Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 315–317.

УДК 551.511.31
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-315
Orcid: 0009-0003-5321-0810

ДИНАМИКА АКТИВНОСТИ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ПЕРИОДЫ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ ИНФРАКРАСНОЙ КАМЕРЫ ВСЕГО НЕБА

Е.Н. Ноев, И.И. Колтовской, О.В. Тыщук., П.П. Аммосов

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия,
e-mail: NoevEN@ikfia.ysn.ru

DYNAMICS OF INTERNAL GRAVITY WAVE ACTIVITY DURING SUDDEN STRATOSPHERIC WARMINGS FROM INFRARED ALL-SKY CAMERA DATA

E.N. Noev, I.I. Koltovskoi, O.V. Tyshchuk, P.P. Ammosov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk,
Russia, e-mail: NoevEN@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Рассматриваются физические механизмы внезапных стратосферных потеплений (ВСП) и их влияние на верхнюю атмосферу, в частности на генерацию и распространение внутренних гравитационных волн (ВГВ) в мезосфере. Описана роль планетарных волн Россби в разрушении полярного вихря и последующей модуляции стратосферного ветра, которая определяет условия вертикального распространения ВГВ. Представлен метод наземных оптических наблюдений с использованием камер всего неба, регистрирующих пространственную структуру свечения гидроксила (OH) на высотах около 87 км. Приведены характеристики ВСП, зарегистрированных в период 2011–2014 гг., и статистика волновой активности (пакетов волн), выявленной методом временного дифференцирования до, во время и после каждого события. Полученные данные систематизированы в виде таблицы для дальнейшего анализа. Обсуждаются перспективы использования многолетних архивов наблюдений.

Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление, внутренние гравитационные волны, камера всего неба, гидроксил, мезопауза, метод временного дифференцирования.

Abstract. The report examines the physical mechanisms of sudden stratospheric warmings (SSWs) and their influence on the upper atmosphere, in particular on the generation and propagation of internal gravity waves (IGWs) in the mesosphere. The role of planetary Rossby waves in the destruction of the polar vortex and the subsequent modulation of the stratospheric wind, which determines the conditions for vertical IGW propagation, is described. A ground-based optical observation method using all-sky cameras that record the spatial structure of hydroxyl (OH) emission at altitudes of about 87 km is presented. Characteristics of SSWs recorded during 2011–2014 and statistics of wave activity (wave packets) detected by the time differencing method before, during and after each event are provided. The obtained data are systematized in a table for further analysis. Prospects for using long-term observation archives are discussed.

Keywords: sudden stratospheric warming, internal gravity waves, all-sky camera, hydroxyl, mesopause, time differencing method.

ВВЕДЕНИЕ

Внезапные стратосферные потепления относятся к числу наиболее ярких проявлений динамической изменчивости полярной стратосферы. В Северном полушарии они происходят в среднем раз в 1–2 года, сопровождаясь резким (на 30–50 К за несколько дней) повышением температуры на высотах 30–50 км и ослаблением или полным разрушением полярного вихря [Andrews et al., 1987]. Изменение зонального ветра в стратосфере кардинально перестраивает условия распространения внутренних гравитационных волн, которые, диссипируя в мезосфере, влияют на ее термический режим и динамику [Fritts, Alexander, 2003].

Наземные оптические методы, в частности наблюдения с помощью камеры всего неба, позволяют визуализировать волновые структуры в свечении гидроксила OH (высота ~87 км) и количественно оценивать активность ВГВ.

Цель данной работы — на основе обобщения известных физических механизмов и собственных данных представить характеристику ВСП и статистику зарегистрированных волн до, во время и после потеплений.

ФИЗИЧЕСКАЯ СХЕМА РАЗВИТИЯ ВСП

Инициатором ВСП служат крупномасштабные планетарные волны Россби, генерируемые в тропосфере за счет орографии (Гималаи, Скалистые горы) и термических контрастов между океанами и континентами [Matsuno, 1971]. Согласно критерию Чарни — Дразина, вертикальное распространение планетарных волн возможно только при наличии западного зонального потока, скорость которого не превышает 40–50 м/с [Charney, Drazin, 1961]. В конце зимы в Северном полушарии полярный вихрь ослабевает, что создает условия для проникновения волн в стратосферу.

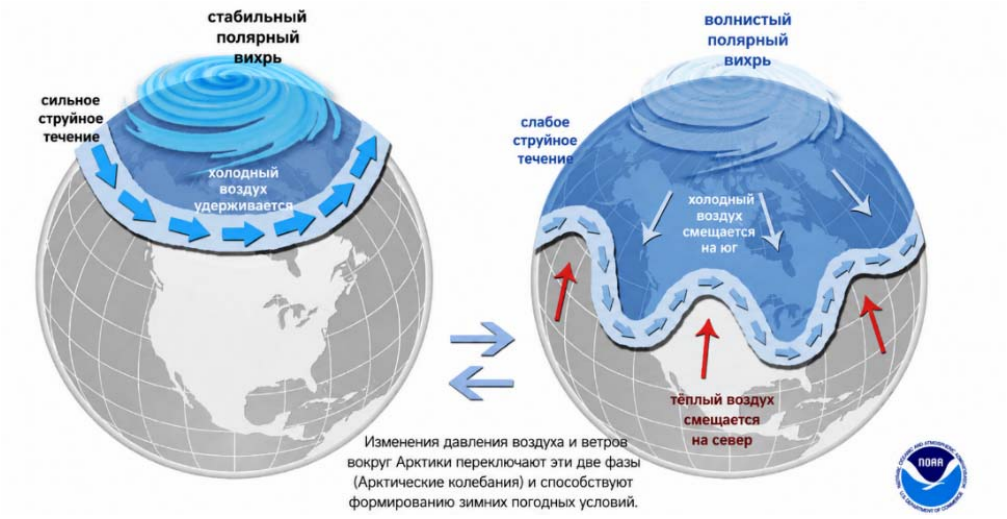

Рис. 1. Схема внезапного стратосферного потепления

Важным этапом, предшествующим мажорному ВСП, является постепенное ослабление вихря за счет предварительных эпизодов волнового разрушения на его периферии («зона прибоя») [McIntyre, 1982]. При достижении критической амплитуды планетарная волна нелинейно разрушается, передавая свой восточный импульс среднему потоку. Это приводит к резкому торможению полярного вихря, вплоть до полного реверса ветра (при мажорном ВСП) [Shepherd, 2002].

Нарушение геострофического равновесия запускает мощную меридиональную циркуляцию: теплый воздух из средних широт устремляется к полюсу и опускается. Опускание сопровождается адиабатическим сжатием и, следовательно, нагревом. Температура на уровне 10 гПа повышается на 30–50 К за 3–7 дней — это и есть внезапное стратосферное потепление.

Типы ВСП

Различают два основных типа внезапных стратосферных потеплений.

Минорное ВСП — повышение температуры в полярной стратосфере на 25 К и более за неделю, однако западный зональный ветер сохраняет свое направление. Полярный вихрь ослабевает, деформируется, но не разрушается.

Мажорное ВСП — полный реверс зонального ветра (с западного на восточный) на широтах 60–90° на уровне 10 гПа (~30 км) и ниже. Сопровождается разрушением или расщеплением полярного вихря и повышением температуры на 30–50 К за 3–7 дней. В Южном полушарии зафиксировано лишь одно мажорное ВСП (сентябрь 2002 г.) из-за большей устойчивости антарктического вихря [Charlton, Polvani, 2007].

Влияние на верхнюю атмосферу

После реверса ветра кардинально меняются условия фильтрации внутренних гравитационных волн. В нормальных зимних условиях сильный западный поток действует как фильтр, задерживая ВГВ. При восточном ветре «окно прозрачности» расширяется и ВГВ беспрепятственно распространяются в мезосферу (80–100 км) [Fritts, Alexander, 2003]. Рассеиваясь на этих высотах, они вызывают:

— охлаждение мезопаузы на 10–30 К;

— вертикальные смещения эмиссионных слоев (OH, OI);

— вариации интенсивности собственного свечения ночного неба;

— формирование специфических волновых структур, например мезосферных боров [Smith et al., 2009].

Таким образом, ВСП представляет собой каскадный процесс, связывающий тропосферные источники волн с динамикой стратосферы, мезосферы и нижней термосферы.

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Наземные оптические наблюдения выполняются на оптическом полигоне Маймага (около 63° с.ш., 129,5° в.д.) с использованием камер всего неба, работающих в инфракрасном диапазоне. Регистрация ведется в эмиссии гидроксила OH. Камера имеет поле зрения 180° и обеспечивает частоту съемки до 1 кадра в 3 мин. Это позволяет отслеживать быстрые изменения пространственной структуры свечения, связанные с прохождением внутренних гравитационных волн.

Для анализа данных камеры всего неба используется метод временного дифференцирования (time differencing, TD) [Swenson, Mende, 1994]. Суть метода заключается в попиксельном вычитании двух последовательных кадров, что позволяет усилить изменения интенсивности свечения, вызванные распространением ВГВ в атмосфере, — этот метод подходит для обработки данных камеры «ST-6». Для камеры всего неба «ST-9», работающей с более короткой экспозицией, применяется модифицированный метод TD, при котором результирующее изображение формируется из девяти последовательных кадров.

Таблица 1. Характеристика ВСП и количество зарегистрированных ВГВ в период 2011–2014 гг.

Тип ВСП	Даты начало/конец	Центральная дата	Длительность ВСП, дни	Количество событий		
				До ВСП	Во время ВСП	После ВСП
Минорное	с 29.01.2011 по 05.02.2011	02.02.2011	7	2	5	1
Минорное	с 11.01.2012 по 05.02.2012	21.01.2012	25	-	10	3
Мажорное	с 04.01.2013 по 27.01.2013	12.01.2013	23	3	12	7
Минорное	с 05.02.2014 по 13.02.2014	09.02.2014	8	5	0	0
Мажорное	с 14.03.2014 по 31.03.2014	17.03.2014	17	2	3	-

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе анализа изображений камеры всего неба, установленной на оптическом полигоне Маймага, за четыре наблюдательных сезона с 2011 по 2014 г. составлен перечень событий обнаружения внутренних гравитационных волн до (–10 дней), во время и после (+10 дней) внезапных стратосферных потеплений [Мордосова, Колтовской, 2022; Зоркальцева и др., 2023]. Камера оснащена инфракрасным фильтром, выделяющим эмиссию гидроксила OH (высота свечения ~87 км), что позволяет регистрировать пространственную неоднородность интенсивности свечения, связанную с прохождением волн.

В табл. 1 приведены характеристики зарегистрированных ВСП и количество выявленных ВГВ-пакетов.

АНАЛИЗ ДАННЫХ (2011–2014 ГГ.)

Наибольшее количество пакетов ВГВ наблюдается во время ВСП (в среднем 6 событий на одно потепление) по сравнению с периодами до (в среднем ~3) и после (в среднем ~2,75). Максимум зафиксирован для мажорного ВСП января 2013 г. — 12 событий. Для весеннего мажорного ВСП (март 2014 г.) активность ВГВ ниже (3 события), что может объясняться сезонными особенностями (более слабая стратификация мезосферы поздней зимой).

В минорных ВСП активность ВГВ также повышена, но менее выражена. Интересно, что после минорного потепления февраля 2014 г. события ВГВ практически отсутствуют, что может указывать на быстрое восстановление западного потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная таблица наглядно демонстрируют, что максимум регистраций ВГВ приходится на мажорное ВСП января 2013 г., а весеннее мажорное потепление 2014 г. дает значительно меньше ВГВ. Для минорных ВСП 2011, 2012 и 2014 гг. активность ВГВ также повышена, но менее выражена.

По данным оптических наблюдений в эмиссии OH над Якутском в 2011–2014 гг. зафиксировано повышение активности внутренних гравитационных волн в мезосфере во время ВСП. Максимум ВГВ-событий пришелся на мажорное ВСП января 2013 г. Для минорных ВСП и весеннего мажорного ВСП 2014 г. активность ВГВ ниже.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20119, https://rscf.ru/project/25-27-20119/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зоркальцева О. С., Антохина О. Ю., Антохин П. Н. Долговременная изменчивость параметров внезапных стратосферных потеплений по данным реанализа ERA5 //Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 03. С. 200.

Мордосова О. В., Колтовской И. И. Исследование внутренних гравитационных волн инфракрасной камерой всего неба над территорией Якутии //Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2022. Т. 40, № 3. С. 227–238.

Зоркальцева О.С., Антохина О.Ю., Антохин П.Н. Долговременная изменчивость внезапных стратосферных потеплений и их взаимосвязь с процессами в тропосфере // Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2022. С. 191.

Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B. Middle Atmosphere Dynamics. Academic Press, 1987. 489 p.

Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Rev. Geophys. 2003. V. 41. P. 1003.

Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming // J. Atmos. Sci. 1971. V. 28. P. 1479–1494.

Charney J.G., Drazin P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // J. Geophys. Res. 1961. V. 66. P. 83–109.

McIntyre M.E. How well do we understand the dynamics of stratospheric warmings? // J. Meteor. Soc. Japan. 1982. V. 60. P. 37–65.

Shepherd T.G. Dynamics of the middle atmosphere // J. Meteor. Soc. Japan. 2002. V. 80. P. 719–750.

Charlton A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks // J. Clim. 2007. V. 20. P. 449–469.

Smith S.M., Baumgardner J., Mende S.B. Mesospheric gravity wave activity at equatorial and middle latitudes // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2009. V. 71. P. 875–885.

Swenson G.R., Mende S.B. OH emission and gravity wave (including a breaking wave) in all-sky imagery from Bear Lake // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21, N 20. P. 2239–2242.

Baldwin M. P. et al. Sudden stratospheric warmings // Rev. Geophys. 2021. T. 59, № 1, e2020RG000708.

NOAA. The science behind the polar vortex: You might want to put on a sweater. https://www.noaa.gov/multimedia/infographic/science-behind-polar-vortex-you-might-want-to-put-on-sweater (дата обращения 15.05.2026)