



Двадцать третья международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
Москва, 10-14 ноября 2025



Влияют ли выбросы от сильных пожаров на образование серебристых облаков?

Тышук Олеся Владимировна

младший научный сотрудник
лаборатории оптики атмосферы

Института космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера

соавторы: Томшин О. А., Стародубцев В. С., Мордовской П. Г.

Серебристые облака (полярные мезосферные облака) – это скопление ледяных кристаллов, взвешенных в атмосфере на высоте 80–85 км (иногда 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°).



Первые упоминания о серебристых облаках датированы 1885 г. Робертом Лесли в Англии

«Вулканическая» гипотеза:
выбросы водяного пара
конденсируются в
мезосфере



*Извержение
вулкана
Кракатау
27 августа
1883 г.*

«Метеорная» гипотеза:
частицы серебристых
облаков сформированы
продуктами испарения
метеоров, влетающих в
земную атмосферу



*Падение
Тунгусского
метеорита
30 июня
1908 г.*

«Ледяная» гипотеза:
образование кристалликов льда
происходит при очень низких
температурах (порядка 160 К),
при том парциальное давление в
атмосфере должно превосходить
упругость насыщенного пара над
льдом



*Ракетные измерения
7 марта 1947 г.*

«Современная» гипотеза:
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.

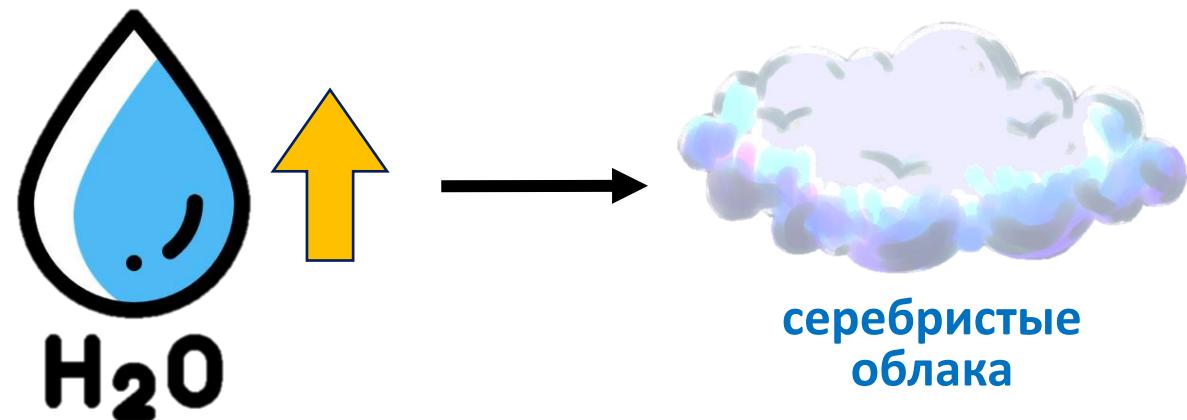
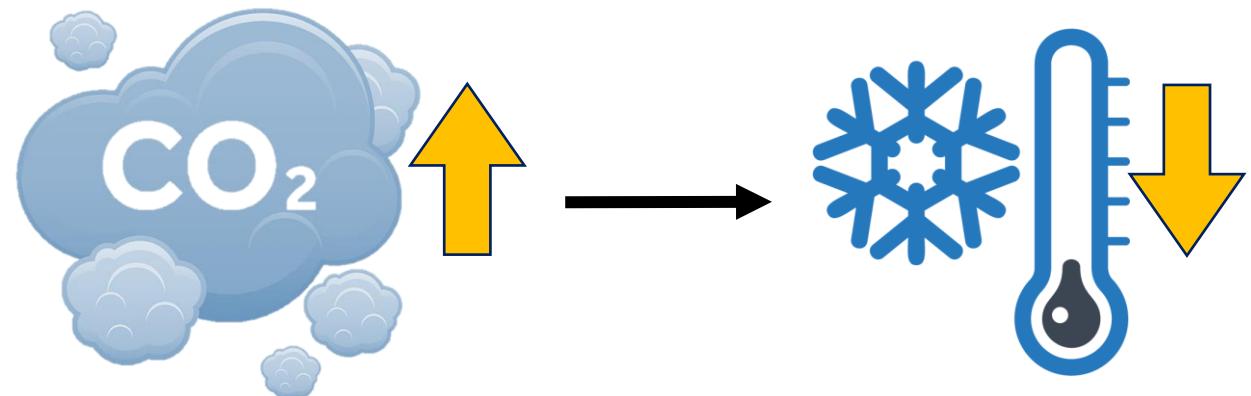
Классификация форм серебристых облаков



Вероятность увидеть серебристые облака невооруженным взглядом сильно возросла по сравнению с прошлым. Причиной этому является глобальное изменение климата, а именно **изменение концентрации парниковых газов в атмосфере**.

Увеличение концентрации **углекислого газа (CO_2)** приводит к большому охлаждению в средней и нижней мезосфере. Низкие температуры являются причиной зарождения ледяных частиц.

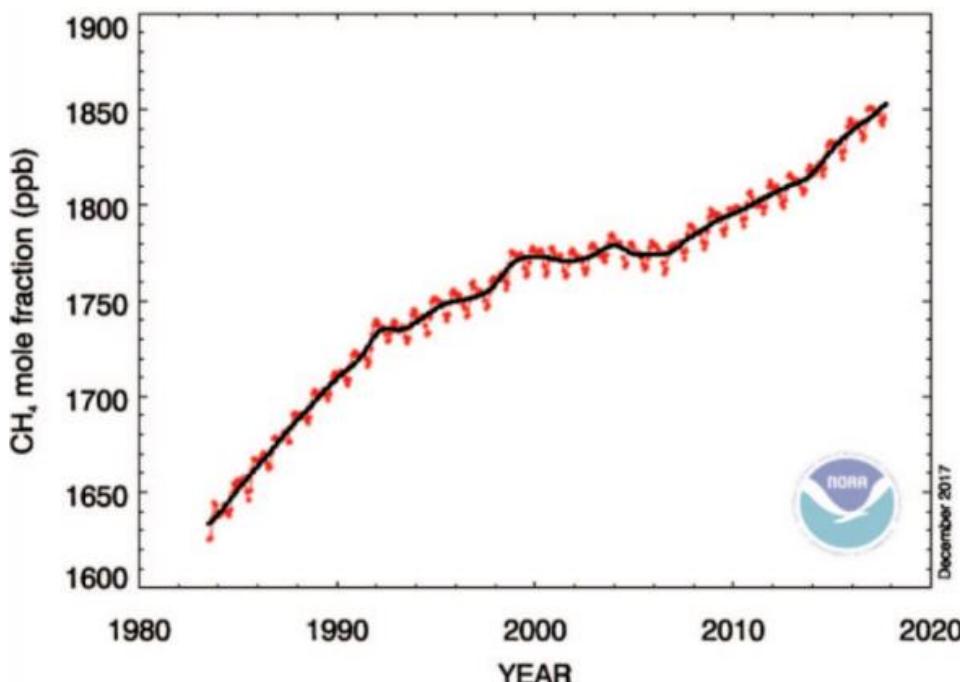
Видимость серебристых облаков определяется количеством **водяного пара (H_2O)**, который оказывает воздействие на увеличение размера ледяных частиц.



Источники H_2O в мезосфере

1. Метан (CH_4)

Рост концентрации H_2O напрямую связан с увеличением концентрации CH_4 в атмосфере.



Изменение среднемесячных глобальных значений концентрации CH_4 в приповерхностном слое [1]

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 [2].



[1] Nisbet, E. G., et al. (2016), Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift, *Global Biogeochem. Cycles*, 30. DOI:10.1002/2016GB005406

[2] Hurst D.F., 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]

2. Вулканизм

При извержении 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.

3. Тропосфера

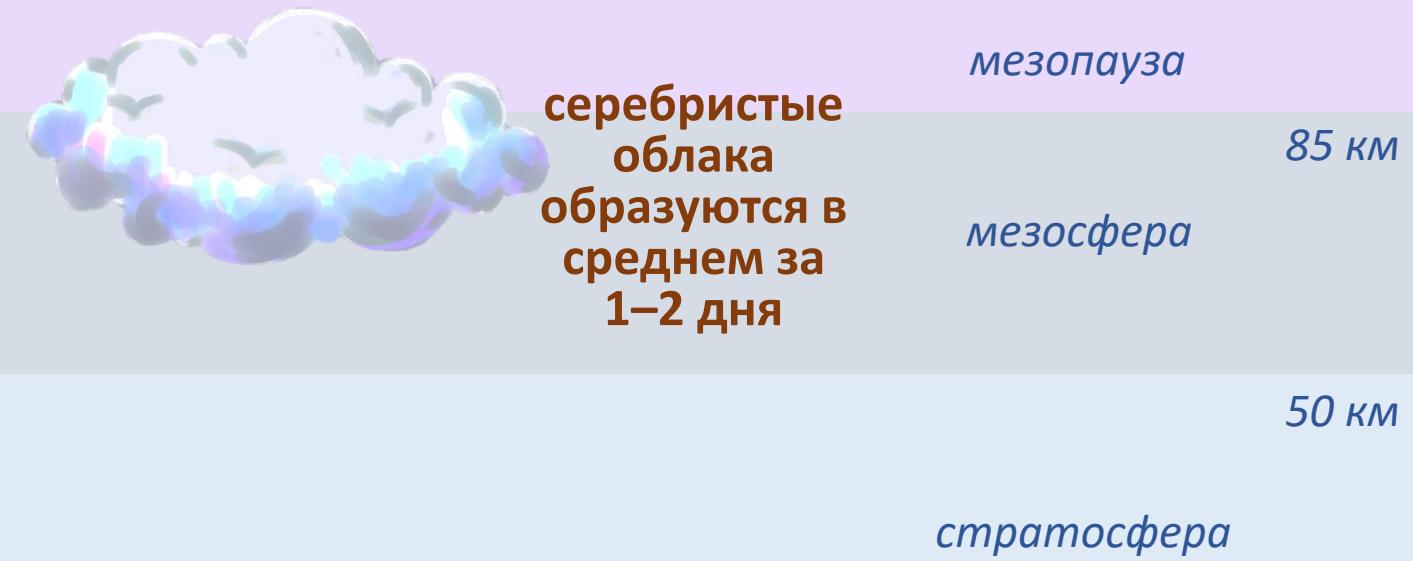
Около половины стратосферного содержания H_2O возникает в экваториальной тропической тропосфере в результате подъема воздуха в ячейке Хэдли. Молекулы H_2O в стратосфере подвергаются фотолизу, расщепляясь на кислород и водород, который в дальнейшем может участвовать в химических реакциях.

4. Солнечная цикличность

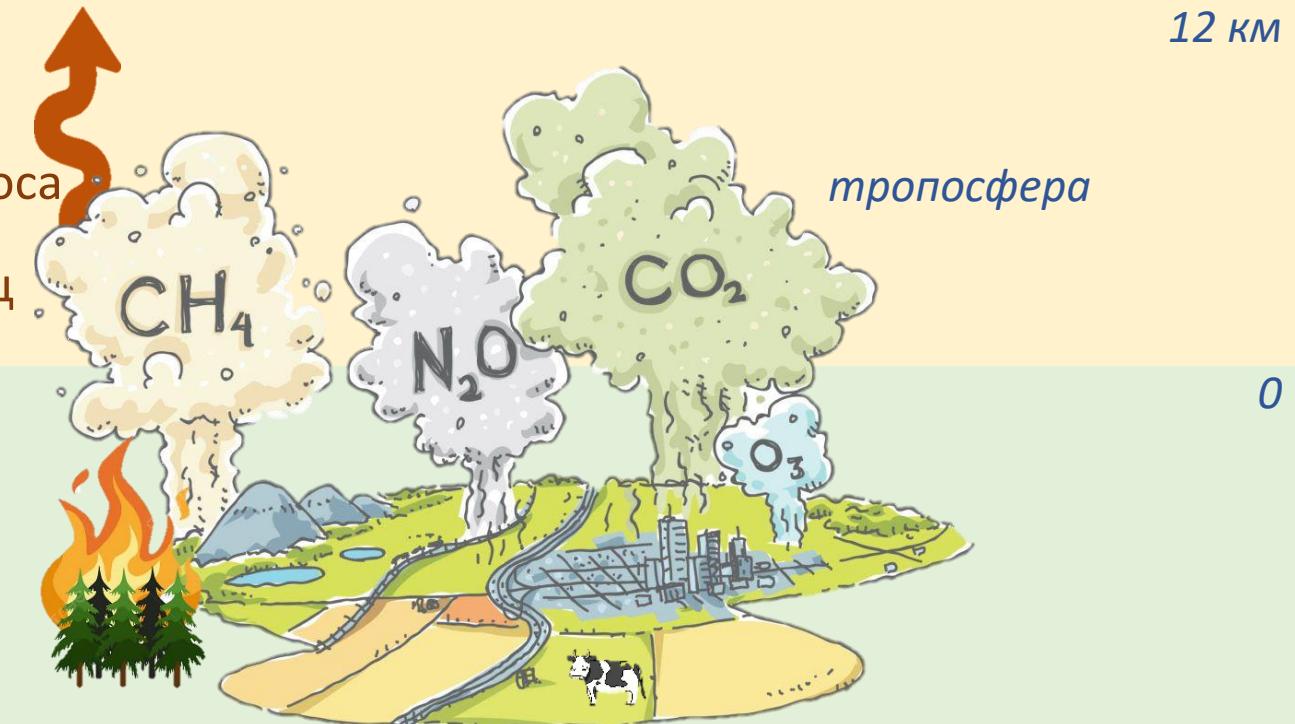
Существует мнение, что серебристые облака чаще всего происходят в периоды минимальной солнечной активности. Ультрафиолетовое излучение, исходящее от Солнца, расщепляет молекулы H_2O . Впрочем, исследования показали такую зависимость только для южных полярных широт.

время жизни	
H_2O в мезосфере	10 суток
неустойчивые молекулы и свободные радикалы (O_2 , OH и т.д.)	от доли до нескольких секунд
промежуточные продукты реакции (формальдегиды и т.п.)	от 7 до 70 ч
CO_2	5-10 лет
CH_4	4-7 лет

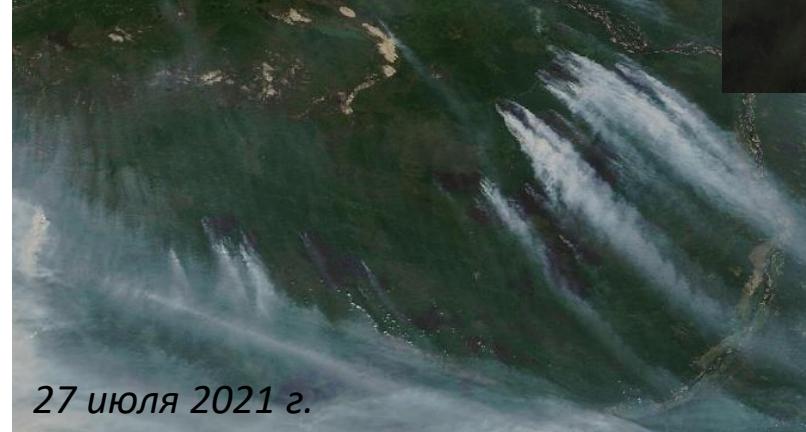
Все химические процессы в атмосфере зависят от интенсивности солнечной радиации и погодных условий.



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 [1]. В Якутии в 2021 году наблюдались экстремально сильные лесные пожары за последние четыре десятилетия. Поэтому в рамках данного исследования возник вопрос о значимости вклада выбросов CH_4 от горения лесных массивов на образование серебристых облаков.



[1] Ciais P., 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



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.

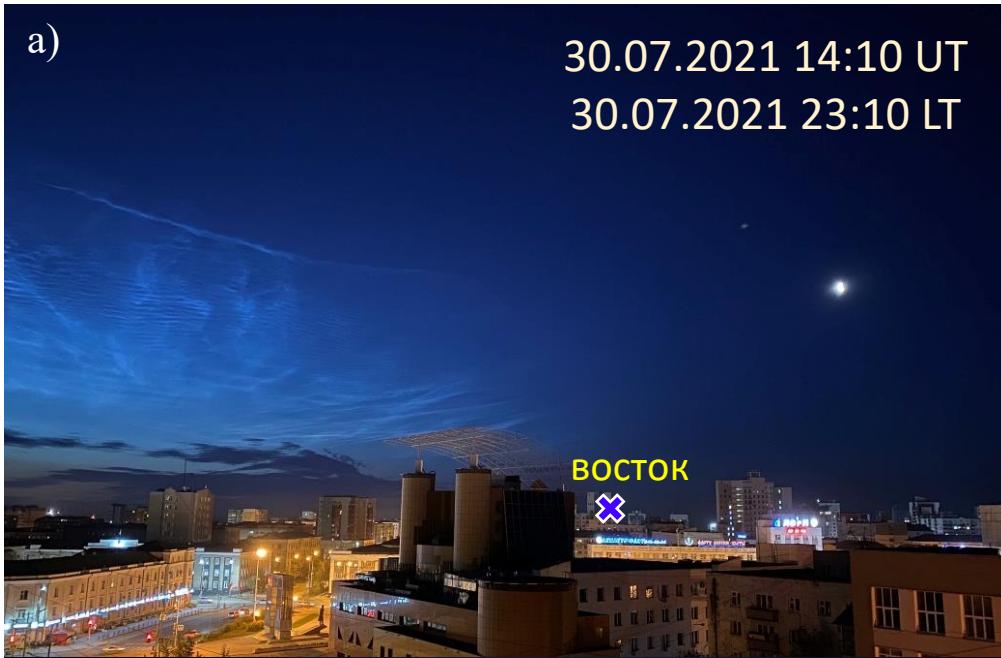
Анализ температуры верхней атмосферы и концентрации водяного пара осуществлялся с помощью данных прибора MLS (Microwave Limb Sounder) на борту спутника NASA EOS Aura (<https://mls.jpl.nasa.gov/>).

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 (<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 (<https://psl.noaa.gov/>).

г. Якутск (62°2 сш, 129°4 вд)



п. Ус-Кюель (62°4 сш, 131°6 вд)



Поля серебристых облаков служат индикатором определенного температурно-влажностного режима мезосферы.

Чтобы вычислить **температуру замерзания водяного пара** (T_s) на высоте серебристых облаков необходимо воспользоваться уравнением [1]:

$$\ln p = 28,548 - \frac{6077,4}{T_s}$$

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 [2]. Этот коэффициент находится по формуле:

$$S = \frac{p_{H2O}}{p}$$

p_{H2O} – парциальное давление водяного пара, Н/м²

[1] Gadsden M., Schröder W. *Noctilucent clouds*. Berlin: Springer; 1989.

[2] Lübken F. Thermal structure of the Arctic summer mesosphere. *JGR:Atmospheres*. 1999;104;(D8);9135-9149. DOI: 10.1029/1999JD900076.

Парциальное давление водяного пара (p_{H_2O}) 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 [1]:

$$p = K_{H_2O} * p_g$$

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

В результате получаем итоговую формулу T_s на высоте серебристых облаков:

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

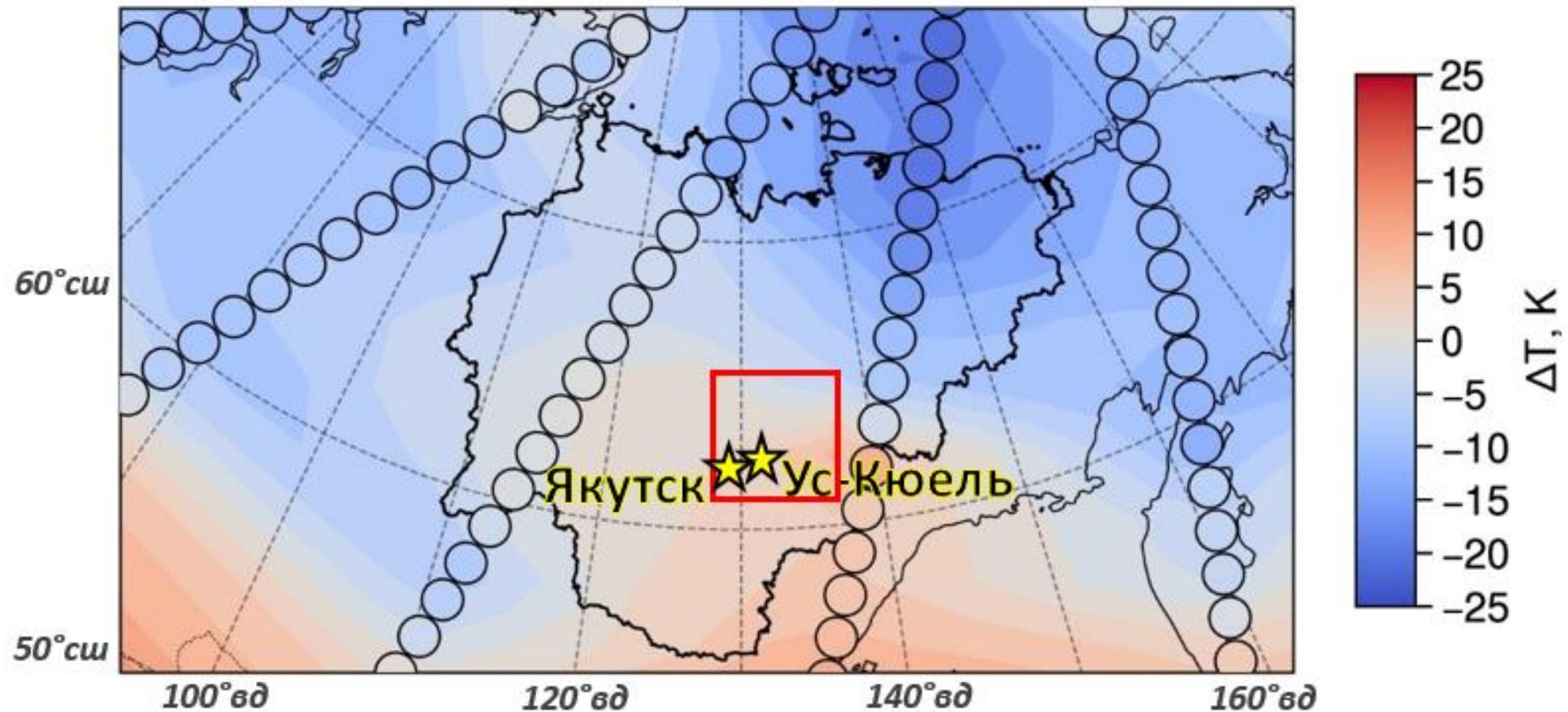
Для определения вероятности образования и существования серебристых облаков находится разность температуры (ΔT) между измеренной температурой (T) и вычисленной температурой замерзания водяного пара T_s [2]:

$$\Delta T = T - T_s$$

[1] Wallace J.M., Hobbs P.V. *Atmospheric science: an introductory survey*. Canada: Elsevier Academic Press; 2006:483.

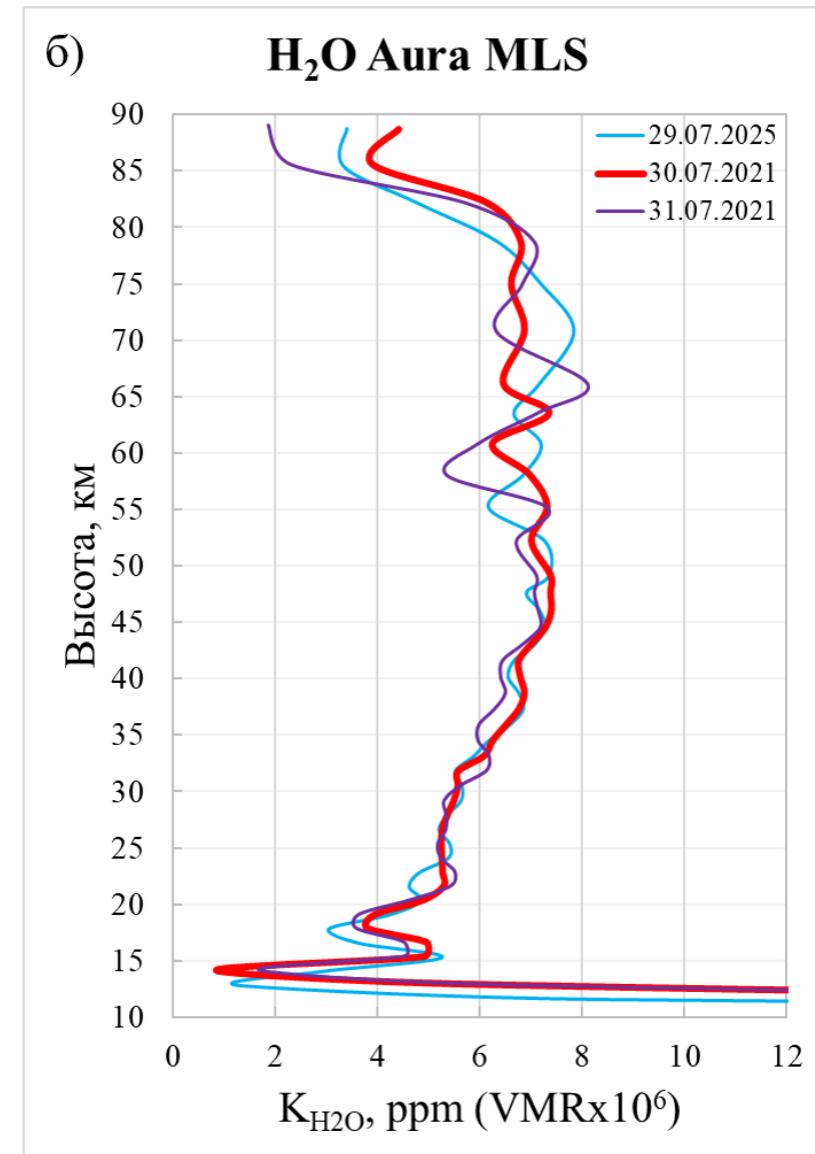
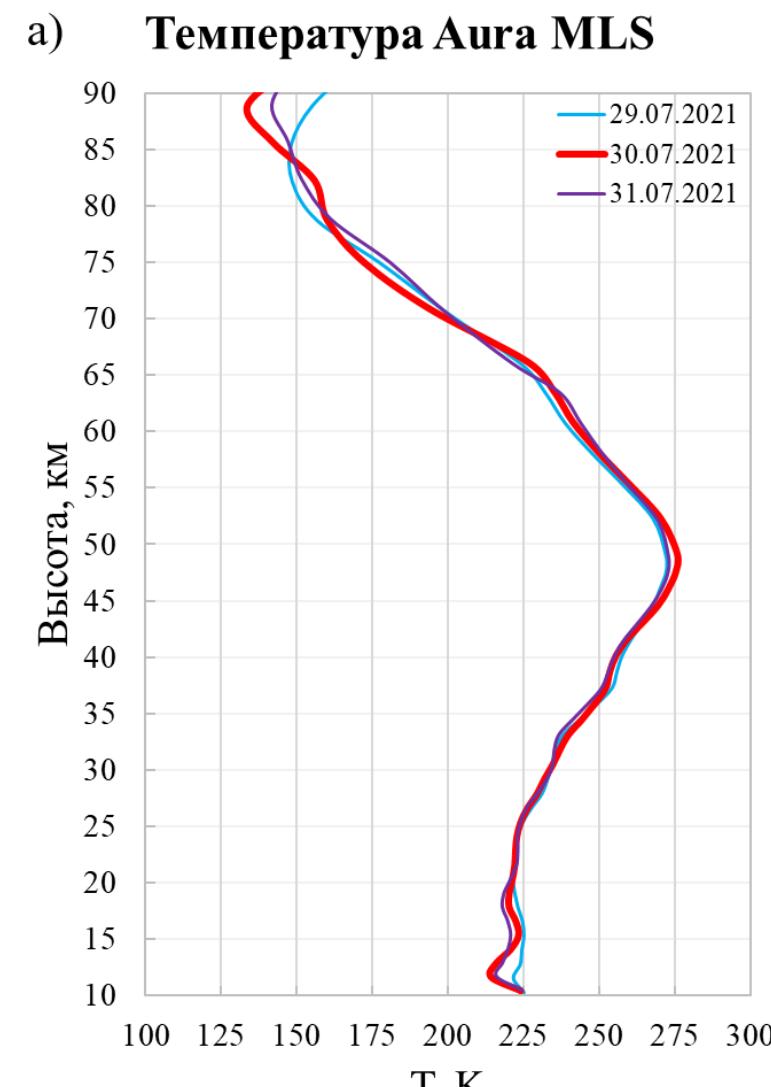
[2] Pertsev N.N., et al. Analysis of noctilucent clouds' fields according to ground-based network and airborne photography data. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024;60;(2):187-194. DOI: 10.1134/S0001433824700191

Спутниковые данные Aura MLS

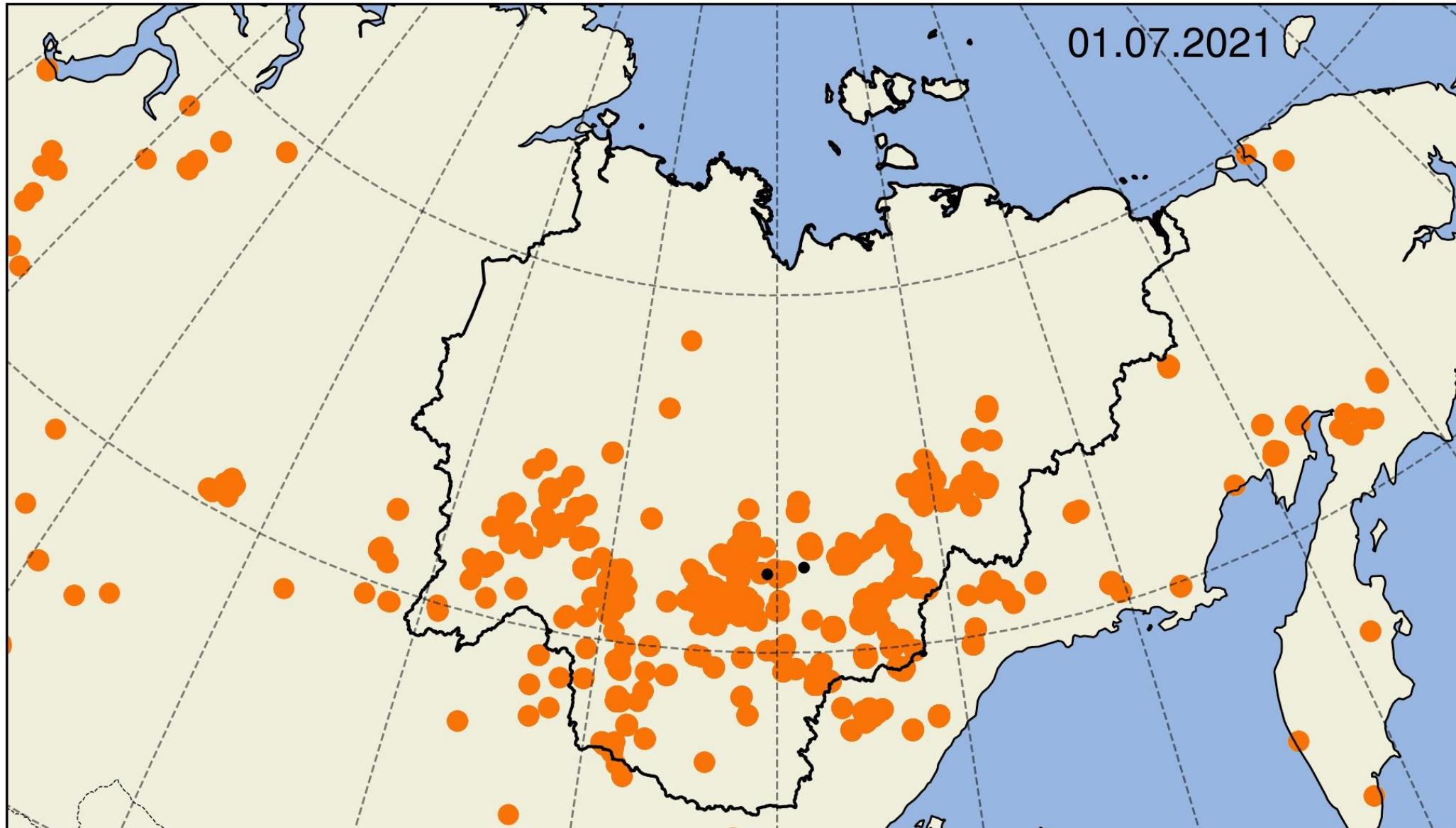


Карта разности температуры ΔT между измеренной и вычисленной температурой замерзания водяного пара на геопотенциальной высоте 0.002 гПа (~86 км) 30 июля 2021 года

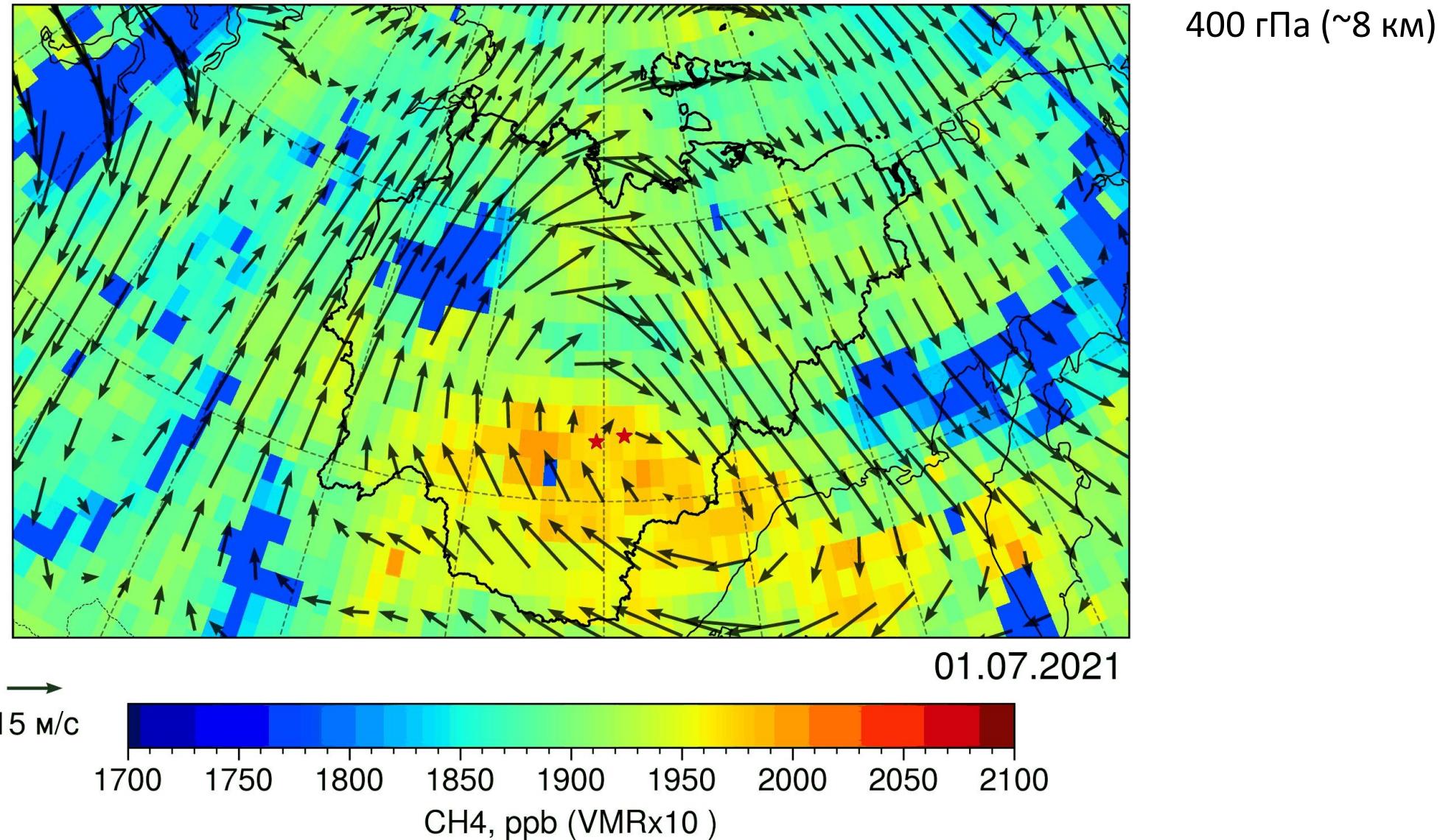
Спутниковые данные Aura MLS

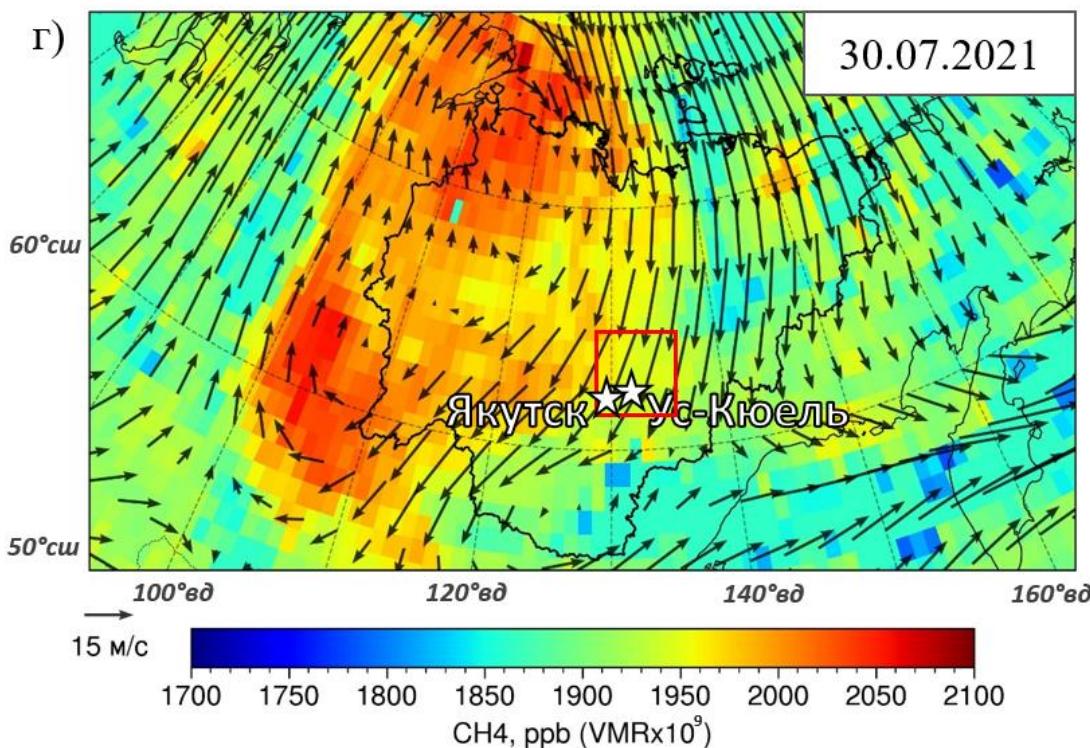
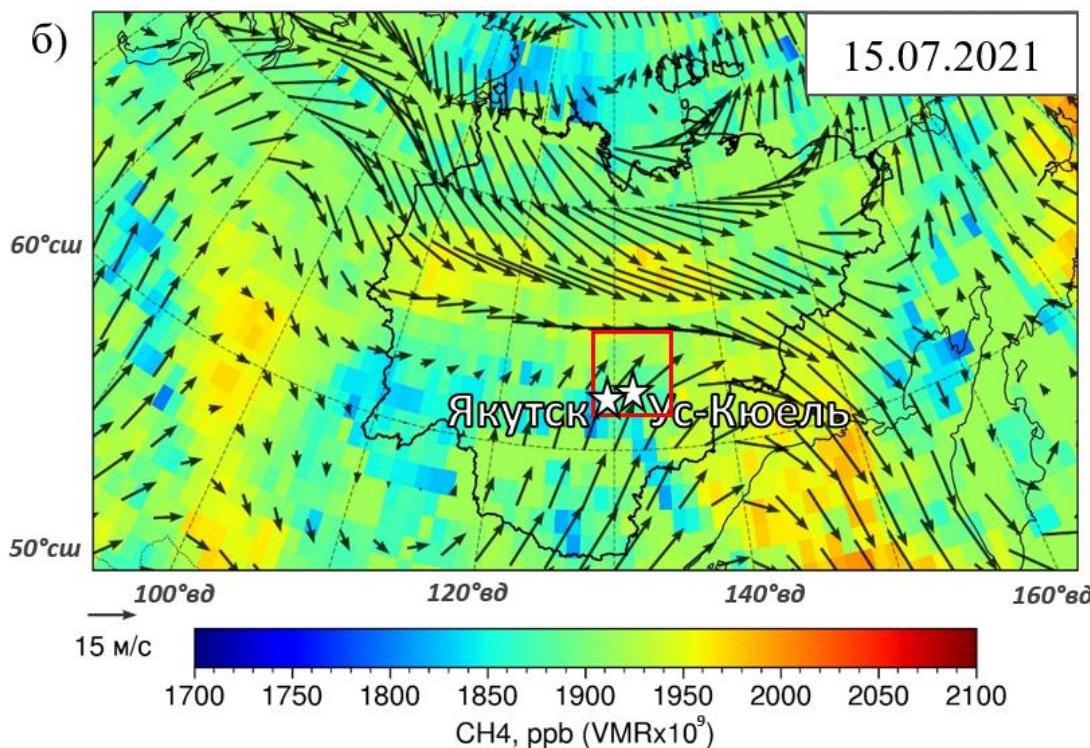


Карты термоточек по данным приборов MODIS, VIIRS



Распределение концентрации CH_4 и поле ветров по данным реанализа NCEP/NCAR





Заключение

В данной работе представлены фотографические наблюдения серебристых облаков 30 июля 2021 года, сделанные в двух точках центральной части Якутии: г. Якутск и п. Ус-Кюеля.

Серебристые облака имеют форму размытых вытянутых параллельных полос из флера и перпендикулярных им четких волн, которые являются индикатором внутренних гравитационных волн.

Построена карта разности между измеренной температурой и вычисленной температурой замерзания водяного пара в мезосфере. Полученные данные показали отсутствие благоприятных условий для образования и существования серебристых облаков в области наблюдения, 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 достигнув стратосферы, где преобразовался в молекулы водяного пара. Распространение внутренних гравитационных волн, вероятно, повлияло на перемешивание атмосферы, изменив тем самым содержание водяного пара в мезосфере, что являлось причиной образования ярких серебристых облаков.

Спасибо за внимание!

Работа выполнена в рамках
государственного задания Минобрнауки России
для ИКФИА СО РАН.

