ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2020, том 56, № 2, с. 186–194

УДК 551.511.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАЧНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ТЕЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИХ СУЩЕСТВОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ HIMAWARI-8

© 2020 г. А. В. Скороходов*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Академика Зуева, 1, Томск, 634055 Россия

**e-mail: vazime@yandex.ru*

Поступила в редакцию 28.10.2019 г.
После доработки 14.11.2019 г.
Принята к публикации 20.11.2019 г.

Представлены результаты исследования изменчивости характеристик внутренних гравитационных волн и их сигнатур по спутниковым данным. Рассмотрены эпизоды наблюдения рассматриваемых волновых процессов над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации в период с 2015 по 2017 г. При этом использовались высокопериодичные спутниковые снимки Himawari-8 и тематические продукты их обработки. Приведено описание методов и алгоритмов восстановления параметров внутренних гравитационных волн и их облачных проявлений. Построены тренды для различных характеристик рассматриваемых волновых процессов. Выявлена типовая изменчивость параметров внутренних гравитационных волн и их сигнатур на основе наиболее продолжительных эпизодов их наблюдения. Приведены результаты анализа коэффициентов корреляции между различными характеристиками рассматриваемых волновых процессов. Установлены схожие эпизоды наблюдения сигнатур внутренних гравитационных волн за исследуемый промежуток времени. Обсуждаются процессы, происходящие в системе “атмосфера–подстилающая поверхность” и их влияние на создание благоприятных условий для генерации и распространения рассматриваемых волновых процессов.

Ключевые слова: атмосфера, внутренние гравитационные волны, изменчивость характеристик, облачность, подстилающая поверхность, спутниковые данные, тренды

DOI: 10.31857/S000235152002011X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время внутренние гравитационные волны (ВГВ) являются одними из наименее изученных явлений в атмосфере Земли. В первую очередь это обусловлено нерегулярностью их появления над одной и той же территорией, сложностью их детектирования, а также временем их существования. Однако результаты исследований, полученных в последнее десятилетие, свидетельствуют о связи рассматриваемых явлений с различными процессами окружающей среды. Так, в [1] обсуждается взаимосвязь ВГВ с общей циркуляцией и образованием ураганов, в [2] – их влияние на термосферу Земли, а в [3] – их возникновение под воздействием прохождения волн цунами. Поэтому существует необходимость в улучшении понимания механизмов генерации и распространения рассматриваемых волновых процессов над конкретными регионами планеты.

Традиционными методами регистрации ВГВ и их сигнатур являются акустическое [4], лидарное [5] и радиолокационное [6] зондирование, которые обеспечивают хоть и локальный, но достаточно регулярный мониторинг указанных явлений над сушей с хорошим временны́м разрешением. Над водной поверхностью эпизодические исследования рассматриваемых волновых процессов являются сопутствующим результатом других экспериментов. В настоящее время для исследований ВГВ стали активно привлекаться результаты дистанционного зондирования Земли из космоса. Большая часть из них направлена на изучение рассматриваемых явлений в ионосфере с помощью анализа вариаций полного электронного содержания по данным сигналов спутников GPS и ГЛОНАСС [7–9]. Однако на изображениях из космоса в видимом диапазоне спектра ВГВ проявляются в виде упорядоченных квазипараллельных полос протяженностью до нескольких сотен километров, образованных облаками нижнего и среднего ярусов. Основными причинами возникновения таких тропосферных волн являются рельеф подстилающей поверхности (горы, острова, холмы), а также процессы поднятия воздушных

масс, обладающих большой вертикальной составляющей скорости (конвекция, конвергенция, развитие атмосферного фронта) [10]. При этом на гребнях волн происходит конденсация влаги с последующим образованием облаков.

Результаты спутниковой съемки позволили выделить регионы с наибольшей повторяемостью облачных проявлений ВГВ [11]. Однако комплексная параметризация рассматриваемых явлений над ними по-прежнему отсутствует. Рассмотрены и описаны лишь единичные эпизоды наблюдения облачных проявлений ВГВ [12]. При этом известны необходимые условия возникновения рассматриваемых явлений: устойчивая стратификация, присутствие струйных течений нижнего уровня и наличие слоев температурной инверсии [13]. Детальная же информация о ВГВ и их сигнатурах над конкретным регионом планеты позволит выявить не только причины и источники их генерации, но и взаимосвязь с различными процессами окружающей среды. Кроме этого, рассматриваемые волновые процессы относятся к авиационным факторам риска, что делает их изучение актуальным с точки зрения обеспечения безопасности полетов воздушных судов [14].

На данный момент на орбите Земли находятся несколько десятков спутниковых систем, сканирующих ее поверхность в различных спектральных диапазонах. Полярно-орбитальные спутники позволяют получать изображения одной и той же территории не чаще 1–2 раз в день. Это позволяет охарактеризовать ВГВ и их сигнатуры только в какой-то определенный момент их существования. Такой подход широко применяется в данной области [15–17]. Однако при исследовании рассматриваемых явлений более целесообразным является использование результатов геостационарной съемки, периодичность которой в настоящее время достигает 2.5 мин. Это дает возможность оценить изменчивость характеристик ВГВ и их сигнатур в течение времени их существования. При этом современные геостационарные спутники приблизились по своим характеристикам к полярно-орбитальным, обеспечивая тем самым достоверность получаемой ими информации.

Таким образом, целью данной работы является исследование изменчивости характеристик облачных проявлений ВГВ за время их существования на основе спутниковых данных Himawari-8 отдельно взятого региона планеты и выявление особенностей их генерации и распространения над ним.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Восстановление параметров облачных проявлений ВГВ осуществлялось на основе использования результатов спутниковой съемки Himawari-8, полученных в период с 2015 по 2017 г. В стандартном режиме данный аппарат позволяет получать изображения всего земного диска (Азиатско-Тихоокеанский регион) раз в 10 мин с пространственным разрешением 500, 1000 и 2000 м в зависимости от спектрального диапазона. Таким образом, периодичность дневной съемки может составлять 35–45 снимков, учитывая время года и положение солнечного терминатора. Предварительно поиск эпизодов наблюдения облачных проявлений ВГВ выполнен путем анализа спутниковых снимков Terra и Aqua, представленных онлайн-сервисом MODIS Atmosphere (https://modis-images.gsfc.nasa.gov). При этом в качестве целевого региона рассматривалось Тихоокеанское побережье Российской Федерации, характеризуемое высокой повторяемостью исследуемых волновых процессов. Так, в 2015 г. количество дней наблюдения сигнатур ВГВ составило 98, в 2016 – 110 и в 2017 – 106. Среди всего объема данных было отобрано 40 наиболее продолжительных эпизодов регистрации рассматриваемых явлений с ярко выраженной структурой их сигнатур. Спутниковые данные Himawari-8 на выбранные даты были предоставлены ДЦ ФГБУ “НИЦ “Планета”, которые включали изображения целевого региона в видимом диапазоне спектра через каждые 10 мин, а также тематические продукты, содержащие информацию о характеристиках облачности и подстилающей поверхности.

Следует отметить, что в исследуемом регионе волновые процессы, генерируются под воздействием различных факторов. На рис. 1 показаны облачные проявления ВГВ, возникновению которых совершенно очевидно способствовала Курильская островная гряда. На рис. 2 квазипараллельные полосы расположены перпендикулярно береговой линии острова Парамушир и движутся по направлению на северо-восток. При этом высота верхней границы облаков за время их распространения увеличилась более чем в 2.5 раза. Это свидетельствует о высокой интенсивности поднятия воздушных масс, способствующих генерации ВГВ. В данной работе сигнатуры рассматриваемых волновых процессов описывались следующими характеристиками:

– площадь, занимаемая группой квазипараллельных полос S,

– средняя толщина квазипараллельных полос W,

– средняя протяженность квазипараллельных полос L,

– число квазипараллельных полос N,

– длина волны λ,

– скорость распространения волны ν,

– период волны T,

– температура верхней границы облаков $T_{ВГ}$,

– давление на верхней границы облаков $p_{ВГ}$,

– высота верхней границы облаков $h_{ВГ}$,

– температура подстилающей поверхности $T_{ПП}$.

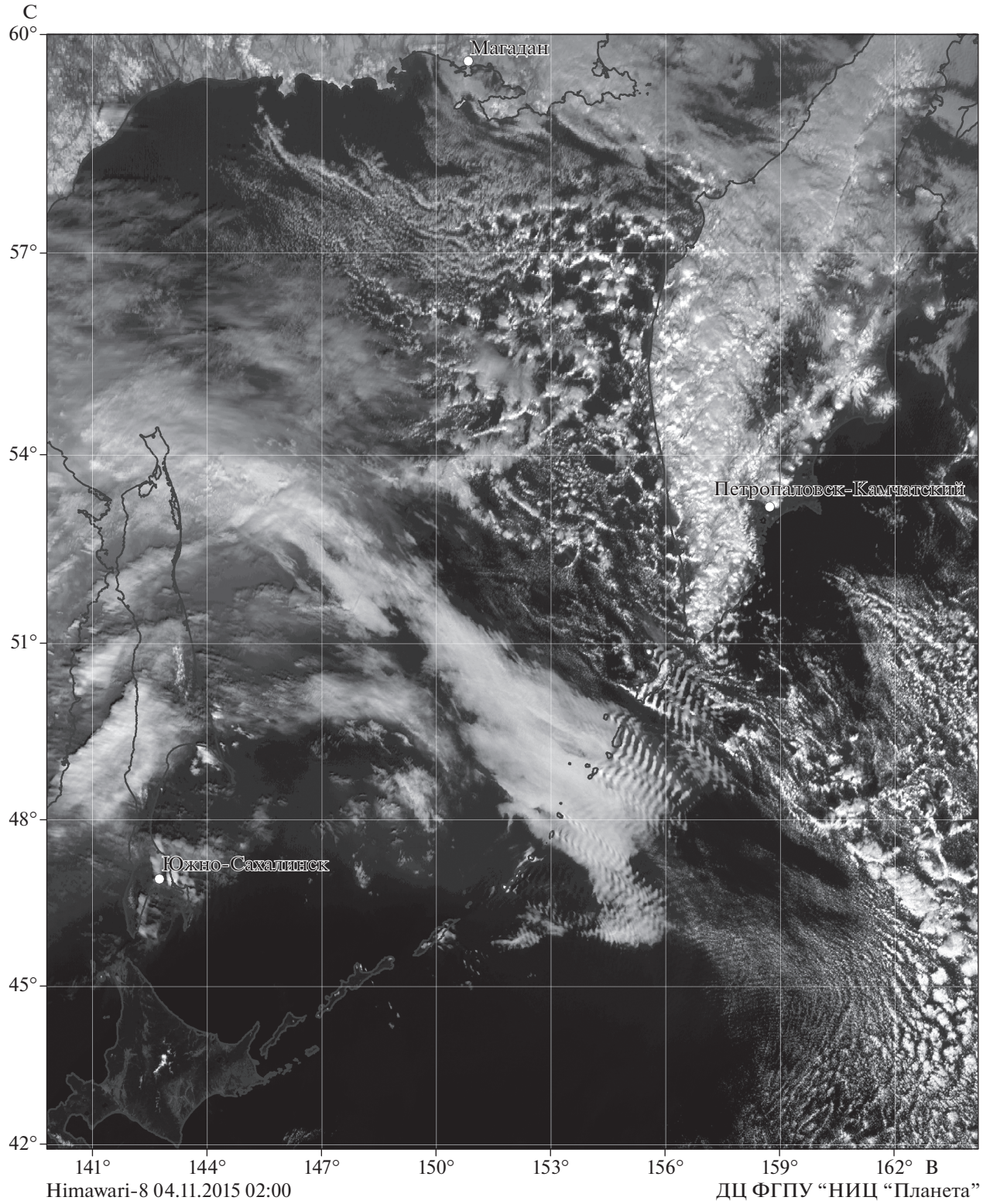

Рис. 1. Облачные проявления внутренних гравитационных волн над акваторией северных островов Курильского архипелага.

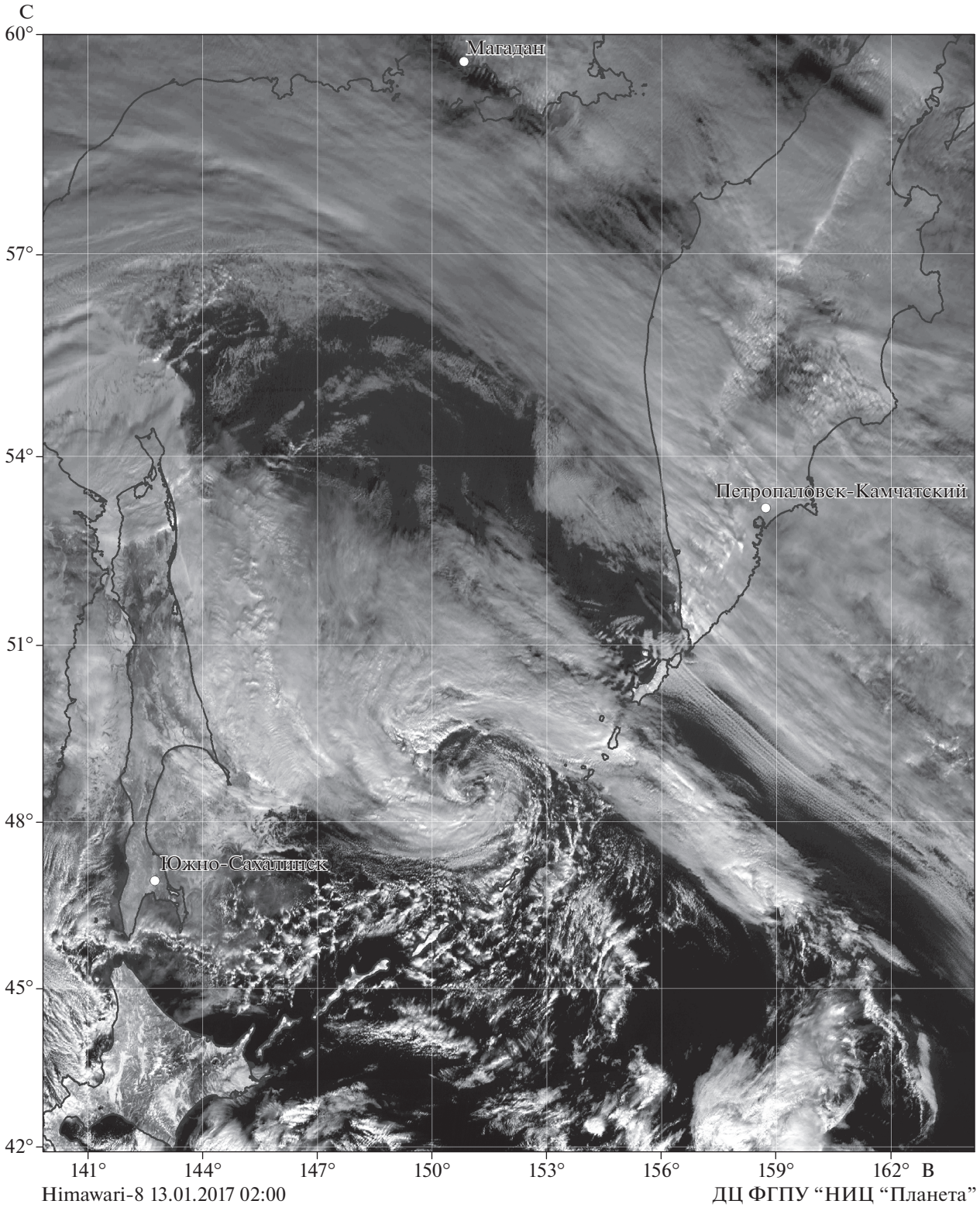

Рис. 2. Облачные проявления внутренних гравитационных волн перпендикулярные береговой линии Курильских островов.

Кроме этого, восстановленные характеристики облачных проявлений ВГВ верифицировались на основе результатов аэрологических измерений метеостанций региона: Ключи, Кусиро, Немуро, Петропавловск-Камчатский, Северо-Курильск, Соболево и Южно-Сахалинск.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАЧНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ВГВ

Восстановление характеристик рассматриваемых волновых процессов и их сигнатур осуществлялось путем применения методов и алгоритмов, предложенных в [18]. Вычисление площади облачных проявлений ВГВ осуществляется на основе оконтуривания всей группы квазипараллельных полос на снимке видимого диапазона спектра и подсчета числа пикселей внутри выделенной области. Для определения толщины, протяженности и числа облачных линий, а также периода волнового процесса проводится секущая, перпендикулярная им. При этом выбирается участок сигнатуры с наименьшим количеством разрывов квазипараллельных полос. Наиболее яркие пиксели в каждой облачной линии, являющиеся точкам пересечения с секущей, считаются центрами гребней волны. На основе этого предположения и вычисляются искомые параметры. Высота, температура и давление на верхней границе облаков, а также температура подстилающей поверхности определяется на основе соответствующих тематических продуктов Himawari-8. При этом объективная точность восстановления параметров облачности согласно производителю указанной аппаратуры составляет 300 м для $h_{ВГ}$, 15–30 гПа для $p_{ВГ}$ в зависимости от высоты, и 1.5 K для $T_{ВГ}$, а для $T_{ПП}$ не превышает 1 K. Это обуславливает достоверность полученных данных.

Результаты восстановления характеристик ВГВ и их сигнатур по спутниковым снимкам Himawari-8, полученных с интервалом 10 мин, позволяют проследить динамику этих параметров, а также выявить их характерные особенности. Однако не всегда удается зарегистрировать все этапы существования облачных проявлений волнового процесса (генерация, распространение, затухание) из-за его большой длительности и отсутствия информации в видимом диапазоне спектра в ночное время суток. При этом довольно часто в рамках одного эпизода наблюдаются несколько этапов усиления и ослабления волны. На снимках же в инфракрасном диапазоне спектра структура сигнатур ВГВ является размытой, что не позволяет надежно восстановить рассматриваемые в работе характеристики.

На рис. 3 показаны графики изменения некоторых характеристик облачных проявлений ВГВ, зарегистрированных 04.11.2015 г. над акваторией северных островов Курильского архипелага (рис. 1), в течение времени их существования. В 00:00 число квазипараллельных полос равнялось 6, к 04:00 увеличилось до 16, а затем постепенно снизилось до 14. Аналогичная тенденция характерна для площади и толщины облачных проявлений ВГВ, что видно из рис. 3а. При этом длина и скорость распространения волнового процесса к моменту завершения его регистрации снизились от первоначальных значений на 14 и 52% соответственно, а период увеличился более чем в два раза (рис. 3б). Характеристики же облаков демонстрируют типичную динамику – рост температуры и давления на верхней границе при уменьшении ее высоты (рис. 3в). Кроме этого, наблюдалось увеличение температуры океана с 4 до 7°C, что является существенным приростом данного параметра для рассматриваемого региона в это время года за исследуемый промежуток времени. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что до 04:00 волновой процесс находился на этапе распространения, а затем стал затухать. Учитывая динамику увеличения числа полос, можно предположить, что генерация ВГВ и ее сигнатур началась между 20 и 21 ч 03.11.2015 г. Аналогично можно спрогнозировать время полного затухания волнового процесса, которое находится между 8 и 9 ч 03.11.2015 г. Однако данные предположения являются лишь оценками, которые адекватны только в условиях неизменности динамики рассматриваемых характеристик ВГВ. Полученные результаты восстановления параметров рассматриваемых волновых процессов хорошо согласуются с аэрологическими данными, а также с инструментальными измерениями температуры подстилающей поверхности.

В табл. 1 представлены процентные изменения параметров волновых процессов в течение времени их существования для наиболее продолжительных эпизодов их регистрации из 40 отобранных. Уменьшение или увеличение значений характеристик ВГВ и их сигнатур менее чем на 5% рассматривалось в качестве статистической погрешности. Таким образом, на основе приведенной таблицы можно сделать ряд выводов. Положительный тренд наиболее характерен для площади и числа квазипараллельных полос, а также температуры подстилающей поверхности. Такая динамика S и N обусловлена различной длительностью этапов распространения и затухания волновых процессов. Относительно $T_{ПП}$ можно предположить, что ее увеличение способствует ослаблению колебательных движений за счет нагрева приповерхностного воздуха. Такая гипотеза вполне допустима, учитывая механизм образования орографических волн, согласно которому набегающий поток теплого воздуха с Охотского моря поднимается над препятствия-

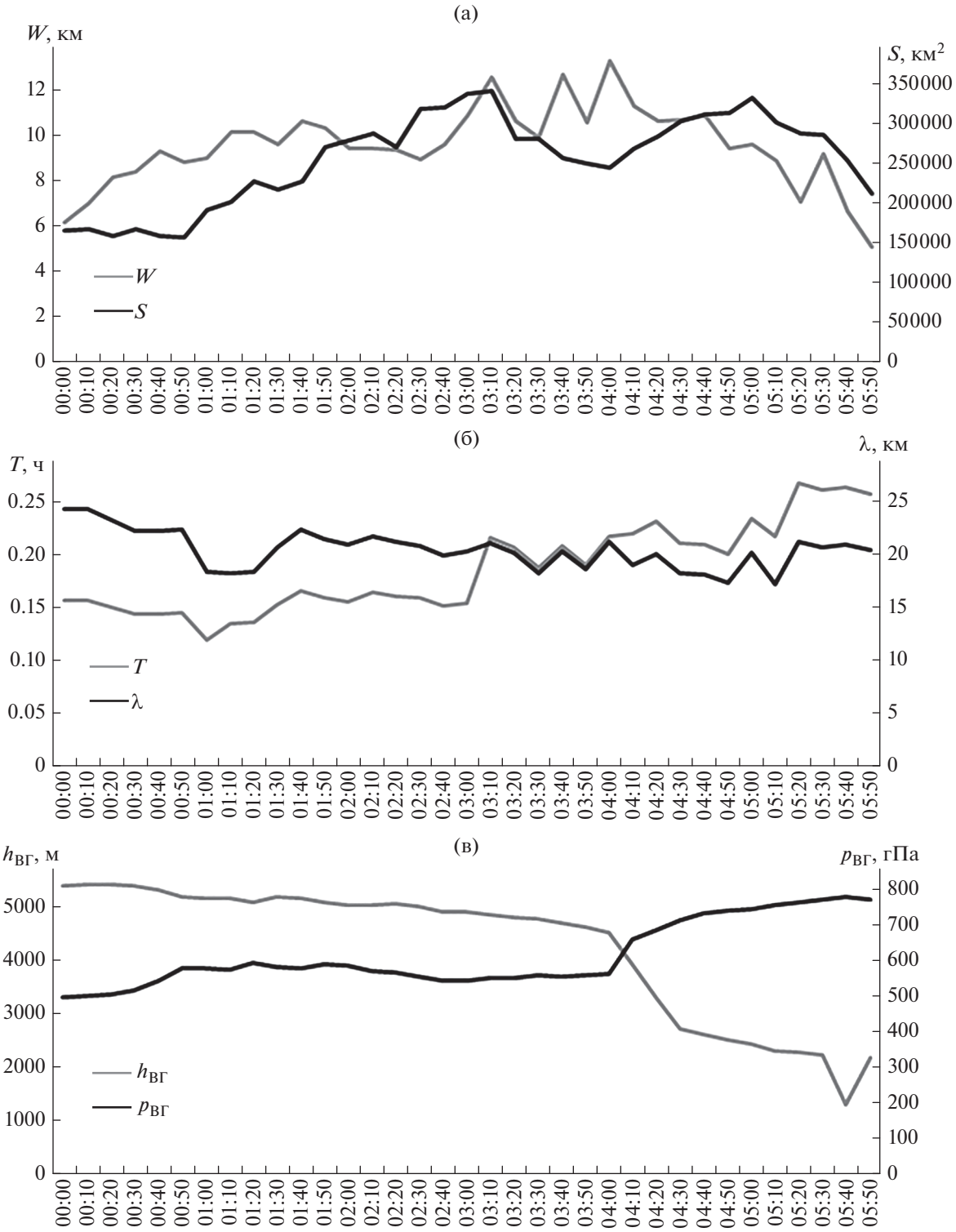

Рис. 3. Изменчивость характеристик облачных проявлений внутренних гравитационных, наблюдаемых 04.11.2015 г., в течение времени их существования: площади и толщины квазипараллельных полос (а), длины и периода волнового процесса (б), высоты и давления на верхней границе облаков (в).

ми (Курильскими островами) и смешивается с холодными воздушными массами, приходящими со стороны океана.

Отрицательный тренд наиболее характерен для толщины и протяженности квазипараллельных полос, а также длины и периода волнового

Таблица 1. Процентное изменение характеристик ВГВ и их сигнатур

Дата	S, %	W, %	L, %	N, %	λ, %	ν, %	T, %	$T_{ВГ}$, %	$p_{ВГ}$, %	$h_{ВГ}$, %	$T_{ПП}$, %
29.08.15	−10	−51	25	7	−14	−11	<5	<5	<5	−20	16
10.10.15	104	−21	−18	−33	−37	−53	23	<5	<5	−12	47
04.11.15	65	<5	−18	172	−14	−52	108	<5	52	−61	61
26.01.16	−43	−7	−33	14	6	14	−12	<5	9	−11	19
09.03.16	−18	7	−32	48	84	<5	87	<5	11	−12	152
05.05.16	16	−9	27	128	27	12	38	<5	−25	91	<5
29.09.16	70	−21	−8	22	−7	55	−45	<5	<5	−13	<5
25.10.16	118	−7	50	<5	9	19	−11	<5	<5	<5	−29
13.01.17	−19	<5	−36	−11	−25	38	−45	<5	−16	249	−23
09.02.17	−26	−32	−64	21	−31	−20	−9	<5	−33	<5	–
11.04.17	−32	−38	−38	<5	−43	<5	−35	<5	<5	<5	−16
09.05.17	39	−42	−17	−14	−48	34	−65	<5	<5	−16	16
06.11.17	56	33	<5	42	−15	<5	−17	<5	<5	<5	−16
28.11.17	44	−12	12	66	−23	7	−30	<5	37	−37	23
Итого	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↔	↔	↓	↑

процесса. Такую изменчивость W и L можно объяснить тем, что интенсивность конденсации по мере удаления от источника генерации ВГВ ослабевает. Поэтому на начальных этапах развития волнового процесса число квазипараллельных полос невелико, их толщина и протяженность примерно одинакова. Далее образующиеся облачные линии являются уже менее широкими и длинными. Аналогичным образом объясняется тенденция к уменьшению λ и T – расстояние между новыми квазипараллельными полосами уменьшается. При этом скорость распространения ВГВ может, как расти, так и падать в течение всего периода ее существования.

Нейтральный тренд характерен для температуры и давления на верхней границе облаков. Такую динамику $T_{ВГ}$ и $p_{ВГ}$ можно объяснить незначительными колебаниями амплитуды волнового процесса, которая согласно [19] редко превышает 300–500 м в течение всего периода его существования. Однако типичную изменчивость высоты верхней границы определить достаточно сложно, поскольку наблюдается, как сильный рост значений $h_{ВГ}$ (например, 05.05.2016 и 13.01.2017), так и их существенная убыль (например, 04.11.15 и 28.11.17). Примечательно, что 13.01.2017 наблюдались ВГВ, не связанные с орографией (рис. 2). Однако высота облачных проявлений волнового процесса за время их регистрации увеличилась в 2.5 раза на фоне повышения только его скорости.

Анализируя табл. 1, были выделены наиболее схожие эпизоды наблюдения сигнатур ВГВ по совокупной тенденции изменения их характеристик. К ним относятся 10.10.2015 с 09.05.2017 и 29.09.2016 с 09.05.2017. При этом в указанные даты облачные проявления волновых процессов наблюдались над различными участками Курильской островной гряды: 09.05.2017 над южной частью, 10.10.2015 над центральной и 29.09.2016 над северной. Наиболее отличающийся от всех остальных эпизодов наблюдения ВГВ зарегистрирован 05.05.2016, когда ее облачные проявления продвигались перпендикулярно Курильской гряде от о. Хоккайдо до п-ва Камчатка, а центры квазипараллельных полос располагались над поверхностью островов. В последней строке табл. 1 приведена типовая изменчивость характеристик сигнатур ВГВ в течение времени их существования над рассматриваемым регионом планеты, где "↑" – обозначает положительный, "↓" – отрицательный и "↔" – нейтральный тренд.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции r для рассматриваемых в работе параметров ВГВ и их сигнатур. При этом уровень значимости r равнялся 0.1. Анализируя данную таблицу, можно заметить, что ожидаемо высокие значения r наблюдаются между характеристиками верхней границы облаков: высотой, давлением и температурой, а также параметрами самого волнового процесса: длиной, скоростью и периодом. Кроме этого, логичным выглядит достаточно большое значение r между площадью и протяженностью квазипараллельных полос. Наиболее интересной же особенностью является хорошая корреляция температуры подстилающей поверхности с длиной и периодом волнового процесса. Кроме этого, высокое значение r наблюдается для периода ВГВ и числа квазипараллельных полос. При этом из таблицы 2 видно, что значительное число пар признаков плохо коррелируют между собой. Таким образом, можно предположить, что некоторая взаимосвязь между процессами, происходящими в системе "атмосфера–подстилающая поверхность" присутствует. Однако для выявления механизмов этих взаимодействий в рассматриваемом регионе необходимо привлекать допол-

Таблица 2. Корреляционная таблица для характеристик ВГВ и их облачных проявлений

	S	W	L	N	λ	$T_{ВГ}$	ν	$T_{ПП}$	$h_{ВГ}$	$p_{ВГ}$	T
S	1.00	0.19	0.56	0.04	–0.13	0.28	–0.12	–0.10	–0.30	0.30	0.07
W		1.00	0.05	0.39	0.43	0.13	0.00	0.15	–0.30	0.19	0.36
L			1.00	0.16	0.19	0.10	0.16	–0.23	–0.13	0.14	0.01
N				1.00	0.34	0.02	–0.29	0.28	–0.17	0.42	0.67
λ					1.00	0.00	0.11	0.61	–0.01	0.03	0.59
$T_{ВГ}$						1.00	–0.13	0.34	–0.58	0.88	0.13
ν							1.00	–0.38	0.40	–0.31	–0.65
$T_{ПП}$								1.00	–0.35	0.43	0.72
$h_{ВГ}$									1.00	–0.55	–0.26
$p_{ВГ}$										1.00	0.37
T											1.00

нительную информацию, например, об океаническом апвеллинге в районе Курило-Камчатского желоба, характеристиках течения Оясио, сейсмической активности, режимах вскрытия морей ото льда и другого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы является информация об изменчивости характеристик облачных проявлений ВГВ в течение времени их существования на основе эпизодов их наблюдения над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации. Данные сведения были получены на основе использования высокопериодичных спутниковых данных Himawari-8, а также методов и алгоритмов восстановления характеристик рассматриваемых волновых процессов из [18]. Данный подход позволяет проанализировать динамику параметров облачных проявлений ВГВ, и выделить этапы развития волнового процесса: генерации, распространения и затухания. Несмотря на то, что время существования ВГВ может существенно превышать продолжительность дневной спутниковой съемки Himawari-8, результаты исследования позволяют оценить время их генерации и затухания.

Информация о процентном изменении характеристик рассматриваемых волновых процессов за время их существования, приведенная в табл. 1, позволила определить их типовую динамику для данного региона и выделить схожие эпизоды наблюдения. Так положительный тренд характерен для площади и числа квазипараллельных полос, скорости распространения ВГВ и температуры подстилающей поверхности. Наиболее часто отрицательный тренд наблюдается у толщины и протяженности облачных линий, длины и периода волнового процесса и высоты верхней границы облаков. Нейтральным трендом характеризуется температура и давление на верхней границе облаков. На основании полученных результатов выдвинуто предположение о том, что в рассматриваемом регионе планеты повышение температуры подстилающей поверхности ослабляет колебательные движения за счет нагрева приповерхностного воздуха. Наиболее схожими эпизодами наблюдения облачных проявлений ВГВ (тренды совпадают у 9 параметров) являются: 10.10.2015 с 09.05.2017 и 29.09.2016 с 09.05.2017. При этом сигнатуры волнового процесса в указанные дни наблюдались над различными участками Курильской островной гряды.

Анализ коэффициентов корреляции между всеми парами характеристик облачных проявлений ВГВ позволил выявить взаимосвязь некоторых из них. Высокое значение r между температурой, высотой и давлением на верхней границе облаков свидетельствует о типичной изменчивости этих параметров – увеличение $h_{ВГ}$ сопровождается уменьшением $T_{ВГ}$ и $p_{ВГ}$. Закономерно выглядит хорошая корреляция между площадью и протяженностью квазипараллельных полос, а также периодом, длиной и скоростью ВГВ. При этом наблюдаются и неожиданные взаимосвязи, например, между температурой подстилающей поверхности, длиной облачных линий и периодом волнового процесса. Однако для выявления причин такой динамики необходимо привлекать дополнительную информацию о состоянии окружающей среды в рассматриваемом регионе в моменты прохождения ВГВ.

Перспективным направлением развития данной работы является оценка влияния различных процессов, происходящих в системе “атмосфера–подстилающая поверхность” на создание благоприятных условий для генерации и распространения рассматриваемых волновых процессов. Другим направлением является сравнение результатов исследования изменчивости характеристик ВГВ и их сигнатур, наблюдаемых над различными регионами планеты.

Работа в части исследования атмосферных внутренних волн выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых российских ученых - кандидатов наук № МК-1745.2018.5, а изучения характеристик облачности – в рамках госу-

дарственного заказа ИОА СО РАН (рег. № АААА-А17-117021310142-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Coleman A.T., Knupp K.R.* The interactions of gravity waves with mesocyclones: preliminary observations and theory // Mon. Weather Rev. 2008. V. 136. P. 4206–4219.
2. *Liu H.-L., McInerney J. M., Santos S., Lauritzen P.H., Taylor M.A., Pedatella N.M.* Gravity waves simulated by high-resolution Whole Atmosphere Community Climate Model // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. P. 9106–9112.
3. *Скороходов А.В., Шевченко Г.В.* Внутренние гравитационные волны в атмосфере, вызванные цунами, над Курильскими островами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 428–436.
4. *Камардин А.П., Одинцов С.Л., Скороходов А.В.* Идентификация внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое по данным содара // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 812–818.
5. *Банах В.А., Смалихо И.Н., Сухарев А.А., Фалиц А.В.* Лидарная визуализация струйных течений и внутренних гравитационных волн в пограничном слое атмосферы. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 8. С. 694–702.
6. *Rodenas J., Garello R.* Internal wave detection and location in SAR images using wavelet transform // IEEE Transact. Geosci. and Rem. Sens. 1998. V. 36. P. 1494–1507.
7. *Artru J., Ducic V., Kanamori H., Lognonne P., and Murakami M.* Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis // Geophys. J. Int. 2005. V. 160. P. 840–848.
8. *Liou Y.A., Pavelyev A.G., Wickert J.* Observation of the gravity waves from GPS/MET radio occultation data // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2005. V. 67. P. 219–228.
9. *Nayak C., Yigit E.* GPS-TEC observation of gravity waves generated in the ionosphere during 21 August 2017 total solar eclipse // J. Geophys. Res. 2017. V. 122. P. 725–738.
10. *Pedlosky J.* Waves in the ocean and atmosphere. Introduction to wave dynamics: Berlin: Springer, 2003. 260 p.
11. *Nappo C.J.* An introduction to atmospheric gravity waves. San Diego: Academic Press, 2013. 359 p.
12. *Lutzak P.A.* A proposal for analyzing and forecasting low-eratmospheric undular bores in the western Gulf of Mexico region // Wea. Forecasting. 2013. V. 28. P. 55–76.
13. *Госсард Э.Э., Хук У.К.* Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
14. Авиационные факторы риска. Программа обучения и подготовки ETR № 20. Женева: Изд-во ВМО, 2007. 53 с.
15. *da Silva J.C.B., Magalhaes J.M.* Satellite observations of large atmospheric gravity waves in the Mozambique Channel // International J. Remote Sensing. 2009. V. 30. P. 1161–1182.
16. *Xu J., Li Q., Yue J., Hoffmann L., Straka W.C., Wang C., Liu M., Yuan W., Han S., Miller S.D., Sun L., Liu X, Liu W., Yang J., Ning B.* Concentric gravity waves over northern China observed by an airglow imager network and satellites // J. Geophys. Res. Atmos. 2015. V. 120. P. 11058–11078.
17. *Jackson C.* Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. P. C11012:1–C11012:13.
18. *Скороходов А.В., Курьянович К.В.* Методы и алгоритмы восстановления характеристик атмосферных внутренних волн на основе спутниковых данных и результатов аэрологического зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 24–31.
19. *Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М.* Мезометеорологические процессы: Учебное пособие. М.: МГУ, 2006. 101 с.

Research of Characteristics Variability for Cloud Manifestations of Internal Gravity Waves during Their Lifetime Based on HIMAWARI-8 Satellite Data

A. V. Skorokhodov*

Zuev Institute of atmospheric optics SB RAS, Academician Zuev square, 1, Tomsk, 634055 Russia

**e-mail: vazime@yandex.ru*

The study results of the characteristics variability for internal gravity waves and their signatures based on satellite data are presented. The observation episodes of the wave processes under consideration over the Russian Federation Pacific coast in the period from 2015 to 2017 are considered. High-period satellite images Himawari-8 and thematic products of their processing were used. The description of methods and algorithms for recovering the parameters of internal gravity waves and their cloud manifestations is given. Trends are constructed for various characteristics of the wave processes under consideration. The typical parameters variability of the internal gravity waves and their signatures based on the longest episodes of their observation is revealed. The results are presented for analysis of the correlation coefficients between the various characteristics of the wave processes under consideration. Similar episodes of observing the signatures of internal gravity waves for the studied time period were established. The processes occurring in the system "atmosphere–underlying surface" and their influence on the creation of favorable conditions for the generation and propagation of the wave processes under consideration are discussed.

Keywords: atmosphere, internal gravity waves, characteristics variability, clouds, underlying surface, satellite data, trends