ИНСТИТУТ
ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ
им. В.Е. ЗУЕВА СО РАН

Сопоставление результатов измерений оптической толщи кристаллической облачности наземными и спутниковыми средствами

В.А. Шишко, А.В. Скороходов, Г.П. Коханенко, Ю.С. Балин, М.Ю. Аршинов

Работа выполнена за счёт гранта РНФ № 25-77-10053

Двадцать четвертая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, г. Москва, 9 – 13 ноября 2026 г.

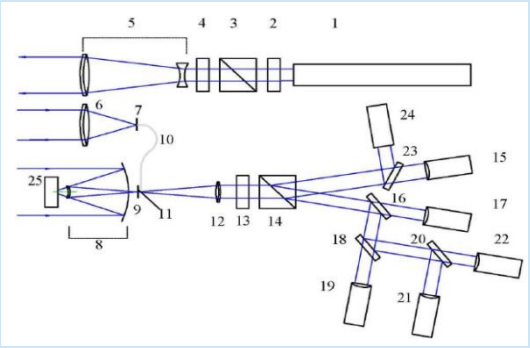
Цель работы

Сопоставление измерений оптической толщи кристаллической облачности на основе лидарных данных и средств спутникового зондирования MODIS, а также с данными аэрологических измерений и реанализа ERA5.



Аэрозольно-рамановский сканирующий поляризационный лидар ЛОЗА-М3

Азимутальное сканирование – ±180°
Вертикальное сканирование – 0-90°
Точность – 1′.
Скорость сканирования – 0,5°/sec



Оптическая схема:
1 – Q-Smart 850 (Quantel) лазер (1064 nm and 532 nm, 10Hz)
2, 4, 13 – фазовые пластинки
3 – призма Глана
5 – 7-кратный ахроматический расширитель
6 – ахроматический объектив с диаметром 40мм и фокусным расстоянием 200 мм для ближней зоны
7, 9 – ирисовые диафрагмы
8 – зеркальный объектив Кассегрена с диаметром 200 мм и фокусом 1000 мм для дальней зоны
10 – оптическое волокно
11 – зеркальный обтюратор
12 – линзы
14 – призма Волластона
15, 17 – лавинные фотодиоды для 1064 нм (3009 Perkin Elmer, диаметр приемной части 3 мм)
16,18, 23 – спектроделители (Di-757, Semrock)
19 – фотоумножитетль для сигналов 607 nm (H11706P Hamamatsu)
20 – пластинка
21 – фотоумножитель (H11706P) для сигналов 607 и 532 нм
22, 24 – фотоумножители (H11506 Hamamatsu) для 532 нм

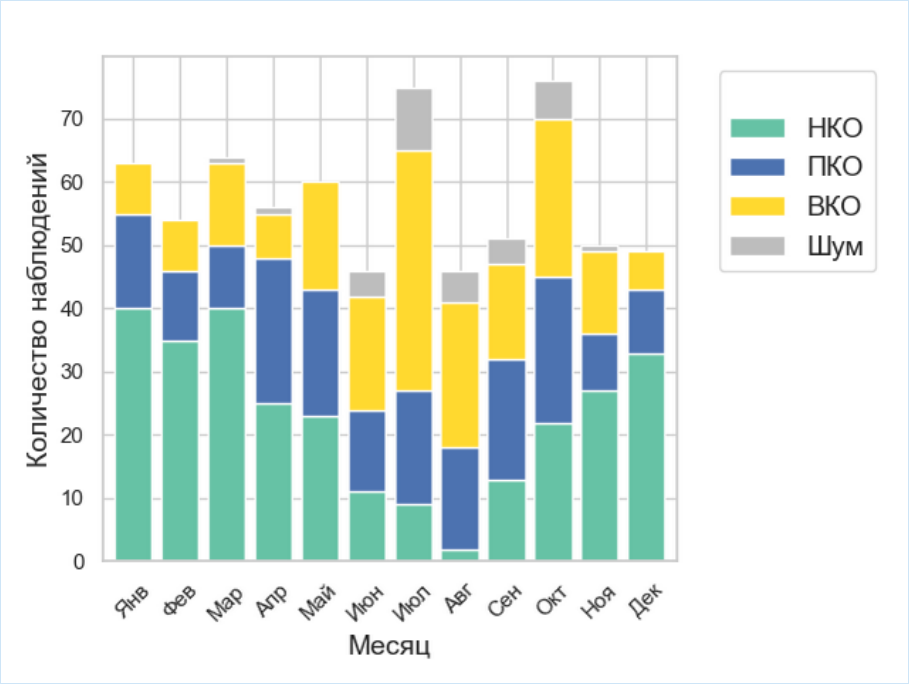
Спутниковые данные и результаты реанализа

Используется климатология кристаллической облачности с CTH > 5000 м и COT < 5 над Томском за период 2000-2025 гг.[1]

Обозн.	Название	Ед. изм.
Характеристики облаков (продукты MODIS)		
CTH	Высота верхней границы (*англ.* Cloud Top Height)	м
CTP	Давление на верхней границе (*англ.* Cloud Top Pressure)	гПа
CTT	Температура на верхней границе (*англ.* Cloud Top Temperature)	К
COT	Оптическая толщина (*англ.* Cloud Optical Thickness)	–
CER	Эффективный радиус частиц (*англ.* Cloud Effective Radius)	мкм
CWP	Водозапас (*англ.* Cloud Water Path)	г/м^2
CEE	Коэффициент излучения (*англ.* Cloud Effective Emissivity)	–
CR	Коэффициент отражения (*англ.* Cloud Reflectance)	–
Параметры атмосферы (данные реанализа ERA5)		
D	Дивергенция (*англ.* Divergence)	1/с
PV	Потенциальная завихренность (*англ.* Potential Vorticity)	К м^2/(кг с)
RV	Относительная завихренность (*англ.* Relative Vorticity)	1/с
SH	Удельная влажность (*англ.* Specific Humidity)	кг/кг
RH	Относительная влажность (*англ.* Relative Humidity)	%
UW	Зональная компонента ветра (*англ.* U-component of Wind)	м/с
VW	Меридиональная компонента ветра (*англ.* W-component of Wind)	м/с
VV	Вертикальная скорость воздуха (*англ.* Vertical Velocity)	Па/с
T	Температура воздуха (*англ.* Temperature)	К

[1] Скороходов А.В., Шишко В.А. Климатология кристаллической облачности над Томском по данным MODIS и ERA5 за 2000–2025 гг. как основа для организации наземных лидарных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2026. Т. 23. № 3. С. 353-368.

Спутниковые данные и результаты реанализа



НКО - нижняя кристаллическая облачность

ПКО - переходная кристаллическая облачность

ВКО - верхняя кристаллическая облачность

Шум – кристаллическая облачность с выбивающимися характеристиками

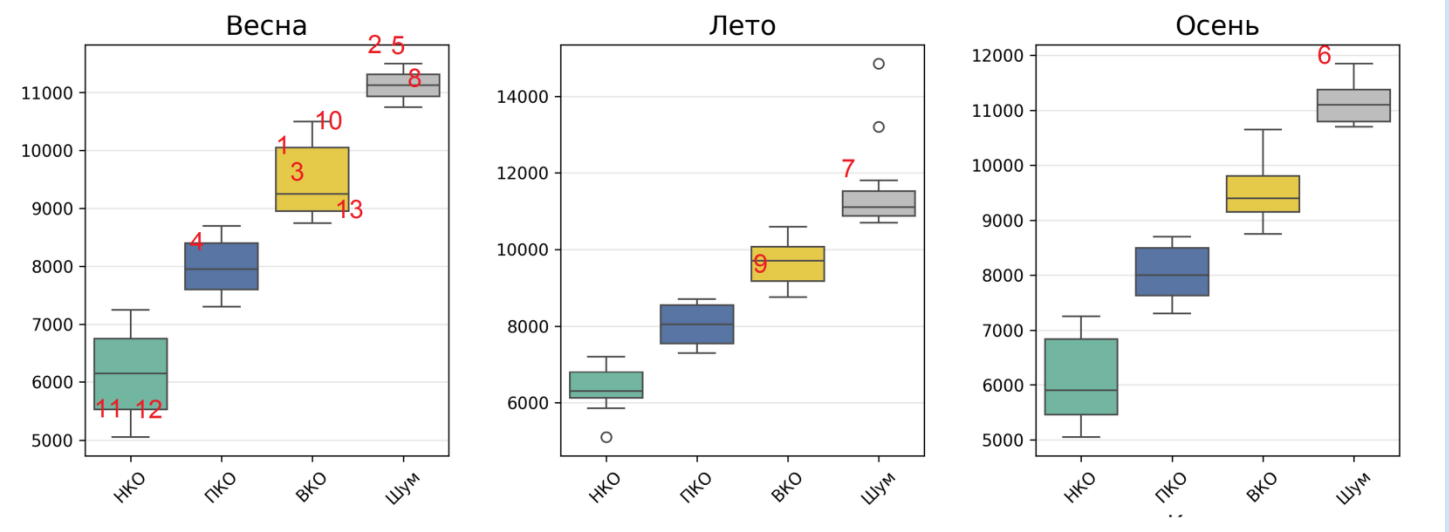
Средние значения характеристик

ПКО	ВКО	НКО	
354.58	299.24	456.44	CTP, гПа
8046.88	9172.73	6120.63	CTH, м
232.65	223.58	240.25	CTT, K
0.69	0.61	0.88	CEE
34.58	28.91	38.03	CER, мкм
2.26	1.97	1.91	COT
47.54	36.15	45.85	CWP, г/м^2
0.17	0.18	0.19	CR
2.E-06	9.E-07	-4.E-06	D, 1/c
3.E-07	5.E-07	4.E-07	PV, К м^2/(кг с)
2.E-04	8.E-05	4.E-04	SH, кг/кг
94.45	95.67	90.71	RH, %
232.12	222.22	239.99	T, K
15.08	16.76	17.64	UW, м/с
1.98	5.18	0.78	VW, м/с
-3.E-05	-4.E-05	-1.E-05	RV, 1/c
-0.06	-0.04	-0.07	VV, Па/с

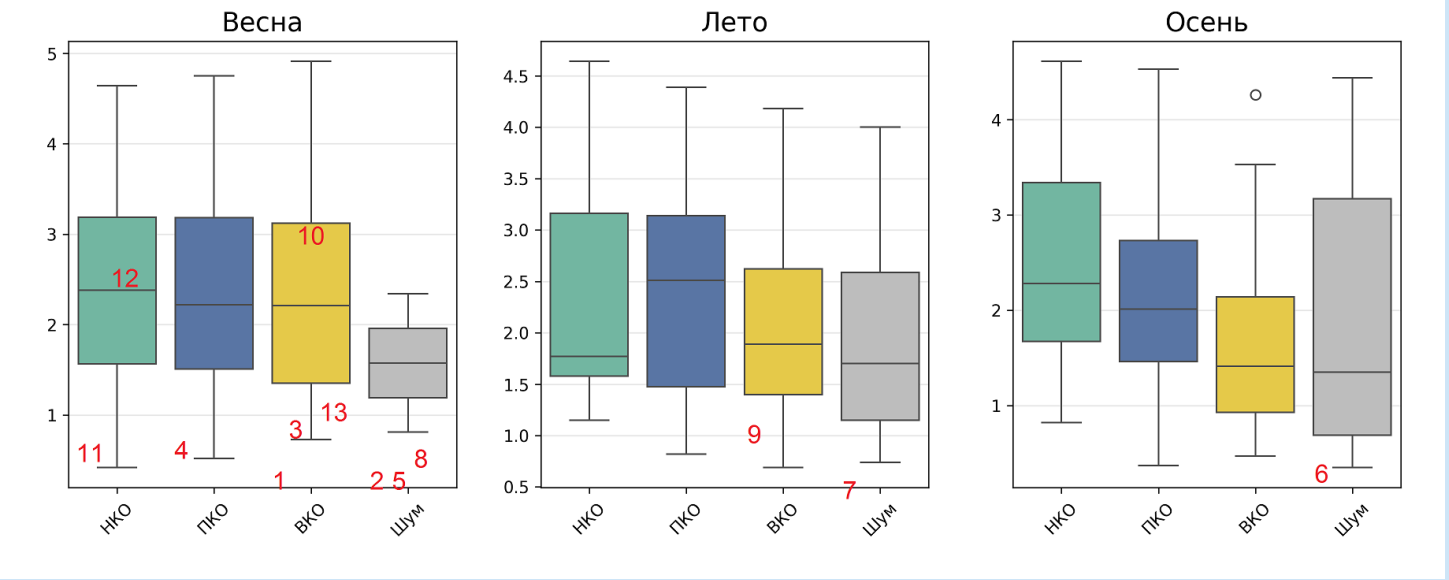
Результаты лазерного зондирования

№	Дата	Тип	СТН, м	СТТ, К	СТР, гПа	СВН, м	СВТ, К	СВР, гПа	ОТ (532 нм)
1	12.05.2011	Перистое облако	10160	214.38	254.08	7460	235.85	383.96	0.109
2	19.04.2011	Перистое облако	12000	211.53	189.27	7500	236.84	382.60	0.385
3	22.05.2012	Перистое облако	9600	216.45	279.70	6200	243.95	456.70	0.74
4	27.05.2012	Перистое облако	8400	224.80	322.44	5460	247.76	494.28	0.66
5	30.05.2012	Перистое облако	12000	219.47	198.82	10000	222.26	271.86	0.27
6	24.09.2013	Перистое облако	12000	210.63	192.88	7500	243.85	381.00	0.247
7	22.06.2015	Перистое облако	12500	212.33	183.53	10500	224.11	251.74	0.214
8	29.05.2017	Перистое облако	11324	218.37	216.84	7000	245.35	412.66	0.36
9	02.06.2017	Перистое облако	9500	222.90	284.10	6150	249.05	462.74	0.92
10	25.04.2011	Многослойное облако	10500	218.86	237.95	7086	236.48	398.55	3.07
11	03.05.2011	Переохлажд. вода	5459	245.89	500.77	3368	257.81	665.24	0.525
12	24.05.2017	Переохлажд. вода	5500	259.50	498.39	2850	277.78	697.54	2.46
13	20.05.2012	Смешанный состав	8900	224.71	311.86	4800	256.47	556.33	1.1

Сопоставление результатов

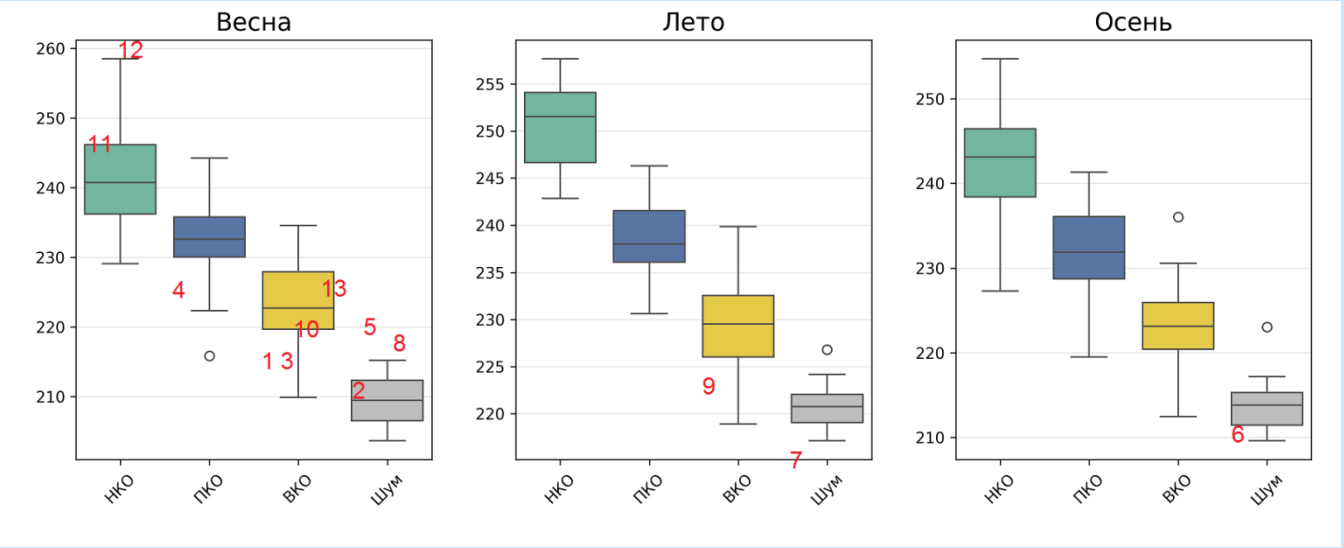


Диаграммы рассеяния СТН с нанесенными номерами эпизодов лидарного зондирования

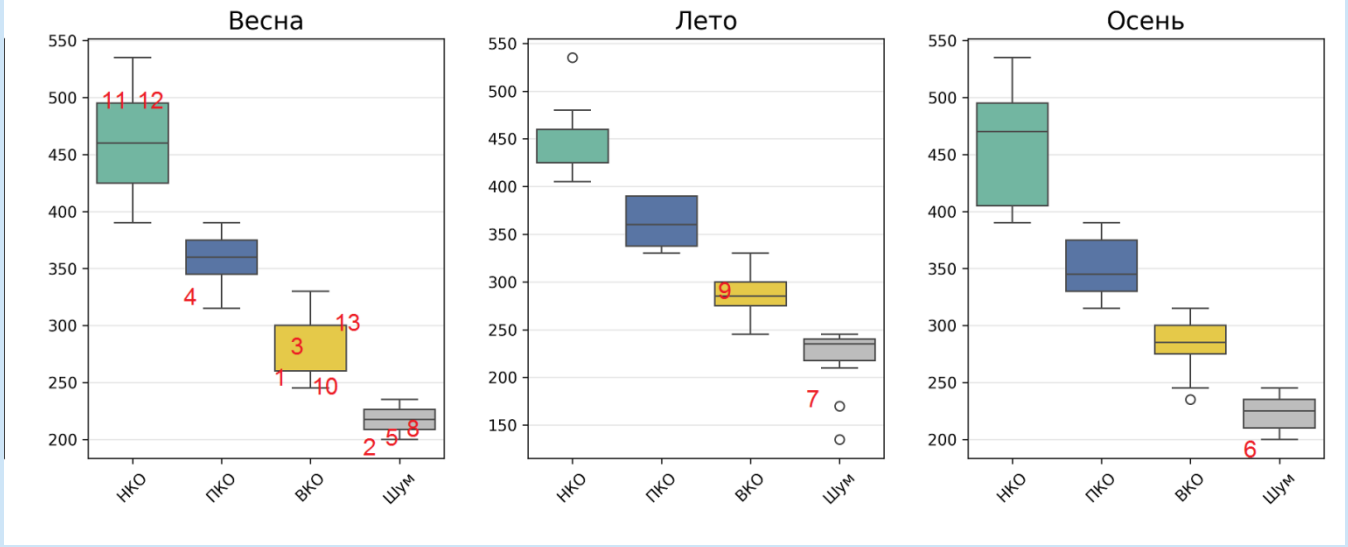


Диаграммы рассеяния СОТ с нанесенными номерами эпизодов лидарного зондирования

Сопоставление результатов



Диаграммы рассеяния СТТ с нанесенными номерами эпизодов лидарного зондирования



Диаграммы рассеяния СТР с нанесенными номерами эпизодов лидарного зондирования

Выводы

1) Измеренные лидаром значения CTH в большинстве случаев попали в область допустимых значений спутниковой климатологии. Исключением являются высокие облака с COT<0.4, т.е. за пределами технических возможностей MODIS;

2) Лидаром были зарегистрированы в основном перистые облака с малой оптической толщиной, у которых COT<1. Эпизоды наблюдения облачности с COT>1 относятся к другим атмосферным образованиям;

3) Связь между геометрической толщиной и попаданием лидарных измерений в спутниковую климатологию не прослеживается;

4) Данные пассивного спутникового зондирования необходимо дополнять для создания надежной климатологии кристаллической облачности над исследуемым регионом.