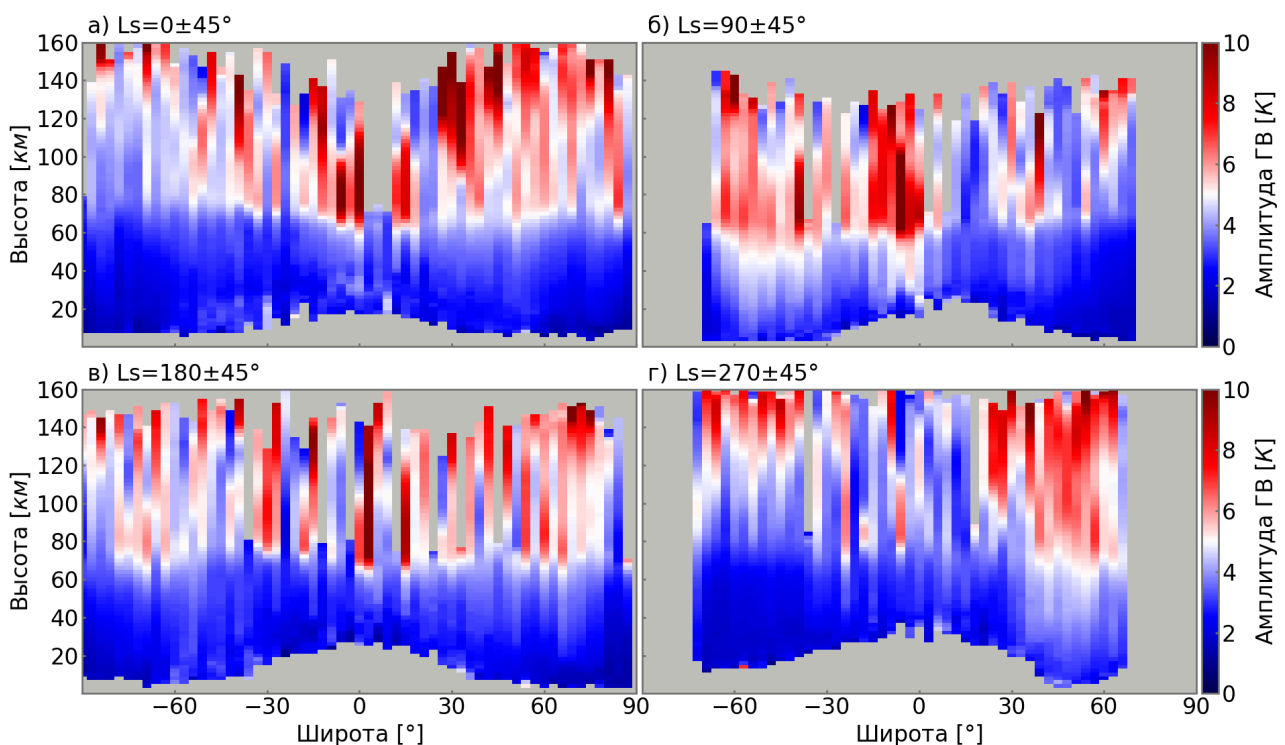


Рисунок 2. Широтно-высотные распределения амплитуды ВГВ на Марсе для четырех сезонов. Из анализа исключен период глобальной пылевой бури.

Подобное распределение амплитуды ВГВ представлено на рисунке 2. Амплитуда растет с высотой и достигает максимальных значений 10 К на высотах 80–150 км в зависимости от сезона. В среднем наибольшая амплитуда наблюдается в регионе мезопаузы (100–120 км). В период равноденствий повышенная активность волн сосредоточена в низких широтах на высотах от 80 км, тогда как в период солнцестояний активность больше проявлена в зимнем полушарии.

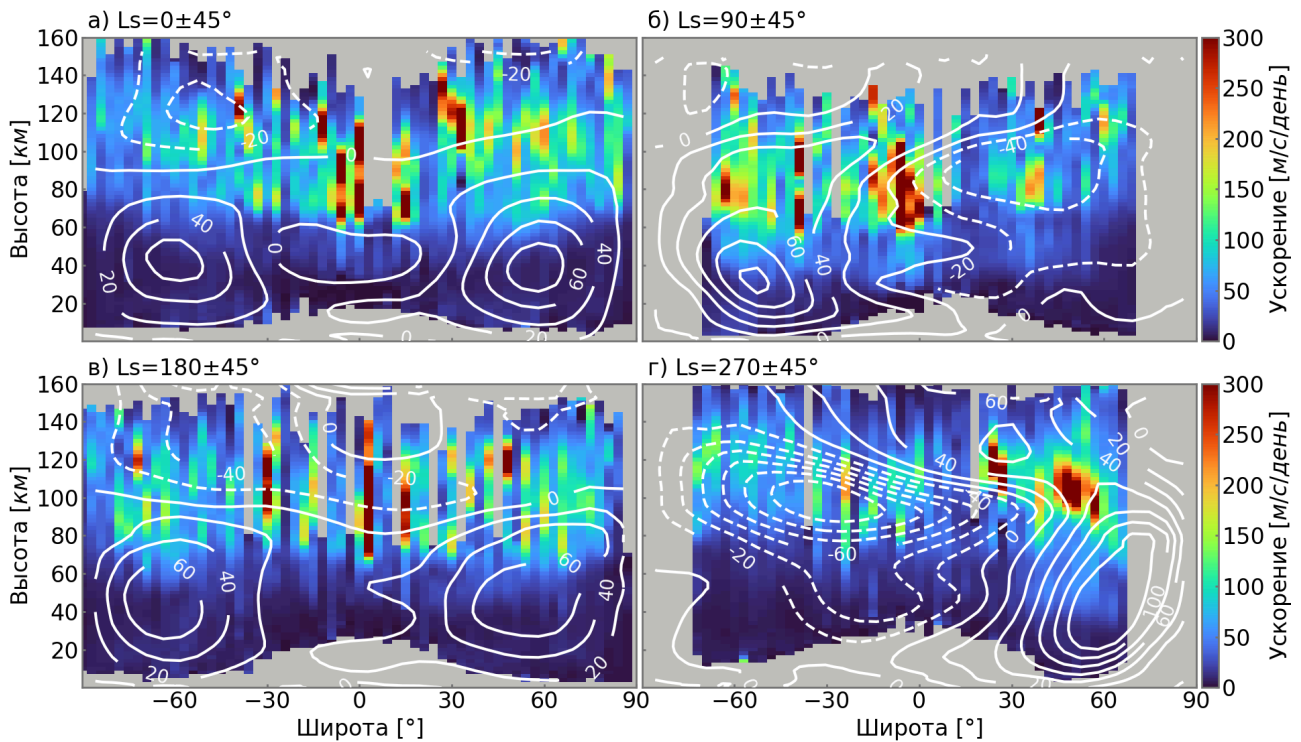


Рисунок 3. То же самое, что и на Рисунке 2, но для ускорения ВГВ. Белыми контурными линиями изображена средняя скорость зонального ветра, построенная из модели MAOAM MGCM. Сплошные и штриховые линии обозначают западный и восточный ветра, соответственно. Из анализа исключен период глобальной пылевой бури.

Рисунок 3 представляет зональное ускорение ВГВ (цветовая шкала) и скорость среднего зонального ветра (белые контурные линии), воссозданную с помощью марсианской модели глобальной циркуляции Martian Atmosphere Observation and Modeling (MAOAM) Martian general circulation model (MGCM; Hartogh et al., 2005) за MY34 и MY35 и усредненную соответственно наблюдениям. Регионы с большим ускорением ВГВ обычно соответствуют зонам слабого зонального ветра, что согласуется с механизмом распространения и диссипации волн. При приближении фазовой скорости волны c к скорости фонового ветра $\bar{u}$ внутренняя фазовая скорость $|c - \bar{u}|$ уменьшается, что приводит к подавлению волн, распространяющихся по направлению потока. Волны с ($c > \bar{u}$) или распространяющиеся против ветра могут проникать в более высокие слои, где их амплитуда возрастает до достижения условия насыщения,

когда амплитуда возмущений скорости ветра $|u'|$, вызванных волнами, достигает значения внутренней фазовой скорости. Поэтому в областях слабого ветра для разрушения волн требуется меньшая амплитуда возмущений. На рисунке 3 это проявляется в виде повышенного ускорения ВГВ, например, на панели (в) на высоте около 100 км, где скорость ветра близка к нулю.

Исследование сезонных и широтных вариаций квадрата частоты Брента-Вяйсяля, показывает, что разрушение волн, соответствующее более высоким значениям ускорения, происходит на высотах выше 40–60 км в областях с низкими значениями квадрата частоты Брента-Вяйсяля. Это может соответствовать разрушению волн в слоях атмосферы с относительно низкой устойчивостью. При этом, области максимального ускорения, превышающего $200 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$, наиболее выражены на высотах мезопаузы, 100–120 км (Рисунок 3). Это соответствует областям, в которых наблюдается рост квадрата частоты Брента-Вяйсяля. Данная особенность может свидетельствовать о разрушении волн вследствие конвективной неустойчивости, когда амплитуда волны достигает предельного значения, препятствующего ее дальнейшему распространению (см. Главу 4.2).

В разделе 3.3 исследуется влияние глобальной пылевой бури на активность ВГВ. Глобальная пылевая буря в МУ34 произошла в промежутке $L_s=188^\circ\text{--}250^\circ$, соответствующему осенне-зимнему сезону Северного полушария и периоду, близкому к перигелию планеты (Montabone et al., 2020). На рисунке 4 сравнивается потенциальная энергия ВГВ в этот период с аналогичными данными для МУ35, МУ36 и МУ37, когда глобальной пылевой бури не наблюдалось. Панели соответствуют трем широтным диапазонам, обозначенным на рисунке. Каждый профиль является усреднением всех отдельных профилей, входящих в широтный интервал. Для проверки статистической значимости разницы между двумя профилями был проведен тест Стьюдента для каждой ячейки высоты. Такая разница наблюдается на высотах, где стандартные ошибки профилей (красная и голубая области вокруг профилей) не перекрываются.

На рисунке 4 показано, что в северных широтах потенциальная энергия ВГВ во время бури увеличивается на высотах > 80 км и достигает максимальных значений $300 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ (Рисунок 4в). Похожий результат показало моделирование глобальной циркуляции атмосферы на больших высотах (Kuroda et al., 2020, Yiğit et al., 2021a). В южных широтах (Рисунок 4а), напротив, активность волн увеличивается на высотах < 80 км и достигает $100 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$. Данный результат ранее не был зафиксирован в наблюдениях или воспроизведен моделями.

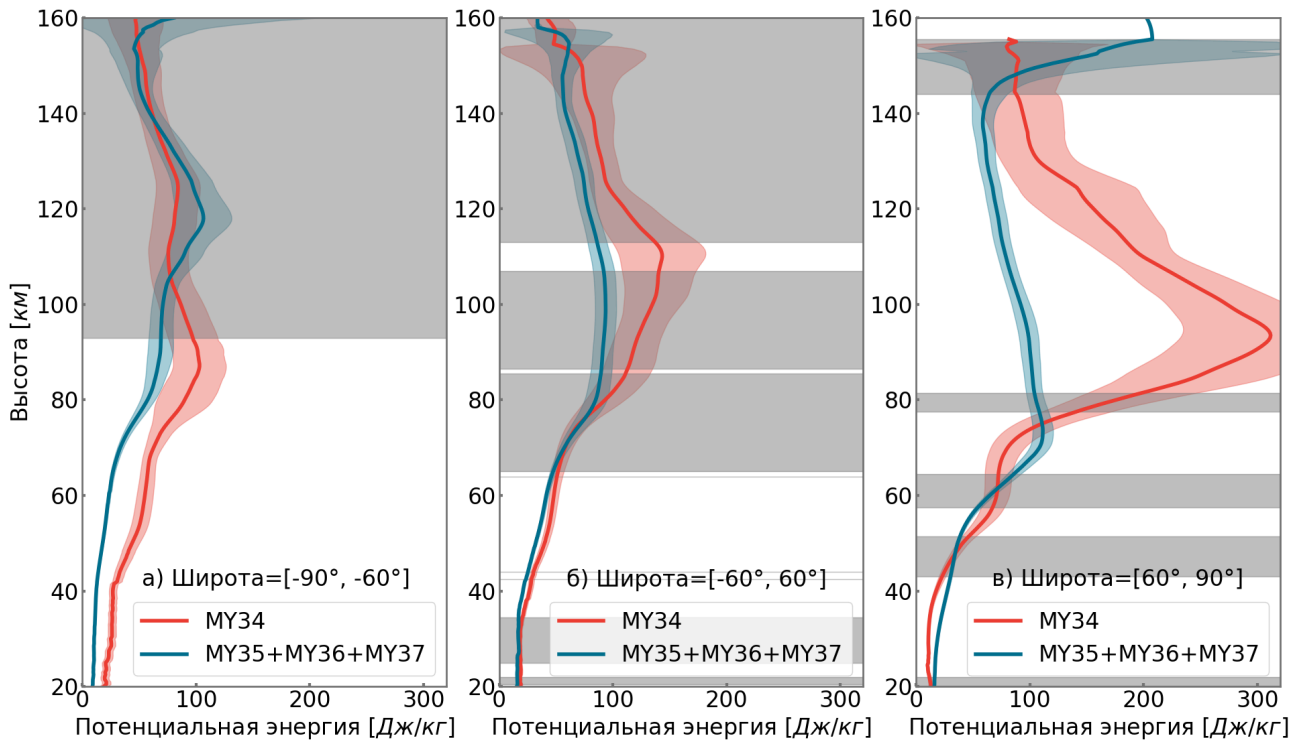


Рисунок 4. Высотные профили потенциальной энергии E_p ВГВ, усредненные в трех различных широтных интервалах для периода глобальной пылевой бури МУ34 ($L_s=188^\circ-250^\circ$, красные линии) и для соответствующего периода с низкой пылевой активностью МУ35, МУ36 и МУ37 (синие линии). Полупрозрачными красным и синим цветом обозначена стандартная ошибка средних профилей. Белые регионы обозначают высоты, на которых разница между средними потенциальными энергиями за пылевой и беспылевой периоды является статистически значимой (с уровнем значимости 5% согласно тесту Стьюдента).

Глава 4 посвящена исследованию конвективной неустойчивости как возможного механизма разрушения ВГВ в атмосфере Марса.

Раздел 4.1 — вводный, в нем представлены предыдущие исследования, обнаружившие обратную зависимость между относительными колебаниями температуры и фоновой температурой. Подобная отрицательная корреляция может свидетельствовать о том, что конвективная неустойчивость является доминирующим механизмом разрушения ВГВ.

В разделе 4.2 представлен анализ данных, основанный на соотношении для одной гармоники, справедливом в случае разрушения ГВ вследствие конвективной неустойчивости (Fritts et al., 1988):

$$\frac{|T'|}{\bar{T}} = \frac{|u'|}{|c - \bar{u}|} \frac{N^2}{mg}, \quad (1)$$

Когда $|u'|$ достигает значения $|c - \bar{u}|$, увеличивающая диссипация волн останавливает рост $|u'|$, делая соотношение $|u'|/|c - \bar{u}| \approx 0,7$ постоянным (Fritts et al., 1988). Уравнение 1 представляет зависимость между амплитудой относительных колебаний температуры и квадратом частоты Брента-Вяйсяля в условии насыщения волн. Если вертикальный градиент $d\bar{T}/dz$ мал, он может быть отброшен в уравнении для квадрата частоты Брента-Вяйсяля, создавая

обратную зависимость между относительными колебаниями амплитуды и фоновой температурой.

Исследование данных зависимостей представлено на рисунке 5. Для этого, а также следующего рисунка данные были объединены в четыре группы, соответствующие четырем сезонам года на Марсе. Размер ячеек по высоте составляет 5 км. Зависимости от широты выявлено не было, поэтому каждая панель представляет статистику по всей совокупности широт. Наибольшие значения амплитуд колебаний температуры наблюдаются в районе мезопаузы, особенно в регионе низких температур ($T < 140$ K) или же наибольших значений квадрата частоты Брента-Вяйсяля ($N^2 > 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-2}$). В этих же областях обнаружена антикорреляция между фоновой температурой и амплитудой колебаний волн. Однако, в области низких высот, а также высоких температур данная зависимость исчезает. Все это говорит о том, что конвективная неустойчивость не является главным механизмом ослабления ВГВ в термосфере, хотя в области мезопаузы ее роль может быть определяющей.

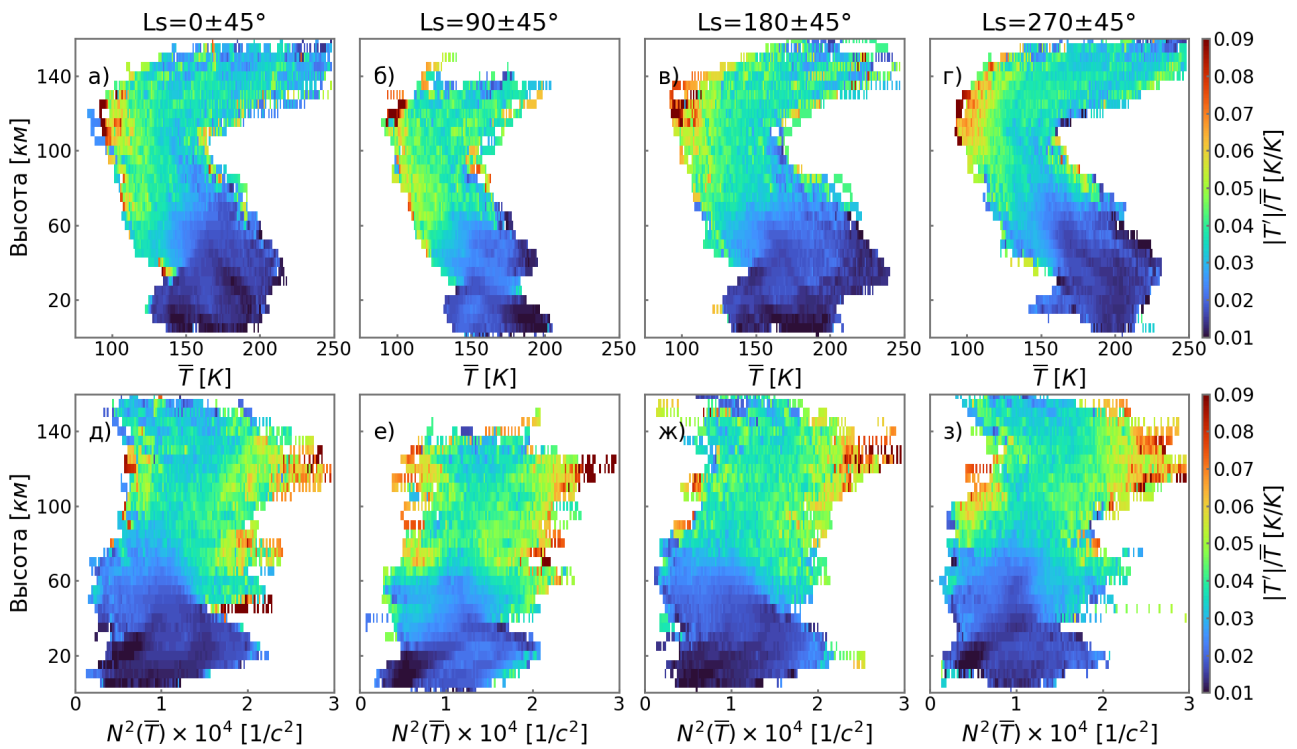


Рисунок 5. Верхний ряд (а–г): амплитуда относительных колебаний температуры в зависимости от фоновой температуры. Средний ряд (д–з): амплитуда относительных колебаний температуры в зависимости от квадрата частоты Брента-Вяйсяля. Колонками разделены сезоны года на Марсе.

Для дальнейшего анализа разрушения ВГВ используется величина суммарного потока импульса $\bar{\rho}F$, где $\bar{\rho}$ — фоновая плотность. При отсутствии диссипации волн эта величина сохраняется с изменением высоты. С учетом диссипации выражение принимает вид $d\bar{\rho}F/dz = -\beta\bar{\rho}F$, что после

дифференцирования и нормирования на F принимает вид (см. Medvedev & Yiğit, 2019, уравнение 6).

$$\frac{dF}{Fdz} = -\frac{d\bar{\rho}}{\bar{\rho}dz} - \beta \equiv \frac{1}{H} - \beta, \quad (2)$$

где β — коэффициент вертикального затухания волн, а H — шкала высот. Величина $1/H$ характеризует рост амплитуды волн вследствие уменьшения плотности атмосферы, тогда как β описывает их диссипацию под действием совокупности всех возможных механизмов, включая конвективную неустойчивость, процессы молекулярной диффузии, теплопроводности, фильтрацию волн ветром. Уравнение (2) позволяет вычислить коэффициент β , тогда как остальные параметры можно получить из наблюдений.

Результаты подобного анализа для 4 сезонов года представлены на рисунке 6. Темпы роста волн $1/H$ варьируются от 0,1 до 0,175 км⁻¹, тогда как разрушение волн имеет более широкие рамки значений от 0 до 0,3 км⁻¹. Обе величины достигают наибольших своих значений в регионе мезопаузы, причем разрушение волн значительно превышает величины их роста, таким образом делая мезопаузу областью наибольшей диссипации волн. В области же низких высот (до 100 км) и высоких значений температуры разрушение волн ослабевает, $1/H$ превышает β , что позволяет волнам расти.

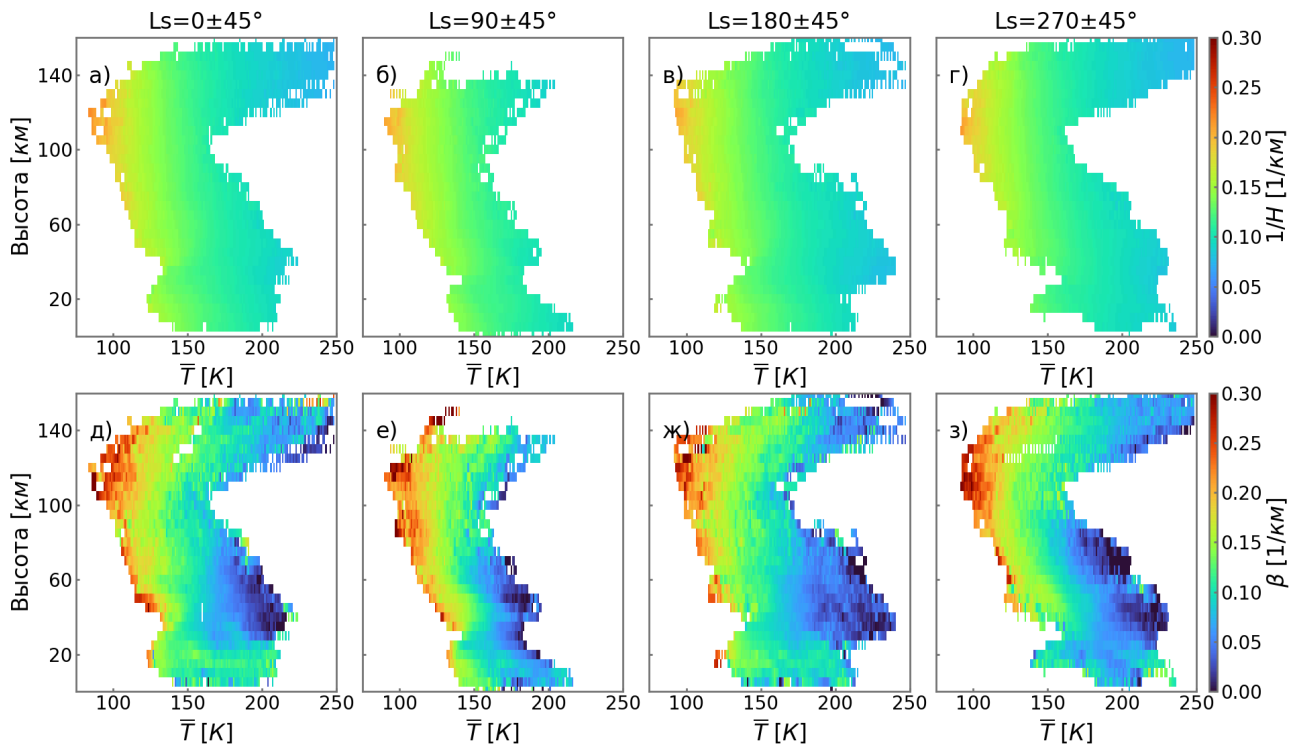


Рисунок 6. Верхний ряд (а–г): обратная шкала высот $1/H$ в зависимости от фоновой температуры. Нижний ряд (д–з): коэффициент вертикального затухания волн β в зависимости от фоновой температуры. Колонками разделены сезоны года на Марсе.

Стоит отметить, что коэффициент β обратно пропорционален фоновой температуре на всех высотах выше 20 км (коэффициент корреляции Пирсона принимает значения от $-0,8$ до -1).

Глава 5 посвящена исследованию ВГВ в атмосфере Сатурна по данным эксперимента по звездному просвечиванию прибором UVIS миссии “Кассини”.

Раздел 5.1 посвящен описанию эксперимента UVIS, основные характеристики которого представлены в Таблице 2.1. В работе исследуются данные, полученные каналом экстремального УФ-диапазона UVIS-EUV в диапазоне длин волн 91,1–118 нм (Esposito et al., 2004). Для данного анализа были использованы 18 вертикальных профилей температуры с вертикальным разрешением 38 км, полученных во время последнего этапа миссии “Кассини” — Grand Finale. Исследуемый диапазон высот составляет от 600 до 1600 км над уровнем давления 1 бар.

В разделе 5.2 обозначены различия в процедуре сглаживания вертикальных профилей температуры для Марса и Сатурна. Если в случае Марса неравномерный профиль температуры дискретизировался на эквидистантную сетку с шагом 0,5 км, то для Сатурна шаг был выбран равным 5 км из-за большего масштаба профиля и атмосферы Сатурна в целом. Также были эмпирически подобраны другие интервалы окна усреднения и шага. Для Марса, как было описано выше, они составляют 60 км и 7 км соответственно, для Сатурна же они равны 600 и 110 км. Горизонтальная длина волны была принята равной 6400 км — горизонтальной протяженности наиболее плотного слоя атмосферы в тангенциальной точке. В результате Фурье-анализа были оценены вертикальные длины волн: их значения составляют от 120 до 330 км.

В разделе 5.3 представлены широтные распределения параметров ВГВ в термосфере Сатурна (Рисунок 7). Рассматриваемые параметры включают фоновую температуру (180–500 К), амплитуду ВГВ (10–60 К), потенциальную энергию ВГВ на единицу массы (0–60000 Дж·кг⁻¹), вертикальный поток горизонтального импульса на единицу массы (0–2000 м²·с⁻²), ускорение (0–500 м·с⁻¹·сут⁻¹) и меридиональную скорость переноса (0–60 м·с⁻¹). Полученные значения меридиональной скорости примерно в 10 раз превышают соответствующие значения для Земли и Марса.

Раздел 5.4 посвящен влиянию ускорения ВГВ на меридиональный перенос. В статье Brown et al. (2022) автор вычисляет меридиональную и зональную компоненты скорости ветра с помощью измененного уравнения геострофического баланса (modified geostrophy) (Larsen & Walterscheid, 1995). Этот подход учитывает силу Кориолиса, меридионального градиента давления и аврорального ионного торможения (auroral ion drag). В диссертационной работе была также добавлена составляющая, отвечающая за наличие ВГВ. Наибольшее изменение, при добавлении влияния ВГВ, претерпевает меридиональная компонента скорости ветра. Скорость ветра, направленного к экватору, увеличивается с 34 м·с⁻¹ без учета влияния ВГВ до 57 м·с⁻¹ при его учете в Северном полушарии и с 34 до 87 м·с⁻¹ — в Южном. Оказываемый ВГВ эффект приводит к большему переносу тепла и вещества от полярных регионов к экваториальным.

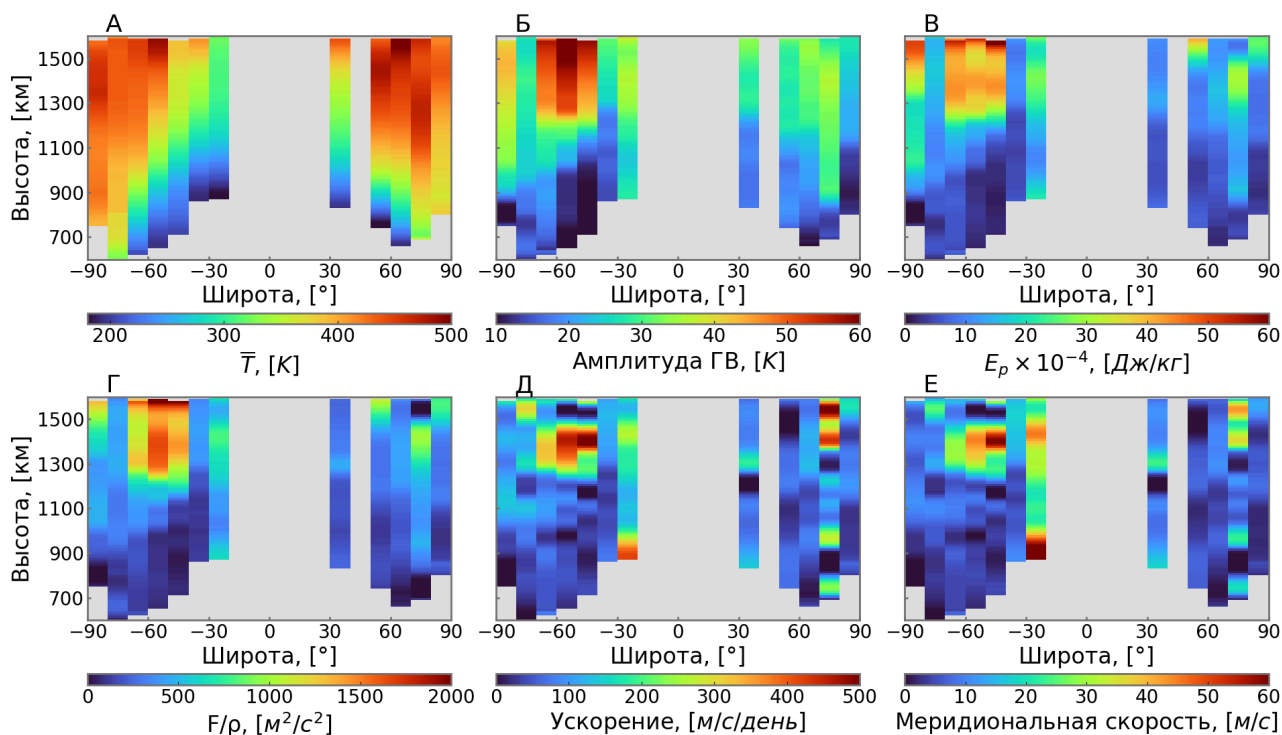


Рисунок 7. Широтно-высотные распределения в термосфере Сатурна для: а) фоновой температуры, б) амплитуды ВГВ, в) потенциальной энергии ВГВ на единицу массы, г) вертикального потока горизонтального импульса на единицу массы, д) ускорения ВГВ, е) средней меридиональной скорости потока. Размер ячейки по широте — 10° .

Результаты исследования ВГВ в атмосфере Сатурна представлены в разделе 5.5. Показано, что усиление меридионального переноса, обусловленного ВГВ, может способствовать переносу энергии из полярных областей в экваториальные и объяснять “проблему энергетического кризиса” Сатурна — расхождение в несколько сотен кельвинов между наблюдаемой и рассчитанной по радиационным моделям температурой верхней атмосферы планет-гигантов (O'Donoghue & Stallard, 2022).

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

В **приложениях А и Б** приведены методы восстановления профилей плотности и температуры по спектрам атмосферного пропускания, измеренным ACS и UVIS соответственно. В **приложении В** дана процедура коррекции вертикального потока горизонтального импульса для случаев больших случайных отклонений величины потока на низких высотах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Cooray A. R., Elliot J. L., Bosh A. S., Young L. A., Shure M. A. Stellar occultation observations of Saturn's north-polar temperature structure // *Icarus*. 1998. V. 132. P. 298-310. doi: 10.1006/icar.1998.5901
- Esposito L. W., Barth C. A., Colwell J. E. et al. The Cassini ultraviolet imaging spectrograph investigation // *Space Science Reviews*. 2004. V. 115(1-4). 299-361. doi: 10.1007/s11214-004-1455-8

- Fedorova A. A. et al.* Water and thermal structure of the Martian atmosphere from ACS/TGO observations // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2023. V. 128. e2022JE007348. doi: 10.1029/2022JE007348
- Fritts D. C., Alexander J. M.* Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // *Reviews of Geophysics*. 2003. V. 41(1). 1003. doi: 10.1029/2001RG000106
- Fritts D. C., Tsuda T., Kato S., Sato T., Fukao S.* Observational evidence of a saturated gravity wave spectrum in the troposphere and lower stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 1988. V. 45. P. 1741–1759. doi: 10.1175/1520-0469(1988)045<1741:OEOASG>2.0.CO;2
- Gavrilov N. M., Kshevetskii S. P., Koval A. V.* Propagation of non-stationary acoustic-gravity waves at thermospheric temperatures corresponding to different solar activity // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2018. V. 172. P. 100–106. doi: 10.1016/j.jastp.2018.03.021
- Gubenko V. N., Kirillovich I. A., Pavelyev A. G.* Characteristics of internal waves in the Martian atmosphere obtained on the basis of an analysis of vertical temperature profiles of the Mars Global Surveyor mission // *Cosmic Research*. 2015. V. 53(2). P. 141–151. doi: 10.1134/S0010952515020021
- Hartogh P., Medvedev A. S., Kuroda T. et al.* Description and climatology of a new general circulation model of the Martian atmosphere // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, E11008, doi:10.1029/2005JE002498.
- Hinson D. P., Tyler G. L.* Internal gravity waves in Titan's atmosphere observed by Voyager radio occultation // *Icarus*. 1983. V. 54. P. 337–352. doi: 10.1016/0019-1035(83)90202-6
- Korablev O., Montmessin F., Trokhimovskiy A. et al.* The atmospheric chemistry suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. 7. doi: 10.1007/s11214-017-0437-6
- Koskinen T. T., Sandel B. R., Yelle R. V. et al.* Saturn's variable thermosphere from Cassini/UVIS occultations // *Icarus*. 2015. V. 260. P. 174–189. doi: 10.1016/j.icarus.2015.07.008
- Kuroda T., Medvedev A. S., Yiğit E.* Gravity wave activity in the atmosphere of Mars during the 2018 global dust storm: simulations with a high-resolution model // *J. Geophys. Res. Planets*. 2020. V. 125. e2020JE006556. doi: 10.1029/2020JE006556
- Larsen M. F., Walterscheid R. L.* Modified geostrophy in the thermosphere // *Journal of Geophysical Research*. 1995. V. 100(A9). P. 17321–17330. doi: 10.1029/95JA00137
- Lindzen R. S.* Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1981. V. 86(C10). P. 9707–9714. doi: 10.1029/JC086iC10p09707
- Medvedev A. S., Yiğit E.* Gravity waves in planetary atmospheres: their effects and parameterization in global circulation models // *Atmosphere*. 2019. V. 10. P. 531. doi: 10.3390/atmos10090531
- Montabone L., Spiga A., Kass D. M. et al.* Martian year 34 column dust climatology from Mars Climate Sounder observations: reconstructed maps and model simulations // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2020. V. 125. e2019JE006111. doi: 10.1029/2019JE006111

- Nakagawa H., Terada N., Jain S. K. et al.* Vertical propagation of wave perturbations in the middle atmosphere on Mars by MAVEN/IUVS // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2020. V. 125. e2020JE006481. doi: 10.1029/2020JE006481
- O'Donoghue J., Stallard T.* What the upper atmospheres of giant planets reveal // *Remote Sensing*. 2022. V. 14(24). Article 6326. doi: 10.3390/rs14246326
- Tellmann S., Häusler B., Hinson D. P. et al.* Small-scale temperature fluctuations seen by the VeRa Radio Science Experiment on Venus Express // *Icarus*. 2012. V. 221. P. 471–480. doi: 10.1016/j.icarus.2012.08.023
- Vals M., Spiga A., Forget F. et al.* Study of gravity waves distribution and propagation in the thermosphere of Mars based on MGS, ODY, MRO and MAVEN density measurements // *Planetary and Space Science*. 2019. V. 178. Article 104708. doi: 10.1016/j.pss.2019.104708
- Vervack R. J. Jr., Moses J. I.* Saturn's upper atmosphere during the Voyager era: reanalysis and modeling of the UVS occultations // *Icarus*. 2015. V. 258. P. 135–163. doi: 10.1016/j.icarus.2015.06.007
- Yelle R. V., Serigano J., Koskinen T. T. et al.* Thermal structure and composition of Saturn's upper atmosphere from Cassini/Ion Neutral Mass Spectrometer measurements // *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. P. 10,951–10,958. doi: 10.1029/2018GL078454
- Yiğit E., Medvedev A. S., Hartogh P.* Influence of gravity waves on the climatology of high-altitude Martian carbon dioxide ice clouds // *Annales Geophysicae*. 2018. V. 36(6), P. 1631–1646. doi:10.5194/angeo-36-1631-2018
- Yiğit E., Medvedev A. S., Benna M., Jakosky B. M.* Dust storm-enhanced gravity wave activity in the Martian thermosphere observed by MAVEN and implication for atmospheric escape // *Geophys. Res. Lett.* 2021a. V. 48. e2020GL092095. doi: 10.1029/2020GL092095
- Young L. A., Yelle R. V., Young R., Seiff A., Kirk D. B.* Gravity waves in Jupiter's thermosphere // *Science*. 1997. V. 276(5309). P. 108–111. doi: 10.1126/science.276.5309.108