

УДК 528.8

Особенности волновой структуры мезосферы по данным наблюдений серебристых облаков

С.В. Николашкин, И.И. Колтовской, А.М. Аммосова✉*

*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН
677027, г. Якутск, пр. Ленина, 31*

Поступила в редакцию 28.08.2023;
после доработки 21.11.2023;
принята к печати 04.03.2024

Термодинамическое состояние атмосферы, в том числе мезосферы, определяется ее волновой структурой. Серебристые облака являются хорошим индикатором данных волновых процессов. По фотографиям серебристых облаков в г. Якутске проанализированы некоторые характеристики распространения атмосферных волн. Впервые описан случай наблюдения так называемого мезосферного бора в серебристых облаках над Восточной Сибирью, зарегистрированного синхронно с двух однотипных фотокамер. Высота волнового фронта, определенная триангуляционным методом, составила 79 км. Изучен случай распространения нескольких волн различной длины с пересекающимися направлениями в серебристых облаках 25.07.2018 г. Анализ параметров двух волн, распространяющихся навстречу друг другу, показал, что первая имела длину в среднем $53,5 \pm 6,2$ км и двигалась на северо-восток со средней фазовой скоростью $98,4 \pm 12$ м/с. Вторая волна типа гребешков со средней длиной $14,8 \pm 1,8$ км распространялась на юго-запад со средней фазовой скоростью $61,5 \pm 6$ м/с. Скорость ветрового дрейфа всей облачности составляла 67 ± 5 м/с в западном направлении. Полученные результаты будут полезны для специалистов в области физики волновых процессов в верхней атмосфере.

Ключевые слова: мезопауза, серебристые облака, атмосферные гравитационные волны, мезосферный бор, фотограмметрический метод; mesopause, noctilucent cloud, atmospheric gravitational wave, mesospheric bore, photogrammetric method.

Введение

В летнее время, когда температура в области мезопаузы часто становится ниже точки замерзания водяного пара, формируются ледяные кристаллы размером 10–100 нм и возникают так называемые мезосферные (серебристые) облака на высоте 80–85 км толщиной всего в несколько километров. При этом температура конденсации на высотах мезопаузы составляет ~ 140–150 К. Общее количество случаев появления серебристых облаков в течение сезона из года в год не постоянно, оно колеблется, достигая изредка 20–30 за сезон для одного района [1]. Известно, что серебристые облака являются только видимой с земли частью полярных мезосферных облаков (PMCs – Polar mesospheric clouds), захватывающих всю полярную область летней мезосферы. Они исследовались с помощью спутников SME и AIM [2, 3].

Серебристые облака представляют собой отличный индикатор волновых процессов в верхней атмосфере. Современные методы наблюдения и об-

работки данных позволяют проследить их эволюцию и по этим параметрам изучать основные динамические характеристики верхней атмосферы – скорость и направление ветра, атмосферно-гравитационные волны (АГВ), а также попытаться установить их источники. Считается, что основными источниками АГВ (в том числе внутренних гравитационных волн (ВГВ)) являются возмущения в тропосфере: циклоны, атмосферные фронты и орографические особенности ландшафта [4], кроме того влияние солнечной и геомагнитной активности на высоких широтах [5].

Цель работы – изучение особенностей волновой структуры мезосферы по фотографиям серебристых облаков в 2002 и 2018 гг. в Якутске (62° с.ш., $129,7^\circ$ в.д.).

Метод наблюдения

Основным методом изучения серебристых облаков является съемка с использованием автоматических камер или их сети [6, 7].

В 2002 г. были проведены синхронизированные наблюдения серебристых облаков при помощи двух однотипных цифровых фотокамер KODAK DC-120 (поле зрения камер по вертикали – $29,4^\circ$), в г. Якутске (высота точки установки камер 102 м

* Семен Викторович Николашкин (nikolashkin@ikfia.ysn.ru); Игорь Иннокентьевич Колтовской (koltik@ikfia.ysn.ru); Анастасия Михайловна Аммосова (ammosovaam@mail.ru).

н.у.м.) и на полигоне ШАЛ (с. Окемцы) (высота 92 м) на 56 км южнее Якутска. Съемки проводились автоматически, синхронно через каждые 15 мин с экспозицией 15 с.

Для определения высоты серебристых облаков был использован метод триангуляции при одновременной съемке из двух точек. Поскольку в нашем случае базисы расположены практически на одном меридиане (разница долгот 11'), то оси зрения камер почти параллельны и направлены примерно на север. В этом случае пространственная задача триангуляции вырождается в плоскую. Азимут и высота опорной звезды (Капеллы) получены по звездной карте SkyMap на момент времени съемки кадра и координат пункта наблюдения. Для расчетов высоты серебристых облаков применяли формулу, учитывающую кривизну Земли [8]:

$$H_{CO} = R \left[\frac{\sin Z_2}{\sin \alpha} - 1 \right],$$

где

$$\alpha = \arctg \left[\frac{\sin(Z_1 - Z_2 - \beta)}{\frac{\sin Z_1}{\sin Z_2} - \cos(Z_1 - Z_2 - \beta)} \right],$$

$$\beta = \frac{360L}{2\pi R},$$

Z_1, Z_2 — зенитные углы объекта из первой и второй точек наблюдения, определенные относительно высоты опорной звезды, β — центральный угол по дуге L , L — расстояние между пунктами наблюдений — база, R — радиус Земли.

В 2018 г. съемки серебристых облаков проводились с помощью фотокамеры телефона Samsung Galaxy S4/mini и приложения Time Lapse Creator, которое позволяет задать режимы съемки: экспозицию, частоту, фокусировку, баланс белого и др.

Разрешение матрицы фотокамеры 2048×1152 пикселей. Угол обзора камеры по горизонтали $61,4^\circ$, по вертикали 38° . Ось камеры была направлена выше горизонта на 19° с азимутом 29° , отсчитываемым от севера к востоку. Съемки проводились с интервалом 2 мин и экспозицией в 2 с.

Определение основных параметров ВГВ при такой видеосъемке представляется сложным, так как необходимо учитывать угол обзора камеры в соответствии с полученным изображением. В целях упрощения оценки основных параметров и для привязки к географической карте в прямоугольной проекции была использована специальная программа [9] по проецированию серебристых облаков на земную поверхность фотограмметрическим методом [10].

Результаты

Первое рассматриваемое событие связано с возможной регистрацией так называемого мезосферного бора в серебристых облаках 28.07.2002 г. (в ночь на 29.07.2002 г.). Мезосферный бор представляет собой фронт одиночной волны, разделяющий различные волновые структуры. Здесь и далее для удобства везде используется всемирное время.

Серебристые облака начали появляться в 14:30 UT 28.07.2002 г. на западной стороне неба и стали постепенно расширяться на восток. В 14:45 UT начал формироваться бор. При этом само облачное поле дрейфовало на восток, а волновой фронт в меридиональном направлении остался на месте, но стал ярче и расширился на запад, разделяя облачное поле на две части. После уярчения серебристые облака на южной стороне перестали распространяться на восток, а с северной стороны бора наблюдалось более ровное светящееся поле с волновой структурой типа ряби.

Высота измерялась по кадрам для момента 15:30 UT с использованием положения звезды α Возничего (на рис. 1 показана стрелками) и координат

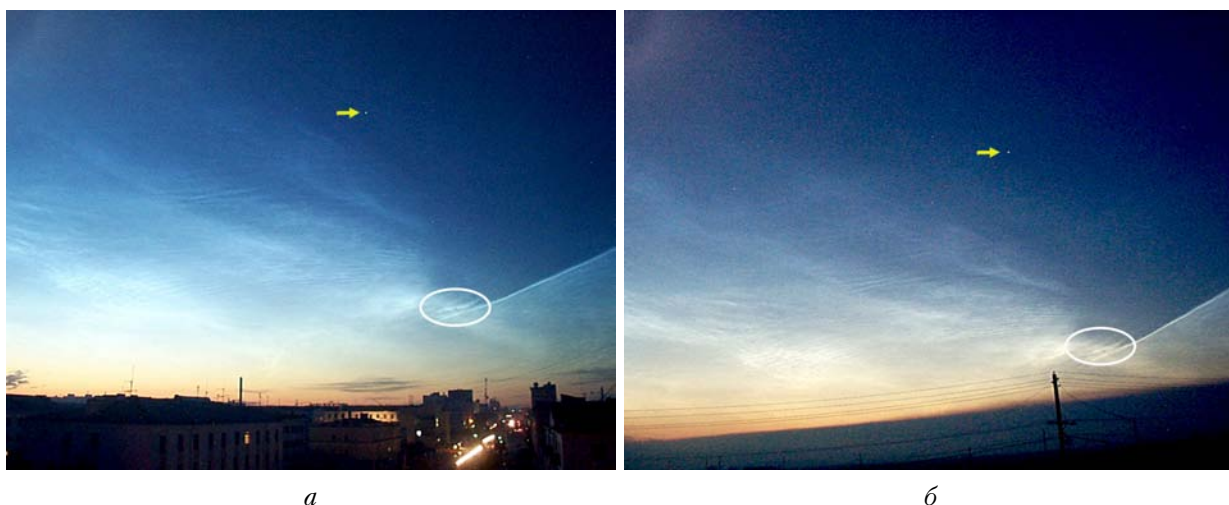


Рис. 1. Кадры от 28.07.2002 г. для измерения высоты мезосферного бора в серебристых облаках: *а* — г. Якутск; *б* — с. Окемцы. Стрелкой обозначена звезда α Возничего, эллипсы — выбранные для анализа фрагменты облачной структуры на снимках (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.05>)

точек наблюдения. Для измерения была выбрана одна характерная структура бора (отмечены эллипсами), которая хорошо идентифицируется на обоих снимках. При расстоянии между пунктами наблюдения 56 км высота гребня волны равна 79,4 км.

Проекция данных кадров на земную поверхность, сделанная для высоты 79,4 км по вышеуказанному методу, показана на рис. 2. Видно, что положение бора ориентировано строго на север и примерно совпадает с положением хребта Черского на географической карте.

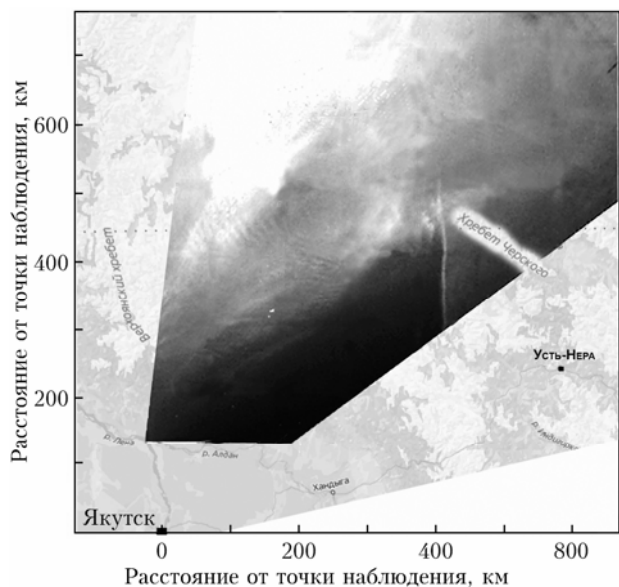


Рис. 2. Проекция рис. 1, а на географическую карту на уровне 79,4 км

На рис. 3 в качестве примера приведен кадр, где зарегистрированы одновременно две волны, противоположные по направлению распространения, который был сделан в 16:23 UT 25.07.2018 г. Распространение волн и ветровой дрейф поля облачности хорошо обнаруживаются при просмотре таймлапс видео. После идентификации волн по видео мы обозначили более длинные волны, распространяющиеся на северо-восток, цифрой 1, а цифрой 2 — короткие, движущиеся в противоположном направлении.

Серебристые облака в эту ночь появились около 14:00 UT. Светящееся облачное образование сносилось ветром вначале с севера на юг. Около полуночи по местному времени начался поворот ветра на запад и далее на юго-запад. Это изменение заняло примерно два часа. При этом все светящиеся структуры, которые состоят из волокон и нескольких разнонаправленных мелких волновых структур, стали перемещаться на юго-запад. Примерно в 15:47 UT начали появляться длинные волны, распространяющиеся против ветра на северо-восток; они наблюдались до 16:45 UT. В 16:09 UT появились мелкие волны типа гребешков, перемещающиеся на юго-запад. Так продолжалось до самого рассвета, и в 17:30 UT облака перестали быть видимыми. Следует отметить, что перед самым исчезновением

начался дрейф волн на север, северо-запад, т.е. произошло полное обращение направления ветра.



Рис. 3. Атмосферные гравитационные волны в 16:23 UT 25.07.2018 г.: 1 — более длинные, распространяющиеся на северо-восток; 2 — короткие, движущиеся на юго-запад. Эллипсами обозначены группы волн (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.05>)

Особый интерес в этом случае представляет одновременное распространение волн различной длины в противоположных направлениях. Для анализа кадры съемки были перенесены на географическую сетку в прямоугольной проекции с учетом направления оси съемки и параметров камеры и спроецированы на высоту 83 км (рис. 4). С помощью данного метода по серии обработанных кадров были определены основные параметры ВГВ (период и длина волны) и скорость ветра по дрейфу облачности.

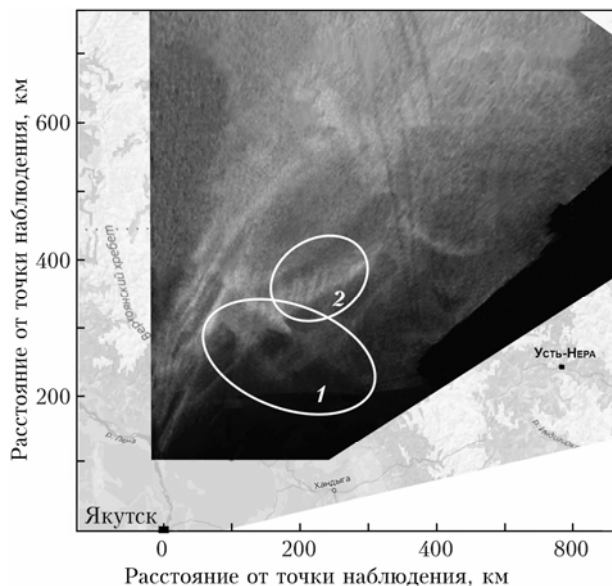


Рис. 4. Проекция кадра, показанного на рис. 3, на географическую карту (обозначения см. на рис. 3)

Первая группа волн (эллипс 1 на рис. 3) более крупномасштабная и распространяется в северо-восточном направлении. Ее основные параметры следующие: средняя горизонтальная длина волны $\lambda_1 = 53,5 \pm 6,2$ км, наблюдаемая средняя фазовая горизонтальная скорость $v_1 = 98,4 \pm 12$ м/с, период

$\tau_1 = 9,1 \pm 1$ мин. Вторая группа волн (эллипс 2) типа гребешков [11] распространяется на юго-запад: $\lambda_2 = 14,8 \pm 1,8$ км, $v_2 = 61,5 \pm 6$ м/с, $\tau_2 = 4,5 \pm 0,5$ мин. Средняя скорость дрейфа облачности в этот момент составила 67 ± 5 м/с, в дальнейшем скорость и направление ветра менялись.

Таким же образом были определены горизонтальная длина волны, фазовая скорость и период для атмосферной волны, зафиксированной в 15:15 UT. Основные параметры волны в среднем составляют $\lambda_3 = 10,2 \pm 1$ км, $v_3 = 36 \pm 3,5$ м/с, $\tau_3 = 4,6 \pm 0,5$ мин, направление распространения — юго-запад.

Обсуждение

Тейлор и др. в [12] описали то, что они назвали «захватывающим событием гравитационной волны», которое наблюдалось на камере всего неба, снимающей излучение гироксила ОН, в виде линейного фронта, за которым следовало поле повышенной яркости (по всему небу). Фронт, или уярчения свечения, двигался со скоростью ~ 76 м/с в основном на высоте ~ 85 км (номинальная высота свечения ОН). Фронт также был связан с заметным изменением структуры облачного поля: позади него появлялись яркие гребни и впадины волн, которые двигались со скоростью фронта и были привязаны к нему. На фронте канала была видна четкая линия, разделяющая небо на светлую и темную области. Обычно за фронтом волны бора наблюдаются более мелкие волны и рябь. Деван и Пикард [13] предположили, что в формировании мезосферного бора важную роль играет взаимодействие между гравитационными волнами и средним потоком в критическом слое. Свое название он получил по сходству с механизмом образования классического приливного бора [14–16]. Похожую волновую структуру мы видим и в серебристых облаках (см. рис. 1).

Измеренная нами высота мезосферного фронта оказалась несколько ниже средней высоты серебристых облаков (83 км). Как было показано выше, положение и ориентация мезосферного бора, зарегистрированного в серебристых облаках, примерно совпадают с положением гор хребта Черского. Хребет Черского представляет собой сложную горную систему, состоящую из нескольких параллельных хребтов, вытянутых с северо-запада на юго-восток, высота которых доходит до 2500–3000 м. В работе [13] предположено, что в формировании мезосферного бора важную роль играет взаимодействие между гравитационными волнами и средним потоком в критическом слое либо появление инверсии [17].

Анализ основных характеристик двух гравитационных волн на рис. 1 показывает, что их источники разные. Возможно, они распространяются по одному слою светящихся облаков [18, 19].

Предполагается, что короткие волны являются проявлением АГВ, генерируемых ветровым обтеканием системы гор Верхоянского и Черского хреб-

тов, над которыми они обнаруживаются. А длинные (распространяющиеся против среднего течения и малых волн), возможно, связаны с генерацией ВГВ на неустойчивостях струйного течения [20, 21]. На рис. 5, *а* показана карта изобар 25.07.2018 г. (г. Якутск отмечен черным кружком) по данным реанализа NCEP, а на рис. 5, *б* схематически изображены системы гор Верхоянского и Черского хребтов, над которыми наблюдаются серебристые облака.

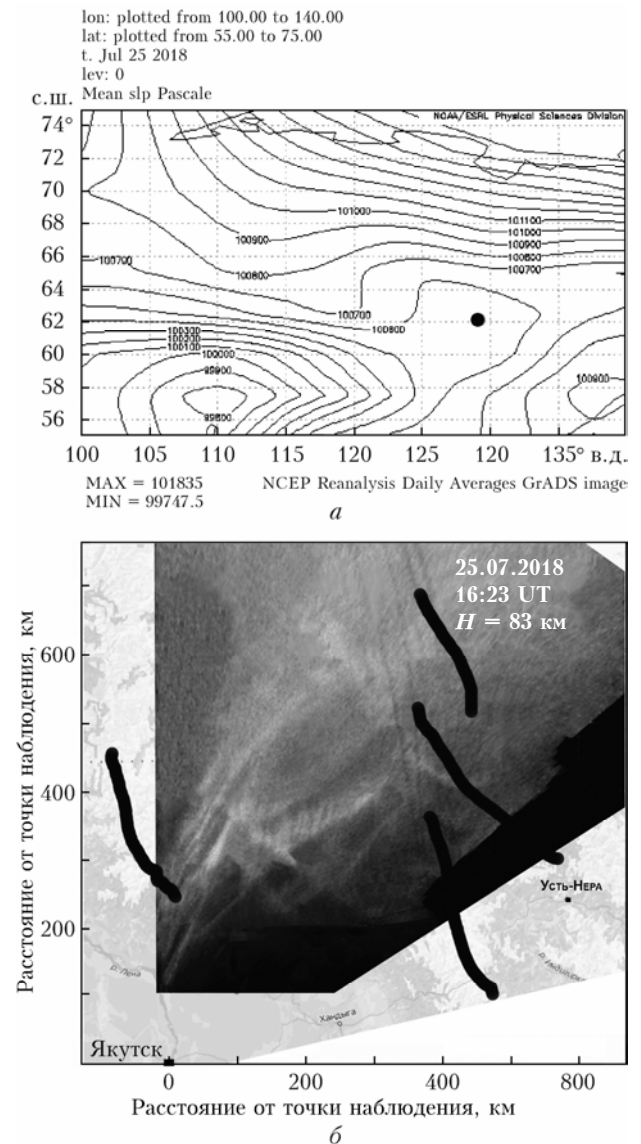


Рис. 5. Возможные метеорологические (*а*) и орографические источники (*б*) АГВ и ВГВ (25.07.2018 г.). Полуширными линиями изображены системы гор Верхоянского (слева) и Черского хребтов (справа)

Как видно из рис. 5, *а*, севернее оз. Байкал располагался обширный циклон, а над Восточно-Сибирским морем — антициклон. Источниками гравитационных волн, проявляющихся в серебристых облаках и свечении ночного неба, могут быть атмосферные фронты в тропосфере и обтекание ветром

горных хребтов [18, 20, 22]. Мы предполагаем, что источниками этих волн могут быть барические образования, показанные на рис. 5.

Заключение

По результатам фотографических наблюдений серебристых облаков в г. Якутске нами было зарегистрировано проявление мезосферного бора в серебристых облаках. Впервые над Восточной Сибирью проведено измерение его высоты триангуляционным способом по синхронным фотосъемкам из двух пунктов, сделана привязка положения бора к географической карте. Оно совпало с расположением хребта Черского, что указывает на происхождение бора в результате роторного возмущения от натекающего на горы потока ветра.

Определены основные параметры ВГВ, зарегистрированных 26.07.2018 г. В эту ночь были зафиксированы волновые структуры серебристых облаков. Одновременно наблюдались несколько волн различной длины с пересекающимися направлениями распространения. Предполагается, что в данном случае короткие волны являются отображением АГВ, генерированных обтеканием ветром гор Верхоянского хребта, над которыми они обнаруживаются. А длинные волны, распространяющиеся против среднего потока и мелких волн, возможно, связаны с генерацией ВГВ на барических образованиях на уровне тропосферы на более дальних расстояниях.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 22-27-20137) (<https://rscf.ru/project/22-27-20137>) и в рамках государственного задания (проект № 0297-2021-0010).

Список литературы

- Gadsden M., Schroder W. Noctilucent clouds. Berlin, New-York: Springer-Verlag, 1989. 165 p.
- Thomas G.E. Solar Mesosphere Explorer measurements of polar mesospheric clouds (noctilucent clouds) // J. Atmos. Terr. Phys. 1984. V. 46, N 9. P. 819–824.
- McClintock W., Rusch D., Thomas G., Merkel A., Lankton M., Drake V.A., Bailey S., Russell J. The Cloud Imaging and Particle Size experiment on the Aeronomy of Ice in the Mesosphere mission: Instrument concept, design, calibration, and on-orbit performance // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2009. V. 71, N 3–4. P. 340–355. DOI: 10.1016/J.JASTP.2008.10.011.
- Fritts D.C., Isler J.R., Thomas G.E., Andreassen O. Wave breaking signatures in noctilucent clouds // Geophys. Res. Lett. 1993. V. 20, N 19. P. 2039–2042. DOI: 10.1029/93GL01982.
- Thomas G.E., Olivero J. Noctilucent clouds as possible indicators of global change in the mesosphere // Adv. Space Res. 2001. V. 28, N 7. P. 937–946. DOI: 10.1016/S0273-1177(01)80021-1.
- Dalin P., Pertsev N., Zadorozhny A., Connors M., Schofield I., Shelton I., Zalcik M., McEwan T., McEachran I., Frandsen S., Hansen O., Andersen H., Sukhodoev V., Perminov V., Romejko V. Ground-based observations of noctilucent clouds with a northern hemisphere network of automatic digital cameras // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2008. V. 70, N 11–12. P. 1460–1472. DOI: 10.1016/j.jastp.2008.04.018.
- Sugiyama T., Ammosov P., Gavril'yeva G.A., Nikolashkin S., Zadorozhny A.M., Semenov A., Pertsev N., Sukhodoev V. Recording images of noctilucent clouds in Russia from 1999 (extended abstract) // Tohoku Geophys. J. 2001. V. 36, N 2. P. 251–252.
- Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Ососков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
- Вдовиченко В.Д., Кириенко Г.А. Мезосферные серебристые облака. Проблемы и решения. Алматы: RISO, 2012. 280 с.
- Буров М.И. Определение проекции серебристых облаков на земную поверхность фотограмметрическим методом // Труды совещания по серебристым облакам (III). Таллин: Изд-во АН Эстонской ССР, 1962. С. 90–104.
- Бронштэн В.А. Серебристые облака и их наблюдение. М.: Наука, 1984. 119 с.
- Taylor M.J., Turnbull D.N., Lowe R.P. Spectrometric and imaging measurements of a spectacular gravity wave event observed during the ALOHA-93 campaign // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22, N 20. P. 2849–2852. DOI: 10.1029/95GL02948.
- Dewan E., Picard R. Mesospheric bores // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. ND6. P. 6295–6306. DOI: 10.1029/97JD02498.
- Труккер Р. Бор, прибор, волнение и корабельные волны. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 288 с.
- Fritts D.C., Kaifler N., Kaifler B., Geach C., Kjellstrand C.B., Williams B.P., Eckermann S.D., Miller A.D., Rapp M., Jones G., Limon M., Reimuller J., Wang L. Mesospheric bore evolution and instability dynamics observed in PMC Turbo imaging and Rayleigh Lidar profiling over Northeastern Canada on 13 July 2018 // J. Geophys. Res.: Atmos. 1998. V. 125, N 14. P. e2019JD032037. DOI: 10.1029/2019JD032037.
- Hozumi Y., Saito A., Sakanoi T., Yamazaki A., Hosokawa K. Mesospheric bores at southern midlatitudes observed by ISS-IMAP/VISI: A first report of an undulating wave front // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18, N 22. P. 16399–16407. DOI: 10.5194/acp-18-16399-2018.
- Li Q., Xu J., Yue J., Liu X., Yuan W., Ning B., Guan S., Younger J.P. Investigation of a mesospheric bore event over northern China // Ann. Geophys. 2013. V. 31, N 3. P. 409–418. DOI: 10.5194/angeo-31-409-2013.
- Dalin P., Pogoreltsev A., Pertsev N., Perminov V., Shevchuk N., Dubietis A., Zalcik M., Kulikov S., Zadorozhny A., Kudabayeva D., Solodovnik A., Salakhutdinov G., Grigoryeva I. Evidence of the formation of noctilucent clouds due to propagation of an isolated gravity wave caused by a tropospheric occluded front. // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42, N 6. P. 2037–2046. DOI: 10.1002/2014GL062776.
- Yue J., Thurairajah B., Hoffmann L., Alexander J., Chandran A., Taylor M.J., Russell III J.M., Randall C.E., Bailey S.M. Concentric gravity waves in polar mesospheric clouds from the Cloud Imaging and Particle Size experiment // J. Geophys. Res.: Atmos. 2014. V. 119, N 9. P. 5115–5127. DOI: 10.1002/2013JD021385.
- Hines C.O. A possible source of waves in noctilucent clouds // J. Atmos. Sci. 1968. V. 25, N 9. P. 937–942.
- Miao J., Gao H., Kou L., Zhang Y., Li Y., Chu Zh., Bu L., Wang Zh. A case study of midlatitude

noctilucent clouds and its relationship to the secondary generation gravity waves over tropopause inversion layer // J. Geophys. Res.: Atmos. 2022. V. 127, N 17. P. e2022JD036912. DOI: 10.1029/2022JD036912.

22. Шефов Н.Н., Перцев Н.Н., Шагаев М.В., Яров В.Н. Орографически обусловленные вариации эмиссий верхней атмосферы // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1983. Т. 19, № 9. С. 920–926.

S.V. Nikolashkin, I.I. Koltovskoi, A.M. Ammosova. Features of the wave structure of the mesosphere from observations of noctilucent clouds.

The article discusses some characteristics of the propagation of atmospheric waves based on photographic observations of noctilucent clouds in the city of Yakutsk. For the first time, a case of observation of the so-called mesospheric boron in noctilucent clouds over Eastern Siberia, recorded synchronously with two cameras of the same type, has been described. The height of the wave front determined by the triangulation method was 79 km. The case of video recording of the propagation of several waves of different lengths with intersecting directions in noctilucent clouds on July 25, 2018 is analyzed. Analysis of the parameters of two waves propagating towards each other showed that the first has average wavelength of 53.5 ± 6.2 km, average phase velocity of 98.4 ± 12 m/s, and northeast direction. The second wave of the scallop type propagated to the southwest with an average phase velocity of 61.5 ± 6 m/s, its average wavelength was 14.8 ± 1.8 km. The speed of westerly wind drift of all clouds was 67 ± 5 m/s.