Измерение общего содержания метана в атмосфере на основе спектров уходящего теплового ИК-излучения

Поляков А.В., Бордовская Ю.И., Акишина С.В.

Санкт-Петербургский государственный университет

ЛАБОРАТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЗОНОВОГО СЛОЯ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Двадцать четвертая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

12 ноября 2026 г.

Метан (CH_4)– это парниковый газ, который образуется биогенно в результате жизнедеятельности микроорганизмов и животных, а также при горении лесов. Вследствие антропогенных факторов (в основном, сельского хозяйства) метан накапливается в атмосфере быстрее, чем поглощается, и также увеличивает парниковый эффект.

https://carbonplatform.ru/parnikovye-gazy

КАРБОНОВАЯ ПЛАТФОРМА
ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ: ОБРАЗОВАНИЕ, НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, БИЗНЕС

… обеспечить к 2035 году сокращение выбросов парниковых газов до 65 - 67 процентов относительно уровня 1990 года …

Указ Президента Российской Федерации от 06.08.2025 г. № 547

Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты

Под редакцией В.Г. Бондура, И.И. Мохова, А.А. Макоско, МОСКВА, 2022, 388 с.

Научный совет РАН по проблемам климата Земли

…. Метан является **вторым** по значимости антропогенным парниковым газом после диоксида углерода (CO2) и составляет около 11 процентов от общего объема глобальных выбросов.

….

По способности удерживать тепло в атмосфере метан более чем **в 28 раз превосходит диоксид углерода**. За последние два столетия концентрация метана в атмосфере **увеличилась более чем вдвое**, главным образом вследствие человеческой деятельности.

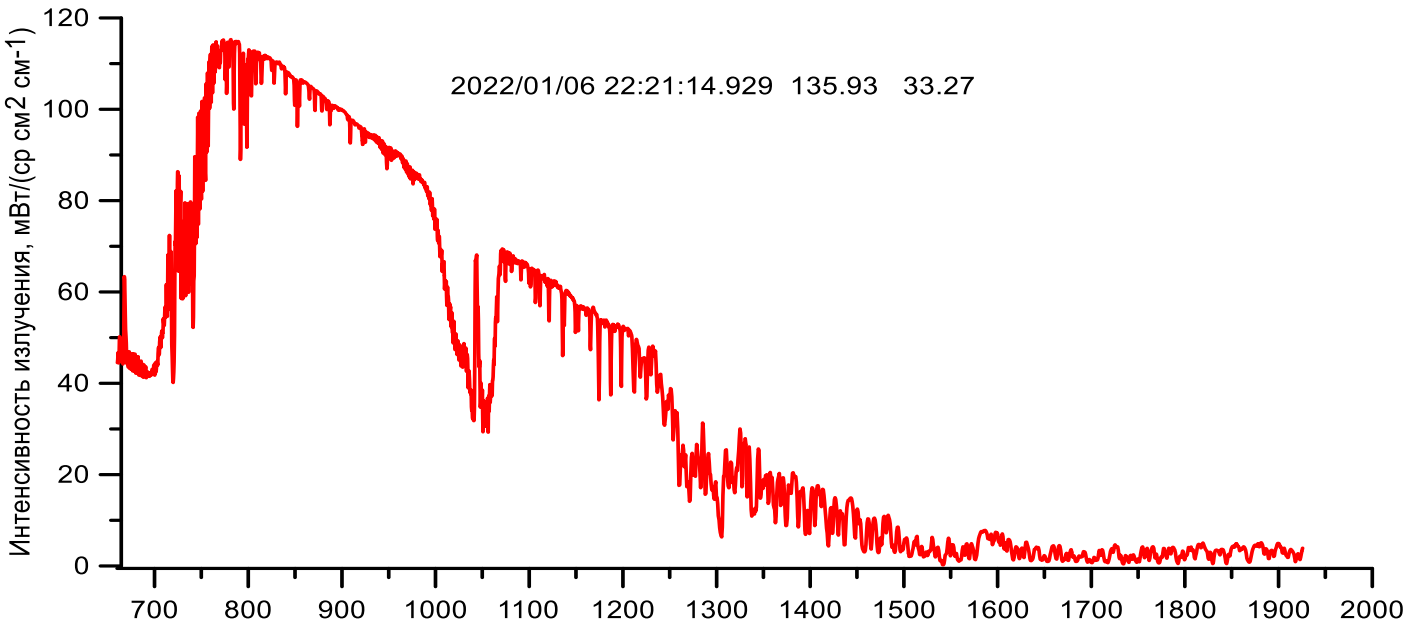
….

Метан относительно **быстро выводится** из атмосферы, значительное сокращение его выбросов позволило бы добиться быстрого и ощутимого эффекта в плане снижения потенциала атмосферного потепления.

United States Environmental Protection Agency

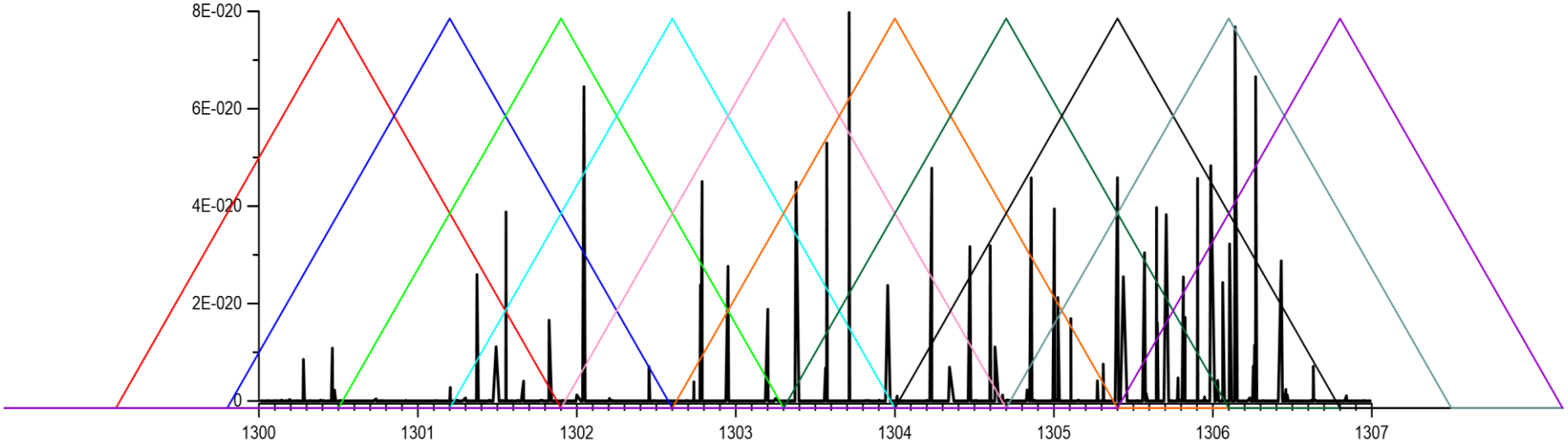
https://www.epa.gov/gmi/importance-methane

Пример спектра уходящего теплового излучения, зарегистрированного с борта «Метеор-М №2» прибором ИКФС-2, и интенсивности линий поглощения метана





Интенсивности линий поглощения метана и (условно треугольниками) спектральные каналы ИКФС-2



Метод

Подход по аналогии с определением общего содержания озона (ОСО).
Трехслойный перцептрон.
Предикторы:

- 30 ГК «всего спектра» 660-1400 $см^{-1}$
- 15ГК «полосы газа» 1220-1370 $см^{-1}$
- Зенитный угол спутника
- Широта
- Приземное давление

Число ГК и набор предикторов варьировались

Мы сравнили результаты нашего ПО, использованного для определения ОСО (трехслойный перцептрон, функция активации th, минимизация функции многих переменных классическим методом) и применения KERAS (та же структура сети, возможна произвольная) , функция активации ReLU, обучение сети специфическими методами.
Результаты близки, KERAS незначительно точнее, обучение много быстрее.

Обучающий набор данных основан на данных TROPOMI (S5P), (2018-2022)
Валидация данных TROPOMI на сайте https://mpc-vdaf.tropomi.eu/methane показывает смещение 0.3% при дисперсии 0.7%, что при X_{CH4} порядка 2000 ppbv ссоставит около 14 ppbv.

Обучение ИНС для метана:

№	Список предикторов	Число НСС	Число коэфф-в	Погрешность обучения ИНС, ppb
1	SZA+30+15	30	1441	25.5
2	P0+SZA+30+15	30	1471	24.6
3	lat+SZA+30+15	30	1471	24.3
4	dY+SZA+30+15	30	1471	25.1
5	dY+p0+SZA+30+15	30	1501	24.0
6	dY+lat+SZA+30+15	30	1501	24.4
7	**P0+lat+SZA+30+15**	**30**	**1501**	**23.4**
8	dY+P0+lat+SZA+30+15	30	1531	23.3

Сравнение с данными NDACC. Дистанция менее 50км, разница времени менее 3час.

	Статистика по станциям				Статистика разностей ИКФС-2 минус NDACC					COP/SD$_{Апр}$	
название	Число измерений	Среднее XCH4, ppbv	SD XCH4, ppbv	SD XCH4, %	Число пар	CP, ppbv	COP, ppbv	CP, %	COP, %	50k 3h	100k 12h
wollongong	10104	1814.5	40.3	2.2	1945	44.8	28.9	2.5	1.7	0.77	0.82
reunion	5889	1820.2	14.4	0.8	1941	32.2	19.7	1.8	1.1	1.38	1.25
paramaribo	362	1853.7	54.5	2.9	753	-17.3	66.5	-0.8	3.3	1.14	1.14
altzomoni	3760	1801.2	29.3	1.6	1729	58.8	27.4	3.3	1.5	0.92	1.06
maunaloa	5928	1846.4	37.4	2.0	2284	-0.6	29.6	-0.0	1.6	0.80	0.8
izana	5329	1849.4	32.5	1.8	1242	13.2	25.7	0.7	1.4	0.78	1.05
tsukuba	827	1871.5	44.7	2.4	620	17.7	39.0	1.0	2.1	0.88	0.83
boulder	12278	1872.8	28.8	1.5	2341	15.4	34.5	0.9	1.9	1.27	1.2
rikubetsu	302	1831.2	45.1	2.5	1120	23.8	43.4	1.4	2.4	0.96	0.92
toronto	7594	1844.5	47.9	2.6	1414	28.7	42.3	1.6	2.3	0.88	0.85
zugspitze	6900	1820.4	37.4	2.1	1766	47.9	27.6	2.7	1.6	0.76	0.76
paris	18182	1829.7	35.5	1.9	5188	26.6	25.0	1.5	1.4	0.73	0.74
bremen	1288	1862.4	57.9	3.1	1361	5.7	41.4	0.4	2.2	0.71	0.71
St.Petersburg	6840	1809.7	42.4	2.3	1876	14.1	29.1	0.8	1.6	0.70	0.70
harestua	1863	1838.7	94.2	5.1	1768	29.3	96.5	1.9	5.7	1.12	1.00
Kiruna	2026	1839.3	29.3	1.6	2449	15.7	27.8	0.9	1.5	0.94	0.94
thule	5596	1806.0	35.1	1.9	13805	61.2	37.6	3.5	2.2	1.16	1.1
ny_alesund	774	1816.3	44.8	2.5	4857	38.1	34.3	2.1	1.9	0.76	0.76
arrival	1793	1735.2	36.9	2.1	9476	108.0	60.3	6.3	3.5	1.67	1.67
lauder	9985	1812.9	32.9	1.8	2197	54.4	28.0	3.1	1.6	0.89	0.83
все	107620	1829.4	45.0	2.5	60132	48.0	53.0	2.7	3.1	1.24	1.08

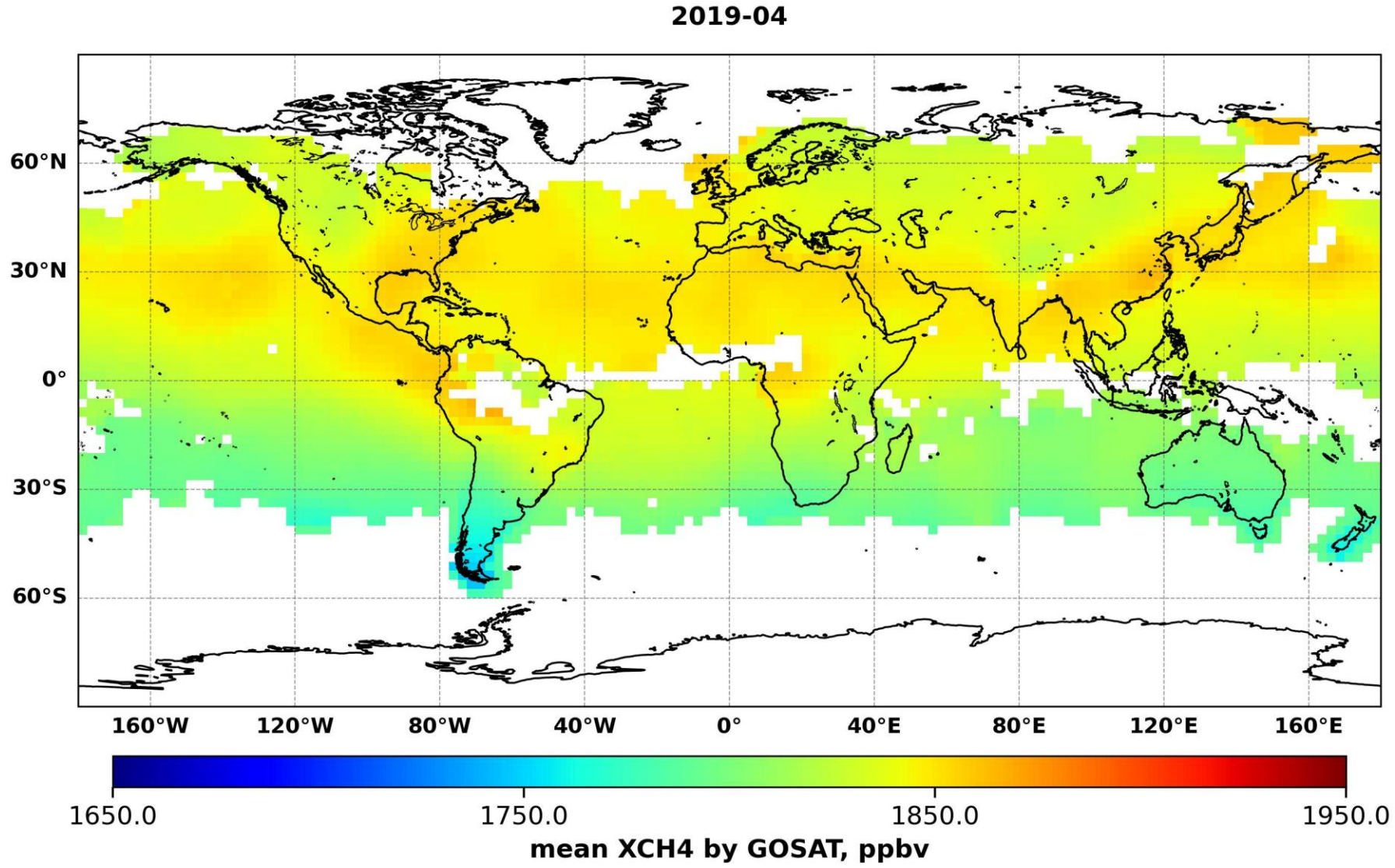
Сравнение с TCCON, 50км, 3ч, оригинальное ПО

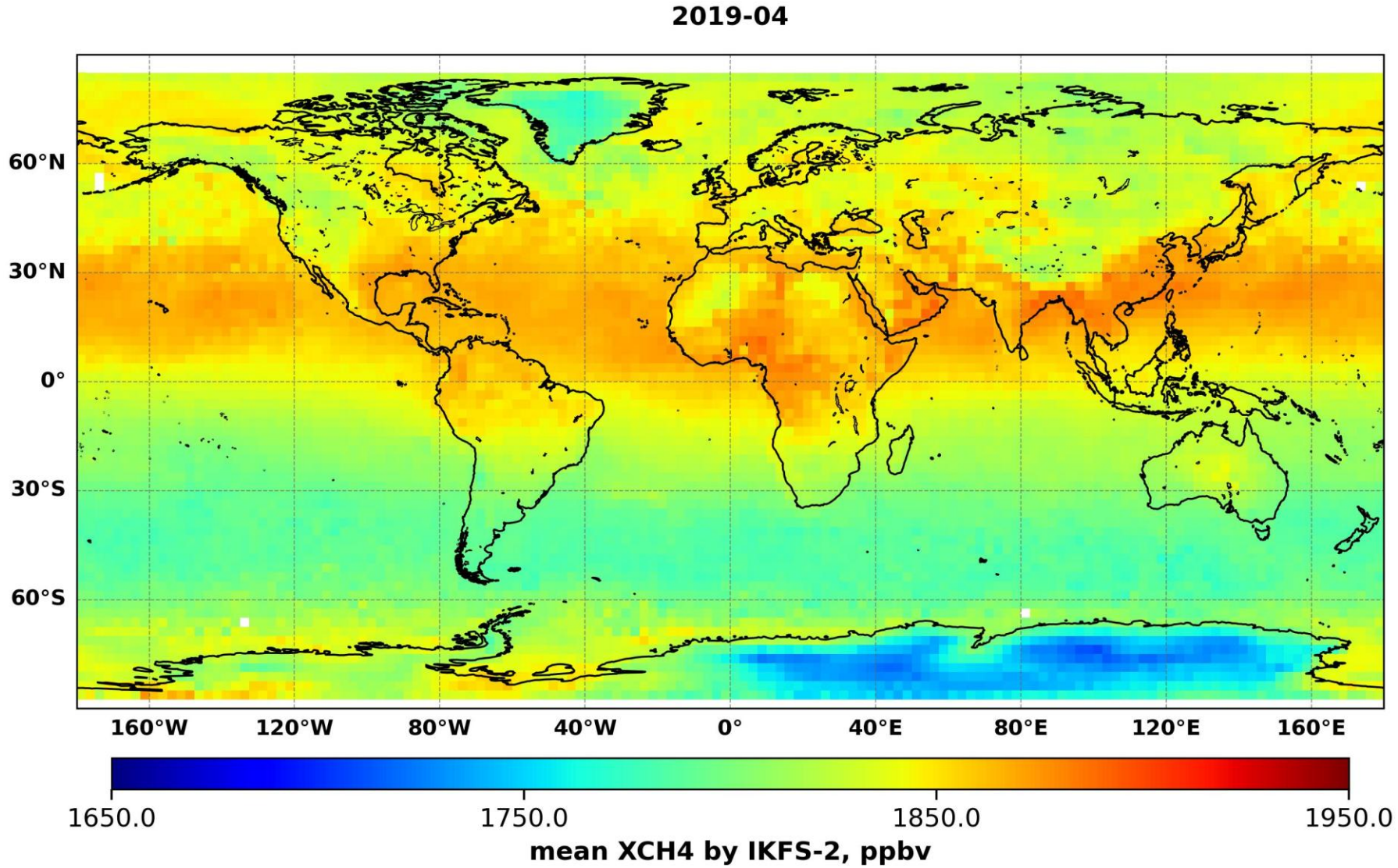
Название	Число пар	ОС CH4						Local, %		COP/ SDAпр
		сред	SD	SD%	bias	SD	RMSD	bias	SD	
parkfalls	38728	1840.0	23.3	1.3	13.8	20.8	24.9	0.8	1.1	0.89
nyalesund	115432	1825.0	29.7	1.6	17.8	28.7	33.8	1.0	1.6	0.98
garmisch	8456	1842.5	28.2	1.5	16.0	25.7	30.3	0.9	1.4	0.92
bremen	4011	1841.7	18.6	1.0	9.2	17.7	19.9	0.5	1.0	0.96
bialystok	17482	1822.7	16.3	0.9	26.3	14.1	29.9	1.4	0.8	0.88
sodankyla	34653	1824.9	23.2	1.3	20.2	23.6	31.1	1.1	1.3	1.03
orleans	29596	1837.1	22.7	1.2	15.0	20.2	25.1	0.8	1.1	0.89
eureka	35321	1796.6	20.0	1.1	39.0	26.6	47.2	2.2	1.5	1.34
lamont	57216	1845.9	22.8	1.2	8.4	19.9	21.6	0.5	1.1	0.87
jpl02	7312	1839.6	14.9	0.8	11.5	13.6	17.8	0.6	0.7	0.92
saga	15349	1868.9	24.1	1.3	3.6	21.4	21.7	0.2	1.1	0.88
pasadena	53220	1858.5	27.1	1.5	-2.5	22.8	23.0	-0.1	1.2	0.84
darwin	17451	1815.3	22.3	1.2	23.1	20.9	31.2	1.3	1.2	0.95
lauder	34663	1752.2	10.8	0.6	83.1	15.6	84.5	4.7	0.9	1.46
wollongong	21619	1788.9	21.6	1.2	57.6	21.4	61.4	3.2	1.2	1.01
edwards	73645	1847.6	28.8	1.6	-2.0	22.7	22.8	-0.1	1.2	0.79
izana	8287	1843.9	18.4	1.0	21.5	19.8	29.2	1.2	1.1	1.09
karlsruhe	11698	1840.9	22.0	1.2	12.7	20.5	24.1	0.7	1.1	0.93
tsukuba	8100	1847.6	14.6	0.8	21.4	15.5	26.5	1.2	0.8	1.07
rikubetsu	4341	1854.7	29.6	1.6	7.3	24.5	25.6	0.4	1.3	0.83
paris	25335	1849.5	23.4	1.3	5.5	20.6	21.3	0.3	1.1	0.89
manaus	158	1810.4	5.3	0.3	37.1	11.3	38.8	2.0	0.6	2.16
reunion	23828	1794.8	14.1	0.8	61.0	18.6	63.7	3.4	1.0	1.34
hefei	3198	1879.3	35.1	1.9	2.0	29.7	29.7	0.1	1.6	0.84
easttroutlake	54925	1839.0	22.3	1.2	9.4	20.6	22.6	0.5	1.1	0.93
burgos	25642	1855.0	20.2	1.1	6.2	17.0	18.1	0.3	0.9	0.84
xianghe	13104	1889.5	25.9	1.4	-21.3	21.0	29.9	-1.1	1.1	0.80
lauder	22568	1793.1	24.1	1.3	52.7	21.1	56.8	3.0	1.2	0.90
nicosia	7541	1871.7	14.5	0.8	-1.8	12.8	12.9	-0.1	0.7	0.89
total	776148	1831.4	36.3	1.98				1.03	1.73	

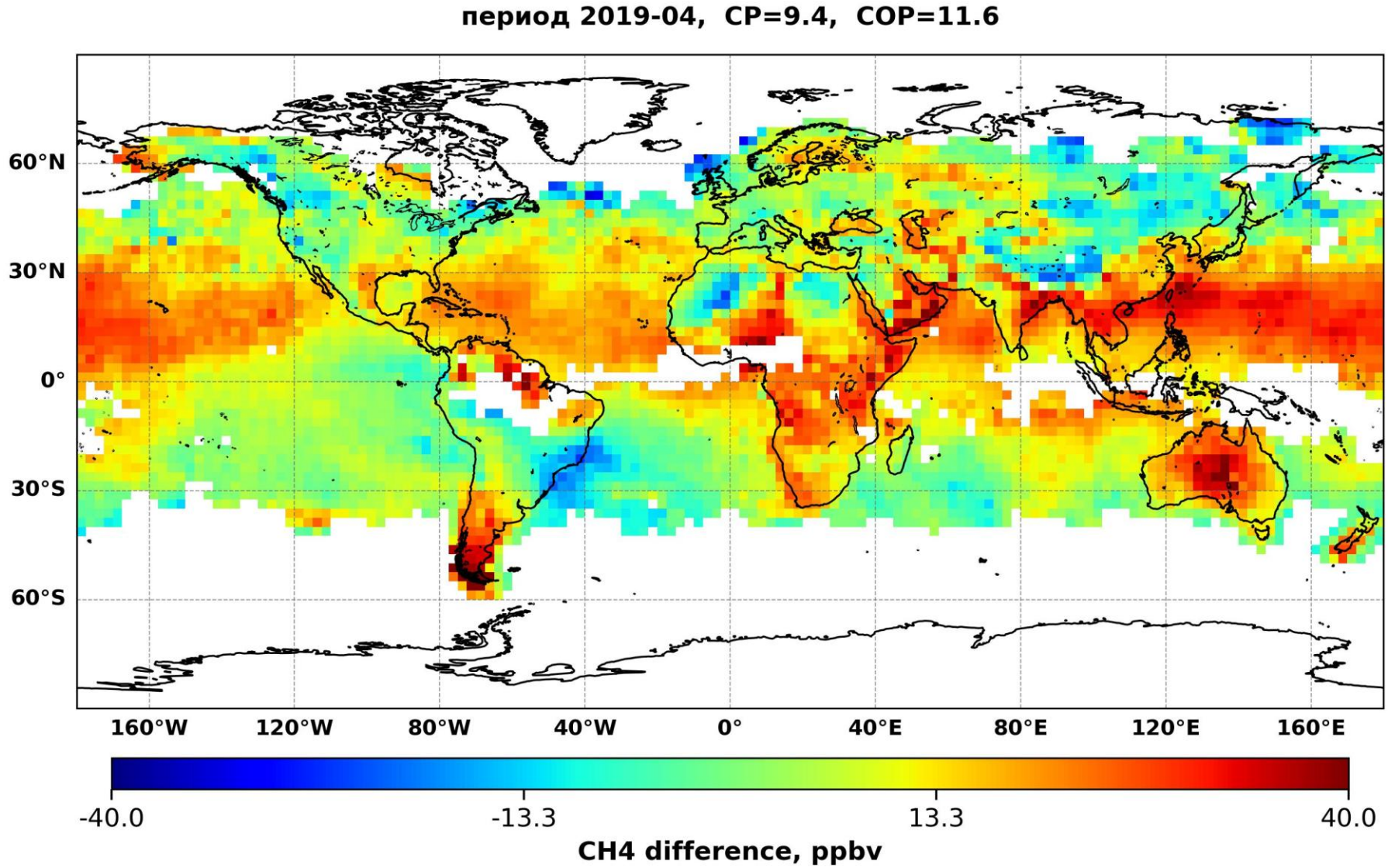
Сравнение с TCCON, 50км, 3ч, Keras, Tensorflow

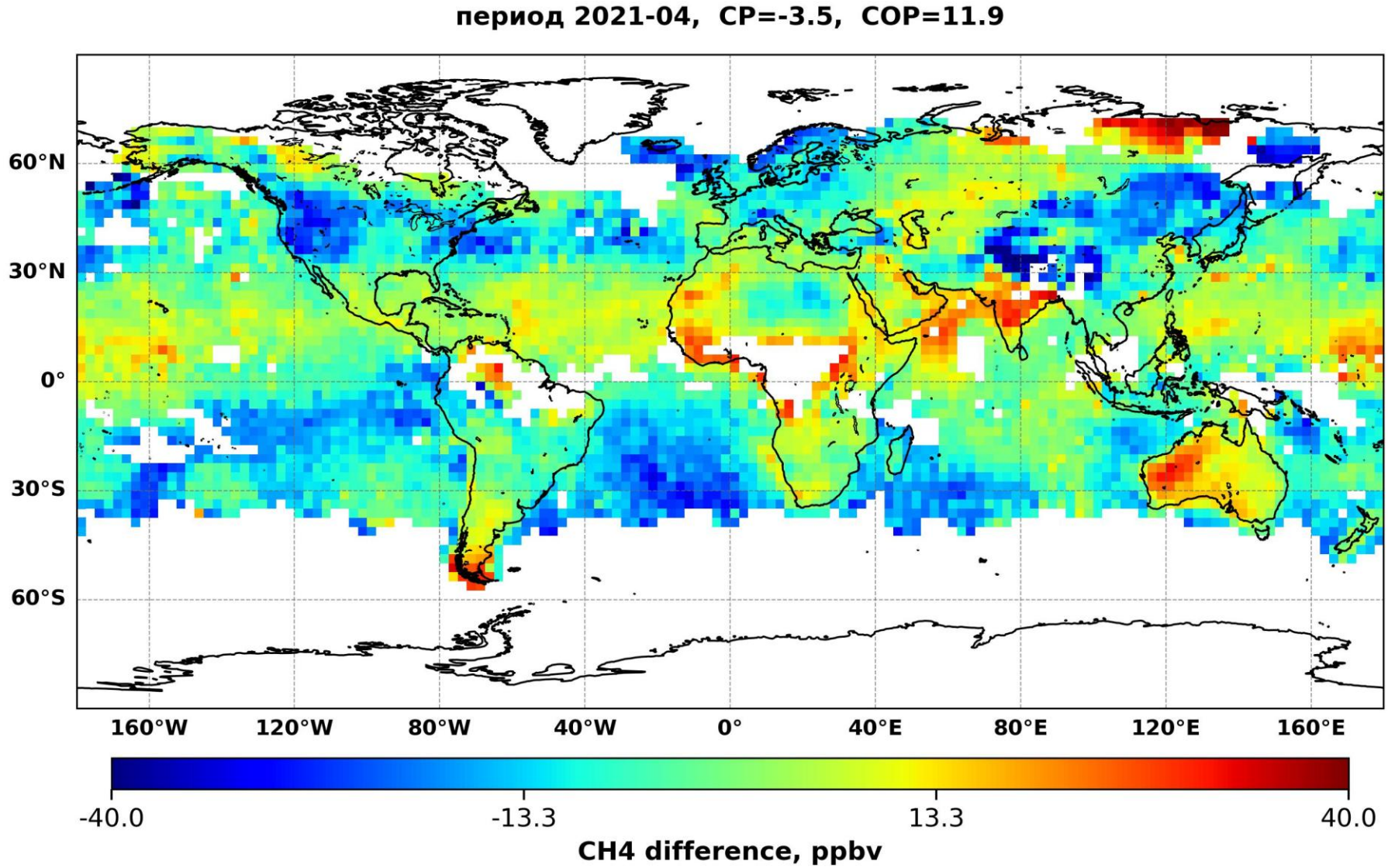
имя	Число пар	ОС CH4						Local, %		COP/ SDAпр
		сред	SD	SD%	bias	SD	RMSD	bias	SD	
parkfalls	**38728**	**1840.0**	**23.3**	**1.3**	**10.0**	**19.1**	**21.6**	**0.6**	**1.0**	**0.82**
nyalesund	115432	1825.0	29.7	1.6	16.9	26.2	31.1	0.9	1.5	0.89
garmisch	8456	1842.5	28.2	1.5	11.8	23.2	26.0	0.7	1.3	0.83
bremen	4011	1841.7	18.6	1.0	6.0	16.3	17.4	0.3	0.9	0.88
bialystok	17482	1822.7	16.3	0.9	19.2	14.4	24.0	1.1	0.8	0.89
sodankyla	34653	1824.9	23.2	1.3	13.9	21.0	25.2	0.8	1.2	0.91
orleans	29596	1837.1	22.7	1.2	12.4	19.1	22.7	0.7	1.0	0.84
eureka	35321	1796.6	20.0	1.1	37.5	25.6	45.4	2.1	1.4	1.30
lamont	57216	1845.9	22.8	1.2	9.6	18.9	21.2	0.5	1.0	0.83
jpl	7312	1839.6	14.9	0.8	9.1	16.0	18.4	0.5	0.9	1.08
saga	15349	1868.9	24.1	1.3	6.8	19.2	20.3	0.4	1.0	0.79
pasadena	53220	1858.5	27.1	1.5	-1.4	21.0	21.1	-0.1	1.1	0.77
darwin	17451	1815.3	22.3	1.2	23.0	21.8	31.7	1.3	1.2	0.98
lauder	34663	1752.2	10.8	0.6	70.6	24.8	74.8	4.0	1.4	2.30
wollongong	21619	1788.9	21.6	1.2	46.7	22.7	51.9	2.6	1.3	1.07
edwards	73645	1847.6	28.8	1.6	-0.7	19.5	19.5	-0.0	1.1	0.68
izana	8287	1843.9	18.4	1.0	24.5	17.8	30.3	1.3	1.0	0.98
karlsruhe	11698	1840.9	22.0	1.2	9.6	18.6	20.9	0.5	1.0	0.84
tsukuba	8100	1847.6	14.6	0.8	25.0	15.5	29.4	1.4	0.8	1.07
rikubetsu	4341	1854.7	29.6	1.6	5.7	22.3	23.0	0.3	1.2	0.76
paris	25335	1849.5	23.4	1.3	6.9	19.5	20.7	0.4	1.1	0.84
manaus	158	1810.4	5.3	0.3	29.9	5.5	30.4	1.7	0.3	1.07
reunion	23828	1794.8	14.1	0.8	56.9	16.6	59.3	3.2	0.9	1.19
hefei	3198	1879.3	35.1	1.9	7.3	26.6	27.6	0.4	1.4	0.75
easttroutla	54925	1839.0	22.3	1.2	6.2	19.7	20.6	0.3	1.1	0.89
burgos	25642	1855.0	20.2	1.1	6.3	15.0	16.3	0.3	0.8	0.74
xianghe	13104	1889.5	25.9	1.4	-16.3	21.9	27.2	-0.8	1.1	0.84
lauder	22568	1793.1	24.1	1.3	45.4	22.1	50.5	2.5	1.3	0.93
nicosia	7541	1871.7	14.5	0.8	-0.7	11.4	11.4	-0.0	0.6	0.78
total	776148	1831.4	36.3	2.0	16.5	28.3	32.7	0.9	1.57	

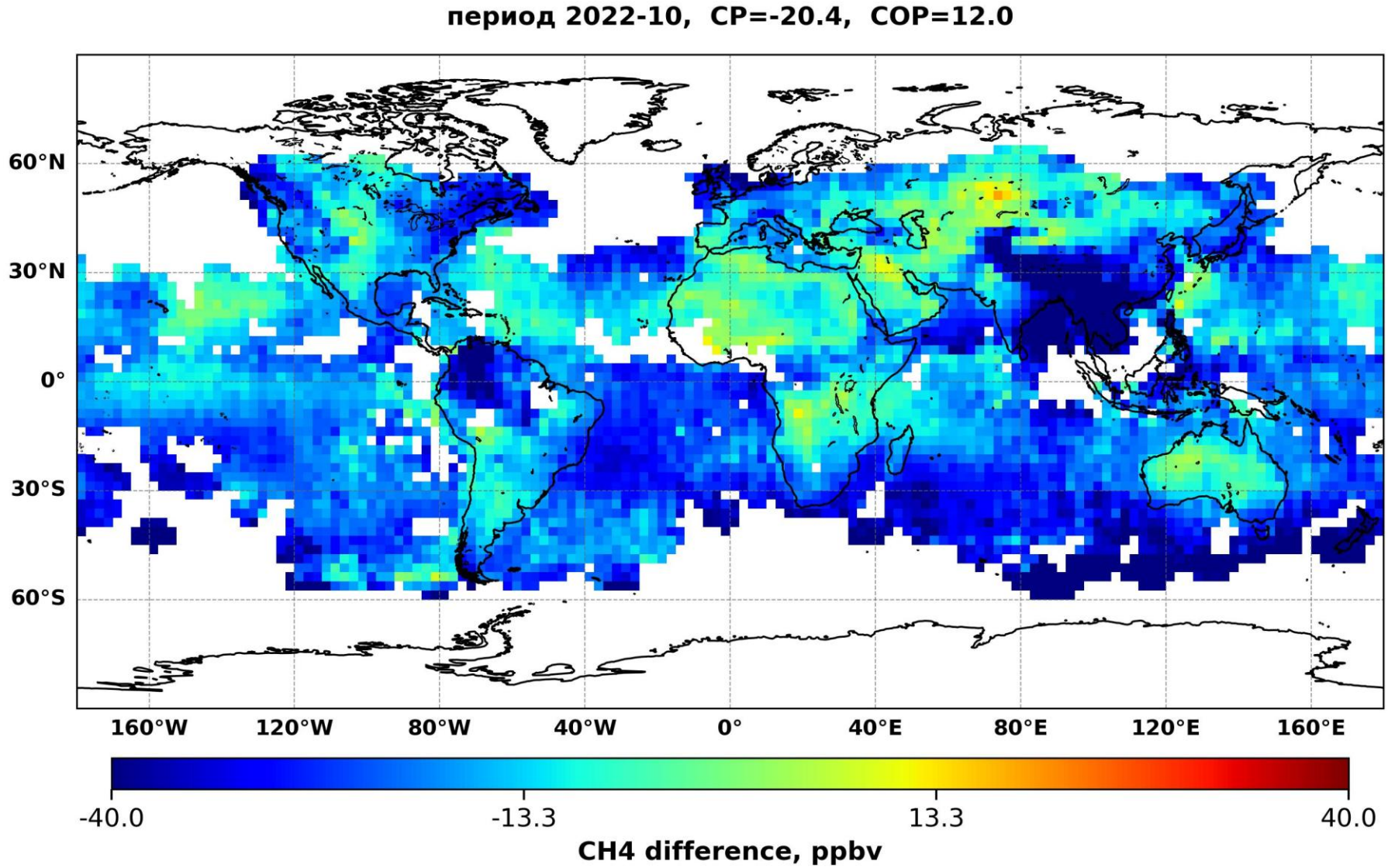
Сопоставление с GOSAT
среднемесячные, 2.5°x2.5°


2019-04
60°N
30°N
0°
30°S
60°S
160°W
120°W
80°W
40°W
0°
40°E
80°E
120°E
160°E
1650.0
1750.0
1850.0
1950.0
mean XCH4 by GOSAT, ppbv


2019-04
60°N
30°N
0°
30°S
60°S
160°W
120°W
80°W
40°W
0°
40°E
80°E
120°E
160°E
1650.0
1750.0
1850.0
1950.0
mean XCH4 by IKFS-2, ppbv

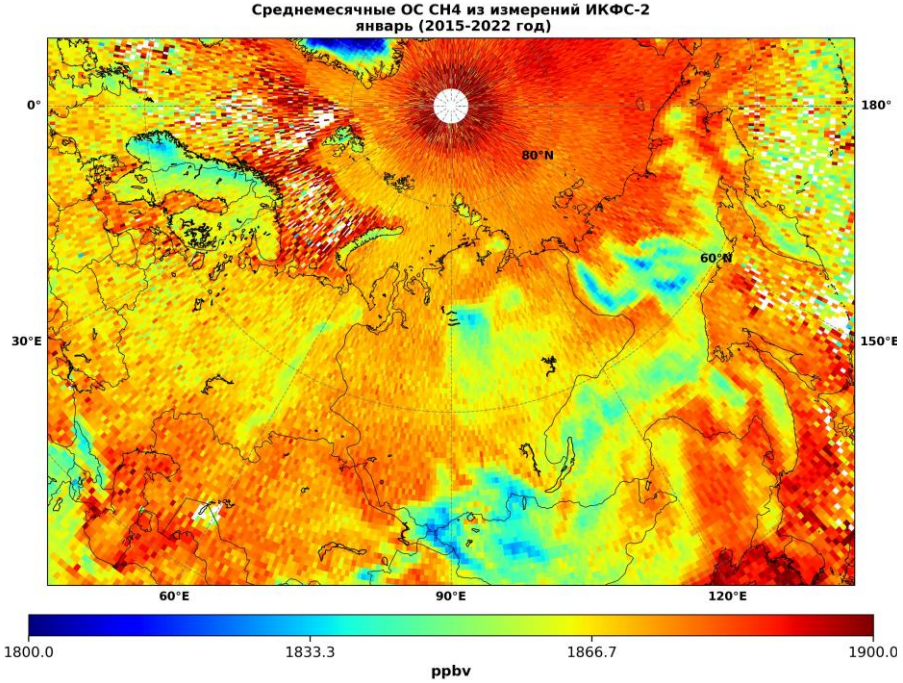

период 2019-04, CP=9.4, COP=11.6
60°N
30°N
0°
30°S
60°S
160°W
120°W
80°W
40°W
0°
40°E
80°E
120°E
160°E
-40.0
-13.3
13.3
40.0
CH4 difference, ppbv

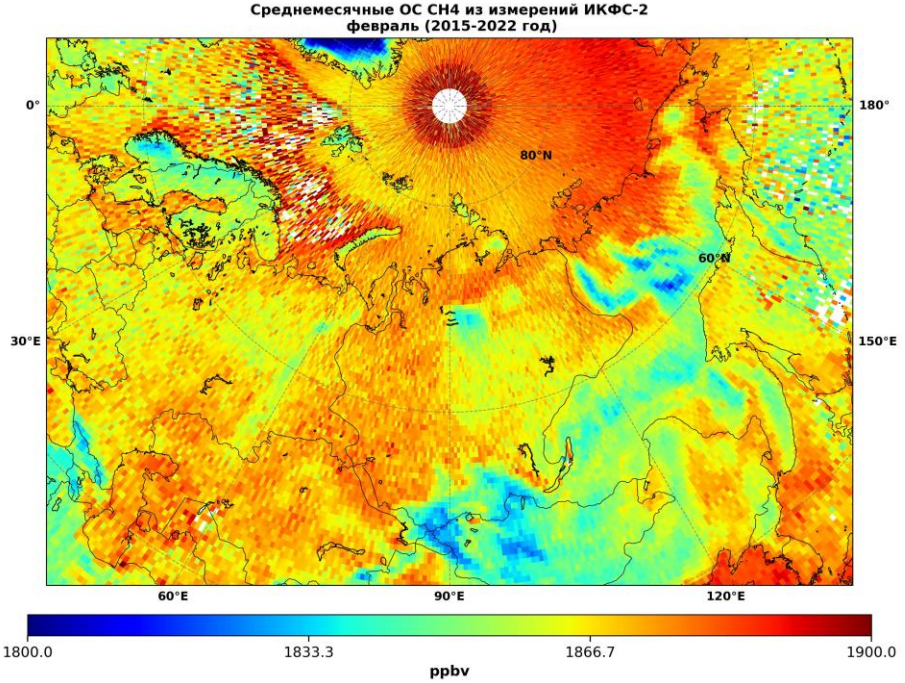

период 2021-04, CP=-3.5, COP=11.9
60°N
30°N
0°
30°S
60°S
160°W
120°W
80°W
40°W
0°
40°E
80°E
120°E
160°E
-40.0
-13.3
13.3
40.0
CH4 difference, ppbv

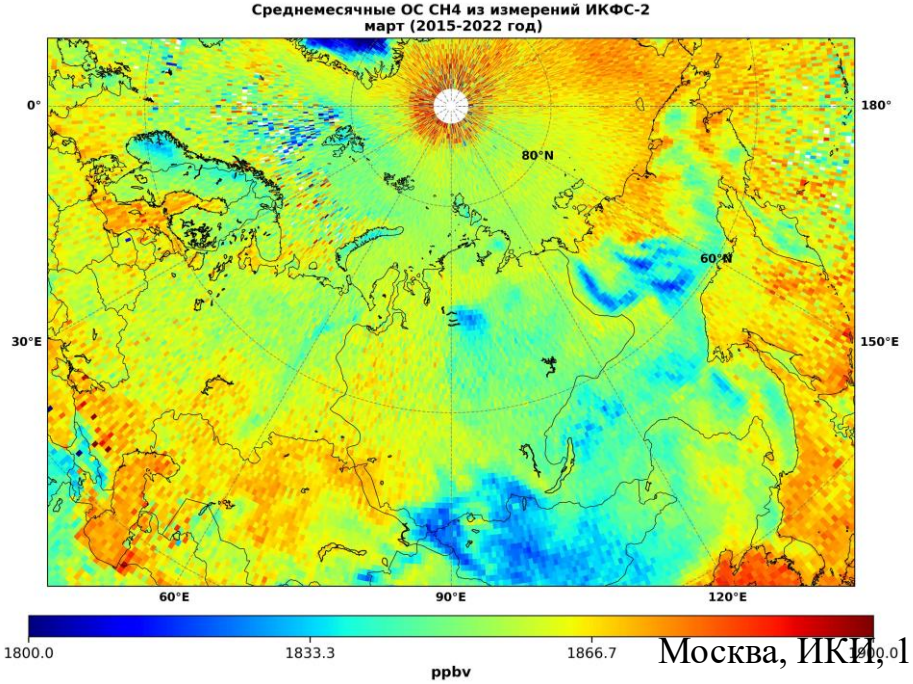

период 2022-10, CP=-20.4, COP=12.0
60°N
30°N
0°
30°S
60°S
160°W
120°W
80°W
40°W
0°
40°E
80°E
120°E
160°E
-40.0
-13.3
13.3
40.0
CH4 difference, ppbv

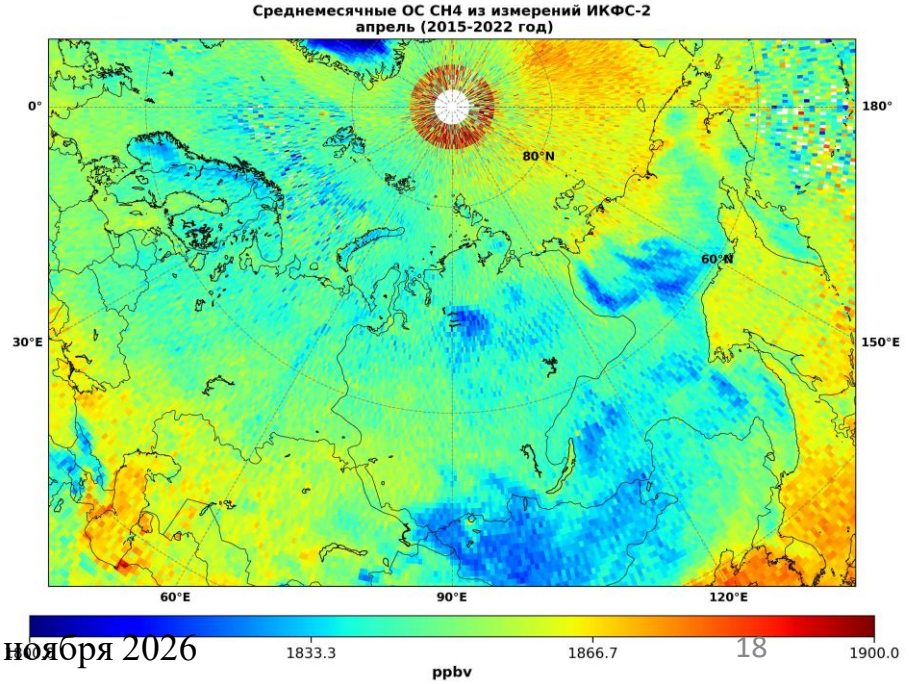
Средняя разность и стандартное отклонение среднемесячных XCH4.
Метеор М №2 минус GOSAT

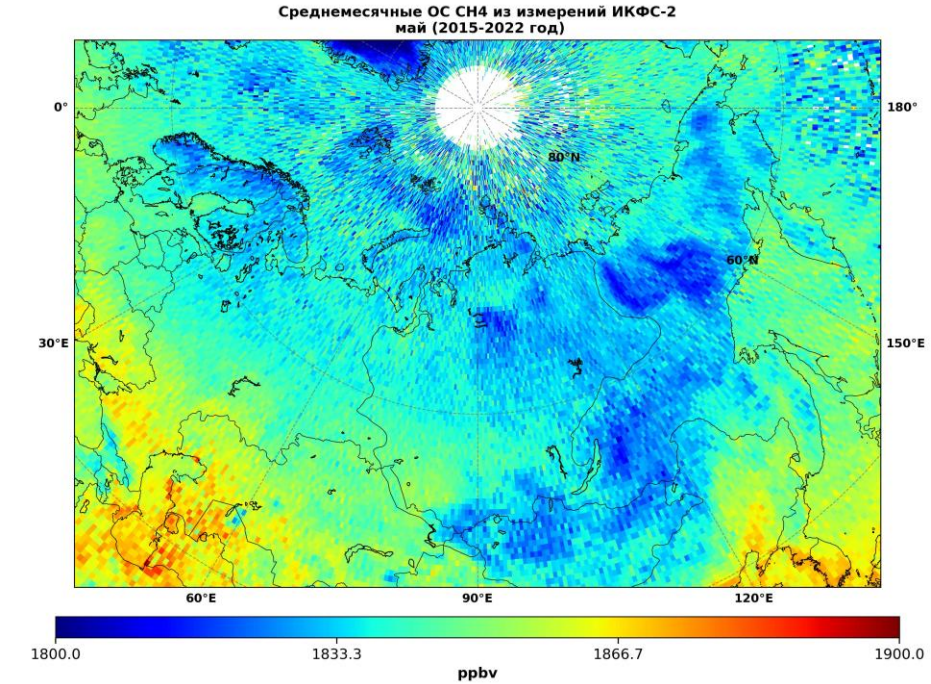


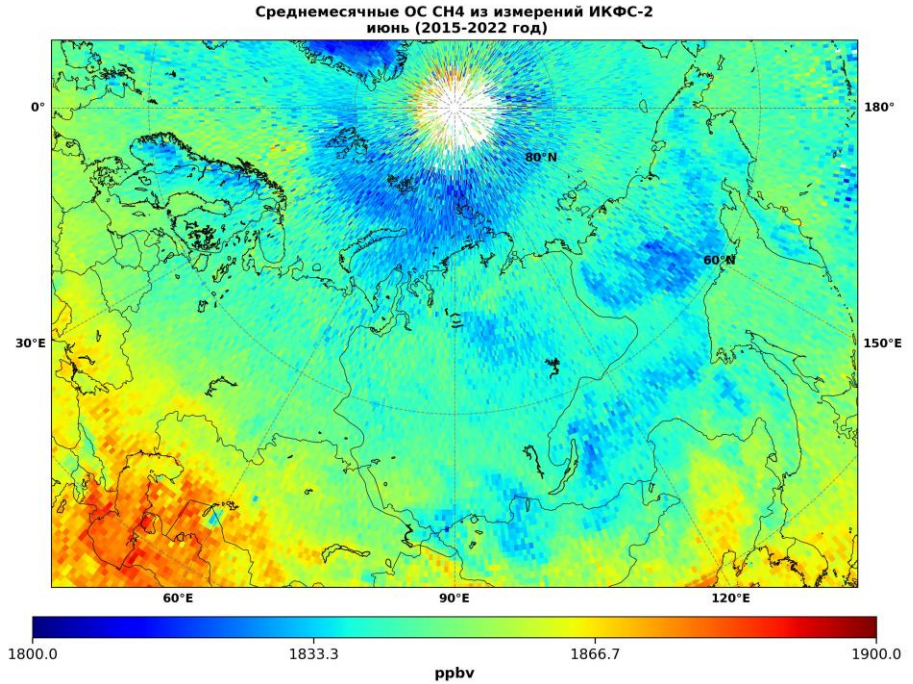

Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
январь (2015-2022 год)
0°
180°
30°E
150°E
80°N
60°N
60°E
90°E
120°E
1800.0
1833.3
1866.7
1900.0
ppbv

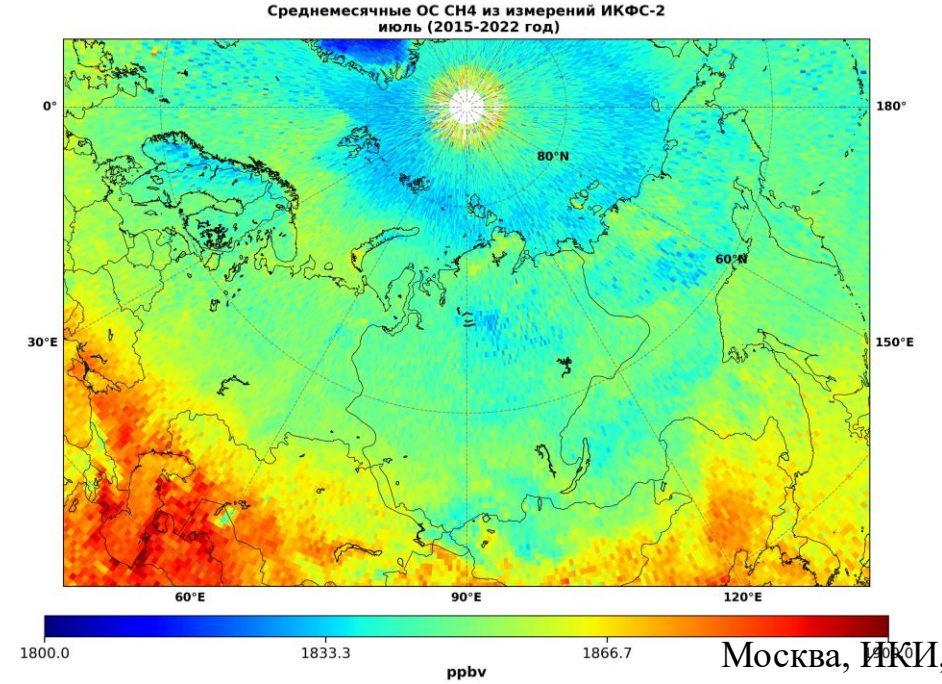

Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
февраль (2015-2022 год)
0°
180°
30°E
150°E
80°N
60°N
60°E
90°E
120°E
1800.0
1833.3
1866.7
1900.0
ppbv

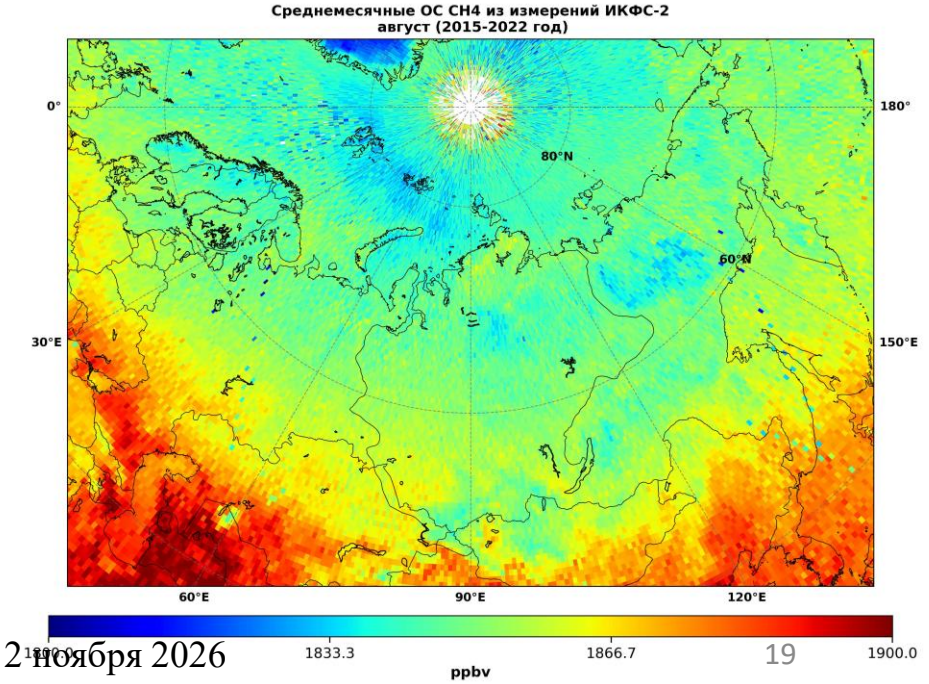

Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
март (2015-2022 год)
0°
180°
30°E
150°E
80°N
60°N
60°E
90°E
120°E
1800.0
1833.3
1866.7
1900.0
ppbv

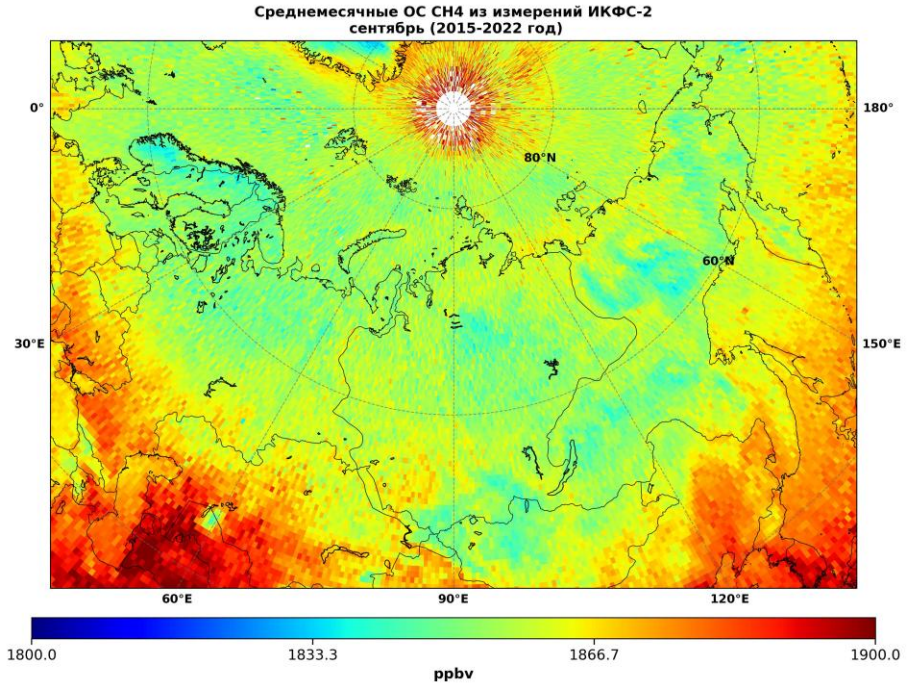

Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
апрель (2015-2022 год)
0°
180°
30°E
150°E
80°N
60°N
60°E
90°E
120°E
1800.0
1833.3
1866.7
1900.0
ppbv

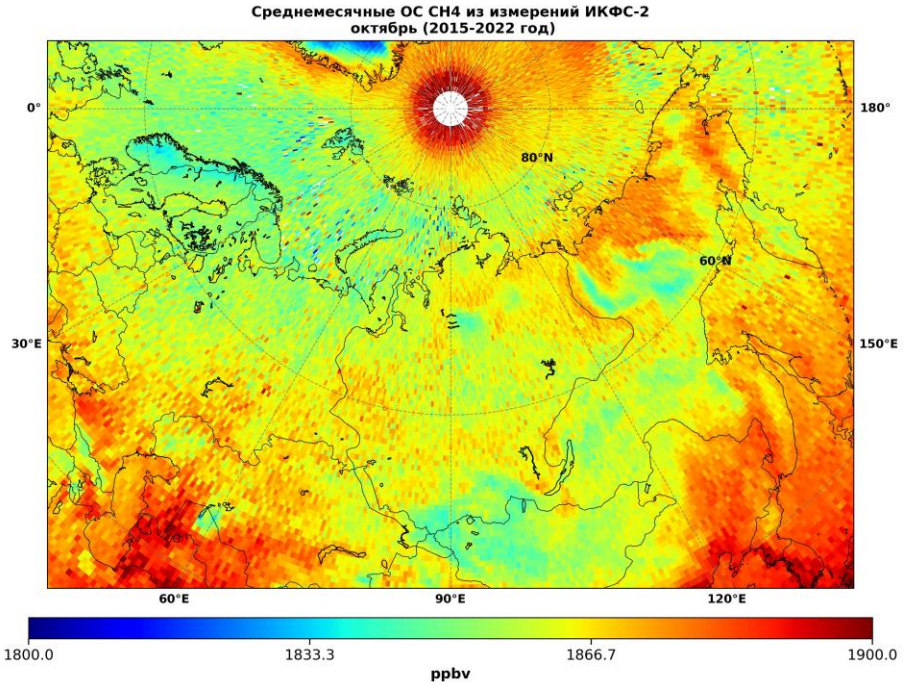

Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
май (2015-2022 год)
0°
180°
80°N
60°N
30°E
150°E
60°E
90°E
120°E
1800.0
1833.3
1866.7
1900.0
ppbv

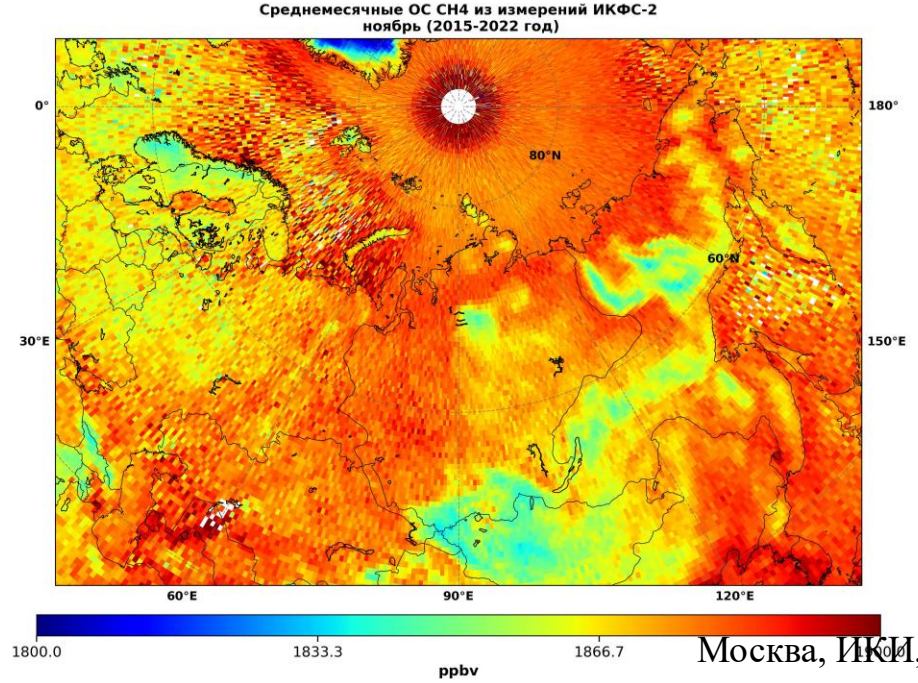

Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
июнь (2015-2022 год)
0°
180°
80°N
60°N
30°E
150°E
60°E
90°E
120°E
1800.0
1833.3
1866.7
1900.0
ppbv

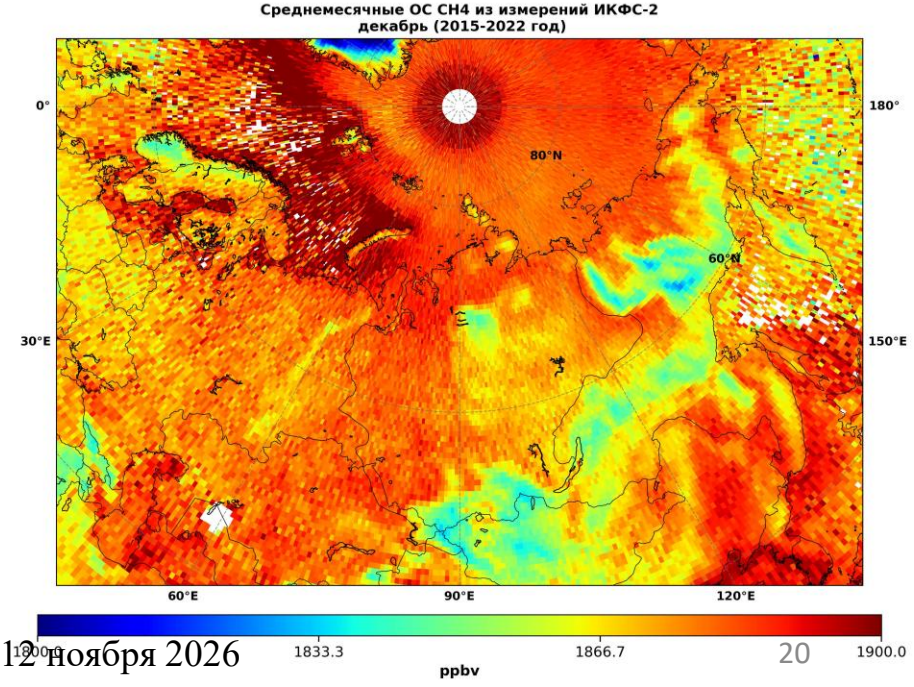

Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
июль (2015-2022 год)
0°
180°
80°N
60°N
30°E
150°E
60°E
90°E
120°E
1800.0
1833.3
1866.7
ppbv


Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
август (2015-2022 год)
0°
180°
80°N
60°N
30°E
150°E
60°E
90°E
120°E
1833.3
1866.7
1900.0
ppbv


Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
сентябрь (2015-2022 год)
0°
180°
80°N
60°N
30°E
150°E
60°E
90°E
120°E
1800.0
1833.3
1866.7
1900.0
ppbv


Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
октябрь (2015-2022 год)
0°
180°
80°N
60°N
30°E
150°E
60°E
90°E
120°E
1800.0
1833.3
1866.7
1900.0
ppbv


Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
ноябрь (2015-2022 год)
0°
180°
80°N
60°N
30°E
150°E
60°E
90°E
120°E
1800.0
1833.3
1866.7
ppbv


Среднемесячные ОС CH4 из измерений ИКФС-2
декабрь (2015-2022 год)
0°
180°
80°N
60°N
30°E
150°E
60°E
90°E
120°E
1833.3
1866.7
1900.0
ppbv

Выводы:

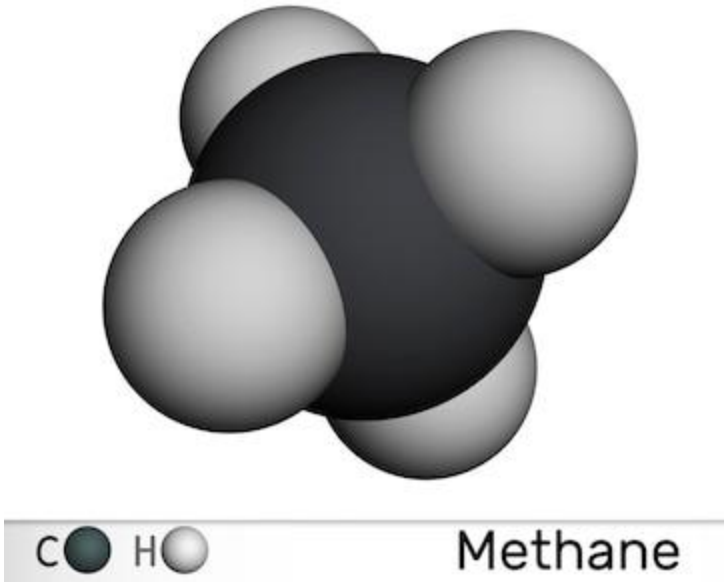
- Измерения уходящего теплового излучения с борта российских метеорологических спутников серии “Метеор М №2” позволяют получать данные об общем содержании (ОС) метана в столбе атмосферы с погрешностями, меньшими фоновой изменчивости.

- Измерения, основанные на уходящем тепловом излучении, обеспечивают глобальный охват.

- Результаты позволяют уверенно анализировать региональную пространственную и сезонную изменчивость ОС метана.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 124032000025-1

Спасибо за Ваше внимание



https://ru.freepik.com/premium-photo/methane-ch4-molecule-molecular-model-main-component-natural-gas-3d-rendering_157153015.htm.