

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

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

**Официальные оппоненты:**

**Ведущая организация:** Физический факультет  
Санкт-Петербургского государственного  
университета

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г. в \_\_\_ часов на заседании  
Диссертационного совета Д 24.1.481.01 при Институте космических  
исследований РАН по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32,  
Институт космических исследований РАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института космических  
исследований РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Ткаченко А.Ю.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Внутренние гравитационные волны (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 по наблюдениям, так и в моделях циркуляции, что отражено в многочисленных работах (например, Lindzen, 1981; Fritts & Alexander 2003; Yigit & Medvedev 2015; Gavrilov et al., 2018). ВГВ также наблюдаются в атмосферах других планет и некоторых их спутников: на Венере (Young et al. 1987, Tellmann et al., 2012), Юпитере (Young et al. 1997), Сатурне (Brown et al. 2022), Титане (Hinson & Tyler 1983, Lorenz et al., 2014). Детальный обзор по изучению волн в планетных атмосферах приведен в статье (Medvedev & Yigit, 2019). На Марсе, несмотря на его относительно разреженную атмосферу, внутренние гравитационные волны периодически регистрировались как контактными методами при спусках и аэро-торможении аппаратов (Seiff & Kirk, 1976; 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 активности ВГВ и их влияния на атмосферу планет, исследуют такие параметры ВГВ, как их амплитуду, потенциальную энергию, ускорение, вертикальный поток горизонтального импульса, а также частоту Брента-Вяйсяля, характеризующую стабильность атмосферы и возможность в ней распространения ВГВ. Данные величины можно получить из анализа вертикального профиля температуры атмосферы планеты, измеренного с высотным разрешением не хуже, чем половина характерной длины ГВ. 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 давали температурные профили лишь в ограниченном диапазоне высот. Например, радио затмения осуществлялись в тропосфере (Gubenko et al., 2015), звездное просвечивание ультрафиолетового диапазона чувствительно к высотам верхней мезосферы и термосферы (Nakagawa et al., 2020), равно как и эксперименты по аэро-торможению. По этим данным определялись параметры ВГВ, однако, изучить их распределение вдоль всего столба атмосферы не представлялось возможным. 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 накладывало ограничения на существующие модели циркуляции в части влияния ВГВ на вертикальный перенос воздушных масс.

Ситуация для Марса поменялась с началом российского эксперимента по солнечному просвечиванию Atmospheric Chemistry Suite (ACS), работающего на борту аппарата Trace Gas Orbiter (TGO) с апреля 2018 г. по настоящее время. ACS, в числе многочисленных задач, измеряет спектры пропускания атмосферы в сильных линиях поглощения CO<sub>2</sub>, 1.58 мкм и 2.7 мкм, в результате чего восстанавливаются вертикальные профили атмосферной 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 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 носит уникальный характер по покрытию данных и могла бы существенно улучшить современные модели циркуляции атмосферы. Дополнительной мотивацией изучения ВГВ на Марсе стала возможность исследовать их активность в период глобальной пылевой бури, поскольку эксперимент ACS застал это событие в июне 2018 г. (середина 34го марсианского года).

На Сатурне первые детальные профили температуры, подходящие для анализа ВГВ, стали доступны в результате звездного просвечивания в УФ диапазоне с борта аппарата Cassini (Brown et al. 2022). На финальной стадии миссии (Grand Finale) были получены высотные профили, охватывающие протяженную мезосферу и термосферу планеты (600-1600 км над уровнем давления 1 бар). Для обоих массивов данных (с Марса и Сатурна) первоначальной задачей стала разработка универсального алгоритма сглаживания (усреднения) каждого индивидуального профиля температуры, чтобы выявить волновые флуктуации и соответствующие параметры ВГВ. При этом, ввиду большого охвата высот, применение единого полинома для сглаживания по всему профилю (как в работе Nakagawa et al., 2020) оказалось неприемлемым.

Данная диссертационная работа включает в себя универсальную процедуру обработки и сглаживания высотных профилей температуры, которая позволяет дальнейшее вычисление параметров ВГВ на Марсе и Сатурне, определение этих параметров и их пространственно-временные распределения, выражающие активность ВГВ и их рост и обрушение в атмосфере, выводы о возможном влиянии ВГВ на планетные атмосферы.

### Цели и задачи работы

Целью настоящей диссертационной работы является исследование активности ВГВ в атмосферах Марса, Сатурна. Данную цель можно разделить на несколько пунктов:

- 1) Получение параметров ВГВ;
- 2) Исследование данных параметров в различных пространственно-временных координатах.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- 1) Разработка и реализация алгоритма восстановления среднего профиля температуры (а также плотности), с помощью которого идет дальнейшее определение параметров ВГВ;

- 2) Построение пространственно-временных карт параметров ВГВ, характеризующих их активность по высоте в атмосфере, географии и сезонам;
- 3) Валидация результатов с другими исследованиями, включая модели циркуляции атмосферы.

#### Научная новизна

- 1) Впервые был разработан и применен единый метод восстановления среднего вертикального профиля температуры/плотности в широком диапазоне высот, который позволил выявить активность ВГВ в атмосферах Марса и Сатурна;
- 2) Впервые получено распределение параметров ВГВ по высотам тропосферы, мезосферы и термосферы Марса (от 20 до 160 км) за 7 лет наблюдений (3.5 марсианских года), охватывая все марсианские сезоны, включая пылевую бурю;
- 3) Впервые данный алгоритм исследования ВГВ был применен на Сатурне и сделаны выводы о возможной динамике атмосферы планеты.

#### Научная и практическая ценность

Разработанный метод сглаживания профилей температуры и плотности, может быть использован в дальнейшем изучении ВГВ, как на Земле, так и на других планетах, а также применяться в качестве сглаживающей функции для ряда других исследований, в которых он может оказаться наиболее оптимальным для выполнения той или иной задачи.

Статистика по картине активности ВГВ как на Марсе, так и на других планетах, может в дальнейшем подвергаться дополнению, сравнению с другими исследованиями, объяснению тех или иных аспектов динамики планетных атмосфер. Также, полученные данные могут быть использованы для исследования глобальных моделей циркуляции атмосферы планет: как в качестве входных данных, так и в качестве образца для сравнения с моделями.

### 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 JGR: Planets, GRL, Astronomy & Astrophysics и Frontiers квантилей Q1 и Q2.
2. их представлении на научных семинарах, российских и международных конференциях;
3. сравнении с результатами, полученными другими методами и другими авторами.

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

1. XVI конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 15 – 17 апреля 2019, ИКИ РАН, Москва
2. The Tenth Moscow Solar System Symposium, 7 – 11 October 2019, IKI RAS, Moscow (poster)
3. XVII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 11–15 ноября 2019 г., ИКИ РАН, Москва
4. 62 научная конференция МФТИ, 18 – 23 ноября 2019, МФТИ, Долгопрудный
5. The EGU General Assembly 2020, section PS3.6 Atmospheres and exospheres of terrestrial planets, satellites, and exoplanets", 4 - 8 May, 2020, (display)
6. XVII конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 30 сентября – 02 октября 2020, ИКИ РАН, Москва
7. The Eleventh Moscow Solar System Symposium, 5 – 9 October 2020, IKI RAS, Moscow (poster)
8. 63 научная конференция МФТИ, 23 – 29 ноября 2020, МФТИ, Долгопрудный

9. XVIII конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 14 – 16 апреля 2021, ИКИ РАН, Москва
10. Международный симпозиум по Атмосферной Радиации и Динамике, 29 июня – 1 июля 2021 г., дистанционная форма, СПбГУ, Петергоф
11. The Twelfth Moscow Solar System Symposium, 11 – 15 october 2021, IKI RAS, Moscow
12. XIX Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 11–15 ноября 2022 г., ИКИ РАН, Москва
13. XIX конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 13 – 15 апреля 2022, ИКИ РАН, Москва.
14. The 7th *Mars Atmosphere Modelling and Observations* conference, 14 – 17 june 2022, Sorbonne University, Paris (poster)
15. The Thirteenth Moscow Solar System Symposium, 10 – 14 october 2022, IKI RAS, Moscow
16. XX Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 14–18 ноября 2022 г., ИКИ РАН, Москва
17. XX конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 12 – 14 апреля 2023, ИКИ РАН, Москва
18. Международный симпозиум по Атмосферной Радиации и Динамике, 21 – 24 июня 2023, СПбГУ, Петергоф
19. The Fourteenth Moscow Solar System Symposium 9 – 13 october 2023, IKI RAS, Moscow
20. XXI конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 10 – 12 апреля 2024, ИКИ РАН, Москва
21. The Fifteenth Moscow Solar System Symposium 21 – 25 october 2024, IKI RAS, Moscow
22. XXII конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 21 – 23 апреля 2025, ИКИ РАН, Москва

23. Международный симпозиум по Атмосферной Радиации и Динамике, 23 июня – 26 июня 2025 г., СПбГУ, Петергоф

24. The Sixteenth Moscow Solar System Symposium 20 – 24 October 2025, IKI RAS, Moscow

25. XXIII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 10–14 ноября 2025 г., ИКИ РАН, Москва

Результаты диссертационной работы неоднократно докладывались на научных семинарах в ИКИ РАН.

В 2020-2025 гг. автор принимал участие в рабочих совещаниях научной группы по обработке и анализу данных эксперимента «ACS» в г. Москва (РФ), г. Дубай (ОАЭ) и г. Париж (Франция).

#### 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. 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, 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 CO<sub>2</sub> spectroscopy// *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 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, 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// *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2025, 12:1672283. DOI: 10.3389/fspas.2025.1672283. **(WOS, Scopus)**

#### Личный вклад автора

Разработка и применение алгоритма сглаживания вертикального профиля температуры/плотности была проведена лично автором.

Также автором проведен весь расчет параметров ВГВ, оформление и представление 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 восстановленные автором величины параметров ВГВ, а также для статьи были предоставлены несколько рисунков.

В работе [Belyaev et al., 2022] представлен анализ данных по высотным профилям температуры и плотности, которые в дальнейшем используются автором для анализа ВГВ.

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, четырех глав, заключения, трех приложений и списка литературы. Работа содержит 133 страницы, 37 рисунков и 2 таблицы. Список литературы насчитывает 156 наименований.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведена актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обозначены основные положения, выносимые на защиту, описаны степень достоверности и апробация полученных результатов, личный вклад автора, а также структура и объем диссертации.

В **главе 1** приведен краткий обзор атмосфер Марса и Сатурна, а также методов их исследования в данной работе, сравнению спектрометров Atmospheric Chemistry Suite - Middle InfraRed (ACS-MIR), Near InfraRed (NIR), изучающих марсианскую атмосферу с апреля 2018 года и UltraViolet Imaging Spectrograph - Extreme UltraViolet (UVIS-EUV), изучавшего атмосферу Сатурна с апреля по сентябрь 2017 года (в данном исследовании) (раздел 1.1).

Общая характеристика, история исследования ВГВ, информация о возможных источниках данных волн приведена в разделе 1.2. В разделах 1.3 и 1.4 приведены обзоры предшествующих исследований ВГВ в атмосферах Марса и Сатурна с Юпитером соответственно. Раздел 1.5 предоставляет информацию о методах солнечного и звездного просвечиваний: о принципе их работы (раздел 1.5.1) и о ранних исследованиях, проводимых этими методами (раздел 1.5.2).

Таблица 1.1. Сравнение спектрометров ACS-NIR, ACS-MIR и UVIS-EUV.

	ACS-NIR	ACS-MIR	UVIS-EUV
Диапазон длин волн	0.73-1.6 мкм	2.3-4.2 мкм	56-118 нм
Измеряемый газ	CO <sub>2</sub> (1.58 мкм)	CO <sub>2</sub> (2.7 мкм)	H <sub>2</sub> (91.1-118 нм)
Вертикальное разрешение	0.5-2.5 км	0.5-2.5 км	~38 км
Диапазон высот (в данной работе)	от 10 до 100 км	от 20 до 160-180 км	от 600 до 1600 км (над уровнем давления 1 бар)
Метод измерений	солнечное просвечивание	солнечное просвечивание	звездное просвечивание

**Глава 2** посвящена обработке вертикальных профилей температуры/плотности и восстановлению из них параметров ВГВ. Глава в первую очередь посвящена обработке данных в условиях атмосферы Марса, для Сатурна процедура хотя и аналогична, используемые параметры могут численно отличаться (более подробно в главе 4).

В разделе 2.1 аргументируется выбор метода обработки вертикального профиля температуры  $T(z)$  и разделение его на так называемый средний профиль температуры  $\bar{T}(z)$  и колебания температуры, вызванные ВГВ  $T'(z) = T(z) - \bar{T}(z)$ . Проведено сравнение трех методов по получению средней температуры: метода спектральной фильтрации с помощью Фурье анализа (средняя температура - нулевой коэффициент Фурье разложения), приближения

скользящим полиномом и приближения полиномом большого порядка. По итогу исследования выбран метод скользящих полиномов, который представляет собой вписывание полиномов третьей степени в скользящее окно размером 60 км.

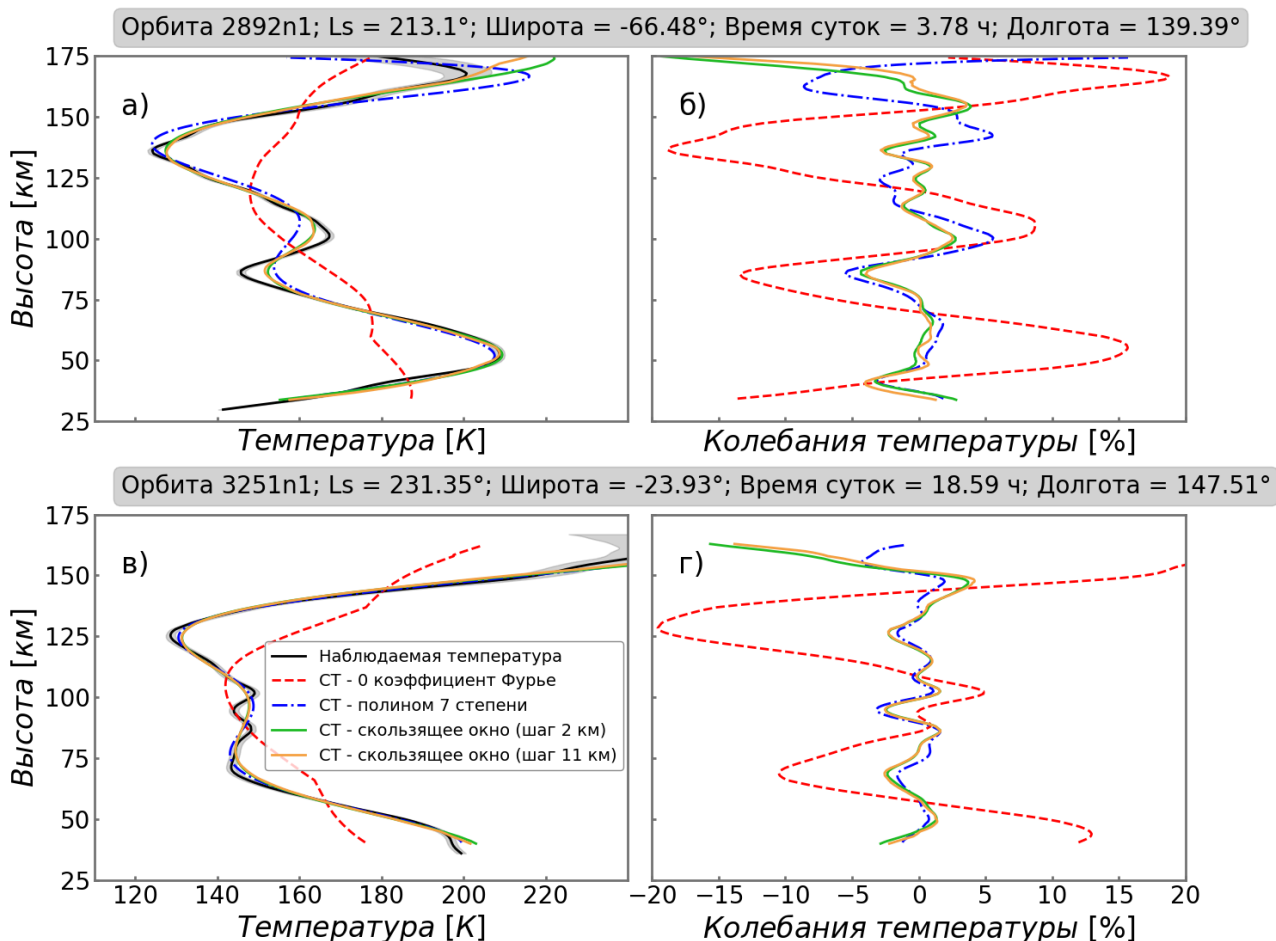


Рисунок 1. Разделение измеренного профиля температуры на среднюю и волновую компоненты для двух орбит с разной волновой структурой. Левая колонка (а, в) отображает среднюю температуру  $\overline{T}(z)$  (СТ), правая (б, г) – относительные флуктуации температуры  $T'(z)/\overline{T}(z)$  (в процентах). В легенде обозначены методы построения средней температуры. Серая закрашенная область соответствует ошибкам измерений.

Для учета значимости величин были использованы веса измерений, рассчитанные из погрешностей температуры. На каждом шаге окно сдвигается снизу вверх на определенную высоту (опытным путем был выбран шаг 7 км), затем процедура повторяется для сдвига сверху вниз. После, перекрывающиеся

значения полиномов усредняются, и полученный результат сглаживается скользящим средним. В зависимости от измерений конкретного прибора, скользящее окно уменьшается на концах профиля, вследствие больших отклонений вписанных полиномов, а также верхние и нижние концы профилей обрезаются на некоторую величину.

Окно 60 км было выбрано, как ограничение сверху измеряемой длины волны ВГВ равной 30 км. При этом, хотя возможна переоценка вклада волн, не являющихся гравитационными, не будет потеряна длинноволновая составляющая ВГВ.

В разделе 2.2 проведена качественная проверка восстановления среднего профиля температуры. Было проведено сглаживание профиля концентрации CO<sub>2</sub> (основного газа атмосферы) в логарифмическом масштабе методом скользящих полиномов 1 степени и с меньшими параметрами окна и шага (окно - 25 км, шаг - 5 км), чем для температуры (окно - 60 км, шаг - 7 км), затем построены графики относительных колебаний концентрации и температуры. Показано колебание данных графиков в противофазе и с похожими амплитудами, что соотносится с теорией.

Далее, из полученного профиля средней концентрации CO<sub>2</sub> был восстановлен профиль средней температуры из условия выполнения гидростатического равновесия. Средний профиль температуры, найденный из концентрации, не являясь полным совпадением с построенным средним профилем температуры, достаточно хорошо с ним согласуется.

Раздел 2.3 посвящен изучаемым в данной работе параметрам ВГВ и их вычислению.

Частота Брента-Вяйсяля (частота плавучести) - частота, с которой элемент жидкости/воздуха, перемещённый вертикально в стратифицированной среде, будет в этой среде осциллировать. Она характеризует конвективную устойчивость атмосферы:

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

где  $g$  — ускорение свободного падения, а  $c_p$  — удельная теплоёмкость при постоянном давлении. Если частота падает ниже нуля, атмосфера становится конвективно неустойчивой и больше не поддерживает распространение ВГВ.

Для характеристики активности ВГВ используется амплитуда волн  $|T'|$  — огибающая разности наблюдаемой температуры и средней. Она рассчитывается путем выполнения разложения Фурье в каждом 60-километровом скользящем окне и суммирования вкладов всех гармоник.

Другой полезной мерой волнового поля, характеризующей активность ВГВ, является потенциальная энергия (на единицу массы):

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

Также, можно оценить абсолютное значение вертикального потока горизонтального импульса (на единицу массы):

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

Переменные  $k_h$  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  $m$ . С используемым методом наблюдения невозможно оценить горизонтальное волновое число. В данной работе характеристика  $k_h^*$  была выбрана с учетом того, что самый плотный атмосферный след в прицельной точке в экспериментах по затмению составляет  $\sim 400$ - $500$  км по горизонтальной составляющей, следовательно, гармоники с более короткими длинами волн остаются неразрешенными. Поэтому была назначена горизонтальная длина волны  $\lambda_h = 2\pi / k_h^* = 300$  км, что также согласуется с величиной  $\lambda_h = 100 - 500$  км, обычно используемой в параметризациях ВГВ для глобальных моделей циркуляции [Yigit et al., 2018]. Импульс, переносившийся гармоникой, при разрушении/диссипации волны передается окружающему атмосферному потоку, вызывая тем самым его

ускорение или замедление, так называемое «торможение» ВГВ (Gravity wave drag), которое еще также называется ускорением ВГВ:

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

где  $\bar{\rho}$  обозначает среднюю плотность; индекс  $h$  указывает, что ускорение происходит в горизонтальном направлении.

В разделе 2.4 приводится анализ параметров ВГВ для одной орбиты.

В разделе 2.5 приводятся доводы, почему данные спектрометра ACS-NIR дополняют данные ACS-MIR только в отсутствие одновременных измерений.

Хотя покрытие измерений по высоте у спектрометра MIR намного лучше: 20-180 км против 10-100 км для NIR, у спектрометра NIR  $\sim$  в 10 раз большее количественное покрытие измерений, из-за чего используются данные обоих спектрометров. В одновременных измерениях спектрометров, полученные профили температуры хорошо совпадают. Однако, вычисляемые параметры волн, такие как амплитуда, потенциальная энергия, ускорение, могут как совпадать, так и довольно сильно различаться. Такое поведение возникает в силу различия диапазона высот профилей температуры, получаемых с разных спектрометров. Основное различие происходит на конце высотного диапазона спектрометра ACS-NIR (80-100 км). Таким образом данные спектрометра NIR дополняют данные MIR только в отсутствие одновременных измерений.

**Глава 3** посвящена исследованию ВГВ в атмосфере Марса по данным эксперимента по солнечному просвечиванию ACS-MIR и ACS-NIR.

Раздел 3.1 посвящен описанию эксперимента. В разделе 3.1.1 приводится описание спектрометра ACS-MIR (см. статьи Korablev et al., 2018 и Belyaev et al., 2021, 2022). Канал MIR представляет собой эшелле спектрометр со скрещенной дисперсией, работающий в режиме солнечного просвечивания. Он предназначен для детектирования малых газовых составляющих марсианской атмосферы, а также для измерений температуры, плотностей  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и их изотопов. Спектральный диапазон MIR составляет 2.3–4.2 мкм, а разделение порядков эшелле по пространству достигается благодаря наклону вторичной

дифракционной решетки. Прибор обладает высокой разрешающей способностью  $\lambda/\Delta\lambda > 25000$ , отношением сигнал-шум  $\text{SNR} \sim 1000\text{--}10000$  и вертикальным разрешением от 0.5 до 2.5 км, зависящем от времени накопления сигнала ( $\sim 2$  сек). Весь столб атмосферы, от 0 до 200 км, измеряется за 3–6 минут.

Раздел 3.1.2 содержит описание спектрометра ближнего инфракрасного диапазона ACS-NIR, объединяющего в себе эшелле спектрометр с акусто-оптическим перестраиваемым фильтром, позволяющим выбирать дифракционные порядки (см. статьи Korablev et al., 2018 и Fedorova et al., 2020, 2022). Инструмент работает в диапазоне длин волн от 0.7 до 1.7 мкм. Вертикальное разрешение прибора составляет от 0.5 до 2.5 км. Разрешающая способность  $\lambda/\Delta\lambda \sim 25000$ , отношение сигнал-шум  $\text{SNR} > 1000$ . Покрытие по высоте составляет от 10 до 100 км.

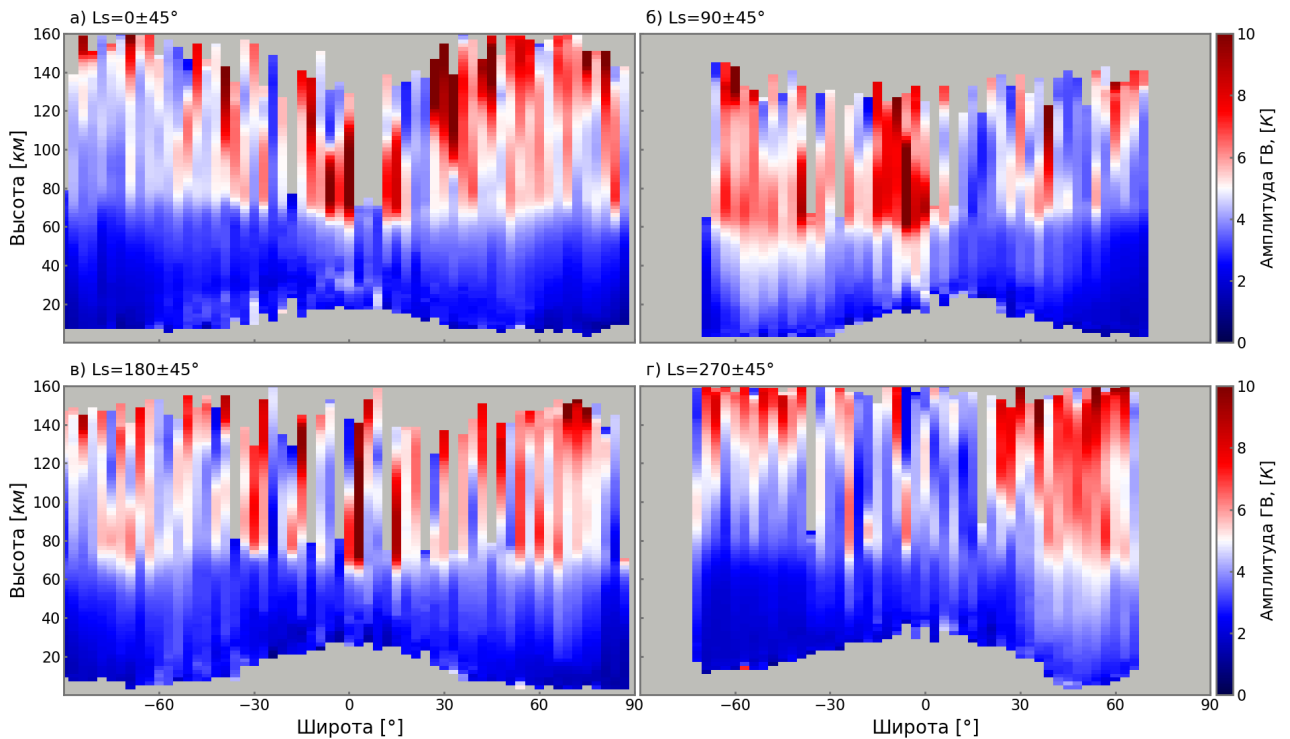
TGO за сутки совершает 12 оборотов вокруг Марса, позволяя делать 24 измерения ежедневно: 12 на восходе, 12 на закате Солнца.

В разделе 3.1.3 приведено покрытие данных: со второй половины 34 марсианского года MY34 по конец MY37 для спектрометра MIR (за исключением необработанных спектрометрических данных для первой половины MY37) - 1189 наблюдений, по конец MY36 для спектрометра NIR - 12324 наблюдения.

В разделе 3.2 приведены различные сезонные и широтные распределения активности ВГВ. Раздел 3.2.1 представляет сезонное распределение активности ВГВ, выраженной в ускорении и потенциальной энергии волн. Активность волн больше проявлена в зимний сезон, причем в зимний период Южного полушария (в сезон афелия) активность ВГВ опускается в более низкие слои атмосферы (50-125 км), а в период зимы Северного полушария (в сезон перигелия) поднимается в более высокие слои (70-130 км).

В разделе 3.2.2 приведены широтные распределения амплитуды и ускорения ВГВ для четырех различных сезонов на Марсе, где  $L_s=0, 180$  представляют

собой сезоны весеннего и осеннего равноденствия (для северного полушария), соответственно, а  $L_s=90, 270$  - летнего и зимнего солнцестояния.



*Рисунок 2. Широтно-высотные распределения амплитуды ВГВ для четырех различных сезонов года для (а)  $L_s = 0$ , (б) 90, (в) 180, (г) 270. Из распределений исключен период глобальной пылевой бури*

На Рисунке 2 приведено распределение амплитуды ВГВ. Амплитуда растет с высотой и достигает своих наибольших значений 10-15 К на высотах 80-150 км, в зависимости от сезона. В среднем, наибольшая амплитуда наблюдается в регионе мезопаузы (100-120 км). В период равноденствий наибольшая активность волн сосредоточена в низких широтах на высотах верхней мезосферы, в низких слоях термосферы, тогда как в период солнцестояний активность смещена в зимнее полушарие.

Рисунок 3 изображает зональное ускорение ГВ (обозначено цветом) вместе со скоростью среднего зонального ветра (красные контурные линии), воссозданную с помощью марсианской модели глобальной циркуляции Martian Atmosphere Observation and Modeling (MAOAM) Martian general circulation model (MGCM; Hartogh et al., 2005; Medvedev & Hartogh 2007) за 34 и 35 марсианские года и усредненную, соответственно наблюдениям.

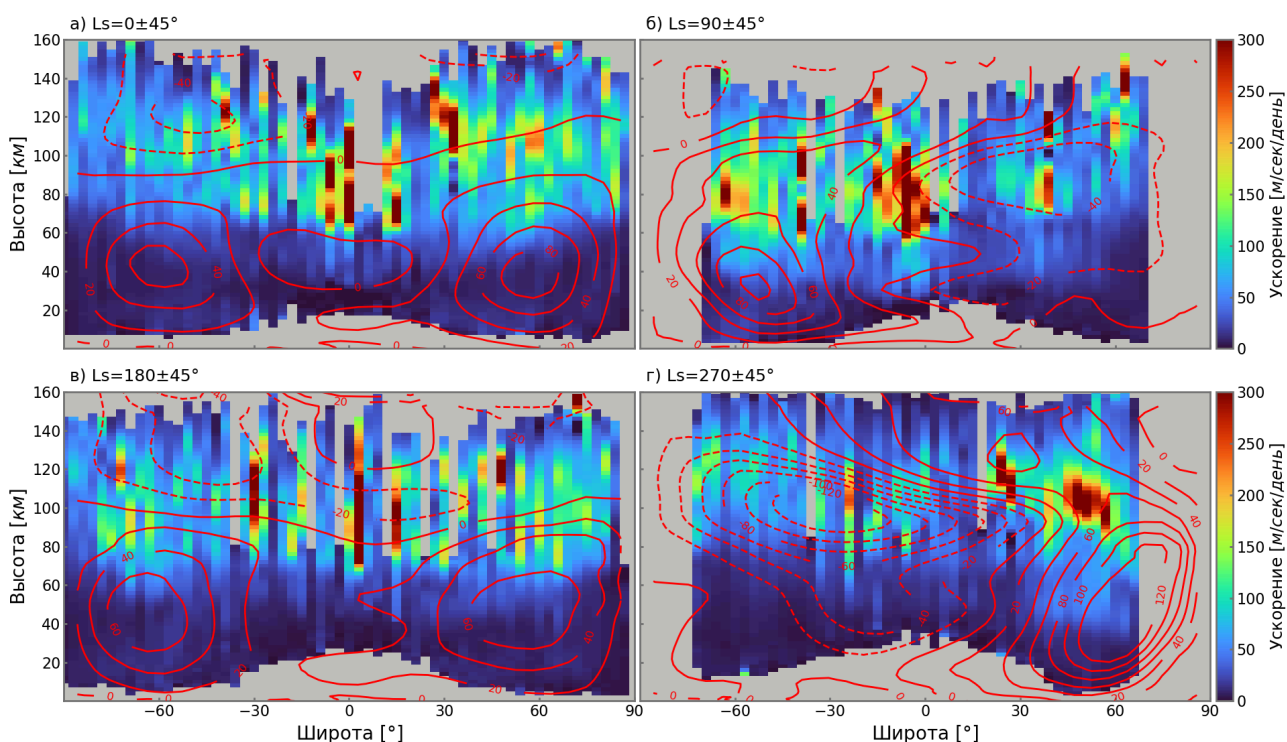
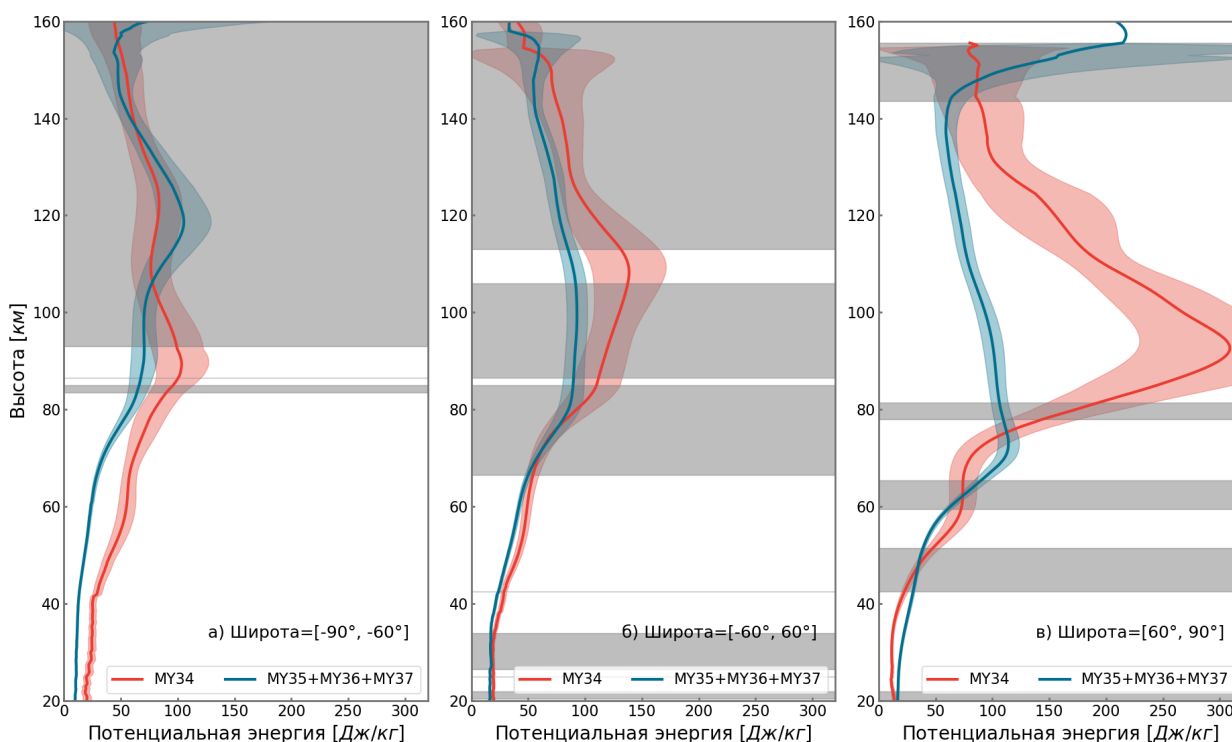


Рисунок 3. То же самое, что и на Рисунке 2, но для ускорения ГВ. Красными контурными линиями изображен средний зональный ветер, построенный из модели MAOAM MGCM для тех же интервалов  $L_s$ , что и на рисунке. Сплошные и штрих линии обозначают западный и восточный ветра, соответственно. Из данных исключен период глобальной пылевой бури.

Из рисунка видно, что регионы с большим ускорением ГВ обычно соответствуют зонам с относительно слабым зональным ветром, что согласуется с теоретическими ожиданиями от распространения и диссипации ГВ. Гармоники волны, особенно с медленной горизонтальной фазовой скоростью  $c$ , значительно подавляются ветром, когда их фазовая скорость приближается к средней скорости потока  $\bar{u}$ . Подобное уменьшение во внутренней фазовой скорости  $|c - \bar{u}|$  приводит к поглощению потоком большей части ГВ идущих вдоль потока среднего ветра  $\bar{u}$ . Гармоники, чья фазовая скорость больше скорости ветра  $c > \bar{u}$  или распространяющиеся в противоположном ветру направлении, могут избежать подавления и

распространиться выше в атмосферу, где они вырастут в амплитуде и, в конце концов, разрушатся, когда флуктуации ветра вызванные волнами  $|u'|$  достигнут значений внутренней фазовой скорости  $|c - \bar{u}|$ . Чем меньше скорость ветра  $\bar{u}$ , тем меньшая амплитуда  $|u'|$  нужна для разрушения и/или насыщения волн. На Рисунке 3 хорошо продемонстрировано, как волны разрушаются и передают свое ускорение окружающему потоку в регионах с низкой скоростью ветра.

В разделе 3.2.3 изучается влияние глобальной пылевой бури на активность ВГВ. Глобальная пылевая буря в 34 марсианском году произошла во временном промежутке  $L_s=188$  и  $L_s=250$  (осенне-зимний период северного полушария, близко к перигелию планеты). Этот же период 35-37 годов прошел относительно спокойно. На Рисунке 4 представлены усредненные вертикальные профили потенциальной энергии ГВ для 34 и объединения 35, 36 и 37 годов за этот период для трех различных широтных зон (Рисунок 4а - южные широты до 60S; Рисунок 4б - от 60S до 60N; Рисунок 4в - северные широты от 60N). 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. Белый цвет фона указывает на то, что с вероятностью большей 95% профили отличаются друг от друга. Это происходит на тех высотах, где стандартные ошибки профилей (красная и голубая области около профилей) не пересекаются. Серым фоновым цветом обозначены области, где точная оценка разницы профилей не представляется возможной, в силу малого количества наблюдений.



*Рисунок 4. Высотные профили потенциальной энергии  $E_p$  усредненные в трех различных широтных интервалах для периода глобальной пылевой бури MY34 ( $L_s=188-250$ , красные линии) и для соответствующего периода с низкой пылевой активностью MY35, MY36 и MY37 (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 95% , согласно тесту Стьюдента)*

На рисунке продемонстрировано, что в северных широтах активность ГВ увеличивается во время бури на высотах больших 80 км (Рисунок 4в). Похожий результат показало моделирование глобальной циркуляции атмосферы на больших высотах (Kuroda et al., 2020, Yigit et al., 2021a). В южных же широтах (Рисунок 4а) отображено увеличение активности волн во время бури на высотах меньших 80 км. Данный результат ранее не был зафиксирован наблюдательным или модельным способом.

Раздел 3.3 исследует механизмы разрушения ВГВ. Раздел 3.3.1 представляет собой введение, в котором представлены предыдущие исследования

обнаружившие обратную зависимость между относительными колебаниями плотности/температуры и температурой, что может являться признаком того, что конвективная неустойчивость является доминирующим механизмом по разрушению ВГВ.

В главе 3.3.2 представлен анализ данных. Если конвективная неустойчивость - основной механизм разрушения волн, то выполняется соотношение для одной гармоники (пр.: Fritts et al., 1988, уравнение 6):

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

где  $|u'|$  - амплитуда флуктуации горизонтальной скорости волны,  $c$  - горизонтальная фазовая скорость,  $\bar{u}$  - скорость окружающего ветра. Таким образом, когда  $|u'|$  достигает значения  $|c - \bar{u}|$ , увеличивающая диссипация волны останавливает рост  $|u'|$ , делая соотношение  $\frac{|u'|}{|c-\bar{u}|} \approx 0.7$  постоянным.

Уравнение 1 представляет зависимость между амплитудой относительных колебаний температуры/плотности и частотой Брента-Вяйсяля в условии насыщения волн. Если вертикальный градиент  $d\bar{T}/dz$  мал, он может быть отброшен в уравнении Брента-Вяйсяля, создавая обратную зависимость между относительными колебаниями амплитуды и средней температурой.

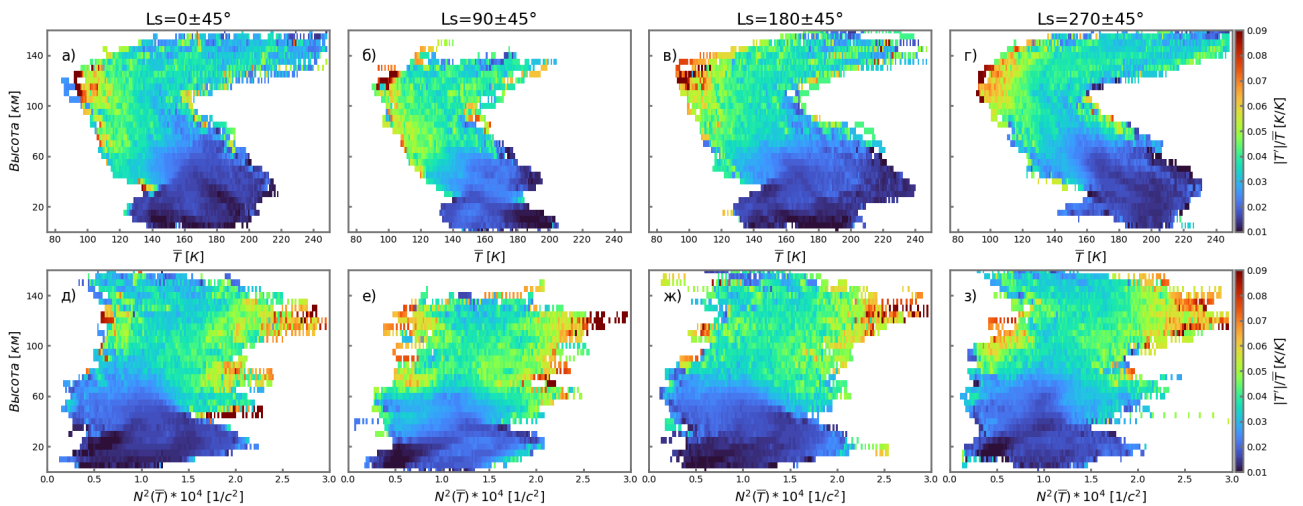


Рисунок 5. Верхний ряд (а-г): амплитуда относительных колебаний температуры в зависимости от средней температуры. Средний ряд (д-з): амплитуда относительных колебаний температуры в зависимости от

*частоты Брента-Вяйсяля. 4 колонками разделены сезоны года на Марсе. Первая колонка (а, д):  $L_s=0\pm 45$ ; вторая (б, е):  $L_s=90\pm 45$ ; третья (в, ж):  $L_s=180\pm 45$ ; четвертая (з, з):  $L_s=270\pm 45$ .*

Таким образом был построен Рисунок 5, отображающий зависимость амплитуды относительных колебаний температуры, а также вертикального потока горизонтального импульса от высоты и средней температуры/частоты Брента-Вяйсяля. 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. Автором не было выявлено какой-либо зависимости от широты, так что каждая панель представляет собой статистику по всем широтам. Наибольшие значения амплитуд колебаний температуры наблюдаются в районе мезопаузы, особенно в регионе низких температур ( $<140$  К) (панели (а-г)). В этих же областях и видна некая антикорреляция между средними температурами и амплитудой колебаний волн. Однако, в области низких высот/высоких температур не видно однозначной зависимости между этими величинами.

Зависимость же  $|T'/T|$  от  $N^2$  (панели (д-з)) наиболее проявлена для больших значений частоты Брента-Вяйсяля, что соответствует критерию конвективной неустойчивости (уравнение 1), однако также видно и увеличение значений амплитуды колебаний волн для менее устойчивого состояния атмосферы (малые значения  $N^2$ ). Таким образом, нет очевидной зависимости между амплитудой колебаний волн и частотой Брента-Вяйсяля. Все это говорит о том, что явление конвективной неустойчивости, вероятно, не является основным/единственным механизмом ослабления ГВ в термосфере.

Для дальнейшего анализа разрушения ГВ используется величина суммарного потока импульса  $\bar{\rho}F$ , где  $\bar{\rho}$  - средняя плотность. В отсутствие 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. Yigit et al., 2021b, уравнение 2).

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

где  $\beta$  - коэффициент вертикального затухания волн,  $1/H$  характеризует рост волн за счет уменьшения плотности атмосферы,  $H = R\bar{T}/g$  - шкала высот,  $R$  - индивидуальная газовая постоянная (универсальная газовая постоянная нормированная на молекулярную массу воздуха). Уравнение (2) позволяет вычислить коэффициент  $\beta$ , тогда как остальные параметры можно получить из наблюдений.

На Рисунке 6 в верхнем ряду (панели (а-г)) цветом изображена обратная шкала высот  $1/H$ , в среднем (панели (д-з)) - коэффициент  $\beta$  в зависимости от средней температуры и высоты. Результаты поделены на 4 сезона года. Темпы роста волн ( $1/H$ ) варьируются от 0.1 до 0.175 1/км, тогда как разрушение волн имеет более широкие рамки значений от 0 до 0.3 1/км. Обе величины достигают наибольших своих значений в регионе мезопаузы, причем разрушение волн значительно превышает величины их роста, таким образом делая мезопаузу местом наибольшего разрушения волн. Коэффициент  $\beta$  охарактеризовывает весь спектр возможных причин ослабления/разрушения волн, в том числе конвективную неустойчивость, процессы молекулярной диффузии, теплопроводности, также фильтрацию волн ветром. В области же низких высот (до ~100 км) и высокой температуры (синие, голубые участки на панелях (д-з)), разрушение волн мало,  $1/H$  превышает  $\beta$ , что позволяет волнам расти.

Стоит отметить, что коэффициент  $\beta$  обратно пропорционален средней температуре на всех высотах. Причина этого не является абсолютно понятной.

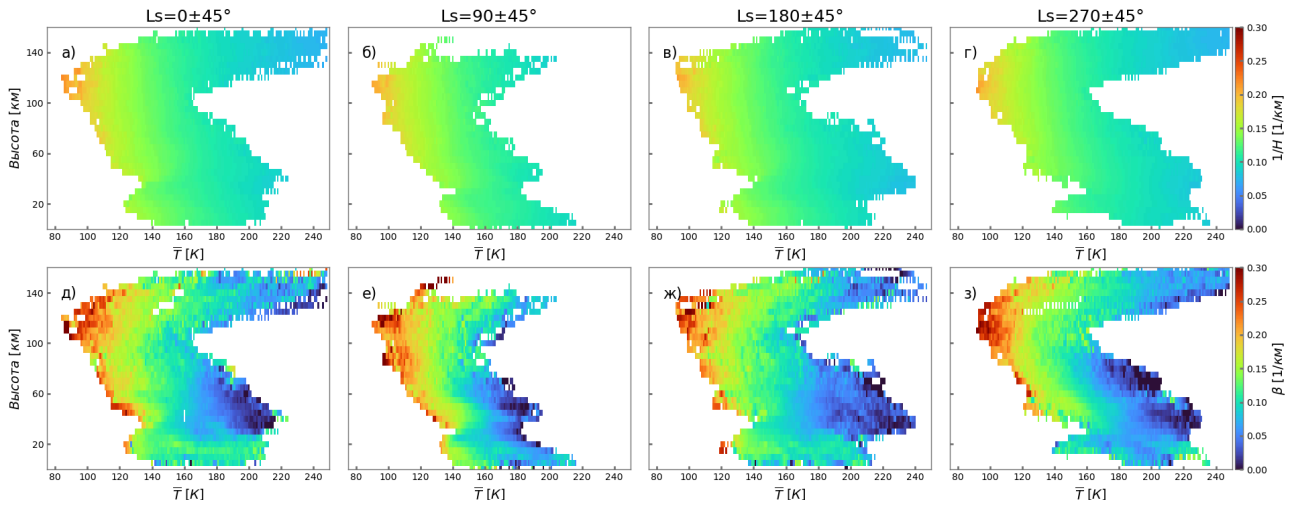


Рисунок 6. Верхний ряд (а-г): обратная шкала высот  $1/H$  в зависимости от средней температуры. Средний ряд (д-з): скорость ослабления волны  $\beta$  в зависимости от средней температуры. 4 колонками разделены сезоны года на Марсе. Первая колонка (а, д):  $Ls=0\pm 45$ ; вторая (б, е):  $Ls=90\pm 45$ ; третья (в, ж):  $Ls=180\pm 45$ ; четвертая (г, з):  $Ls=270\pm 45$ .

В **Главе 4** приводится исследование ВГВ в атмосфере Сатурна по данным эксперимента по звездному просвечиванию прибором UVIS/Cassini

Раздел 4.1 посвящен описанию прибора UVIS. В данной работе исследуются данные, полученные каналом экстремального ультрафиолета UVIS-EUV. Он в основном использовался для изображающей спектроскопии, а также измерения структуры и состава атмосфер Сатурна и Титана. Канал состоял из телескопа с трехпозиционным устройством изменения щели, системы отражателей, спектрографа с микроканальным пластинчатым детектором CODed Anode array CONverter (CODACON) со спектральной разверткой в 1024 пикселя и с пространственной - в 64 пикселя, а также электроники. Подробно устройство и работа прибора описаны в работе Esposito et al., 2004.

В разделе 4.2 приводятся различия в процедуре обработки вертикальных профилей температуры для Марса и Сатурна. Если в случае Марса неравномерный профиль температуры натягивался на сетку 0.5 км перед дальнейшими действиями, то для Сатурна шаг по сетке был выбран 5 км из-за

большого масштаба профиля. Также были эмпирически подобраны другие интервалы окна усреднения и шага. Для Марса они составляют 60 км и 7 км соответственно, для Сатурна же они равны 600 и 110 км. Геометрия звездных наблюдений диктует минимально возможную горизонтальную длину наблюдаемых волн. Основной вклад сигнала, приходящего с высоты измерения на уровне давления 1 бар, приходится на отрезок 6441 км около прицельной точки. Таким образом, расстояние 6400 км представляет собой эффективное горизонтальное разрешение и наименьшую горизонтальную длину наблюдаемых ГВ.

Раздел 4.3 содержит информацию о широтных распределениях параметров ВГВ в атмосфере Сатурна. ВГВ с вертикальной длиной от 80 до 300 км наблюдаются на всем исследуемом промежутке термосферы: от 600 до 1600 км над уровнем давления 1 бар. При этом, наблюдаемая средняя температура варьируется в диапазоне 180-500 К, амплитуда волн преимущественно 20-40 К, а в некоторых наблюдениях превышает 50 К. Потенциальная энергия ГВ на единицу массы достигает значений  $5 \cdot 10^4$  Дж/кг, вертикальный поток горизонтального импульса (на единицу массы) -  $2000 \text{ м}^2/\text{сек}^2$ . Ускорение достигает порядка 100 м/сек/день, меридиональная скорость переноса на высотах 1300-1500 км превышает 60 м/сек, что  $\sim$  в 10 раз превышает значения скорости на Земле и Марсе.

Раздел 4.4 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 предполагает баланс силы Кориолиса, меридионального градиента давления и аврорального ускорения ионов (auroral ion drag). В данной работе была также добавлена составляющая, отвечающая за наличие ВГВ. Наибольшее изменение, при добавлении влияния ВГВ, претерпевает меридиональная компонента скорости ветра. Потоки ветра направленные в сторону экватора увеличиваются в своей величине от 34 до 57 м/с в Северном полушарии и от 34

до 87 м/с - в Южном. Также, в отличие от случая без учета влияния ВГВ, меридиональная компонента скорости сохраняется до низких широт. Оказываемый ВГВ эффект приводит к большему переносу тепла и вещества от полярных регионов к экваториальным.

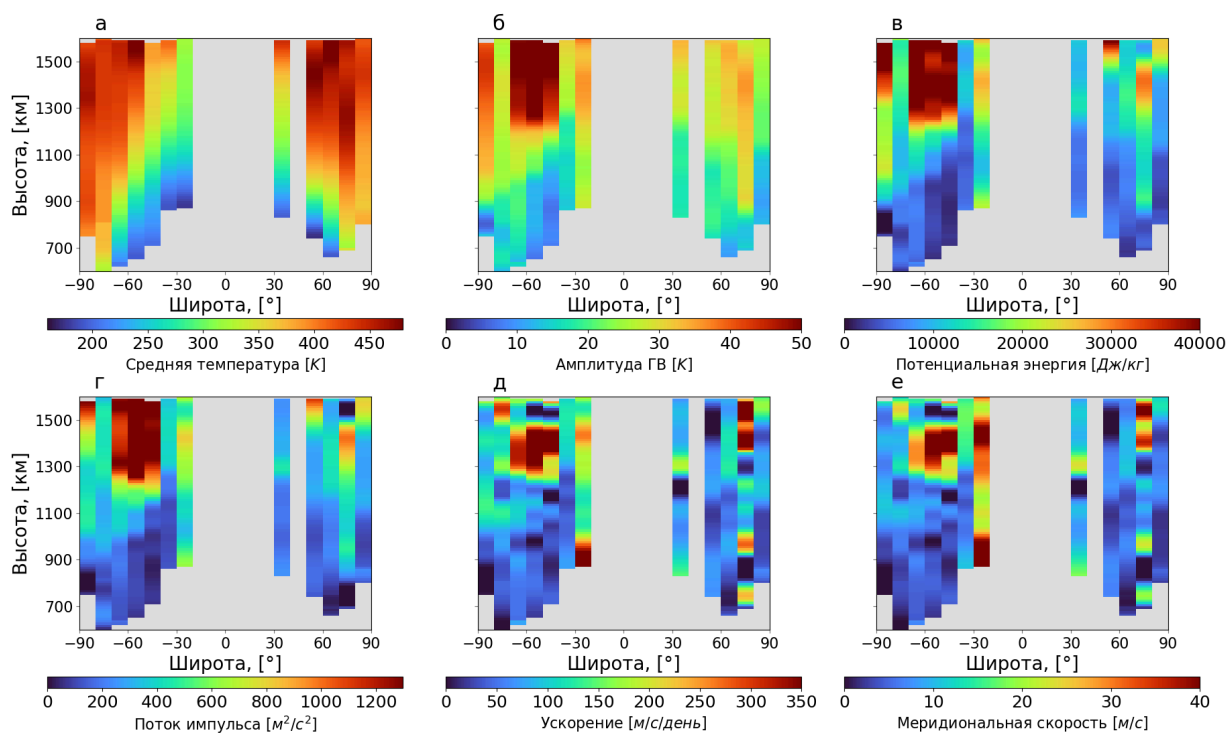


Рисунок 7. Широтно-высотные распределения а) средней температуры  $T$ , б) амплитуды ГВ  $|T|$ , в) потенциальной энергии ГВ (на единицу массы), г) вертикального потока горизонтального импульса (на единицу массы), д) ускорения ГВ, е) средней меридиональной скорости потока. Размер ячейки по широте - 10 градусов.

В разделе 4.5 обсуждаются результаты: увеличение меридионального переноса, вызванного ВГВ, наблюдаемого в данном исследовании, может объяснить перенос энергии в термосфере из полярных регионов в экваториальные и дать решение “проблеме энергетического кризиса” Сатурна - разницу в несколько сот Кельвин в наблюдаемых и моделируемых, на основе радиационной модели, значениях температуры верхней атмосферы планет гигантов, где наблюдаемая температура выше моделируемой.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

В приложении А приведен метод восстановления профилей плотности и температуры для данных ACS.

Приложение Б описывает восстановление профилей плотности и температуры по данным UVIS.

В приложении В дана процедура коррекции для вертикального потока горизонтального импульса, для случаев больших случайных отклонений величины потока на низких высотах.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Разработанный и протестированный алгоритм сглаживания волнового вертикального профиля температуры показал себя универсальным в рекордно широком диапазоне высот для обработки массивов данных как в атмосфере Марса, так и в атмосфере Сатурна.
- 2) В атмосфере Марса амплитуда колебаний температуры, вызванных ВГВ, с вертикальной длиной волны от 5 до 30 км растет с высотой и в области мезопаузы достигает 10-15 К. Основной зоной разрушения/диссипации ВГВ является мезопауза (100-120 км).
- 3) Амплитуда и ускорение ВГВ распределены симметрично относительно экватора в сезоны равноденствий. В период солнцестояний активность волн больше проявлена в зимнем полушарии.
- 4) Наибольших своих величин ускорение ВГВ достигает по краям сезонных зональных потоков, то есть, где западный ветер меняется на восточный, а значит его скорость близка к нулю.
- 5) Во время глобальной пылевой бури 34 марсианского года потенциальная энергия ВГВ в области Северного полюса растет на высотах выше 80 км. А в области Южного полюса та же энергия растет на высотах ниже 80 км.
- 6) Для всех высот выше 20 км наблюдается явная антикорреляция между коэффициентом разрушения волн  $\beta$  и средней температурой. Антикорреляционная зависимость между относительными колебаниями температуры и частотой Брента-Вяйсяля, а также средней температурой, проявлена только в регионе мезопаузы.
- 7) В атмосфере Сатурна ВГВ с вертикальной длиной от 80 до 300 км наблюдаются на всем исследуемом промежутке термосферы: от 600 до 1600 км над уровнем давления 1 бар. При этом, амплитуда волн достигает преимущественно 20-40 К, а в некоторых наблюдениях превышает 50 К. Потенциальная энергия ГВ на единицу массы достигает значений  $5 \cdot 10^4$

Дж/кг, вертикальный поток горизонтального импульса (на единицу массы)  
-  $2000 \text{ м}^2/\text{сек}^2$ . Ускорение достигает порядка  $100 \text{ м/сек/день}$  в  
направлении от полюса к экватору, что позволяет объяснить высокие  
термосферные температуры в экваториальных широтах.

## Список литературы:

1. Belyaev, D., Fedorova, A., Trokhimovskiy, A., Alday, J., Montmessin, F., Korablev, O., et al. (2021). Revealing a high water abundance in the upper mesosphere of Mars with ACS onboard TGO. *Geophys. Res. Lett.* 48, e2021GL093411. doi:10.1029/2021GL093411
2. Belyaev, D., Fedorova, A., Trokhimovskiy, A., Alday, J., Montmessin, F., Korablev, O., et al. (2022). Thermal structure of the middle and upper atmosphere of Mars from ACS/TGO CO<sub>2</sub> spectroscopy. *J. Geophys. Res. Planets* 127, e2022JE007286. doi:10.1029/2022JE007286
3. Brown, Z. L., Medvedev, A. S., Starichenko, E. D., Koskinen, T. T., & Müller-Wodarg, I. C. F. (2022) Evidence for gravity waves in the thermosphere of Saturn and implications for global circulation// *Geophysical Research Letters*, 2022, 49, e2021GL097219. DOI: 10.1029/2021GL097219
4. Fedorova, A., Montmessin, F., Korablev, O., Luginin, M., Trokhimovskiy, A., Belyaev, D., et al. (2020). Stormy water on Mars: the distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season. *Science* 367, 297–300. doi:10.1126/science.aay9522
5. Esposito, L. W., Barth, C. A., Colwell, J. E., Lawrence, G. M., McClintock, W. E., Stewart, A. I. F., et al. (2004). The Cassini ultraviolet imaging Spectrograph investigation. *Space Science Reviews*, 115(1–4), 299–361. <https://doi.org/10.1007/s11214-004-1455-8>
6. Fedorova, A., Montmessin, F., Trokhimovskiy, A., Luginin, M., Korablev, O., Alday, J., et al. (2023). A two-martian years survey of the water vapor saturation state on Mars based on ACS NIR/TGO occultations. *J. Geophys. Res. Planets* 128, e2022JE007348. doi:10.1029/2022JE007348
7. Fritts, D. C., & Alexander, J. M. (2003). Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*, 41(1), 1003. <https://doi.org/10.1029/2001rg000106>

8. Fritts, D. C., Tsuda, T., Kato, S., Sato, T., and Fukao, S. (1988). Observational evidence of a saturated gravity wave spectrum in the troposphere and lower stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 45, 1741–1759. doi:10.1175/1520-0469(1988)045-1741:OEOASG-2.0.CO;2
9. Gavrilov, N.M., Kshevetskii, S.P., and Koval, A.V.. (2018). Propagation of non-stationary acoustic-gravity waves at thermospheric temperatures corresponding to different solar activity. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 172, 100–106. doi: 10.1016/j.jastp.2018.03.021.
10. Gubenko, V. N., Kirillovich, I. A., and Pavelyev, A. G. (2015). 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*, Vol. 53, No. 2, pp. 141–151. doi: 10.1134/S0010952515020021
11. Hartogh, P., Medvedev, A. S., Kuroda, T., Saito, R., Villanueva, G., Feofilov, A. G., Kutepov, A. A., & Berger, U. (2005) Description and climatology of a new general circulation model of the Martian atmosphere. *J. Geophys. Res. Planets* 110, doi: 10.1029/2005JE002498
12. Hinson, D. P. & Tyler, G. L. (1983). Internal gravity waves in Titan's atmosphere observed by Voyager radio occultation. *Icarus*, 54, 337-352, doi: 10.1016/0019-1035(83)90202-6
13. Korablev, O., Montmessin, F., Trokhimovskiy, A., Fedorova, A., Shakun, A., Grigoriev, A., et al. (2018). The atmospheric chemistry suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter. *Space Sci. Rev.* 214, 7. doi:10.1007/s11214-017-0437-6
14. Kuroda, T., Medvedev, A. S., and Yiğit, E. (2020). Gravity wave activity in the atmosphere of Mars during the 2018 global dust storm: simulations with a high-resolution model. *J. Geophys. Res. Planets* 125, e2020JE006556. doi:10.1029/2020JE006556

15. Larsen, M. F., & Walterscheid, R. L. (1995). Modified geostrophy in the thermosphere. *Journal of Geophysical Research*, 100(A9), 17321–17330. doi: 10.1029/95JA00137
16. Lindzen, R. S., (1981). Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86, C10, 9707-9714. doi: 10.1029/JC086iC10p09707
17. Lorenz, R. D., Young, L. A., and Ferri, F. (2014). Gravity waves in Titan's lower stratosphere from Huygens probe in situ temperature measurements. *Icarus*, 227, 49-55. doi: 10.1016/j.icarus.2013.08.025
18. Medvedev, A. S., and Hartogh, P. (2007). Winter polar warmings and the meridional transport on Mars simulated with a general circulation model. *Icarus*, 186, 97-110. doi: 10.1016/j.icarus.2006.08.020.
19. Medvedev, A. S., and Yiğit, E. (2019). Gravity waves in planetary atmospheres: their effects and parameterization in global circulation models. *Atmosphere* 10, 531. doi:10.3390/atmos10090531
20. Nakagawa, H., Terada, N., Jain, S. K., Schneider, N. M., Montmessin, F., Yelle, R. V., et al. (2020). Vertical propagation of wave perturbations in the middle atmosphere on Mars by MAVEN/IUVS. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125, e2020JE006481. doi: 10.1029/2020JE006481
21. Seiff, A., & Kirk, D. B. (1976). Structure of Mars' Atmosphere up to 100 kilometers from the Entry Measurements of Viking 2. *Science*, 194 (4271), 1300-1303. doi: 10.1126/science.194.4271.1300
22. Starichenko, E. D., Belyaev, D. A., Medvedev, A. S., Fedorova, A. A., Korablev, O. I., Trokhimovskiy, A., et al. (2021). Gravity wave activity in the Martian atmosphere at altitudes 20–160 km from ACS/TGO occultation measurements. *J. Geophys. Res. Planets* 126, e2021JE006899. doi:10.1029/2021JE006899
23. Starichenko, E. D., Medvedev, A. S., Belyaev, D. A., Yiğit, E., Fedorova, A. A., Korablev, O. I., et al. (2024). Climatology of gravity wave activity based on

- two martian years from ACS/TGO observations. *Astron. Astrophys.* 683, A206. doi:10.1051/0004-6361/202348685
24. Starichenko E. D., Medvedev, A. S., Belyaev, D. A., Fedorova, A. A., Trokhimovskiy, A., Hartogh, P., Montmessin F., Korablev, O. I. (2025) Vertical damping of gravity waves evaluated from ACS-TGO solar occultation measurements on Mars// *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 12:1672283. DOI: 10.3389/fspas.2025.1672283
25. Tellmann, S., Häusler, B., Hinson, D. P., Tyler, G. L., Andert, T. P., Bird, M. K., Imamura, T., Pätzold, M., Remus, S. (2012). Small-scale temperature fluctuations seen by the VeRa Radio Science Experiment on Venus Express. *Icarus*, 221, 471-480. doi: 10.1016/j.icarus.2012.08.023
26. Vals, M., Spiga, A., Forget, F., Millour, E., Montabone, L., & Lott, F. (2019). 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*, 178, 104708. doi: 10.1016/j.pss.2019.104708
27. Yiğit, E., & Medvedev, A. S. (2015). Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere. *Advances in Space Research*, 55(4), 983–1003. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020>
28. Yiğit, E., Medvedev, A. S., & Hartogh, P. (2018). Influence of gravity waves on the climatology of high-altitude Martian carbon dioxide ice clouds. *Annales Geophysicae*, 36(6), 1631–1646. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-1631-2018>
29. Yiğit, E., Medvedev, A. S., Benna, M., and Jakosky, B. M. (2021a). Dust storm-enhanced gravity wave activity in the martian thermosphere observed by MAVEN and implication for atmospheric escape. *Geophys. Res. Lett.* 48, e2020GL092095. doi:10.1029/2020GL092095
30. Yiğit, E., Medvedev, A. S., and Hartogh, P. (2021b). Variations of the Martian thermospheric gravity-wave activity during the recent solar minimum as observed by MAVEN. *Astrophysical J.* 920, 69. doi:10.3847/1538-4357/ac15fc
31. Young, R. E., Walterscheid, R. L., Schubert, G., Seiff, A., Linkin, V. M., & Lipatov, A. N. (1987). Characteristics of gravity waves generated by surface

- topography on Venus: comparison with the Vega balloon results. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 44, p. 2628-2639. doi: 10.1175/1520-0469(1987)044<2628:COGWGB>2.0.CO;2
32. Young, L. A., Yelle, R. V., Young, R., Seiff, A., & Kirk, D. B. (1997). Gravity waves in Jupiter's thermosphere. *Science*, 276(5309), 108–111. doi: 10.1126/science.276.5309.108