

УДК 528.8

DOI 10.25587/2222-5404-2024-21-3-50-58

## Параметры внутренних гравитационных волн по наблюдениям серебристых облаков в Якутске

С. В. Николашкин ✉, И. И. Колтовской, С. В. Титов, О. В. Тыщук

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю. Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия

✉ nikolashkin@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** Серебристые облака (полярные мезосферные облака) представляют собой скопление ледяных кристаллов размером 10–100 мкм на высоте 80–85 км, имеющих толщину всего в несколько километров, подсвеченных солнечными лучами. Характерной особенностью серебристых облаков является то, что они с Земли наблюдаются только в сравнительно узких широтных поясах северного и южного полушарий. Они являются видимым индикатором волновых процессов в верхней атмосфере. Использование современных методов наблюдений и обработки данных позволяют проследивать их эволюции и по этим параметрам изучать основные динамические характеристики верхней атмосферы – скорость и направление ветра, атмосферно-гравитационные волны – и попытаться установить их источники. В статье приведены результаты исследования особенностей параметров внутренних гравитационных волн по наблюдениям серебристых облаков. Фотографические наблюдения проводились при помощи цифровых фотокамер и камеры телефона. При помощи синхронных триангуляционных наблюдений однотипными камерами в г. Якутске и с. Октенцы удалось измерить высоту серебристых облаков. Проанализированы редкие случаи распространения волн различного вида и их параметры: длины волн, скорости и направления их распространения. Также описывается случай наблюдения серебристых облаков, связанных с так называемым мезосферным бором – выделяющимся волновым фронтом, распространяющимся по волноводному каналу, и визуально разделяющим область свечения, уже вовлеченную в волновой процесс, от области, в которой колебания еще не возникли. Предполагается, что источниками волновых возмущений являются атмосферные фронты и обтекание воздушных масс горных хребтов.

**Ключевые слова:** серебристые облака, полярные мезосферные облака, внутренние гравитационные волны, мезосфера, мезосферный бор, атмосферный волновод, атмосферные фронты, орография, высота серебристых облаков, триангуляционный метод.

**Для цитирования:** Николашкин С. В., Колтовской И. И., Титов С. В., Тыщук О. В. Параметры внутренних гравитационных волн по наблюдениям серебристых облаков в Якутске. *Вестник СВФУ*. 2024, Т. 21, № 3. С. 50–58. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-3-50-58

*Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № 122011700172-2).*

## Parameters of internal gravity waves based on observations of noctilucent clouds in Yakutsk

S. V. Nikolashkin ✉, I. I. Koltovskoi, S. V. Titov, O. V. Tyschuk

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS,

Yakutsk, Russia

✉ nikolashkin@ikfia.ysn.ru

**Abstract.** Noctilucent clouds (polar mesospheric clouds) are clusters of ice crystals 10–100 μm in size at an altitude of 80–85 km, only a few kilometers thick, illuminated by the sun's rays. A characteristic feature of noctilucent clouds is that they are observed from Earth only in relatively narrow latitudinal

belts of the northern and southern hemispheres. They are a visible indicator of wave processes in the upper atmosphere. The use of modern methods of observation and data processing allows us to track their evolution and, based on these parameters, study the main dynamic characteristics of the upper atmosphere - wind speed and direction, atmospheric-gravity waves and try to establish their sources. The article presents the results of a study of the features of the parameters of internal gravity waves based on observations of noctilucent clouds. Photographic observations were carried out using digital cameras and a phone camera. Using synchronous triangulation observations with identical cameras in Yakutsk and Oymyakon, it was possible to measure the height of noctilucent clouds. Rare cases of propagation of different types of waves and their parameters are analysed: wavelengths, speeds and directions of their propagation. A case of observation of noctilucent clouds associated with the so-called mesospheric bore is also described - a prominent wave front propagating along a waveguide channel and visually separating the glow region already involved in the wave process from the region in which oscillations have not yet arisen. It is assumed that the sources of wave disturbances are atmospheric fronts and air mass flow around mountain ranges.

**Keywords:** noctilucent clouds, polar mesospheric clouds, internal gravity waves, mesosphere, mesospheric bore, atmospheric waveguide, atmospheric fronts, orography, noctilucent cloud height, triangulation method.

**For citation:** Nikolashkin S. V., Koltovskoi I. I., Titov S. V., Tyschuk O. V. Parameters of internal gravity waves based on observations of noctilucent clouds in Yakutsk. *Vestnik of NEFU*. 2024, Vol. 21, No. 3. Pp. 50–58. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-3-50-58

*The work was performed within the framework of the state assignment (state registration number No. 122011700172-2).*

## **Введение**

Летом, когда температура области мезопаузы часто становится ниже точки замерзания водяного пара, формируются ледяные кристаллы размером 10–100 мкм и возникают так называемые мезосферные (серебристые) облака на высоте 80–85 км, имеющие толщину всего в несколько километров. При этом температура конденсации на высотах мезопаузы составляет примерно 140–150 К. Считается, что центрами кристаллизации служат космическая пыль, космические лучи и остатки метеорных частиц. Общее количество появлений серебристых облаков в течение сезона из года в год не остается постоянным, но колеблется, достигая изредка 20–30 случаев для одного района. Они видны только ночью со второй половины мая до середины августа в северном полушарии. Характерной особенностью серебристых облаков является то, что они с Земли наблюдаются только в сравнительно узких широтных поясах северного и южного полушарий. В северном полушарии пояс распространения серебристых облаков ограничивается в среднем широтами (50–75°) [1]. Известно, что серебристые облака являются только видимой с Земли частью полярных мезосферных облаков (Polar mesospheric clouds – PMCs), захватывающих всю полярную область летней мезосферы, исследованных при помощи спутников SME и AIM [2, 3].

В последнее время появились сведения о повысившейся частоте появления серебристых облаков, которая объясняется увеличением увлаженности верхней атмосферы под действием разложения метана вследствие увеличения его выброса в атмосферу из-за потепления климата [4].

Серебристые облака являются видимым индикатором волновых процессов в верхней атмосфере. Использование современных методов наблюдений и обработка данных позволяют проследить их эволюции и по этим параметрам изучать основные динамические характеристики верхней атмосферы – скорость и направление ветра, атмосферно-гравитационные волны – и попытаться установить их источники. Атмосферные волны играют важную роль в динамике мезосферы и нижней термосферы. Понимание механизмов движения воздушных масс очень важно, и оно остается актуальной задачей в эпоху глобального изменения климата. Считается, что основными источниками атмосферно-гравитационных волн (в т. ч. внутренних гравитационных волн) являются возмущения в тропосфере – циклоны, атмосферные фронты и орографические особенности ландшафта [4], также на высоких широтах возможно и влияние солнечной и геомагнитной активностей [5].

### **Наблюдения и результаты**

Основным методом наблюдения серебристых облаков являются фотографические наблюдения с использованием автоматических камер или их сети [6, 7]. В данной работе проведены исследования двух редких особенностей волновых процессов в мезосфере по наблюдениям серебристых облаков в 2002 и 2018 гг. в г. Якутске (62N, 129.7E). В первом случае съемки велись в г. Якутске с использованием фотокамеры телефона Samsung Galaxy S4/mini. Разрешение матрицы фотокамеры – 2048x1152 пикселей. Угол обзора камеры по горизонтали 61.4°, по вертикали 38°. Ось камеры была направлена выше горизонта на 19° с азимутом 29°, отсчитываемого от севера к востоку. Съемки проводились с интервалом в 2 мин и экспозицией в 2 сек. На рис. 1 в качестве примера представлен кадр, где зарегистрированы одновременно две волны: противоположные по направлению распространения, которые были засняты в 16:23 UT 25 июля 2018 г. Здесь цифрой 1 обозначены более длинные волны, распространяющиеся на северо-восток, цифрой 2 – короткие волны, движущиеся в противоположном направлении. Распространение волн и ветровой дрейф поля облачности хорошо обнаруживаются при просмотре таймлапс видео.

Определение основных параметров внутренних гравитационных волн 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 [8] по методу определения проекции серебристых облаков на земную поверхность фотографическим методом [9]. Для обработки были заданы основные параметры камеры и высота серебристых облаков ( $h=85$  км). С использованием данного метода по серии обработанных кадров были определены основные параметры внутренних гравитационных волн: период и длина волны, а также скорость ветра по дрейфу облачности.

Серебристые облака в этот день появились около 23 часов местного (якутского) времени (14:00 UT). Светящееся облачное образование сносится ветром вначале с севера на юг. Вблизи местной полуночи начинается поворот ветра на запад и далее на юго-запад. Это изменение заняло примерно 2 часа. При этом все светящиеся структуры, которые состоят из волокон и нескольких разнонаправленных мелких волновых структур, сносится на юго-запад. Примерно в 15:47 UT начинают появляться длинные волны, распространяющиеся против ветра на северо-восток и продолжающиеся до 16:45 UT. В то же время в 16:09 UT появляются мелкие волны типа «гребешков», распространяющиеся на юго-запад. Так происходит до самого рассвета, и в 17:30 UT облака перестают быть видимыми. Следует отметить, что перед самым исчезновением начинается их дрейф на север, северо-запад, т. е. полное обращение направления ветра.



**Рис. 1.** Две атмосферные гравитационные волны с разными параметрами и противоположные по направлению распространения в 16:23 UT 25.07.2018

**Fig. 1.** Two atmospheric gravity waves with different parameters and opposite in the direction of propagation at 16:23 UT 25.07.2018

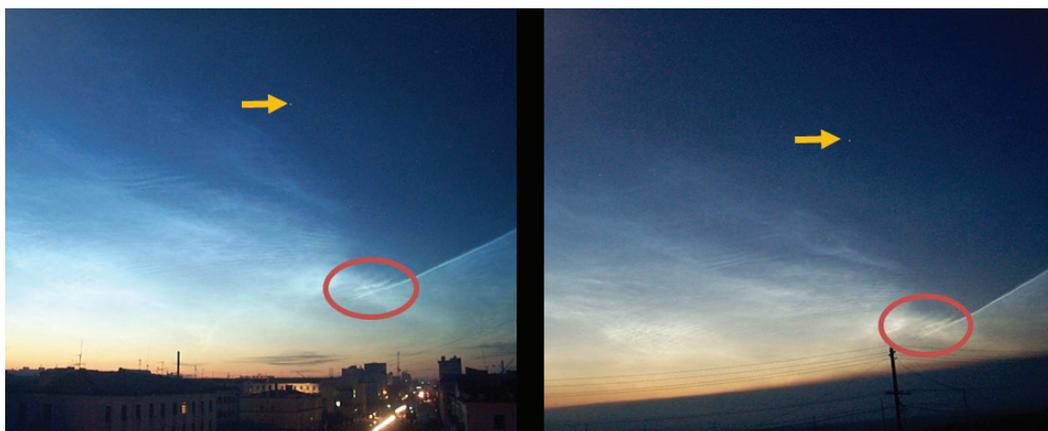
Особый интерес в этом случае представляет наблюдение одновременного распространения волн различной длительности в противоположных направлениях. Первая из них (обозначена кружком 1 на рис. 1) более крупномасштабная и распространяется в северо-восточном направлении. Ее основные параметры следующие: горизонтальная длина волны  $\lambda_1=50.8\pm 5.1$  км, наблюдаемая горизонтальная фазовая скорость составляет  $v_1=96.8\pm 10$  м/с, а период составил  $\tau_1=8.7\pm 1$  мин. Вторая волна (2) типа гребешков [10] распространяется на юго-запад со следующими параметрами:  $\lambda_2=15.2\pm 1.5$  км, наблюдаемая горизонтальная фазовая скорость составляет  $v_2=60.2\pm 6$  м/с, период –  $\tau_2=4.2\pm 0.5$  мин. Скорость дрейфа облачности в этот момент составила  $65\pm 6$  м/с, в дальнейшем скорость и направление ветра менялись.

Также были определены горизонтальная длина волны, фазовая скорость и период для атмосферной волны, зафиксированной в 15:15 UT. Основные параметры волны –  $\lambda_3=10.2\pm 1$  км, наблюдаемая горизонтальная фазовая скорость составляет  $v_3=36\pm 3.5$  м/с, период составил  $\tau_3=4.6\pm 0.5$  мин с направлением распространения на юго-запад.

Второй случай связан с возможной регистрацией т. н. мезосферного бора в серебристых облаках 28 июля 2002 г. Для анализа использовались снимки, сделанные в г. Якутске и на полигоне ШАЛ (с. Октмцы) (56 км южнее Якутска) в ночь на 29 июля 2002 г. однотипными цифровыми фотокамерами KODAK DC-120 (поле зрения камер по вертикали –  $29,4^\circ$ ). Съемки производились автоматически синхронно через каждые 15 минут с экспозицией 15 сек.

Серебристые облака начали появляться в 14:30 UT 28 июля на западной стороне неба и постепенно стали расширяться на восток. В 14:45 UT начал формироваться бор (рис. 2). Фронт или переход к яркости двигался со скоростью около 76 м/с на высоте в среднем 85 км (номинальная высота свечения ОН). Фронт также был связан с заметным изменением структуры: позади фронта появлялись яркие гребни и впадины волн. Эти волны двигались со скоростью фронта и были привязаны к нему. Таким образом, можно видеть четкую линию на фронте канала, разделяющую небо на светлые и темные области.

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 2 части. Причем 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».



**Рис. 2.** Рабочие кадры от 28.07.2002 для измерения высоты мезосферного бора в серебристых облаках:

а) г. Якутск, б) с. Октемцы. Желтой стрелкой обозначена звезда  $\alpha$ Возничего, кружками обозначены выбранные фрагменты на снимках

**Fig. 2.** Working frames dated 28.07.2002 for measuring the height of mesospheric boron in silvery clouds:

а) Yakutsk, б) village Oktemtsy. Yellow arrow indicates the star of Auriga, circles indicate selected fragments in the images

Нами была измерена высота данного волнового фронта методом триангуляции при одновременной съемке из двух точек. Измерения высоты произведены по кадрам для момента 15–30 UT с использованием положения звезды  $\alpha$ Возничего (Капелла) (на рис. 2 отмечена стрелками) и координат точек наблюдения. Для измерения была выбрана характерная структура бора (отмечены красным овалом), которая хорошо идентифицируется на обоих снимках. При расстоянии между пунктами наблюдения 56 км получена высота гребня волны, равная 79,4 км.

Проецирование данных кадров на земную поверхность, сделанное для полученной высоты 79,4 км по методу [9], показало, что положение бора ориентировано строго на север и примерно совпадает с положением хребта Черского на географической карте.

#### Обсуждение

Анализ основных характеристик двух гравитационных волн, показанных на рис. 1, показывают, что их источники разные и предполагается, что они распространяются по одному слою светящихся облаков [17, 18].

Предполагается, что короткие волны являются проявлением акустико-гравитационных волн, генерируемых ветровым обтеканием системы гор Верхоянского и Черского хребтов, над которыми они обнаруживаются. А длинные волны, распространяющиеся против среднего течения, и малые волны, возможно, связаны с генерацией внутренних гравитационных волн на неустойчивостях струйного течения [19, 20]. На рис. 3 показаны карта изобар для 25 июля 2018 г. (г. Якутск отмечен звездочкой) по данным реанализа NCEP и схематические изображения системы гор Верхоянского и Черского хребтов, над которыми наблюдаются серебристые облака. Как видно из верхней карты, севернее оз. Байкал располагался обширный циклон, а над Восточно-Сибирским морем – антициклон. Как показано в [17, 19, 21], источниками гравитационных волн, проявляющихся в серебристых облаках и в свечении ночного неба, могут быть атмосферные фронты в тропосфере и обтекания ветром горных хребтов. Согласно этим утверждениям, мы предполагаем, что источниками этих волн могут быть барические образования, показанные на рис. 3.

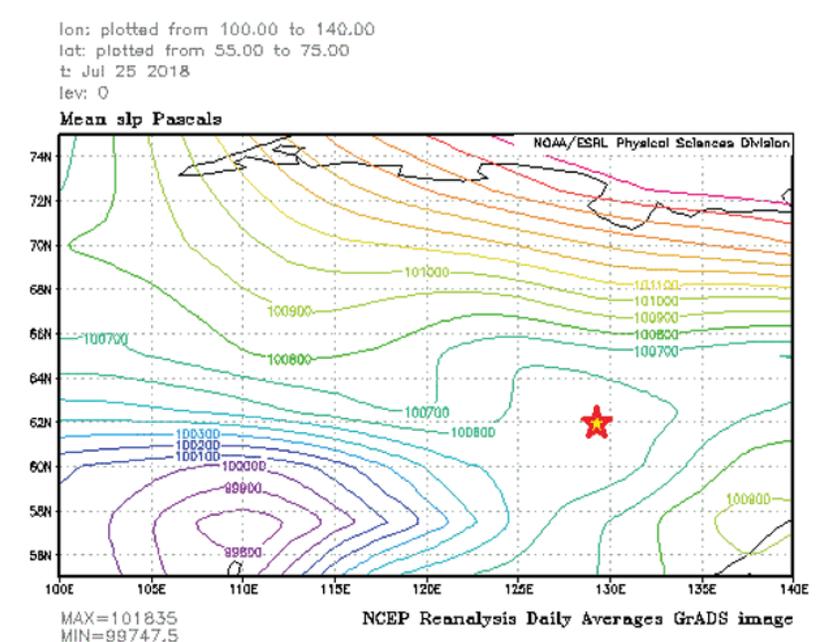


Рис. 3. Возможные метеорологические (верхняя панель) и орографические источники (нижняя панель) АГВ и ВГВ на 25.07.2018

Fig. 3. Possible meteorological (upper panel) and orographic sources (lower panel) of AGW and IGW for 25.07.2018

Измеренная нами высота мезосферного фронта оказалась несколько ниже средней высоты серебристых облаков (83 км). Как было выше показано, положение и ориентация мезосферного бора, зарегистрированного в серебристых облаках, примерно совпадают с положением горного хребта Черского. Хребет Черского представляет собой сложную горную систему, состоящую из нескольких параллельных хребтов, вытянутых с северо-запада на юго-восток, высота которых достигает до 2500–3000 м. Среди обычных волновых возмущений в мезосфере изредка можно заметить проявление выделяющейся одиночной волны. Этому волновому процессу дали название мезосферный бор, которое произошло от старонорвежского «baga» и переводится как «волна, зыбь» [13]. Свое название он получил по сходству механизма образования с классическим приливным бором [13–15]. Мезосферный бор, представляющий собой усиление атмосферных гравитационных волн, может влиять на потоки импульса и энергии и тем самым воздействовать на тепловой режим и состав на всех уровнях атмосферы. В работе [12] предположено, что в формировании мезосферного бора важную роль играет взаимодействие между гравитационными волнами и средним потоком в критическом слое либо появление инверсии [22].

Мезосферный бор впервые был зарегистрирован в свечении ночного неба Тэйлором и др. в 1995 г., которые описали его как «захватывающее гравитационно-волновое событие», наблюдавшееся над кратером вулкана Халеакала [11]. Ими было выдвинуто предположение, что фронт волн в свечении ночного неба вызван сильным приливным течением в мезосфере. Похожую волновую структуру мы видим и в серебристых облаках (рис. 2)

### Заключение

По результатам наблюдений серебристых облаков в г. Якутске были определены основные параметры внутренних гравитационных волн, которые были засняты 26.07.2018. В эту ночь наблюдались такие волновые структуры серебристых облаков, когда одновременно наблюдаются несколько волн различной длины с пересекающимися направлениями распространения. Предполагается, что в данном случае короткие волны

являются отображением акустико-гравитационных волн, генерированных обтеканием ветром гор Верхоянского хребта, над которыми они обнаруживаются. А длинные волны, распространяющиеся против среднего потока и мелким волнам, возможно, связаны с генерацией ВГВ на барических образованиях на уровне тропосферы.

Нами было зарегистрировано проявление мезосферного бора в серебристых облаках. Было проведено измерение его высоты триангуляционным способом по синхронным фотосъемкам из двух пунктов, сделана привязка положения бора на географическую карту. Положение бора совпало с положением хребта Черского, которое указывает на происхождение его в результате роторного возмущения от натекающего на горы потока ветра.

### Л и т е р а т у р а

1. Gadsden M, Schroder W. Noctilucent clouds. Berlin; New-York: Springer-Verlag, 1989.
2. Thomas GE. Solar Mesosphere Explorer measurements of polar mesospheric clouds (noctilucent clouds). *J of Atmos and Terrestrial Phys*, 1984;46(9):819-824.
3. McClintock W, et al. 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 Solar-Terr Phys*, 2009;71(3-4):340-355.
4. Fritts DC, Isler JR, Thomas GE, et al. Wave breaking signatures in noctilucent clouds. *Geophys Res Lett*, 1993;20(19):2039-2042.
5. Thomas GE, Olivero J. Noctilucent clouds as possible indicators of global change in the mesosphere. *Adv in Space Res*, 2001;28(7):937-946. doi:10.1016/S0273-1177(01)80021-1.
6. Dalin P, Pertsev N, Zadorozhny A, et al. Ground-based observations of noctilucent clouds with a northern hemisphere network of automatic digital cameras. *J Atm Solar-Terr Phys*, 2008;70:1460-1472.
7. Sugiyama T, Ammosov P, Gavrilyeva GA, et al. Recording Images of Noctilucent Clouds in (Extended Abstract) Russia from 1999. *Tohoku Geophys Journ (Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5)*, 2001;36(2):251-252.
8. Вдовиченко, В. Д. Мезосферные серебристые облака. Проблема и решение : Монография / В. Д. Вдовиченко, Г. А. Кириенко. – Алматы : RISO, 2012. – 286 с.
9. Буров, М. И. Определение проекции серебристых облаков на земную поверхность фотограмметрическим методом / М. И. Буров // Труды совещания по серебристым облакам (III). – Таллин, 1962. – С. 90–104.
10. Бронштэн, В. А. Серебристые облака и их наблюдение / В. А. Бронштэн. – Москва : Наука, 1984. – 119 с.
11. Taylor MJ, Turnbull DN, Lowe RP. Spectrometric and imaging measurements of a spectacular gravity wave event observed during the ALOHA-93 campaign. *Geophys Res Lett*, 1995;22:2849-2852. doi:10.1029/95GL02948.
12. Dewan E, Picard R. Mesospheric bores. *J Geophys Res*, 1998;103:6295-6306. doi:10.1029/97JD02498.
13. Триккер, Р. Бор, прибой, волнение и корабельные волны / Р. Триккер. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1969. – 288 с.
14. Fritts DC, Kaifler N, Kaifler B, et al. 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*, 2020;125, e2019JD032037. <https://doi.org/10.1029/2019JD032037>
15. Hozumi Y, Saito A, Sakanoi T, et al. Mesospheric bores at southern midlatitudes observed by ISS-IMAP/VISI: a first report of an undulating wave front. *Atmos Chem Phys*, 2018;18:16399-16407. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-18-16399-2018>.
16. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения : курс лекций и практических занятий / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, А. В. Бондаренко [и др.] – Москва : Физматкнига, 2010.
17. Dalin P, Pogoreltsev A, Pertsev N, et al. 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;42:2037-2046. doi: 10.1002/2014GL062776.
18. Yue J, et al. Concentric gravity waves in polar mesospheric clouds from the Cloud Imaging and Particle Size experiment. *J Geophys Res Atmos*, 2014;119:5115-5127. doi:10.1002/2013JD021385.

19. Hines CO. A possible source of waves in noctilucent clouds. *J Atmos Sci*, 1968;25:937-942.
20. Miao J, Gao H, Kou L, et al. 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;127. 10.1029/2022JD036912.
21. Орографически обусловленные вариации эмиссий верхней атмосферы / Н. Н. Шефов, Н. Н. Перцев, М. В. Шагаев, В. Н. Яров // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1983. – Т. 19. – № 9. – С. 920–926.
22. Li Q, Xu J, Yue J et al. Investigation of a mesospheric bore event over northern China. *Ann Geophys*, 2013;31:409-418. doi:10.5194/angeo-31-409-2013.

### References

1. Gadsden M, Schroder W. Noctilucent clouds. Berlin; New-York: Springer-Verlag, 1989.
2. Thomas GE. Solar Mesosphere Explorer measurements of polar mesospheric clouds (noctilucent clouds). *J of Atmos and Terrestrial Phys*, 1984;46(9):819-824.
3. McClintock W, et al. 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 Solar-Terr Phys*, 2009;71(3-4):340-355.
4. Fritts DC, Isler JR, Thomas GE, et al. Wave breaking signatures in noctilucent clouds. *Geophys Res Lett*, 1993;20(19):2039-2042.
5. Thomas GE, Olivero J. Noctilucent clouds as possible indicators of global change in the mesosphere. *Adv in Space Res*, 2001;28(7):937-946. doi:10.1016/S0273-1177(01)80021-1.
6. Dalin P, Pertsev N, Zadorozhny A, et al. Ground-based observations of noctilucent clouds with a northern hemisphere network of automatic digital cameras. *J Atm Solar-Terr Phys*, 2008;70:1460-1472.
7. Sugiyama T, Ammosov P, Gavrilyeva GA, et al. Recording Images of Noctilucent Clouds in (Extended Abstract) Russia from 1999. *Tohoku Geophys Journ (Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5)*, 2001;36(2):251-252.
8. Vdovichenko VD. Mesosphere silver clouds. Problem and solution: Monograph. Almaty: RISO, 2012:286.
9. Burov MI. Determination of the projection of silvery clouds on the Earth surface by photogrammetric method. Proceedings of the meeting on silvery clouds (III). Tallinn, 1962:90-104.
10. Bronshten VA. Silver clouds and their observation. Moscow: Nauka, 1984:119.
11. Taylor MJ, Turnbull DN, Lowe RP. Spectrometric and imaging measurements of a spectacular gravity wave event observed during the ALOHA-93 campaign. *Geophys Res Lett*, 1995;22:2849-2852. doi:10.1029/95GL02948.
12. Dewan E, Picard R. Mesospheric bores. *J Geophys Res*, 1998;103:6295-6306. doi:10.1029/97JD02498.
13. Tricker R. Bore, surf, swell and ship waves. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969:288.
14. Fritts DC, Kaifler N, Kaifler B, et al. 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*, 2020;125, e2019JD032037. <https://doi.org/10.1029/2019JD032037>
15. Hozumi Y, Saito A, Sakanoi T, et al. Mesospheric bores at southern midlatitudes observed by ISS-IMAP/VISI: a first report of an undulating wave front. *Atmos Chem Phys*, 2018;18:16399-16407. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-18-16399-2018>.
16. Vizilter YV, Zheltov SY, Bondarenko AV, et al. Image processing and analysis in machine vision tasks: a course of lectures and practical classes. Moscow: Fizmatkniga, 2010.
17. Dalin P, Pogoreltsev A, Pertsev N, et al. 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;42:2037-2046. doi: 10.1002/2014GL062776.
18. Yue J, et al. Concentric gravity waves in polar mesospheric clouds from the Cloud Imaging and Particle Size experiment. *J Geophys Res Atmos*, 2014;119:5115-5127. doi:10.1002/2013JD021385.
19. Hines CO. A possible source of waves in noctilucent clouds. *J Atmos Sci*, 1968;25:937-942.

20. Miao J, Gao H, Kou L, et al. 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;127. 10.1029/2022JD036912.

21. Shefov NN, Pertsev NN, Shagaev MV, et al. Orographically determined variations of the upper atmosphere emissions. *Izv. of the USSR Acad of Sci Atmosph and Ocean Phys*, 1983;19(9):920-926.

22. Li Q, Xu J, Yue J et al. Investigation of a mesospheric bore event over northern China. *Ann Geophys*, 2013;31:409-418. doi:10.5194/angeo-31-409-2013.

---

*НИКОЛАШКИН Семён Викторович* – к. ф.-м. н., доцент, ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: nikolashkin@ikfia.ysn.ru

*Semen V. NIKOLASHKIN* – Cand. Sci. (Phys. & Math.), Assoc. Prof., FRC “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, SHICRA SB RAS.

*КОЛТОВСКОЙ Игорь Иннокентьевич* – к. ф.-м. н., зав. лабораторией, ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: koltik@ikfia.ysn.ru

*Igor I. KOLTOVSKOI* – Cand. Sci. (Phys. & Math.), Head of the Lab, FRC “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, SHICRA SB RAS.

*ТИТОВ Семён Вячеславович* – м. н. с., ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: stitov@ikfia.ysn.ru

*Semen V. TITOV* – Junior Res., FRC “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, SHICRA SB RAS.

*ТЫЩУК Олеся Владимировна* – м. н. с., ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: olesmile@mail.ru

*Olesya V. TYSCHUK* – Junior Res., FRC “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, SHICRA SB RAS.