

ФИЗИКА

УДК 550.388

Научная статья

**Исследование внутренних гравитационных волн
инфракрасной камерой всего неба над территорией Якутии**

О. В. Мордосова^{1,2}, И. И. Колтовской¹

¹ Институт космофизических исследований и аэронавтики им Ю. Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук,
677027, г. Якутск, пр. Ленина 31, Республика Саха (Якутия), Россия


² Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова,
677000, г. Якутск, ул. Белинского 58, Республика Саха (Якутия), Россия

E-mail: oleSmile@mail.ru, koltigor@mail.ru

Внутренние гравитационные волны – это пространственно-временные колебания воздушных масс в атмосфере, которые помимо продольной составляющей имеют еще и поперечную составляющую, что отличает их от обычных акустических волн. За последние десятилетия достигнут значительный прогресс в изучении динамики атмосферы, однако по-прежнему остается сложной и актуальной задачей решение крупномасштабных волновых движений воздушных масс, в частности внутренних гравитационных волн. Для выявления внутренних гравитационных волн была изучена пространственная неоднородность в эмиссиях свечения ночного неба на высоте около 87 км, где излучаются полосы молекул гидроксила. Регистрация волн проводилась при помощи инфракрасной цифровой камеры всего неба, установленной на оптическом полигоне Маймага (Якутия). Обработка данных выполнялась методом временного дифференцирования снимков. Было получено 1140 кадров за два сезона (2016–2017 гг. и 2017–2018 гг.) с выраженной волновой периодической структурой, которые были определены как внутренние гравитационные волны. Для каждого случая обнаруженных внутренних гравитационных волн были определены такие параметры как: период волны, длина волны, скорость распространения, направление распространения, время и продолжительность наблюдения. Длины зарегистрированных волн варьируют от 9,6 до 52,5 км (среднее значение равно 25 км), наблюдаемые горизонтальные фазовые скорости изменяются от 22,5 до 158,3 м/с (среднее значение равно 60 м/с), оцененные периоды находятся в пределах от 4,5 до 13,3 мин (среднее значение равно 7 мин) и распространение волн направлено преимущественно на северо-запад.


Ключевые слова: внутренние гравитационные волны, мезосфера, инфракрасная камера всего неба, временное дифференцирование.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке фонда РФФ (№ 22-27-20137, <https://rscf.ru/project/22-27-20137/>).

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-227-238

Поступила в редакцию: 29.10.2022

В окончательном варианте: 16.11.2022

Для цитирования. Мордосова О. В., Колтовской И. И. Исследование внутренних гравитационных волн инфракрасной камерой всего неба над территорией Якутии // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2022. Т. 40. № 3. С. 227-238.  DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-227-238

Контент публикуется на условиях лицензии *Creative Commons Attribution 4.0 International* (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Мордосова О. В., Колтовской И. И., 2022

Введение

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) – это пространственно-временные колебания воздушных масс. Генерация этих волн в основном происходит в тропосфере или на ее границе во время активных метеорологических процессов (погодный фронт, грозы, ураганы, бури, сильный ветер), орографических особенностей местности (обтекание воздушными потоками горных массивов, граница море–суша) и от импульсных источников (запуски ракет, землетрясения, цунами, мощные взрывы).

Отличительной особенностью волновых процессов ВГВ в отличие от обычных звуковых (акустических) волн (АГВ) является наличие помимо продольной составляющей еще и поперечной составляющей. Данная особенность возникает под действием силы тяжести, где более тяжёлая часть сжатия стремится опуститься вниз, а более лёгкая область разрежения стремится всплыть наверх. Этот эффект усиливается с увеличением периода колебаний. В атмосфере с увеличением высоты амплитуда ВГВ экспоненциально нарастает с удвоенной шкалой высот H (высотой однородной атмосферы). По горизонтали энергия и фаза волны распространяются в одном направлении и с одинаковой скоростью, а по вертикали – в противоположных: фаза вниз, а энергия вверх [1].

Одной из главных задач ВГВ является перенос энергии, импульса из нижней атмосферы в мезосферу и термосферу. На высоте мезопаузы ВГВ подвергаются спектральной фильтрации из-за ветрового сдвига и поглощаются, отдавая энергию и импульс окружающей среде и вызывая в области поглощения избыточное разогревание. Важно отметить, что при поглощении они могут передавать свой импульс массе воздуха, что приводит к появлению компоненты ветра, в направлении распространения ВГВ. Все эти обстоятельства влияют на структуру нейтральной и ионизированной атмосферы [2]. Передача энергии и импульса происходит именно при диссипации волн, другими словами, когда волновые процессы затухают и исчезают. Энергия волны переходит на тепловое движение молекул [3].

ВГВ принято разделять на две группы волны: полосы (bands или crests) и ряби (ripples или billows). Полосы – более устойчивые, плоские волны с горизонтальной длиной волны от нескольких километров до нескольких сотен километров, которые иногда можно наблюдать всю ночь. Их фазовые скорости доходят до 100 м/с [4].

Ряби – неустойчивые, мелкомасштабные волны, которые имеют очень короткие время жизни, часто это разрушающиеся ВГВ [5].

Оптическое оборудование

В данной работе используются данные полученные с помощью цифровой камеры всего неба, которая установлена на оптическом полигоне Маймага (63.04°N, 129.51°E) (расположена в 130 км к северу от г. Якутска) и настроена на регистрацию пространственной неоднородности в эмиссии свечения ночного неба, а именно на излучение в ближней инфракрасной области.

В качестве основного объектива использован широкоугольный объектив "рыбий глаз" (производство Nikkor Япония, 8 мм f/2.8), угол зрения которого равен 180 градусам. Съёмки волновых структур ночного неба производятся через широкополосный стеклянный фильтр КС17, пропускающий свет в ближней инфракрасной области спектра (более 660 нм). Длинноволновая часть спектра ограничивается падением чувствительности регистрирующего приемника до нуля около длины волны 1000 нм. В области спектра 660-1000 нм излучаются интенсивные полосы молекулы гидроксила ОН (максимум высвечивается на высоте 87 км.) и слабые эмиссии континуума. [6], [7], [8].

В качестве регистрирующего устройства служит CCD камера ST-6 (производства Santa Barbara Instrument Group США). Съёмки ночного неба проводились со средним пространственным разрешением, размер одного пикселя при этом равнялся 23x27 мкм, что соответствует горизонтальному разрешению в зените примерно 1,5 км на высоте 90 км. Кадры с экспозицией 150 секунд снимались каждые 3 минуты, CCD камера охлаждалась до -30°С.

Методика обработки данных

Для визуализации и обработки данных камер всего неба был использован метод обработки – временное дифференцирование (time differencing (TD)) [6]. Суть метода заключается в следующем: строится картина разности интенсивностей двух различных кадров. При этом неподвижные объекты – Полярная звезда, континуум ночного неба, вычитаются, и остается только картина движения неоднородности ночного неба между выбранными кадрами. Хорошо выделенные монохроматические волновые структуры усиливаются в интенсивности двукратно, так как измеряемый сигнал является разностью волновых максимумов, которые последовательно переместились в пространстве на место занятое ранее волновым минимумом.

В данной работе использовалось программное обеспечение камеры CCDOPS. Для обработки выделялась центральная часть небосвода при зенитных углах < 45°, при которых пространственная картина имеет наименьшее искажение. Волна считалась зарегистрированной при наличии более 4 последовательных кадров, полученных методом TD.

Пример обработки снимков методом ТД полученных инфракрасной камерой всего неба 20 ноября 2017 г. (рис.1).

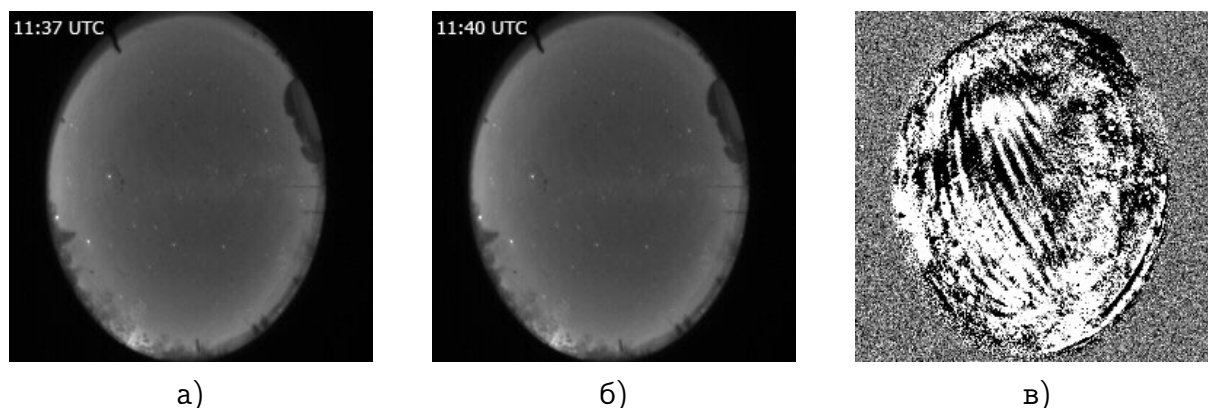


Рис. 1. а) Снимок ночного неба 20 ноября 2017г. 11:37 UTC, б) Снимок ночного неба 20 ноября 2017г. 11:40 UTC, в) Картина разности интенсивности двух снимков на которых можно увидеть монохроматические волновые структуры с некоторой периодичностью.

[Figure 1. a) a snapshot of the night sky on November 20, 2017 at 11:37 UTC, b) a snapshot of the night sky on November 20, 2017 at 11:40 UTC, c) a picture of the difference in intensity of two images on which you can see monochromatic wave structures with some periodicity.]

Результаты исследования

В данном исследовании по изображениям камеры всего неба проанализированы 125 ночей за период 2016-2018 гг. Из них выявлено 30 ночей с наблюдаемыми ВГВ зафиксированных на 1140 кадрах.

По динамике изменений нескольких кадров были вычислены длина волны, период, фазовая скорость распространения, азимут направления распространения обнаруженных ВГВ, время и их продолжительность.

Результаты представлены в таблице.

Таблица

Параметры обнаруженных ВГВ [Parameters of detected IGW]

Дата	Время,UTC	Кол-во кадров	Длительность,мин	Азимут,град	Длина волны,км	Скорость,м/с	Период,мин	Тип ВГВ
Date	Time,UTC	Number of Frames	Duration,Min	Azimuth,Deg	Wavelength,km	Speed,m/s	Period,Min	Type of IGW
01.12.16	08:34-10:19	36	105	310	43	115,8	6,2	полосы
01.12.16	08:34-09:28	19	54	320	12	60	3,3	ряби
23.12.16	17:57-19:27	31	90	255	24	75	5,3	полосы
24.12.16	12:12-12:30	7	18	315	42	158,3	4,4	полосы
20.01.17	09:16-10:16	21	60	230	52,5	147,4	5,9	полосы
21.01.17	16:21-17:03	15	42	160	17,5	22,5	13	ряби
24.01.17	17:13-20:40	70	206	285	39,1	66,6	9,8	полосы
24.01.17	17:16-20:40	69	204	290	39,7	50,6	13,1	полосы
19.02.17	10:23-11:05	15	42	250	27,6	68,7	6,7	полосы
21.02.17	18:23-18:32	4	9	270	25,5	66,6	6,4	полосы
23.02.17	18:58-20:37	34	99	290	26,84	41,6	10,8	полосы
24.02.17	19:34-20:49	26	75	300	25,5	41,6	10,2	полосы
24.02.17	22:07-05:31	149	444	270	16,77	42,5	6,6	ряби
24.02.17	15:58-16:31	12	33	20	31,65	83,3	6,3	полосы
24.02.17	17:25-17:34	4	9	225	11,7	41,6	4,7	ряби
24.02.17	19:31-20:31	21	60	240	21,48	37,25	9,6	полосы
25.02.17	10:34-11:01	10	27	235	22,89	37,25	10,2	полосы
25.02.17	10:46-11:34	17	48	310	14,1	53,3	4,4	ряби
02.03.17	15:01-15:37	13	36	320	34	65	8,7	полосы
20.03.17	14:11-14:44	12	33	115	22,8	44,9	8,5	полосы
31.03.17	13:12-13:45	12	33	210	38,25	87	7,3	полосы
14.11.17	19:23-19:35	5	12	90	15	34,3	7,3	ряби
15.11.17	15:09-17:21	45	132	90	19,5	66,6	4,9	полосы
17.11.17	18:27-18:57	11	30	310	26,7	76,8	5,8	полосы
19.11.17	10:05-15:59	119	354	80	25,89	60,6	7,1	полосы
19.11.17	10:38-15:08	91	270	115	37,5	60	10,4	полосы
20.11.17	10:52-12:10	27	78	240	14,8	26,3	9,4	ряби
15.12.17	11:47-12:14	10	27	60	23,7	42,5	9,3	полосы
20.12.17	17:32-18:11	14	39	290	24,42	76,8	5,3	полосы
20.12.17	18:29-18:50	18	8	290	15,66	34,3	7,6	полосы
10.01.18	16:23-17:59	33	96	70	20,9	44,9	7,8	полосы
19.01.18	11:51-12:00	4	9	330	10	53,3	3,1	ряби
20.01.18	18:56-19:23	10	27	260	28,9	79	6,1	полосы
07.02.18	10:03-12:03	41	120	30	31,2	33,3	15,6	полосы
07.02.18	11:12-17:12	21	360	45	29,7	47,1	10,5	полосы
05.04.18	15:44-16:05	8	21	330	25,5	53,3	8	полосы
08.04.18	14:16-15:08	18	56	280	21,2	50	7,1	полосы
09.04.18	13:40-14:16	13	36	50	12	25	8	ряби
13.04.18	13:13-13:58	16	45	280	9,6	30	5,3	ряби
13.04.18	15:13-15:43	10	30	300	29,13	78,6	6,2	полосы
14.04.18	16:33-16:42	4	9	300	20,25	74,5	4,5	полосы

В летнее время наблюдения не проводились из-за продолжительного светового дня на широтах, где расположен оптический полигон Маймага. Также неблагоприятными условиями для исследования ночного неба являются дни с густым туманом, облачностью и обильными осадками.

Длины волн зарегистрированные за период наблюдения варьируют от 9,6 до 52,5 км. (рис.2). Наибольшее количество волн находится в диапазоне от 20 до 30 км со средним значением 24,7 км.



Рис. 2. Распределение длин волн за период наблюдения 2016–2018гг.
[Figure 2. The distribution of wavelengths for the observation period 2016-2018.]

Согласно авторам работы Taylor at al. [9] ВГВ с горизонтальной длиной волны больше 17,5 км являются крупномасштабными (L – large scale), а менее 17,5 км являются мелкомасштабными волнами (S – small scale). Соответственно крупномасштабные волны соответствуют типу ВГВ как полосы, а мелкомасштабные определяются как ряби (рис.3)

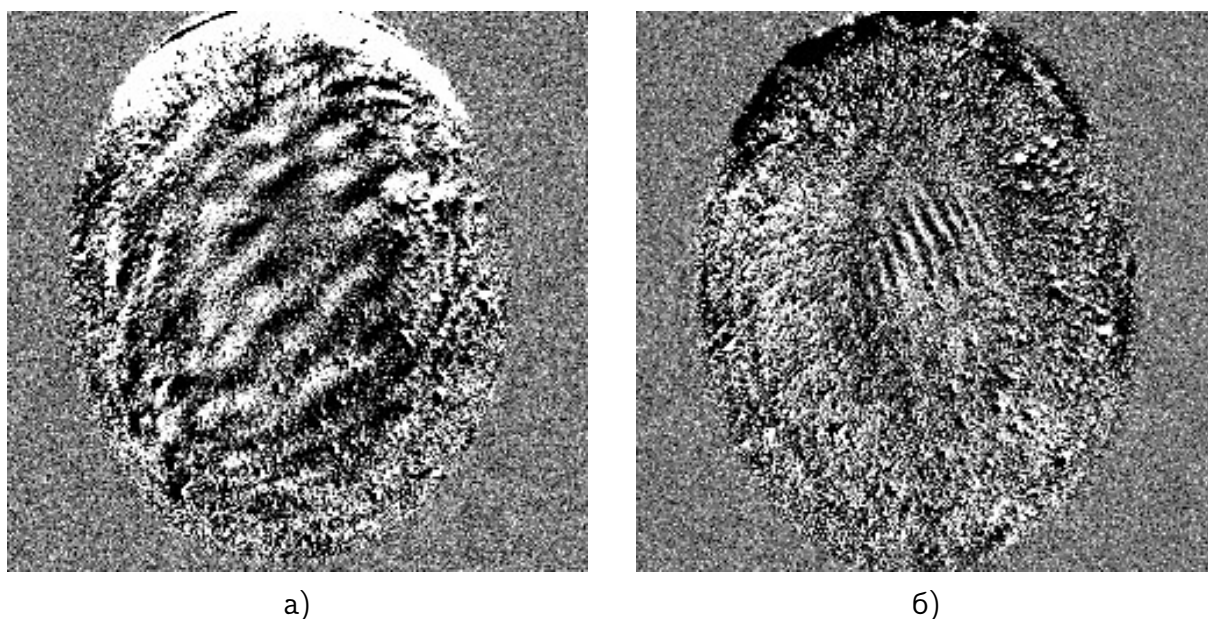


Рис. 3. а) Тип ВГВ – полосы (02.03.2017г.) б) Тип ВГВ – ряби (09.04.2018г.)
[Figure 3. Type of HBV – band (02.03.2017) b) Type of HBV – ripples (09.04.2018)]

За время исследования были отмечены три дня во время которых в свечении ночного неба наблюдалось пересечение двух различных групп ВГВ распространяющихся в разных направлениях (рис.4).

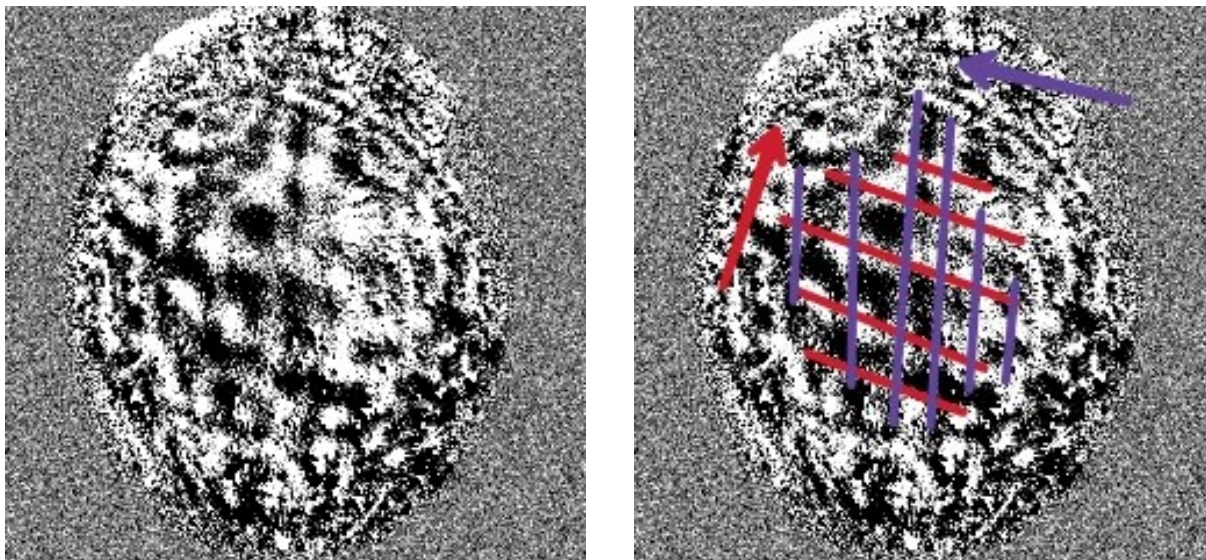


Рис. 4. Пример одного кадра с пересечением двух различных групп ВГВ.
 [Figure 4. An example of a frame with the intersection of two different groups in IGW.]

Фазовые скорости ВГВ изменяются от 22,5 до 158,3 м/с (рис.5) Среднее значение скорости распространения ВГВ около 60,3 м/с.



Рис. 5. Распределение фазовых скоростей за период наблюдения 2016–2018гг.
 [Figure 5. Distribution of phase velocities for the observation period 2016-2018.]

Период ВГВ распределен в пределах от 4,5 до 13,3 минут (рис.6).

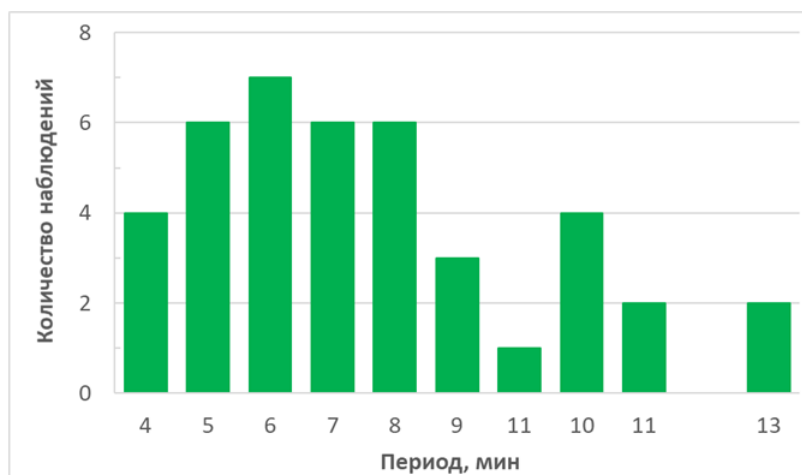


Рис. 6. Распределение периода наблюдений за 2016–2018гг.
[Figure 6. Distribution of the observation period for 2016-2018.]

Распределение распространения волн происходит преимущественно на северо-западное направление (рис.7).

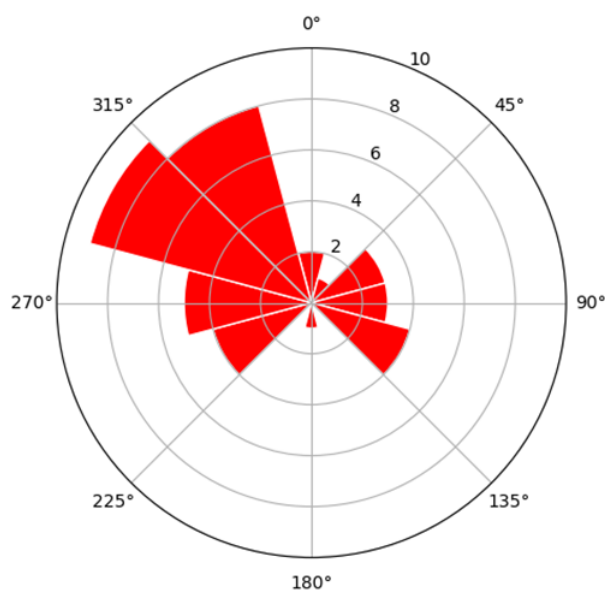


Рис. 7. Распределение периода наблюдений за 2016–2018гг.
[Figure 7. Distribution of the observation period for 2016-2018.]

Известно, что в зимний период на северном полушарии зональный фоновый ветер в средней атмосфере (стратосфере, мезосфере) направлен с запада на восток. Волны поднимаясь снизу вверх преимущественно распространяются против ветра. Выявленное нами азимутальное направление распространения волн в высокоширотной мезопаузе согласуется с теорией фильтрации волн фоновым ветром в средней атмосфере [10]. Вероятным источником волн предполагается Верхоянский

горный хребет, расположенный на расстоянии 200 км на восток от места наблюдения. Фоновый ветер в средней атмосфере преимущественно направлен на восток почти без потерь может достичь высот мезосферы.

При сравнении результатов зарегистрированных волн с другими аналогичными работами на станциях расположенных в Японии [10] и Бразилии [11] прослеживается схожесть полученных параметров.

Заключение

В данной работе сделан статистический анализ параметров выявленных волн за два сезона в период 2016–2018гг. Были определены такие параметры как: период волны, длина волны, скорость распространения, направление распространения, время и продолжительность наблюдения. Получено 1140 кадров с выраженной волновой периодической структурой. Длины зарегистрированных волн варьируют от 9,6 до 52,5 км. Наибольшее количество волн находится в диапазоне от 20 до 30 км со средним значением 24,7 км. Фазовые скорости изменяются от 22,5 до 158,3 км/ч со средним значением около 60,3 м/с. Период наблюдения ВГВ распределен в пределах от 3,3 до 13,3 минут. Распределение распространения волн происходит преимущественно в северо-западном направлении. Выявленное азимутальное направление распространения волн в высокоширотной мезопаузе согласуется с теорией фильтрации волн фоновым ветром в средней атмосфере.

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в отношении авторства и публикации.


Авторский вклад и ответственность. Все авторы внесли свой вклад в эту статью. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательный вариант рукописи был одобрен всеми авторами.

Список литературы


1. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights, *Can. J. Phys.*, 1960. vol. 38, pp. 1441–1481.
2. Шефов Н. Н., Семенов А. И., Хомич В. Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики, М.: ГЕОС, 2006, С. 741.
3. Гаврилов Н. М. Тепловой эффект внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере, *Изв. АН СССР Физ. атмосф. и океана.*, 1974. Т. 10, № 1, С. 83–84.
4. Taylor M. J., Hapgood M. A., Rothwell P. Observations of gravity wave propagation in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the near infrared OH nightglow emissions, *Planet. Space Sci.*, 1987. vol. 35, no. 4, pp. 413–427.
5. Fritts D. C., Isler J. R., Thomas G. E., Andreassen O. Wave breaking signatures in noctilucent clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 1993. vol. 20, pp. 2039–2042.
6. 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. vol. 21, no. 20, pp. 2239–2242.
7. Аммосов П. П., Гаврильева Г. А. Цифровая камера для регистрации пространственной структуры свечения ночного неба, *Приборы и техника эксперимента*, 1999. Т. 42, № 3, С. 120–124.
8. Гаврильева Г. А., Аммосов П. П. Наблюдения распространения гравитационных волн в инфракрасном свечении всего неба, *Геомагнетизм и аэронавигация*, 2001. Т. 41, № 3, С. 363–369.

9. Taylor M. J., Pendleton W. R., Clark Jr.S., Takahashi H., Gobbi D, Goldberg R. A. Image measurements of short period gravity waves at equatorial latitudes, *J. Geophys. Res.*, 1997. vol.102, pp. 26283–26299.
10. Nakamura T., Higashikawa A., Tsuda T., Matsushita Y. Seasonal Variations of gravity wave structures in OH airglow with a CCD imager at Shigaraki, *Earth Planets Space*, 1999. vol. 51, no. 7–8, pp. 897–906.
11. Medeiros A.F., Buriti R. A., Machado E. A., Takahashi H., Batista P.P., Gobbi D., Taylor M. J. Comparison of gravity wave activity observed by airglow imaging at two different latitudes in Brazil, *J. Atmos. and Sol. Terr. Phys.*, 2004. vol. 266, pp. 647.



Мордосова Олеся Владимировна ✉ – младший научный сотрудник института космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, аспирант физико-технического института Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия,  ORCID 0000-0002-6342-6389.



Колтовской Игорь Иннокентьевич ✉ – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник института космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия,  ORCID 0000-0002-6043-3196.

Investigation of internal gravitational waves by an infrared camera of the entire sky over the territory of Yakutia

O. V. Mordosova^{1,2}, I. I. Koltovskoi¹


¹ Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS,
31 Lenin Ave, 677027, Yakutsk, Republic of Yakutia, Russia

² M. K. Ammosov North-Eastern Federal University,
58 Belinsky Str, 677000, Yakutsk, Republic of Yakutia, Russia

E-mail: oleSmile@mail.ru, koltigor@mail.ru


Internal gravitational waves are space-time fluctuations of air masses in the atmosphere. In addition to the longitudinal component, they also have a transverse component, which distinguishes them from ordinary acoustic waves. Significant progress has been made in the study of atmospheric dynamics over the past decades. Solving large-scale wave movements of air masses, particularly internal gravitational waves, remains a complex and urgent task. Spatial heterogeneity was studied to identify internal gravitational waves in the emission of the glow of the night sky at an altitude of about 87 km, where bands of hydroxyl molecules are emitted. The waves were recorded using an infrared digital camera of the whole sky installed at the optical polygon of Maymag (Yakutia). Data processing was performed by the method of temporal differentiation of images. One thousand one hundred forty frames were obtained for two seasons (2016-2017 and 2017-2018) with a pronounced wave periodic structure defined as internal gravitational waves. For each case of detected internal gravitational waves, the following parameters were determined: wave period, wavelength, propagation velocity, the direction of propagation, time, and duration of observation. The lengths of the recorded waves vary from 9.6 to 52.5 km (the average value is 25 km), the estimated periods range from 4.5 to 13.3 min (the average value is 7 min) and wave propagation is directed mainly to the northwest.

Key words: internal gravitational waves, the infrared camera of the whole sky, temporal differentiation, mesosphere.

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-227-238

Original article submitted: 29.10.2022

Revision submitted: 16.11.2022

For citation. Mordosova O. V., Koltovskoi I. I. Investigation of internal gravitational waves by an infrared camera of the entire sky over the territory of Yakutia. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2022, 40: 3, 227-238.  DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-227-238

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Funding. This work was supported by the Russian Science Foundation (No. 22-27-20137, <https://rscf.ru/project/22-27-20137/>).

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.


The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Mordosova O. V., Koltovskoi I. I., 2022


References

- [1] Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.*, 1960, 38, 1441–1481
- [2] Shefov N. N., Semenov A. I., Khomich V. Yu. *Izlucheniye verkhnikh sloyev atmosfery – pokazatel' yeye struktury i dinamiki* [Radiation of the upper atmosphere – an indicator of its structure and dynamics]. Moscow, GEOS, 2006, 741, (In Russian).
- [3] Gavrilov N. M. Thermal effect of internal gravitational waves in the upper atmosphere. *Izv. AN USSR Phys. atmosf. and ocean*, 1974, 10:1, 83–84. (In Russian).
- [4] Taylor M. J., Hapgood M. A., Rothwell P. Observations of gravity wave propagation in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the near infrared OH nightglow emissions, *Planet. Space Sci.*, 1987, 35:4, 413–427.
- [5] Fritts D. C., Isler j. R., Thomas G. E., Andreassen O. Wave breaking signatures in noctilucent clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20, 2039–2042.
- [6] 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, 21:20, 2239–2242.
- [7] Ammosov P., P., Gavriilyeva G., A. Digital camera for recording the spatial structure of the glow of the night sky, *Instruments and experimental techniques*, 1999, 42:3, PP. 120–124 (In Russian).
- [8] Gavriilyeva G. A., Ammosov P. P. Observations of the propagation of gravitational waves in the infrared glow of the entire sky, *Geomagnetism and aeronomy*, 2001, 41:3, 363–369 (In Russian).
- [9] Taylor M. J., Pendleton W. R., Clark Jr. S., Takahashi H., Gobbi D, Goldberg R. A. Image measurements of short period gravity waves at equatorial latitudes, *J. Geophys. Res.*, 1997, 102, 26283–26299.
- [10] Nakamura T., Higashikawa A., Tsuda T., Matsushita Y. Seasonal Variations of gravity wave structures in OH airglow with a CCD imager at Shigaraki, *Earth Planets Space*, 1999, 51:7-8, 897–906.
- [11] Medeiros A. F., et. al. Comparison of gravity wave activity observed by airglow imaging at two different latitudes in Brazil, *J. Atmos. and Sol. Terr. Phys.*, 2004, 266, 647.



Mordosova Olesya Vladimirovna ✉ – Junior researcher of the Institute of the Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Graduate student of the Institute of Physics and Technology of the M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia  ORCID 0000-0002-6342-6389.



Koltovskoi Igor Innokentievich ✉ – PhD (Phys.& Math.), Senior Research Fellow of the Institute of the Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia  ORCID 0000-0002-6043-3196.