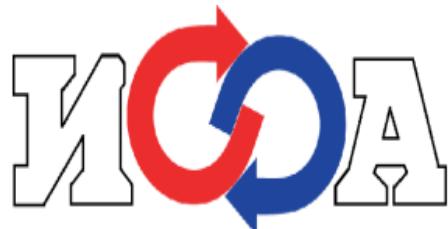


# **Исследование влияния балла облачности на характеристики соответствия измерений АОТ орбитального прибора MODIS/Terra и пунктов сети AERONET**

Белов А.Е., Панкратова Н.В., Ракитин В.С.

y.beloff2013@yandex.ru

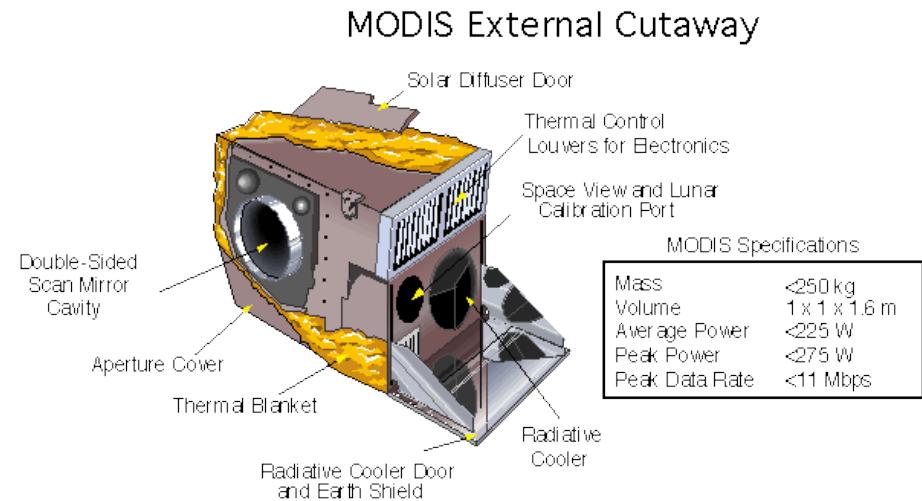
Институт физики атмосферы им. А.М.  
Обухова РАН



XXIII международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 12 ноября 2025

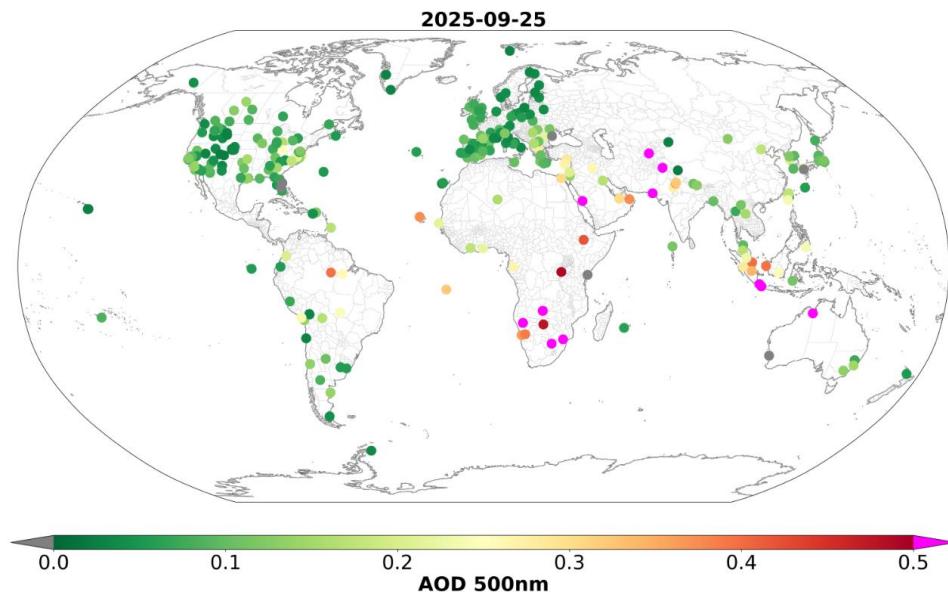
# Методы исследования: спутниковые наблюдения

- MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) – Collection 6.1. Установлен на спутниках Terra (EOS AM-1) и Aqua (EOS PM-1).
- MODIS используется для исследования границ суши и океанов, облаков, свойств аэрозолей, цвета океана, концентрации водяного пара и озона в атмосфере, температуры поверхности и воздуха, альбедо поверхности и многих других параметров.
- Мы использовали переменную Dark Target Deep Blue Combined Mean, отражающую величину АОТ на длине волны 550 нм с суточным осреднением и пространственным разрешением  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  (L3, или 3-й уровень).



# Методы исследования: эталонные наземные измерения

- AERONET (AErosol RObotic NETwork) – это сеть наземных солнечных фотометров, которые измеряют свойства атмосферного аэрозоля. На сегодняшний день в мире функционирует более 1000 станций этой сети. Каждая из них оборудована солнечными фотометрами CIMEL Electronique 318A; измерения АОТ проводятся на нескольких длинах волн (в т.ч. на 500 нм) с заявленной точностью 0,01.



Солнечный фотометр CIMEL на станции Creteil в пригороде Парижа

# Методы исследования

$$AOT_{550} = \frac{AOT_{500}}{e^{(-\ln(\frac{500}{550}) \times \alpha)}} \text{ (Eck et al, 1999)}$$

$AOT_{550}$  – значение аэрозольной оптической толщины на длине волны 550 нм,

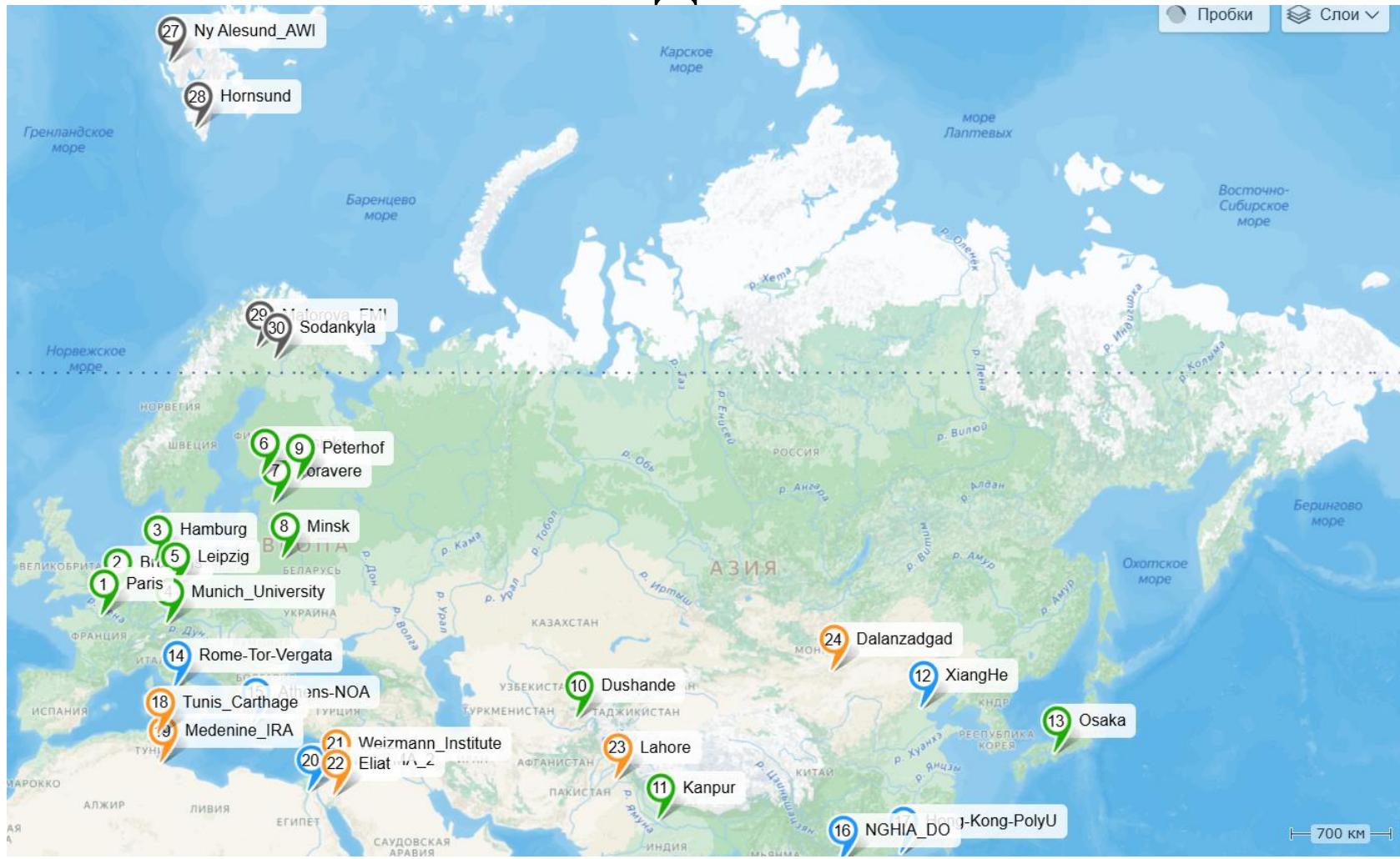
$AOT_{500}$  – значение аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм,

$\alpha$  – параметр Ангстрема на длине волны 440-675 нм

*Станции AERONET были поделены на 4 группы, в зависимости от географических и климатических особенностей расположения*

	Географические особенности	Кол-во станций
<b>Группа 1</b>	Континентальные районы умеренного пояса	13
<b>Группа 2</b>	Прибрежные зоны тропического и субтроп. пояса	5
<b>Группа 3</b>	Пустынные области	7
<b>Группа 4</b>	Высокоширотные области	5

# Станции, использованные в исследовании



Зелёный – станции первой группы

Синий – станции второй группы

Оранжевый – станции третьей группы

Серый – станции четвёртой группы

# Станции, использованные в исследовании

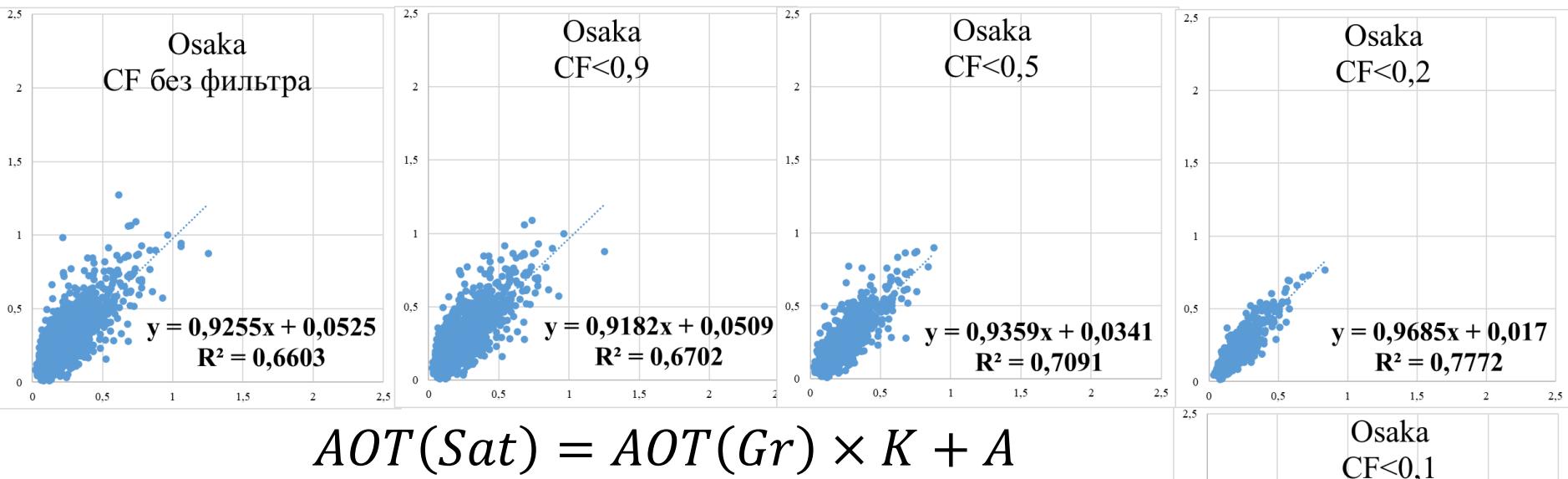
№, п/п	Станция	Шир., °с.ш.	Долг., °в.д.	A.s.l., м	Кол-во синхр. пар	Период, годы
<b>Группа 1 (континентальные районы средних широт)</b>						
1	<b>Paris</b>	48,8	2,4	50	1717	2006-2024
2	<b>Brussels</b>	50,8	4,4	120	1214	2006-2024
3	<b>Hamburg</b>	53,6	9,9	120	1031	2002-2022
4	<b>Munich_University</b>	48,1	11,6	40	1024	2011-2023
5	<b>Leipzig</b>	51,4	12,4	533	1724	2001-2023
6	<b>Helsinki</b>	60,2	25,0	53	1153	2008-2022
7	<b>Toravere</b>	58,3	26,5	85	1630	2002-2022
8	<b>Minsk</b>	53,9	27,6	235	831	2008-2022
9	<b>Peterhof</b>	59,9	29,8	58	374	2013-2021
10	<b>Dushande</b>	38,6	68,9	821	2369	2010-2024
11	<b>Kanpur</b>	26,5	80,2	123	4290	2001-2022
12	<b>XiangHe</b>	39,8	117,0	36	4050	2001-2024
13	<b>Osaka</b>	34,7	135,6	50	2128	2002-2024
<b>Группа 2 (тропические и субтропические береговые районы)</b>						
14	<b>Rome-Tor-Vergata</b>	41,8	12,6	130	1991	2013-2024
15	<b>Athens-NOA</b>	38,0	23,7	130	1622	2008-2024
16	<b>NGHIA_DO</b>	21,0	105,8	50	550	2010-2023
17	<b>Hong_Kong_Sheung</b>	22,5	114,1	40	601	2012-2022
18	<b>Hong-Kong-PolyU</b>	22,3	114,2	30	1361	2005-2024

# Станции, использованные в исследовании (продолжение таблицы)

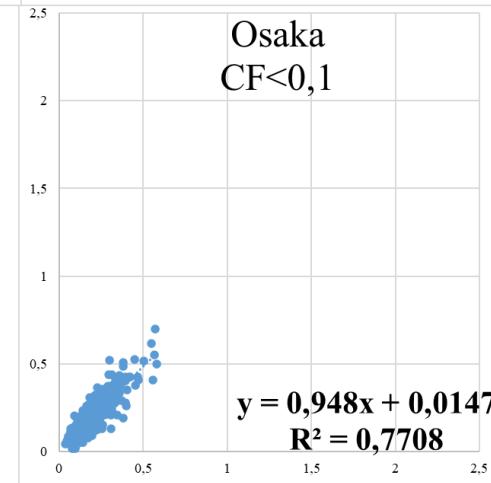
№, п/п	Станция	Шир., °с.ш.	Долг., °в.д.	A.s.l., м	Кол-во синхр. пар	Период, годы
<b>Группа 3 (Пустынные области)</b>						
19	<b>Tunis Carthage</b>	36,8	10,2	10	1846	2013-2022
20	<b>Medenine IRA</b>	33,5	10,6	34	805	2014-2022
21	<b>Cairo EMA 2</b>	30,1	31,3	70	3714	2010-2024
22	<b>Weizmann Institute</b>	31,1	34,8	73	1535	2015-2022
23	<b>Eilat</b>	29,5	34,9	15	2289	2007-2022
24	<b>Lahore</b>	31,5	74,3	209	3339	2007-2024
25	<b>Dalanzadgad</b>	43,6	104,4	1470	3573	2001-2022
<b>Группа 4 (Высокоширотные области)</b>						
26	<b>Thule</b>	76,5	-68,7	225	950	2007-2024
27	<b>Ny Alesund AWI</b>	78,9	11,9	7	490	2017-2024
28	<b>Hornsund</b>	77,0	15,5	12	1128	2005-2024
29	<b>Matorova FMI</b>	68,0	24,2	340	220	2020-2024
30	<b>Sodankyla</b>	67,4	26,7	184	470	2007-2024

# Методы исследования

Мы использовали метод фильтрации спутниковых данных по переменной Cloud Fraction Day Mean (CFDM), которая содержится в данных MODIS 3-го уровня и отражает степень покрытия неба облаками над ячейкой размером  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , в которой расположен измерительный пункт.

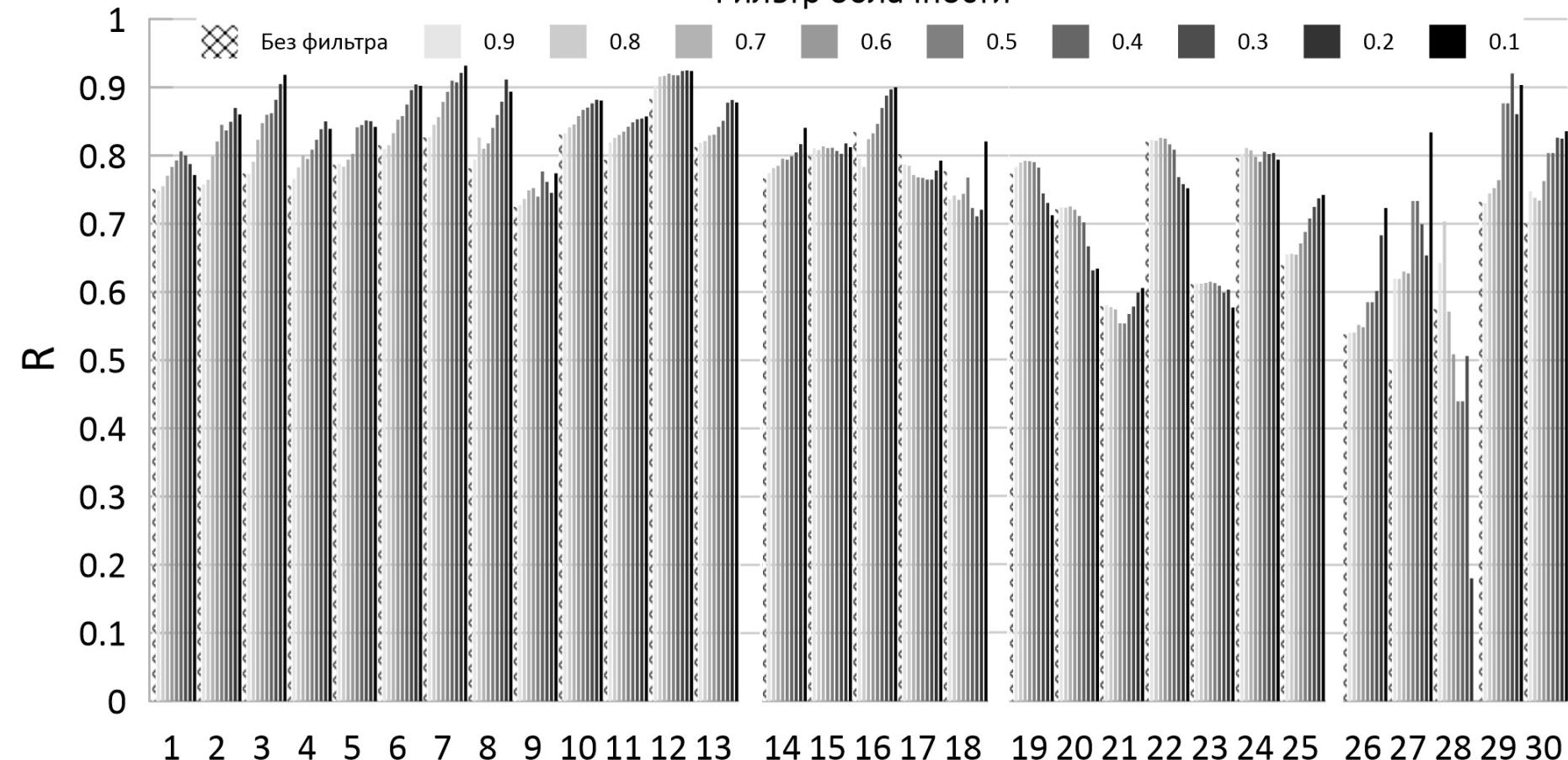


**$AOT(Sat)$**  – АОТ, измеренная спутниковым прибором MODIS/Terra;  **$AOT(Gr)$**  – АОТ, измеренная приборами наземной сети AERONET;  **$K$**  – коэффициент наклона линейной регрессии для синхронных пар значений АОТ MODIS/Terra и AERONET;  **$A$**  – свободный член линейной регрессии;  **$R^2$**  – коэффициент детерминации линейной регрессии



# Результаты исследования (R)

Фильтр облачности

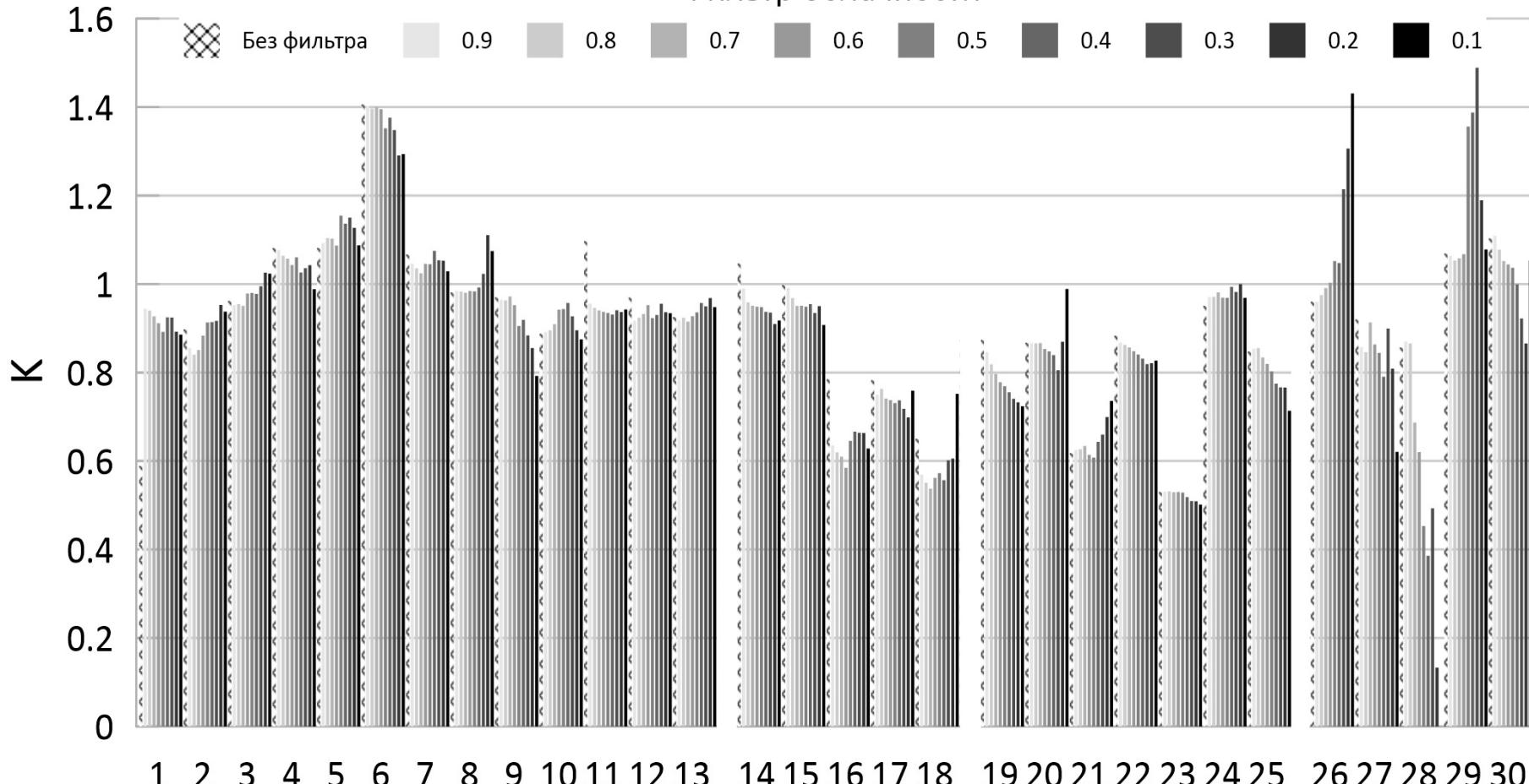


№ группы	R		
	CF 6.ф	CF<0,5	CF<0,1
1	0,79	0,84	0,88
2	0,79	0,80	0,83
3	0,71	0,71	0,69
4	0,61	0,69	0,63

Коэффициент корреляции R для синхронных пар значений дневных измерений АОТ MODIS/Terra и AERONET L1.5

# Результаты исследования (K)

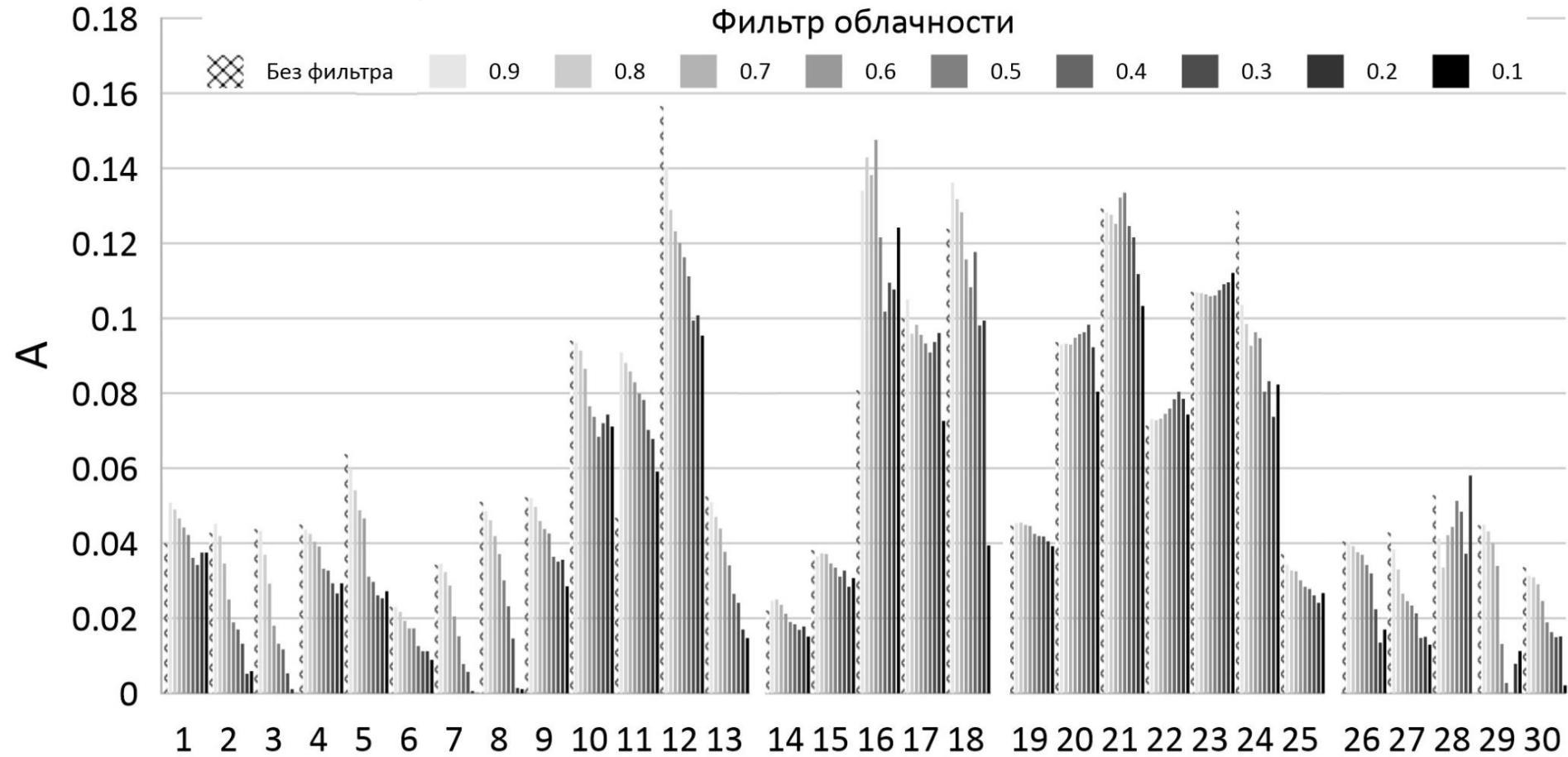
Фильтр облачности



Коэффициент наклона линейной регрессии K для синхронных пар значений дневных измерений AOT MODIS/Terra и AERONET L1.5.

№ группы	K		
	CF бф.	CF<0,5	CF<0,1
1	1,02	1,01	0,99
2	0,85	0,77	0,79
3	0,80	0,77	0,78
4	0,98	0,95	0,83

# Результаты исследования (A)



№ группы	A		
	CF 6.ф	CF<0,5	CF<0,1
1	0,058	0,042	0,029
2	0,073	0,075	0,056
3	0,087	0,082	0,074
4	0,043	0,028	0,022

Свободный член линейной регрессии  
A для синхронных пар значений  
дневных измерений АОТ  
MODIS/Terra и AERONET L 1.5.

# Результаты исследования

№	Название станции	Корреляционный параметр		
		A	K	R
<b>Группа 1</b>				
1	Paris	+	-	+/-
2	Brussels	+	+	+
3	Hamburg	+	+	+
4	Munich.	+	+	+
5	Leipzig	+	+/-	+
6	Helsinki	+	+	+
7	Toravere	+	+/-	+
8	Minsk	+	+	+
9	Peterhof	+	-	+/-
10	Dushande	+	+/-	+
11	Kanpur	+	+	+
12	XiangHe	+	-	+/-
13	Osaka	+	+	+
<b>Группа 2</b>				
14	Rome	+/-	-	+
15	Athens	+/-	-	+/-
16	NGHIA	-	-	+/-
17	Hong_K_Sh.	+	+/-	+/-
18	Hong-K_P.	+/-	-	+/-

Улучшение корреляционных параметров при уменьшении степени облачности

№, пп.	Название станции	Корреляционный параметр		
		A	K	R
<b>Группа 3</b>				
19	Tunis	+/-	-	-
20	Medenine	+/-	+	-
21	Cairo	+	+	+/-
22	Weizmann	-	-	-
23	Eilat	+/-	-	-
24	Lahore	+	+	-
25	Dalanzadgad	+	-	+
<b>Группа 4</b>				
26	Thule	+/-	+	+
27	Ny_Alesund	+	-	+
28	Hornsund	-	-	-
29	Matorova	+	+/-	+
30	Sodankyla	+	+	+

+ - наличие явного положительного эффекта  
+/- - неявный/разнонаправленный эффект  
- - отсутствие положительного эффекта

# Результаты исследования

*Сокращение числа синхронных пар спутниковых и наземных данных при уменьшении степени облачности*

	<i>Cloud Fraction Day Mean CF<math>\leq</math></i>								
	<i>Количество данных в процентах от нефильтрованных данных</i>	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
Группа 1	95	90	83	76	68	60	51	41	30
Группа 2	89	81	73	66	58	50	43	36	25
Группа 3	96	93	89	85	80	76	69	62	51
Группа 4	91	80	70	59	49	38	28	19	8
<b>Среднее по всем станциям</b>	<b>93</b>	<b>87</b>	<b>81</b>	<b>74</b>	<b>60</b>	<b>58</b>	<b>50</b>	<b>41</b>	<b>30</b>

Заметно сокращение числа синхронных пар спутниковых и наземных измерений при уменьшении степени облачности (в среднем при  $CFDM \leq 0.1$  остаётся только 34.7% от первоначального количества данных). Наибольшее сокращение числа синхронных пар отмечено для четвёртой группы станций (при  $CFDM \leq 0.1$  остаётся 8% от первоначального количества данных). Наименьшее сокращение количества данных отмечается для третьей группы станций (при значении  $CFDM \leq 0.1$ , в среднем, остаётся 51% данных). *При средних условиях облачности ( $CFDM \leq 0.5$ ) в среднем для всех станций остаётся ~60% от количества нефильтрованных данных. При  $CFDM \leq 0.5$  характеристики соответствия данных MODIS наземным данным существенно улучшаются на большинстве исследованных пунктов AERONET.*

# ВЫВОДЫ

1. Проанализированы данные 30-ти станций наземной сети наблюдений, практически для всех из них при уменьшении балла облачности выявлен эффект улучшения параметров линейной регрессии ( $R$ ,  $K$ ,  $A$ ). Проведено сопоставление синхронных рядов измерений АОТ MODIS/Terra и AERONET с применением фильтрации по баллу облачности CF с шагом 0,1.
2. В целом, при фильтрации по баллу облачности рост коэффициента корреляции  $R$  отмечен для 24-х из 30-ти станций. Улучшение значений  $K$  отмечено на 17 из 30 станций, а эффект уменьшения значений  $A$  отмечен для 27 из 30 станций.
3. Значимое улучшение всех трёх параметров линейной регрессии отмечено на 8-ми станциях из 30-ти, семь из которых располагаются в континентальных районах умеренного пояса (группа 1), одна – в высокосиротной области (группа 4).
4. В пустынных регионах (группа 3) метод фильтрации по облачности проявил себя нейтрально, что связано с известными трудностями спутникового аэрозольного мониторинга в этих областях. Незначительное проявление эффекта установлено для станций тропических и субтропических широт (группа 2).
5. Для улучшения качества данных MODIS/Terra (по АОТ) над континентальными районами наиболее целесообразно использовать фильтрацию по облачности  $CF \leq 0,5$  (значения параметров корреляции улучшаются, при этом остаётся до 70-80% от общего количества нефильтрованных данных).
6. Пока нельзя сделать однозначный вывод об универсальной рекомендации относительно параметров фильтрации по баллу облачности CF для всех рассмотренных географических районов. В этом направлении требуются дальнейшие исследования.

# Спасибо за внимание!