

УДК 528.8

<https://doi.org/10.25587/2222-5404-2025-22-4-79-93>



Оригинальная научная статья

Влияют ли выбросы от сильных пожаров на образование серебристых облаков?

О. В. Тыщук¹ , О. А. Томшин¹, В. С. Стародубцев¹, П. Г. Мордовской²

¹Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

²Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

 oleSmile@mail.ru

Аннотация

В данной работе представлен анализ фотоснимков серебристых облаков, сделанных 30 июня 2021 года над центральной частью Якутии. Они отличались своей яркостью и формой в виде размытых вытянутых параллельных полос из флера и множества перпендикулярных им четких волн. Эти волны на облаках демонстрируют «след» от распространения внутренних гравитационных волн из нижних слоев атмосферы в верхние. Описаны условия образования и наблюдения серебристых облаков. По спутниковым данным Aura MLS о влагосодержании и температуре мезопаузы, вычислена температура замерзания водяного пара. Увеличивающаяся частота обнаружения серебристых облаков взаимосвязана с ростом концентрации метана в атмосфере. Одним из мощных источников выбросов парниковых газов является горение биомассы. Летом 2021 г. в Якутии наблюдались экстремально сильные лесные пожары за последние четыре десятилетия. Об этом свидетельствуют данные зарегистрированных термоточек спутникового прибора MODIS, VIIRS. Возник вопрос: «Влияют ли выбросы от сильных пожаров на образование серебристых облаков?». С этой целью построены карты распределения концентрации метана по данным прибора AIRS с наложением полей ветров по данным реанализа NCEP/NCAR. Сильный антициклон в конце июля 2021 года способствовал интенсификации лесных пожаров и значительному росту содержания метана в атмосфере в центральной части Якутии. Такие метеоусловия и распространение внутренних гравитационных волн могли оказать влияние на вертикальный перенос молекул метана, которые, вероятно в ходе химических реакций в стратосфере, преобразовались в молекулы воды. Увеличение влагосодержания мезопаузы могло быть одной из составляющих причин образования ярких серебристых облаков 30 июня 2021 года.

Ключевые слова: серебристые облака, мезосфера, Aura MLS, температура верхней атмосферы, влагосодержание верхней атмосферы, внутренние гравитационные волны, пожары, метан, тропосфера, термоточки

Финансирование. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-27-20119)

Благодарности: Выражаем благодарность за предоставленные снимки серебристых облаков фотографу-любителю – графическому дизайнеру компании MOST Софронову Андрею Андреевичу

Для цитирования: Тыщук О. В., Томшин О. А., Стародубцев В. С., Мордовской П. Г. Влияют ли выбросы от сильных пожаров на образование серебристых облаков? *Вестник СВФУ*. 2025, Т. 22, № 4. С. 79–93. DOI: 10.25587/2222-5404-2025-22-4-79-93

Original article

Do emissions from severe fires influence the formation of noctilucent clouds?

Olesya V. Tyshchuk¹ , Oleg A. Tomshin¹, Vadim S. Starodubtsev¹, Petr G. Mordovskoi²

¹Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russian Federation

²The Yakut Scientific Centre SB RAS, Yakutsk, Russian Federation
 oleSmile@mail.ru

Abstract

This paper presents analysis of photographs of noctilucent clouds taken on June 30, 2021, over the central part of Yakutia. They were distinguished by their brightness and shape in the form of blurred elongated parallel stripes of haze and many clear waves perpendicular to them. These waves on the clouds demonstrate a "trace" from the propagation of internal gravity waves from the lower layers of the atmosphere to the upper ones. The conditions for the formation and observation of noctilucent clouds are described. Based on Aura MLS satellite data on moisture content and mesopause temperature, the freezing temperature of water vapor was calculated. The increasing frequency of detection of noctilucent clouds is associated with an increase in the concentration of methane in the atmosphere. One of the powerful sources of greenhouse gas emissions is biomass combustion. In the summer of 2021 in Yakutia, extremely strong forest fires were observed over the past four decades. This is evidenced by the active fire data from MODIS and VIIRS sensors. The question arose: "Do emissions from severe fires affect the formation of noctilucent clouds?" For this purpose, methane concentration distribution maps were constructed based on AIRS data, with wind fields from NCEP/NCAR reanalysis data. A strong anticyclone at the end of July 2021 contributed to intensification of forest fires and significant increase in the methane content in the atmosphere in central Yakutia. Such meteorological conditions and the propagation of internal gravity waves could have affected the vertical transport of methane molecules, which likely were transformed into water molecules during chemical reactions in the stratosphere. An increase in the moisture content of the mesosphere could have been one of the components of the cause of the formation of bright noctilucent clouds on June 30, 2021.

Keywords: noctilucent clouds, mesosphere, Aura MLS, upper atmosphere temperature, upper atmosphere moisture content, internal gravity waves, fires, methane, troposphere, thermal point

Funding. This work was carried out as part of a project with financial support from the Russian Science Foundation (RSF) (project No. 25-27-20119)

Acknowledgments: The authors acknowledge for the provided photographs of noctilucent clouds to amateur photographer and graphic designer of the MOST company Andrey A. Sofronov

For citation: Tyshchuk O. V., Tomshin O. A., Starodubtsev V. S., Mordovskoi P. G. Do emissions from severe fires influence the formation of noctilucent clouds? *Vestnik of NEFU*. 2025, Vol. 22, No. 4. Pp. 79–93.

DOI: 10.25587/2222-5404-2025-22-4-79-93

Введение

С развитием цифровых технологий все больше людей знают и интересуются таким явлением, как серебристые облака. Благодаря этому научное сообщество получает множество фотографий серебристых облаков от фотографов-любителей с разных уголков планеты, что является важным дополнением к материалам для

изучения этого редкого явления. Серебристые облака (полярные мезосферные облака) – это скопление ледяных кристаллов, взвешенных в атмосфере на высоте 80–85 км (иногда разброс высот может достигать значений от 60 до 118 км), которые видны в сумерках после заката или перед восходом Солнца. Наблюдаются в летние месяцы в средних широтах между 45° и 65°, чаще встречаются в интервале широт 55°–60° [1].

Первые упоминания о серебристых облаках датированы 1883 годом в Англии, где во время сумерек Роберт Лесли наблюдал совсем другие, словно подсвеченные фосфорной краской, облака [2]. Он понял, что эти светящиеся серебристо-белые облака находятся на очень большой высоте, ведь обычные облака в сумерках уже были темными и лишь немного подсвечивались даже при полной Луне. В России серебристые облака впервые отмечались Цераским в 1885 году [3] и описывались как «длинные, ослепительно серебристые полосы, перекрещивающиеся или параллельные горизонту, изменяются довольно медленно и столь резки, что их можно удерживать в поле зрения телескопа». В том же году Джесси [4] опубликовал первые снимки серебристых облаков и официально ввел этот термин в науку.

Сформировалась первая, «вулканическая», гипотеза об образовании серебристых облаков, согласно которой выбросы водяного пара в результате извержения вулкана Кракатау 27 августа 1883 г. сконденсировались в мезосфере [5]. Однако в дальнейшем данная гипотеза не нашла своего подтверждения после серии других мощных вулканических извержений [6]. Вторая, «метеорная», гипотеза зародилась после падения Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. Согласно этой гипотезе, частицы серебристых облаков сформированы продуктами испарения метеоров, влетающих в земную атмосферу [7]. В середине 1920-х гг. появилась третья, «ледяная», гипотеза [8], в которой предполагалось, что серебристые облака состоят из кристалликов льда, образованных в результате конденсации водяного пара при очень низких температурах (порядка 160 К [9]). Вестин в 1934 г. собрал предыдущие исследования и объединил все три гипотезы в одну, опубликовав большой итоговый обзор [10]. По сей день в научном сообществе считается, что серебристые облака в мезосфере состоят из ледяных кристаллов, сформированных при температуре конденсации водяного пара 140–150 К, центрами которых оказываются остатки метеорных частиц, космическая и вулканическая пыль. В послевоенные годы стремительно продолжилось изучение серебристых облаков: начались систематические наблюдения во всех странах, был объяснен широтный и сезонный эффекты видимости серебристых облаков, создана их морфологическая классификация форм, проведены фотометрические и поляриметрические наблюдения для оценки размеров частиц, разработаны методы определения высот облаков по фотографиям, снятым из двух пунктов [11].

Классификация [12] форм серебристых облаков:

1) флер – туманообразная пелена белого цвета с голубоватым подтоном и мерцающим сиянием. Флер нередко предшествует (за полчаса-час) появлению других типов форм серебристых облаков;

2) полосы – параллельные друг другу или переплетающиеся под небольшим углом структуры, образованные из масс флера под воздействием воздушных потоков или других благоприятных для них условий;

3) волны являются видимым индикатором волновых процессов в верхней атмосфере, в частности внутренних гравитационных волн (ВГВ) и боров [13]. Подразделяются на три типа: гребешки (ВГВ типа «ряби»), гребни (ВГВ типа «полосы»), волнообразные изгибы;

4) вихри – завихрения других типов форм серебристых облаков от нескольких десятков градусов до полного скручивания в кольцо.

В настоящее время вероятность увидеть серебристые облака невооруженным взглядом сильно возросла по сравнению с прошлым. Научное сообщество уже давно говорит о влиянии глобального изменения климата. Однако это касается не глобального изменения температур (глобального потепления), а изменения концентрации парниковых газов (углекислый газ, метан, водяной пар и др.) в атмосфере. Углекислый газ (CO_2) оказывает значительное влияние на температуру, увеличение его концентрации приводит к большому охлаждению в средней и нижней мезосфере. Известно, что низкие температуры являются причиной зарождения ледяных частиц, но они мало влияют на видимость серебристых облаков, поскольку обладают наименьшими размерами и мало рассеивают света. Видимость серебристых облаков определяется количеством водяного пара (H_2O), который оказывает воздействие на увеличение размера ледяных частиц [14]. Источниками H_2O в мезосфере могут быть:

1. Метан. Рост концентрации H_2O напрямую связан с увеличением концентрации метана (CH_4) в атмосфере, который сильно возрос с началом индустриализации, что совпадает с периодом начала наблюдения серебристых облаков [15]. До начала индустриальной эры значение концентрации CH_4 колебалось в пределах 625–675 ppb, а примерно с 1750 г. начало систематически расти, достигнув к концу XX века уровня ~1500 ppb [16]. Сейчас глобальные концентрации метана в приповерхностном слое достигли 1800 ppb и более. Молекулы CH_4 довольно устойчивы в атмосфере и взаимодействуют лишь с очень активными веществами – молекулами гидроксила (OH), а также с атомами хлора и возбужденными атомами кислорода. В результате из CH_4 образуется формальдегид, который является существенным источником озона (O_3). Исчезновение одной молекулы CH_4 приводит к возникновению 3,75 молекул O_3 , одной молекулы CO_2 , 1,25 молекулы H_2O , 1,5 радикала OH [17]. В свою очередь радикалы OH образуют атомарный кислород (O_2), оксид углерода, водород и водородные радикалы [18]. В конечном итоге после множества циклов цепных химических реакций (около 20 циклов) каждая молекула CH_4 в тропосфере и стратосфере преобразуется в одну или две молекулы H_2O в нижней мезосфере [19].

2. Вулканизм. При некоторых видах извержения вулканов в атмосферу выбрасывается огромное количество мельчайших пылевых частиц (вулканический пепел) и таких газов, как диоксид серы, H_2O , CO_2 , а также галогенных соединений, достигающих самых верхних слоев атмосферы [20]. При условии низких температур на вулканическом пепле конденсируется H_2O , превращаясь в кристаллики льда. Первые наблюдения серебристых облаков, вероятно, все же были вызваны мощным извержением вулкана Кракатау, о котором в данной работе упоминалось ранее. Однако крупные вулканические извержения на Земле происходят не так часто, чтобы быть постоянным источником H_2O в мезосфере. Вулканизм скорее является неким частным случаем.

3. Тропосфера. Около половины стратосферного содержания H_2O возникает в экваториальной тропической тропосфере в результате подъема воздуха в ячейке Хэдли [21]. При конвективном подъеме воздуха, где вблизи тропопаузы температура падает ниже точки росы, большая часть H_2O конденсируется и образуются облака, и лишь совсем небольшая часть H_2O попадает в стратосферу. Молекулы H_2O в стратосфере подвергаются фотолизу, расщепляясь на кислород и водород, который в дальнейшем может участвовать в химических реакциях.

4. Солнечная цикличность. Существует мнение, что серебристые облака чаще всего происходят в периоды минимальной солнечной активности [22]. Ультрафиолетовое излучение, исходящее от Солнца, расщепляет молекулы H_2O , уменьшая тем самым количество, необходимое для образования серебристых

облаков. Впрочем, исследования показали такую зависимость только для южных полярных широт. Связь частоты обнаружения серебристых облаков с солнечным циклом для северных широт не обнаружена.

Рассмотрев возможные виды источников водяного пара в мезосфере, который является одним из важных составляющих формирования серебристых облаков, можно сделать вывод о наибольшей значимости вклада метана. Парниковые газы полностью поступают в атмосферу с земной поверхности и имеют большое время жизни (~10 лет) [23]. Характерное время вертикального переноса CH_4 в тропосфере составляет ~1 месяц [24]. Промежуточные продукты реакции, такие как формальдегиды, пребывают в атмосфере от 7 до 70 ч, а неустойчивые молекулы и свободные радикалы (O_2 , OH и т. д.) от доли до нескольких секунд [25]. Следует учесть, что все химические процессы в атмосфере зависят от интенсивности солнечной радиации и погодных условий (температура, сила ветра, облачность, осадки). Содержание CH_4 определяется естественными (заболоченные территории, пожары и т.д.) и антропогенными (домашний скот, добывающая промышленность и т. д.) источниками. Существенное влияние на изменение в межгодовой изменчивости выбросов парниковых газов оказывают обширные пожары [26]. В Якутии в 2021 г. наблюдались экстремально сильные лесные пожары за последние четыре десятилетия [27]. Поэтому в рамках данного исследования возник вопрос о значимости вклада выбросов CH_4 от горения лесных массивов в образование серебристых облаков.

Целью работы является изучение особенностей формирования серебристых облаков в географических условиях территории Якутии и возможного влияния выбросов от лесных пожаров на их образование.

Материалы и методы исследования

В данной работе представлены изображения серебристых облаков, полученные с помощью фотокамер телефонов Apple iPhone 11 и Apple iPhone 11 Pro Max. Разрешение матрицы фотокамер – 4032x3024 пикселей. Время экспозиции – 0,125 сек. Число диафрагмы – f/1,8. Фокусное расстояние – 26 мм. Автоматическая экспозиция и баланс белого.

Анализ температуры верхней атмосферы и концентрации водяного пара осуществлялся с помощью данных прибора MLS (Microwave Limb Sounder) на борту спутника NASA EOS Aura. Данные версии v.5 загружены с официального сайта (<https://mls.jpl.nasa.gov/>). Горизонтальное разрешение варьирует от ~170 км в стратосфере до ~740 км в мезосфере. Точность измерения температуры изменяется от ~0,5 К в нижней стратосфере до ~2,5 К в мезосфере. Используемые в работе данные Aura MLS о температуре и концентрации водяного пара прошли процедуру фильтрации на основе критериев качества данных, согласно рекомендациям разработчиков алгоритмов прибора.

Информация о действующих природных пожарах в работе основана на данных о термоточках (очагах горения) спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на борту спутников NASA EOS Terra, Aqua и радиометра VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) на борту спутников S-NPP, NOAA-20. Данные получены из архива системы FIRMS (Fire Information for Resource Management System, <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>).

Для построения среднесуточных карт распределения концентрации CH_4 был использован набор данных AIRX3STD v.7 прибора AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), установленного на спутнике NASA EOS Aqua. Для полярного региона наибольшая чувствительность алгоритма восстановления данных находится на барической высоте 400-500 гПа. Набор данных представляет собой двумерные



Рис. 1. Серебристые облака над городом Якутском ($62^{\circ}2$ с. ш., $129^{\circ}4$ в. д.), зафиксированные на фотоснимке 30 июля 2021 года а) в 14:10 UT в направлении на восток б) в 16:58 UT на север

Fig. 1. Noctilucent clouds over the city of Yakutsk ($62^{\circ}2$ N, $129^{\circ}4$ E), recorded in a photograph on July 30, 2021 a) at 14:10 UT in the direction to the east b) at 16:58 UT to the north

карты среднесуточного распределения концентрации метана с разрешением $1 \times 1^{\circ}$. Набор данных доступен на официальном сайте (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>).

Применяются данные реанализа NCEP (National Centers for Environmental Prediction) и NCAR (National Center for Atmospheric Research) для анализа среднесуточных значений скорости и направления ветра [28]. Данные доступны на официальном сайте (<https://psl.noaa.gov/>).

Результаты и обсуждение

В данной работе представлены фотографические наблюдения серебристых облаков 30 июля 2021 года. Снимки в этот день получены с двух точек в центральной части Якутии. В первой точке снимки серебристых облаков (рис. 1) были сделаны в г. Якутске ($62^{\circ}2$ с. ш., $129^{\circ}4$ в. д.) в 14:10 UT ($LT=UT+9$ ч) в направлении на восток и в 16:58 UT в направлении на север.

Во второй точке снимок серебристых облаков (рис. 2) был сделан в п. Ус-Кюель ($62^{\circ}4$ с. ш., $131^{\circ}6$ в. д.) в 16:11 UT [29] в направлении на северо-восток. Серебристые облака на всех фотоснимках яркие, имеют форму размытых вытянутых параллельных полос из флера и перпендикулярных им четких волн, которые являются индикатором ВГВ.



Рис. 2. Серебристые облака над поселком Ус-Кюель (62°4 с. ш., 131°6 в. д.), зафиксированные на фотоснимке 30 июля 2021 года в 16:11 UT в направлении на северо-восток [29]

Fig. 2. Noctilucent clouds over the village of Us-Kyuel (62°4 N, 131°6 E), recorded in a photograph on July 30, 2021 at 16:11 UT in the direction to the northeast [29]

Поля серебристых облаков служат индикатором определенного температурно-влажностного режима мезосферы. Температура замерзания воды в атмосфере с высотой становится ниже 273,5 К (0 °C) из-за особенностей химической водородной связи. Чтобы вычислить температуру замерзания водяного пара (T_s) на высоте серебристых облаков, необходимо воспользоваться уравнением, приведенным в работе Гадсдена [30], которое было определено по формуле Кирхгофа и уравнению Клаузиуса-Клапейрона:

$$\ln p = 28,548 - \frac{6077,4}{T_s}, \quad (1)$$

где p – давление насыщенного водяного пара надо льдом, Н/м²; T_s – температура замерзания водяного пара, К.

Зарождение ледяных частиц происходит при больших значениях коэффициента насыщения (S). При $S>1$ ледяные частицы будут расти, а при $S<1$ – испаряться [31]. Это коэффициент находится по формуле:

$$S = \frac{p_{H_2O}}{p}, \quad (2)$$

где p_{H_2O} – парциальное давление водяного пара, Н/м².

Парциальное давление водяного пара в точке замерзания будет соответствовать значению давления насыщенного водяного пара надо льдом (p). Парциальное давление водяного пара и абсолютная влажность связаны друг с другом уравнением [32]:

$$p = K_{H_2O} * p_g, \quad (3)$$

где K_{H_2O} – концентрация водяного пара, VMR; p_g – геопотенциальная высота, Н/м².

В результате получаем итоговую формулу T_s на высоте серебристых облаков:

$$T_s = \frac{6077,4}{28,548 - \ln(K_{H_2O} * p_g)}. \quad (4)$$

Вычислив температуру замерзания водяного пара, можно определить вероятность образования и существования серебристых облаков. Для этого находится разность температуры (ΔT) между измеренной температурой (T) и вычисленной температурой замерзания водяного пара T_s [33]:

$$\Delta T = T - T_s. \quad (5)$$

Номинальная высота наблюдения серебристых облаков 80–85 км. Образование ледяных частиц происходит на уровне мезопаузы, затем за время своего нарастания они опускаются вниз, в мезосферу, под действием силы тяжести. Высота мезопаузы над центральной Якутией в летние месяцы снижается до ~85 км. В связи с этим спутниковые данные Aura MLS о содержании водяного пара K_{H_2O} и температуре T отобраны на геопотенциальной высоте $p_g=0,2$ Н/м² (0,002 гПа), что соответствует ~86 км. Была построена карта разности ΔT (рис. 3) с использованием линейного интерполяирования средствами библиотеки SciPy для языка программирования Python. Отрицательные значения $\Delta T < 0$ (синие и голубые цвета) являются благоприятным условием для образования и существования серебристых облаков.

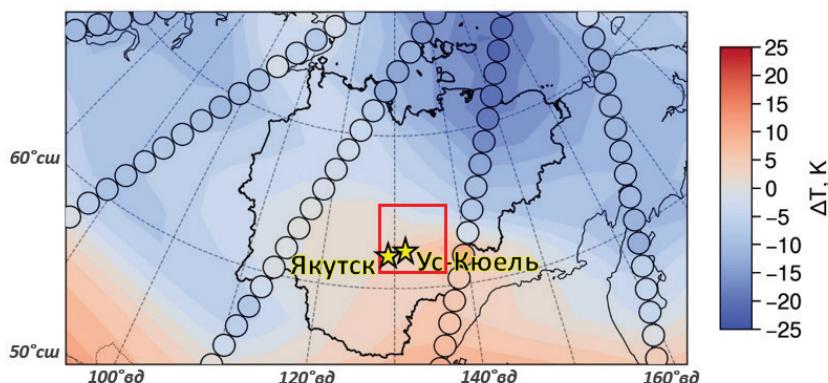


Рис. 3. Карта разности температуры ΔT между измеренной и вычисленной температурой замерзания водяного пара на геопотенциальной высоте 0.002 гПа (~86 км)

30 июля 2021 г. Кружками отмечены измерения Aura MLS. Область наблюдения серебристых облаков выделена красной рамкой. Звездочками отмечены пункты наблюдения г. Якутск и п. Ус-Кюель

Fig. 3. Map of the temperature difference ΔT between the measured and calculated freezing point of water vapor at a geopotential height of 0.002 hPa (~86 km) on July 30, 2021. Circles mark Aura MLS measurements. The observation area of noctilucent clouds is highlighted with a red frame. Asterisks mark the observation points of Yakutsk and Us-Kyuelya

Серебристые облака видны, когда Солнце подсвечивает ледяные частицы, находясь ниже горизонта от 6° до 15° [30]. Этот промежуток времени включает в себя период навигационных сумерек (от 6° до 12°) и часть астрономических суток (от 12° до 18°). Благоприятный отрезок времени для отслеживания серебристых облаков 30 июля 2021 года в пунктах наблюдения, обозначенных звездочками, находился между 13:34 UT (22:34 LT) и 17:18 UT (02:18 LT). В этот промежуток времени были сделаны фотоснимки серебристых облаков: в 14:10 UT (23:10 LT) и в 16:58 UT (01:58 LT) над г. Якутском и в 16:11 UT (01:11 LT) над п. Ус-Кюель. К сожалению, спутник в это время пролетал в северном направлении над областью южнее 52° с. ш., и траектория полета проходила мимо области наблюдения за серебристыми облаками, обозначенной красной рамкой. Время пролета спутника в максимальной близости от пунктов наблюдения 17:28 UT (восточнее п. Ус-Кюель) и 19:06 UT (западнее г. Якутска), где разница температур ΔT составила 9,3 К и -0,8 К соответственно. Интерполяция данных показывает, что ΔT в области наблюдения серебристых облаков положительная, но приближена к значению 0 К. Нужно принимать во внимание, что данные Aura MLS обладают определённой погрешностью измерений. Однако полученная карта все же позволяет проанализировать общую картину температурно-влажностного режима мезосферы.

Серебристые облака образуются в среднем за 1–2 дня [34]. На формирование ледяных частиц оказывают влияние температура и влажность, которые в свою очередь изменяются от концентрации CO_2 и CH_4 соответственно. Температура мезосферы в центральной части Якутии по спутниковым данным Aura MLS в конце июля 2021 года имела характерные для летних месяцев значения (130–150 К) (рис. 4а). Тогда как содержание H_2O в мезосфере претерпевало значительные изменения (рис. 4б). В день наблюдения серебристых облаков $K_{\text{H}_2\text{O}}$ в мезосфере имело наибольшее значение по сравнению с другими днями. Время жизни H_2O в мезосфере невелико и составляет ~ 10 суток [22].

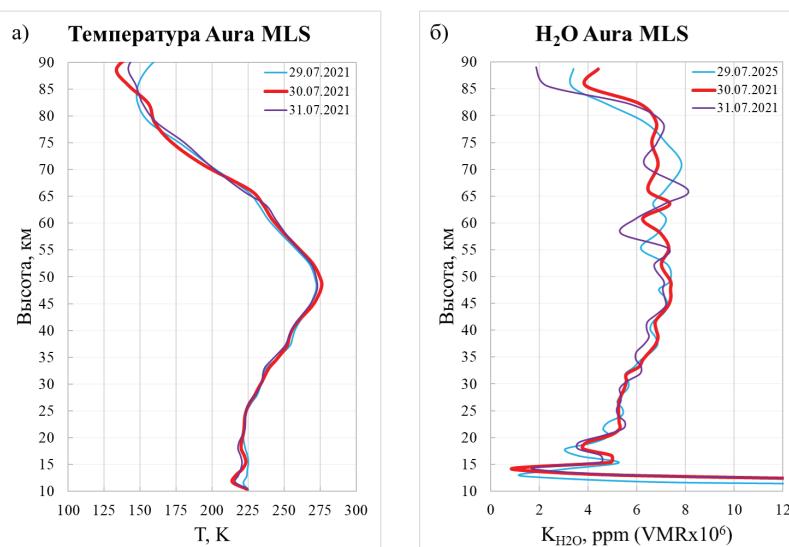


Рис. 4. Спутниковые данные Aura MLS о ночной температуре Т и содержании водяного пара $K_{\text{H}_2\text{O}}$ для центральной части Якутии в день наблюдения за серебристыми облаками (красным), за сутки до (голубым) и после (фиолетовым)

Fig. 4. Aura MLS satellite data on night-time temperature T and water vapor content $K_{\text{H}_2\text{O}}$ for the central part of Yakutia on the day of observation of noctilucent clouds (red), the day before (blue) and after (purple)

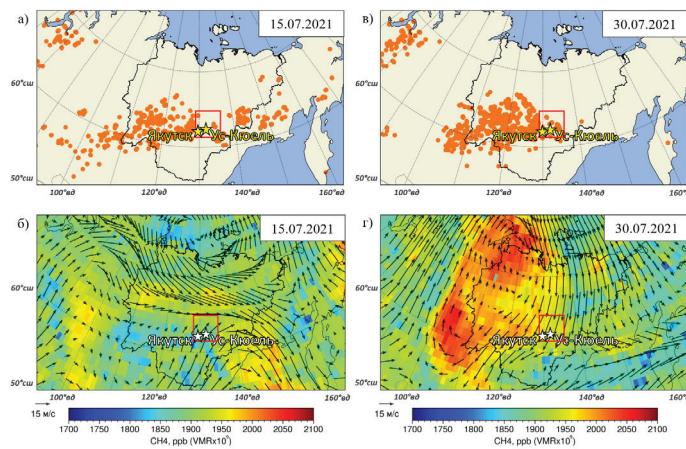


Рис. 5. а, в) Карты зарегистрированных термоточек по данным приборов MODIS, VIIRS на территории Якутии, обозначенные оранжевым; б, г) Распределение концентрации CH_4 и поле ветров на геопотенциальной высоте 400 гПа (~8 км), по данным реанализа NCEP/NCAR, 15 и 30 июля 2021 г. Область наблюдения серебристых облаков выделена красной рамкой. Звездочками отмечены пункты наблюдения г. Якутск и п. Ус-Кюель

Fig. 5. a, c) Maps of registered hotspots according to MODIS, VIIRS instruments in Yakutia, marked in orange. **b, d)** Distribution of CH_4 concentration and wind field at a geopotential height of 400 hPa (~8 km) according to NCEP/NCAR reanalysis data on July 15 and 30, 2021. The observation area of noctilucent clouds is highlighted with a red frame. The observation points of Yakutsk and Us-Kyuel are marked with asterisks

В Якутии в 2021 г. наблюдались экстремально сильные пожары. Общее количество очагов составило рекордные ~150 000 термоточек. На рис. 5а, 5в показаны зарегистрированные термоточки (очаги активного горения) на территории Якутии 15 и 30 июля 2021 года по спутниковым данным приборов MODIS, VIIRS. На рис. 5б и 5г построены карты распределения концентрации метана по данным прибора AIRS, с наложением полей ветров по данным реанализа NCEP/NCAR, за те же даты на геопотенциальной высоте 400 гПа. На рис. 5б за 15 июля 2021 г. виден преобладающий западный перенос воздушных масс. Максимум интенсивности лесных пожаров в регионе пришелся на период с 24 июля по 12 августа. В результате горения биомассы высвобождается большое количество парниковых газов, в том числе CO_2 и CH_4 . На рис. 5г видно, что 30 июля 2021 г. над западной частью Якутии располагался сильный антициклон, который наблюдался с конца июля до середины августа и являлся причиной засушливых погодных условий и низких скоростей ветра, что привело к большому накоплению выбросов лесных пожаров в атмосфере в этом регионе. Среднесуточная концентрация CH_4 на высоте 400 гПа в данный день была около 2050 ppb, что значительно превышает среднемноголетнее значение CH_4 для июля, которое составляет ~1885 ppb. Сильные конвективные потоки воздуха, образующиеся над очагами массивных лесных пожаров, способны поднимать продукты горения на значительные высоты [27]. Можно предположить, что CH_4 , выделившийся при горении биомассы, в сложившихся метеоусловиях мог подняться в стратосферу, где в процессе химических реакций преобразовался в молекулы H_2O , которые могли достичь мезосферы. Это могло повлиять на влагосодержание мезопаузы, что впоследствии привело к образованию ярких серебристых облаков, которые наблюдались над г. Якутском и п. Ус-Кюеля 30 июля 2021 г.

На всех фотоснимках серебристых облаков 30 июля 2021 года хорошо видны волновые периодические структуры. Атмосферные волны, распространяясь вверх из нижних слоев атмосферы (тропосфера) через среднюю атмосферу (стратосфера), как бы оставили свой «след» на серебристых облаках (мезосфера). Поэтому серебристые облака могут служить видимым индикатором внутренних гравитационных волн. Источниками генерации ВГВ в тропосфере могут быть активные метеорологические процессы, орографические особенности местности, импульсные источники, сдвиг ветра, циркуляционные диполи и атмосферные фронты. ВГВ оказывают влияние на потоки импульса и энергии, вызывая турбулентное перемешивание атмосферы посредством инверсии среднего зонального и меридионального ветров [35]. В стратосфере такой эффект оказывает незначительное влияние на тепловой режим и состав атмосферы. Однако намного сильнее этот эффект проявляется в мезосфере и термосфере из-за увеличивающейся с высотой диссипации энергии, что является причиной теплой зимней и холодной летней мезопаузы. Возможно, ВГВ могли оказать дополнительное влияние на перемешивание парниковых газов в стратосфере и изменили содержание водяного пара в мезосфере.

Заключение

В данной работе представлены фотографические наблюдения серебристых облаков 30 июля 2021 г., сделанные в двух точках центральной части Якутии: г. Якутск и п. Ус-Кюель. Серебристые облака имеют форму размытых вытянутых параллельных полос из флера и перпендикулярных им четких волн, которые являются индикатором внутренних гравитационных волн.

В попытке выявить причину зарождения серебристых облаков проанализированы спутниковые данные Aura MLS о содержании водяного пара и температуре, благодаря чему вычислена температура замерзания водяного пара в мезосфере. Карта разности между измеренной температурой и вычисленной температурой замерзания водяного пара в мезосфере не показала в области наблюдения серебристых облаков благоприятных условий для их образования и существования, однако значения были близки к благоприятным.

Во время наблюдения серебристых облаков территория Якутии была охвачена сильными лесными пожарами. Самый пик пришелся на период с 24 июля по 12 августа, когда центральная часть Якутии оказалась под воздействием сильного антициклона. Сложившиеся метеоусловия привели к большому накоплению выбросов лесных пожаров в данном регионе. В результате концентрация метана значительно превысила среднемноголетнее значение. Сделано предположение, согласно которому высвобождающийся при горении биомассы метан подвергся вертикальному переносу и повлиял на содержание водяного пара в атмосфере, что могло явиться причиной образования ярких серебристых облаков, которые наблюдались над г. Якутском и п. Ус-Кюель 30 июля 2021 г.

Л и т е р а т у р а

1. Наблюдения серебристых облаков в СССР. Каталог данных, 1957-1987. Москва: Б. и.; 1989:174.
2. Leslie R. Sky Glows. *Nature*. 1885;32:245. DOI: 10.1038/032245a0.
3. Цераский В. *Избранные работы по астрономии*. Москва: Гос. изд-во техн.-теорет. лит.; 1953:196.
4. Jesse O. Auffallende Abenderscheinungen am Himmel. *Meteorol. Z.* 1885;2:311-312. (на нем. яз.)
5. Kohlrausch W. Zur Höhe der Wolken. *Annalen der Physik*. 1887;267;(8):1047-1048. (на нем. яз.)

6. Бронштэн В. *Серебристые облака и их наблюдение*: Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы; 1984:128.
7. Кулик Л.А. К вопросу о связи метеоритов с кометами. *Мироведение*. 1926;15;(2):173-178.
8. Wegener A. Die Temperatur der obersten Atmosphärenschichten. *Meteorol. Z.* 1925;42:402-405. (на нем. яз.)
9. Humphreys W. J. NACREOUS AND NOCTILUCENT CLOUDS. *Monthly Weather Review*. 1933;61;(8):228-229. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1933\)61<228:NANC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1933)61<228:NANC>2.0.CO;2).
10. Vestine E. Noctilucent clouds. *J. Astron. Soc.* 1934;28:49-272,303-317.
11. Васильев О. Астрофизические исследования серебристых облаков: Дис. ...канд. ф.-м. н. Ленинград; 1967:85.
12. Бронштэн В., Гришин Н. *Серебристые облака*. Москва: Наука; 1970:359.
13. Николашкин С.В., Колтовской И.И., Титов С.В. и др. Параметры внутренних гравитационных волн по наблюдениям серебристых облаков в Якутске. *Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова*. 2024;21(3):50-58. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-3-50-58.
14. Thomas GE., Olivero J. Noctilucent clouds as possible indicators of global change in the mesosphere. *Adv. Space Res.* 2001;28;(7):937-946. DOI: 10.1016/S0273-1177(01)80021-1.
15. Lübken F., Berger U., Baumgarten G. On the Anthropogenic Impact on Long-Term Evolution of Noctilucent Clouds. *Geophys. Res. Lett.* 2018; 45;(13):6681-6689. DOI: 10.1029/2018GL077719.
16. Nisbet EG., Dlugokencky E.J., Manning MR. et al. Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles*. 2016;30;(9):1356-1370. DOI: 10.17863/CAM.6326. DOI: 10.17863/CAM.6326.
17. Бажин Н.М. *Метан в окружающей среде*. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН; 2010;93:56.
18. Кислов А.В., Суркова Г.В. *Климатология*. Москва: НИЦ ИНФРА; 2023:324.
19. Hurst DF., Dutton GS., Romashkin PA. et al. Closure of the total hydrogen budget of the northern extratropical lower stratosphere. *JGR:Atmospheres: Atmospheres*. 1999;104;(D7):8191-8200. DOI: 10.1029/1998JD100092.
20. Evan S., Brioude J., Rosenlof K.H. et al. Rapid ozone depletion after humidification of the stratosphere by the Hunga Tonga Eruption. *Science*. 2023;382;(6668):eadg2551. DOI: 10.1126/science.adg2551.
21. Zhou X., Geller MA., Zhang M. Cooling trend of the tropical cold point tropopause temperatures and its implications. *JGR:Atmospheres*. 2001; 106;(D2):1511-1522. DOI: 10.1029/2000JD900472.
22. Thomas GE., McPeters RD., Jensen EJ. Satellite observations of polar mesospheric clouds by the solar backscattered ultraviolet spectral radiometer: Evidence of a solar cycle dependence. *JGR:Atmospheres*. 1991; 96; (D1):927-939.
23. Stocker TF., D. Qin, Plattner G.-K. et al. *IPCC, 2013: Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. NY: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York; 2013.
24. Eliseev AV. GLOBAL METHANE CYCLE: A REVIEW. *Fundamental and Applied Climatology*. 2018;1:52-70. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-52-70.
25. Халиков И.С. Формальдегид в атмосферном воздухе: источники поступления и пути удаления. *Экологическая химия*. 2019;28;(6):307-317. DOI: 10.25996/6854.2024.24.75.001.
26. Ciais P., Sabine C., Bala G. et al. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. NY: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York; 2013.
27. Tomshin O., Solovyev V. Features of the Extreme Fire Season of 2021 in Yakutia (Eastern Siberia) and Heavy Air Pollution Caused by Biomass Burning. *Remote Sensing*. 2022;14;(19):4980. DOI: 10.3390/rs14194980.
28. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996;77;(3):437-471. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

29. Андреев П. Мезосферные (серебристые) облака в небе над посёлком Ус-Кюеля, июль 2021 года. URL: [https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Файл:Мезосферные_\(серебристые\)_облака_в_небе_над_Якутией,_июль_2021_года.jpg](https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Файл:Мезосферные_(серебристые)_облака_в_небе_над_Якутией,_июль_2021_года.jpg) (Дата обращения: 02.06.2025).
30. Gadsden M., Schröder W. *Noctilucent clouds*. Berlin: Springer; 1989.
31. Lübken F. Thermal structure of the Arctic summer mesosphere. *JGR:Atmospheres*. 1999;104;(D8):9135-9149. DOI: 10.1029/1999JD900076.
32. Wallace JM., Hobbs PV. *Atmospheric science: an introductory survey*. Canada: Elsevier Academic Press; 2006:483.
33. Pertsev NN., Dalin PA., Perminov VI. et al. Analysis of noctilucent clouds' fields according to ground-based network and airborne photography data. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024;60;(2):187-194. DOI: 10.1134/S0001433824700191.
34. Rapp M., Thomas GE. Modeling the microphysics of mesospheric ice particles: Assessment of current capabilities and basic sensitivities. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2006;68;(7):715-744. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.10.015.
35. Fritts DC., Alexander MJ. Correction to «Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere». *Reviews of Geophysics*. 2012;50;(3):2012RG000409. DOI: 10.1029/2012RG000409.

References

1. Observations of noctilucent clouds in the USSR Data Cat., 1957-1987. Moscow; 1989: 174 (in Russian)
2. Leslie R. Sky Glows. *Nature*. 1885;32:245. (in English) DOI: 10.1038/032245a0.
3. Tseraskii V. *Selected works on astronomy*. Moscow: Publishing House “Technical and theoretical literature”; 1953:196 (in Russian)
4. Jesse O. Striking evening phenomena in the sky. *Meteorol. Z.* 1885;2:311-312. (in German)
5. Kohlrausch W. On the issue of the height of the clouds. *Annalen der Physik*. 1887;267;(8):1047-1048. (in German)
6. Bronshten V. *Noctilucent clouds and their observation*: Moscow: Publishing House “Nauka”; 1984:128 (in Russian)
7. Kulik LA. On the connection between meteorites and comets. *Mirovedenie*. 1926;15;(2):173-178 (in Russian)
8. Wegener A. The temperature of the uppermost atmospheric layers. *Meteorol. Z.* 1925;42:402-405. (in German)
9. Humphreys W. J. NACREOUS AND NOCTILUENT CLOUDS. *Monthly Weather Review*. 1933;61;(8):228-229. (in English) DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1933\)61<228:NANC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1933)61<228:NANC>2.0.CO;2).
10. Vestine E. Noctilucent clouds. *J. Astron. Soc.* 1934;28:49-272,303-317. (in English)
11. Vasiliev O. Astrophysical studies of noctilucent clouds: Dis. Ph.D. Ph.D. Leningrad: 1967:85 (in Russian)
12. Bronshten V, Grishin N. *Noctilucent clouds*. Moscow: Publishing House “Nauka”; 1970:359 (in Russian)
13. Nikolashkin SV, Koltovskoy II, Titov SV, Tyshchuk OV. Parameters of internal gravity waves based on observations of noctilucent clouds in Yakutsk. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2024;21(3):50-58. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-3-50-58 (in Russian)
14. Thomas GE., Olivero J. Noctilucent clouds as possible indicators of global change in the mesosphere. *Adv. Space Res.* 2001;28;(7):937-946. (in English) DOI: 10.1016/S0273-1177(01)80021-1.
15. Lübken F., Berger U., Baumgarten G. On the Anthropogenic Impact on Long-Term Evolution of Noctilucent Clouds. *Geophys. Res. Lett.* 2018; 45;(13):6681-6689. (in English) DOI: 10.1029/2018GL077719.
16. Nisbet EG., Dlugokencky EJ., Manning MR. et al. Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles*. 2016;30;(9):1356-1370. (in English) DOI: 10.1029/2015GC06326. DOI:10.1029/2015GC06326.
17. Bazhin NM. *Methane in the environment*. Novosibirsk: Publishing House “State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”; 2010;93:56 (in Russian)

18. Kislov AV, Surkova GV. *Climatology*. Moscow: Scientific Research Center INFRA; 2023:324 (in Russian)
19. Hurst DF., Dutton GS., Romashkin PA. et al. Closure of the total hydrogen budget of the northern extratropical lower stratosphere. *JGR:Atmospheres: Atmospheres*. 1999;104;(D7):8191-8200. (in English) DOI: 10.1029/1998JD100092.
20. Evan S., Brioude J., Rosenlof K.H. et al. Rapid ozone depletion after humidification of the stratosphere by the Hunga Tonga Eruption. *Science*. 2023;382;(6668):eadg2551. (in English) DOI: 10.1126/science.adg2551.
21. Zhou X., Geller MA., Zhang M. Cooling trend of the tropical cold point tropopause temperatures and its implications. *JGR:Atmospheres*. 2001; 106;(D2):1511-1522. (in English) DOI: 10.1029/2000JD900472.
22. Thomas GE., McPeters RD., Jensen EJ. Satellite observations of polar mesospheric clouds by the solar backscattered ultraviolet spectral radiometer: Evidence of a solar cycle dependence. *JGR:Atmospheres*. 1991; 96; (D1):927-939. (in English)
23. Stocker TF., D. Qin, Plattner G.-K. et al. *IPCC, 2013: Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. NY: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York; 2013. (in English)
24. Eliseev AV. GLOBAL METHANE CYCLE: A REVIEW. *Fundamental and Applied Climatology*. 2018;1:52-70. (in English) DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-52-70.
25. Khalikov IS. Formaldehyde in atmospheric air: sources of entry and removal routes. *Environmental Chemistry*. 2019;28;(6):307-317. (in Russian) DOI: 10.25996/6854.2024.24.75.001
26. Ciais P., Sabine C., Bala G. et al. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. NY: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York; 2013. (in English)
27. Tomshin O., Solovyev V. Features of the Extreme Fire Season of 2021 in Yakutia (Eastern Siberia) and Heavy Air Pollution Caused by Biomass Burning. *Remote Sensing*. 2022;14;(19):4980. (in English) DOI: 10.3390/rs14194980.
28. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996;77;(3):437-471. (in English) DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
29. Andreev P. Mesospheric (noctiluscent) clouds in the sky over the village of Us-Kyuelya, July 2021. Available at: [https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Файл:Мезосферные_\(серебристые\)_облаца_в_небе_над_Якутией,_июль_2021_года.jpg](https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Файл:Мезосферные_(серебристые)_облаца_в_небе_над_Якутией,_июль_2021_года.jpg) [Accessed 2 June 2025] (in Russian)
30. Gadsden M., Schröder W. *Noctilucent clouds*. Berlin: Springer; 1989. (in English)
31. Lübken F. Thermal structure of the Arctic summer mesosphere. *JGR:Atmospheres*. 1999;104;(D8):9135-9149. (in English) DOI: 10.1029/1999JD900076.
32. Wallace JM., Hobbs PV. *Atmospheric science: an introductory survey*. Canada: Elsevier Academic Press; 2006:483. (in English)
33. Pertsev NN., Dalin PA., Perminov VI. et al. Analysis of noctilucent clouds' fields according to ground-based network and airborne photography data. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024;60;(2):187-194. (in English) DOI: 10.1134/S0001433824700191.
34. Rapp M., Thomas GE. Modeling the microphysics of mesospheric ice particles: Assessment of current capabilities and basic sensitivities. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2006;68;(7):715-744. (in English) DOI: 10.1016/j.jastp.2005.10.015.
35. Fritts DC., Alexander MJ. Correction to «Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere». *Reviews of Geophysics*. 2012;50;(3):2012RG000409. (in English) DOI: 10.1029/2012RG000409.

Об авторах

ТЫЦУК Олеся Владимировна – м. н. с., ФГБУН «Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-6342-6389>, ResearcherID: JEZ-8765-2023, SPIN: 7405-3748, e-mail: Mordosova@ikfia.ysn.ru

ТОМШИН Олег Анатольевич – м. н. с., ФГБУН «Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-0462-8896>, ResearcherID: R-9969-2017, Scopus Author ID: 56375103800, SPIN: 5662-6882, e-mail: tomshinoa@gmail.com

СТАРОДУБЦЕВ Вадим Сергеевич – м. н. с., ФГБУН «Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5361-0334>, SPIN: 4395-9072, e-mail: starodubjr@ikfia.ysn.ru

МОРДОВСКОЙ Петр Григорьевич – к. т. н., в. н. с., ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7295-6085>, SPIN: 8674-5451, e-mail: mordovskoipg@yandex.ru

About the authors

Olesya V. TYSHCHUK – junior researcher, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-6342-6389>, ResearcherID: JEZ-8765-2023, SPIN: 7405-3748, e-mail: Mordosova@ikfia.ysn.ru

Oleg A. TOMSHIN – junior researcher, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-0462-8896>, ResearcherID: R-9969-2017, Scopus Author ID: 56375103800, SPIN: 5662-6882, e-mail: tomshinoa@gmail.com

Vadim S. STARODUBTSEV – junior researcher, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-5361-0334>, SPIN: 4395-9072, e-mail: starodubjr@ikfia.ysn.ru

Petr G. MORDOVSKOI – Cand. Sci. (Technical), Leading Researcher, Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», <https://orcid.org/0000-0001-7295-6085>, SPIN: 8674-5451, e-mail: mordovskoipg@yandex.ru

Вклад авторов

Тышук О. В. – методология, верификация данных, ресурсное обеспечение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования

Томшин О. А. – программное обеспечение, верификация данных, проведение статистического анализа, редактирование рукописи, визуализация

Стародубцев В. С. – проведение исследования, редактирование рукописи, визуализация

Мордовской П. Г. – разработка концепции, руководство исследованием

Authors' contribution

Olesya V. Tyshchuk – methodology, validation, resources, data curation, writing - original draft, supervision, project administration, funding acquisition

Oleg A. Tomshin – software, validation, formal analysis, writing - review & editing, visualization

Vadim S. Starodubtsev – investigation, writing - review & editing, visualization

Petr G. Mordovskoi – conceptualization, project administration

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interests

Поступила в редакцию / Received 15.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 22.09.2025

Принята к публикации / Accepted 22.10.2025