



Федеральное государственное
бюджетное учреждение
«Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт» (ФГБУ ААНИИ)

Finnish
Meteorological
Institute
(FMI)



Результаты анализа мониторинга метана на НИС Ледовая база “Мыс Баранова”

М.А. Ёжикова¹, А.П.Макштас¹, Т. Лаурилла², Э.Асми²

¹ *ФГБУ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
loskutova@aari.ru*

² *Финский метеорологический институт, Финляндия*

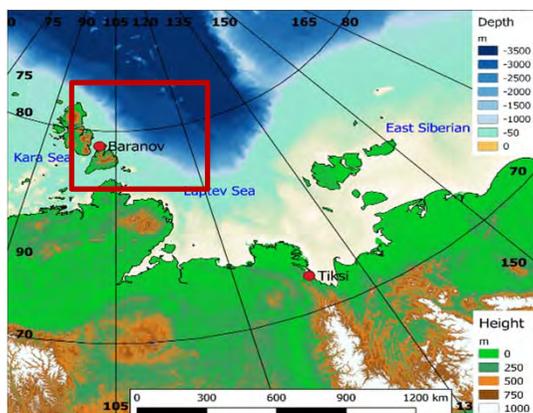
В настоящем исследовании была предпринята попытка выделения фоновых концентраций и изучения сезонной и межгодовой изменчивости метана на арктической станции Ледовая база “Мыс Баранова” (79°16′ с. ш., 101°45′ в. д.) в 2015 – 2020 гг. Измерения проводились газоанализатором Picarro G2401. Для выделения фоновых значений к исходным данным был применен ряд фильтров. Измерения были сопоставлены с данными других арктических станций, являющимися поставщиками данных Мирового Центра Данных по парниковым газам – Алерт, Барроу и Паллас.

Актуальность исследования связана с возможной проблемой меняющегося климата и особой чувствительностью к этим изменениям арктического региона. Изучение межгодовых изменений уровня концентраций таких парниковых газов, как метан и диоксид углерод, послужит своевременным индикатором наличия или отсутствия климатических изменений. **Новизна** данной работы обусловлена тем, что в целом изучению парниковых газов в российской Арктике посвящено немного работ в связи с труднодоступностью станций и сложностью организации подобных наблюдений. Для НИС «Ледовая база Мыс Баранова» подобный анализ был проведен впервые.

В результате исследования были выполнены следующие задачи:

- *оценена адекватность работы приборного комплекса и проведена коррекция ряда наблюдений в соответствии с требованиями по сопоставимости ВМО;*
- *выделены фоновые значения концентраций метана с учетом влияния устойчивой стратификации приземного слоя в полярной атмосфере, ветрового режима и локальных загрязнителей;*
- *оценены характеристики межгодовой и сезонной изменчивости метана посредством применения сглаживающей модели с низкочастотным Фурье-фильтром;*
- *проведено сопоставление среднегодовых значений и оценки среднегодового прироста парниковых газов в районе исследований со среднеглобальными значениями, приведенными в ежегодных Бюллетенях ВМО;*
- *выявлены возможные очаги повышенных концентраций обоих газов посредством вероятностной модели.*

Районы исследований, данные и методы измерений



Архипелаг Северная Земля, о. Большевик
79.3 с.ш., 101.8 в.д.
30 м над уровнем моря



Удаленность от берега
моря – 27 м
Высота пробоотборной
линии – 10 м

Массивы данных

- Концентрации метана на Мысе Баранова, измеренные газоанализатором Picarro G2401 (ежеминутные данные)
- Концентрации метана на станциях Барроу, Алерт и Паллас по данным World Data Centre for Greenhouse gases (среднечасовые)
- Метеопараметры, полученные датчиками метеостанции MAWS 420 (ежеминутные данные)
- Расчеты обратных траекторий моделью HYSPLIT заблаговременностью 72 часа

Технические характеристики Picarro G2401

Технические характеристики	CO ₂	CH ₄
Диапазон измерений	300 – 700 млн ⁻¹	1 – 3 млн ⁻¹
Погрешность измерения (1σ от 5-секундных данных)	±0.07 млн ⁻¹	±0.0005 млн ⁻¹

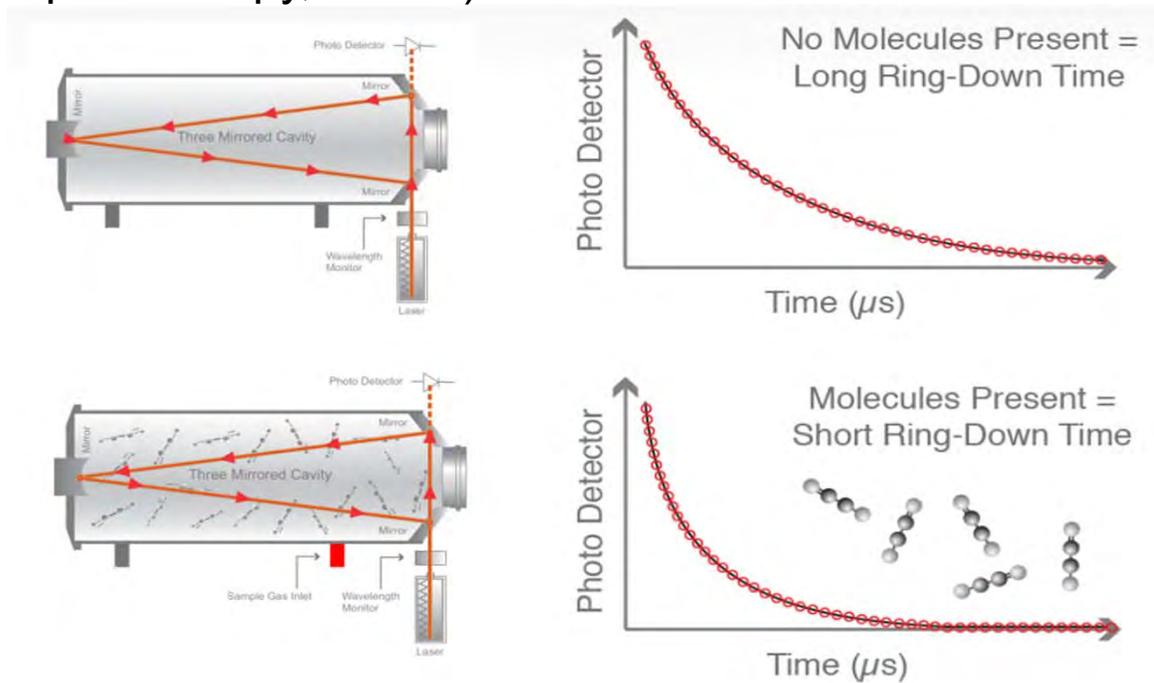


Станция	Координаты	Высота станции, м н.у.м.	Высота инлета, м н.п.з.	Климатическая зона (по В.П. Кёппену)	Метод измерений
ЛБ Мыс Баранова	79°16' с.ш., 101°45' в.д.	28	10	Тундра	CRDS (Picarro G2401)
Барроу	71°18' с.ш., 156°44' з.д.	11	10	Тундра	NDIR/OA-ICOS
Алерт	82°29' с.ш., 62°21' з.д.	185	10	Тундра	CRDS (Picarro)
Паллас	67°58' с.ш., 24°07' в.д.	560	7	Субарктический континентальный климат	CRDS (Picarro G2401)

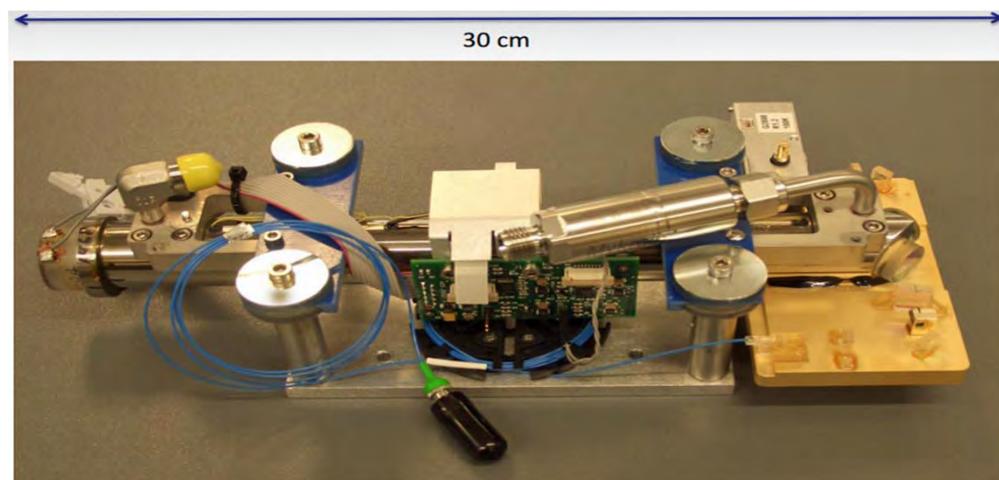
Описание исследуемых станций (по данным World Data Centre for Greenhouse gases, <https://gaw.kishou.go.jp/>)

Станции проекта «Международная Система Наблюдений Атмосферы в Арктике» (IASOA)

Метод измерения: внутрирезонаторная лазерная спектроскопия (Cavity Ringdown Spectroscopy, CRDS)



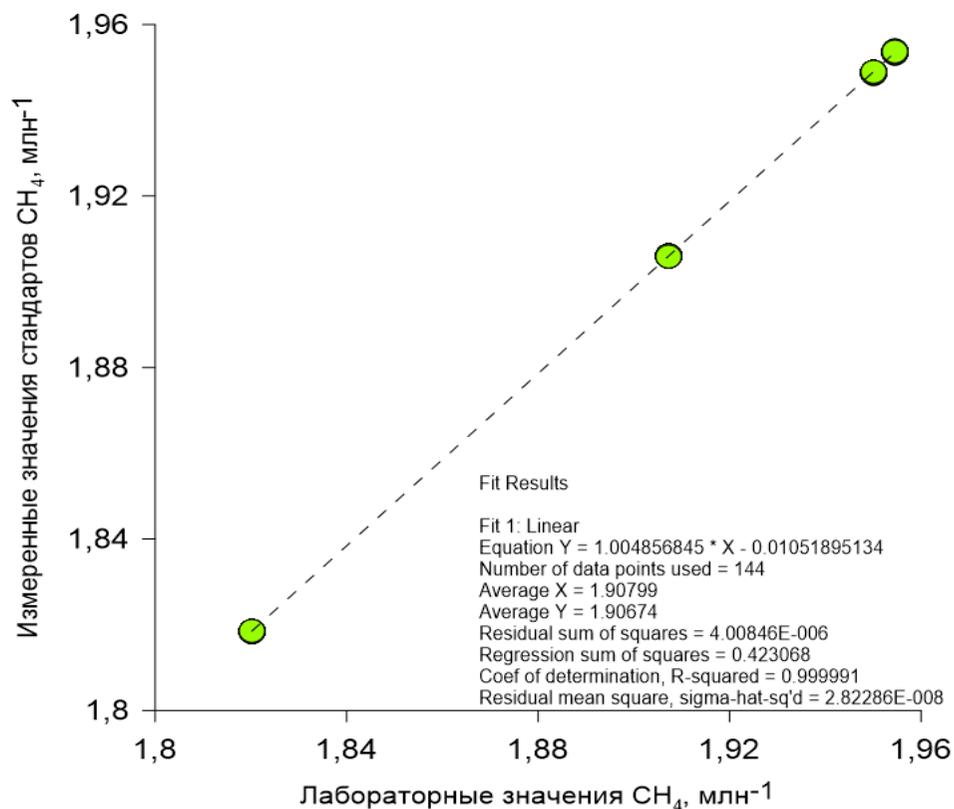
(«Metodology report verification...», 2017)



(Сайт компании Picarro, https://www.picarro.com/g2401_gas_concentration_analyzer)

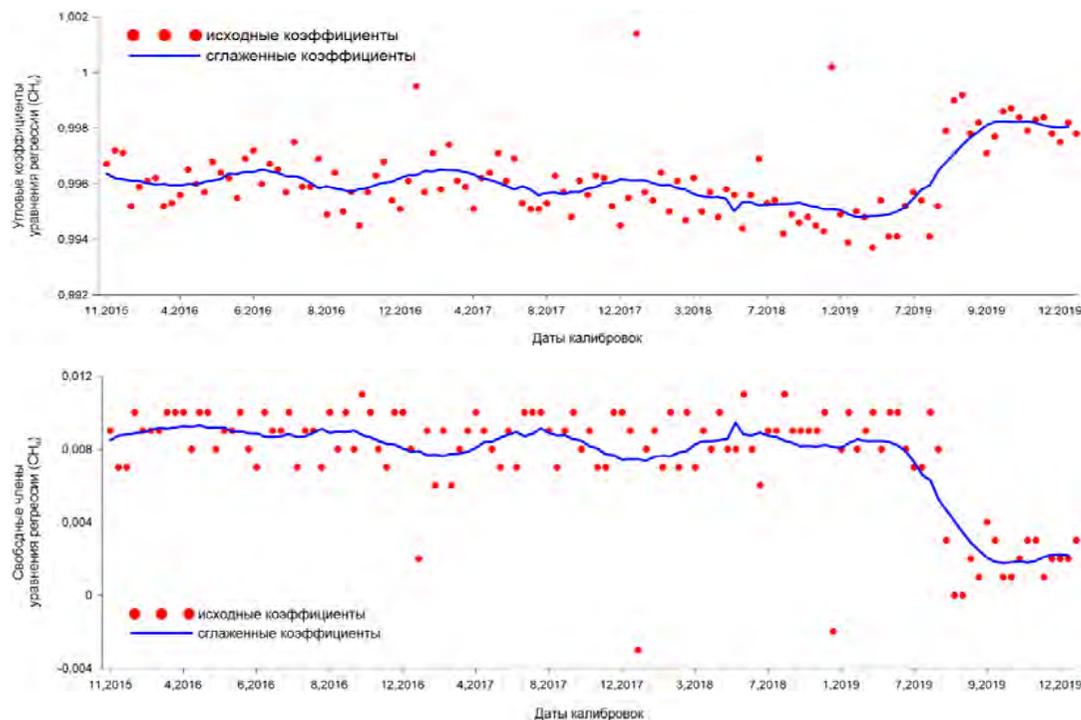
Концентрации калибровочных баллонов, используемых на НИС ЛБ Мыс Баранова

№ баллона	До 01.09.2019 г.		После 05.09.2019 г.	
	CO ₂ , млн ⁻¹	CH ₄ , млн ⁻¹	CO ₂ , млн ⁻¹	CH ₄ , млн ⁻¹
1	389.61±0.01	1.95443±0.00008	418.12±0.02	1.96321±0.00016
2	426.54±0.01	1.95003±0.00006	452.95±0.03	1.99070±0.00015
3	404.52±0.01	1.90734±0.00008	418.01±0.04	1.96815±0.00020
4	384.71±0.02	1.82016±0.00004	382.14±0.03	1.81664±0.00022



Сопоставление значений калибровочных стандартов, заявленных в лаборатории, и измеряемых газоанализатором Picarro G2401 на НИС ЛБ Мыс Баранова, 04.04.2016 г.

Введение поправки к исходным данным



Коэффициенты модели линейной регрессии между приписанными и измеренными значениями концентраций углекислого газа калибровочных баллонов, к которым было применено ядерное сглаживание по методу (Reum F. et al., 2019):

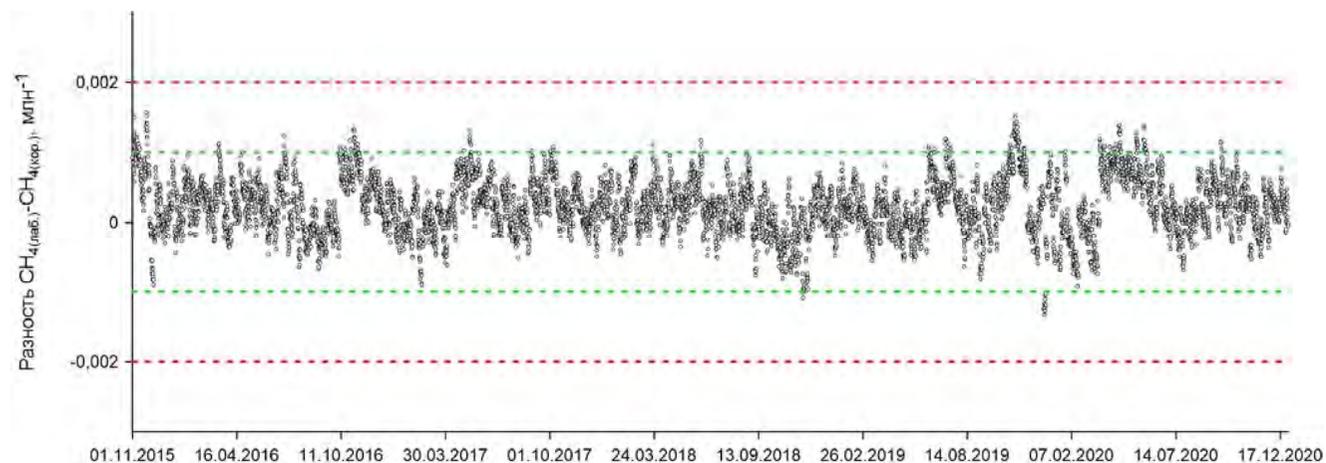
трикубическое ядро вида

$$K(u) = \frac{70}{81}(1 - |u|^3)^3,$$

$$\text{где } |u| = \left| \frac{x - X_i}{h} \right| \leq 1,$$

h - ширина окна функции

Выполнение требований ВМО по сопоставимости на сети измерений (Andrews A.E. et al., 2014)



Метан:
±0.002 млн⁻¹

100% значений
соответствуют
требованиям

Разность значений концентраций CH₄ калибровочного баллона, измеренных в лабораторных условиях (CH₄(лаб)) и газоанализатором на станции (CH₄(кор)) после коррекции исходного ряда наблюдений

Выделение характеристик межгодовой и сезонной изменчивости

Аппроксимация временной функцией $f(t)$, представляющей собой сумму квази-синусоидальной гармоник и полинома (Thoning et al., 1989):

$$f(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_{(k-1)} t^{(k-1)} + \sum_{n=1}^{nh} c_n [\sin(2n\pi t + \varphi_n)],$$

где k – количество членов полинома, а nh – количество гармоник функции

Низкочастотный Фурье-фильтр для выявления межгодовых и короткопериодных изменений, применяемый к остаткам аппроксимации:

$$H(f) = \exp\left[-\ln(2) \cdot \left(\frac{f}{f_c}\right)^6\right],$$

где f_c – частота среза (667 суток для выявления межгодовых изменений, 80 суток – для короткопериодных изменений).

Фильтры, примененные к исходному ряду наблюдений для расчета характеристик межгодовой и сезонной изменчивости:

К ежеминутным данным :

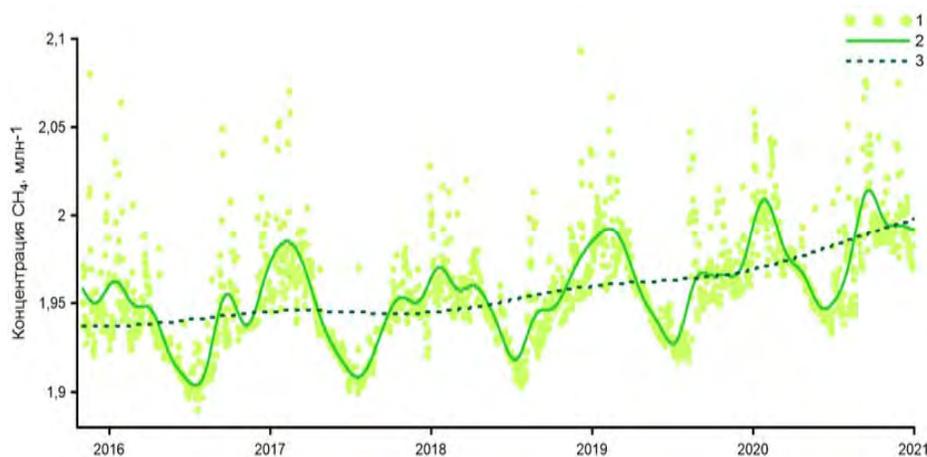
- СКО > 0.5 млн⁻¹
- Скорость ветра менее 3 м/с
- Непостоянство давления и температуры в измерительной кювете Pícarro G2401, ошибки системы самодиагностики
- Перенос с территории ДЭС (направление ветра 95 – 145 гр.)

К среднечасовым данным:

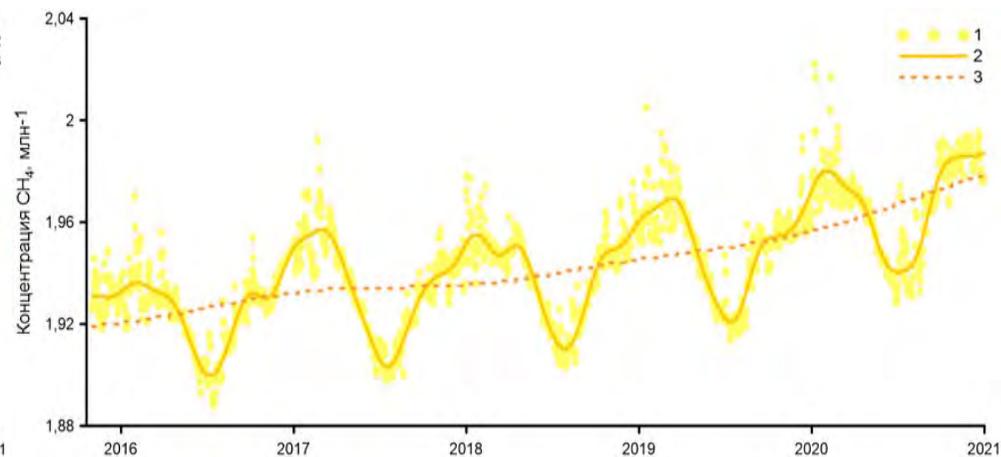
- Устойчивая стратификация ($z/L > 0.2$)
- СКО > 0.3 млн⁻¹

Результаты выделения характеристик межгодовой и сезонной изменчивости метана

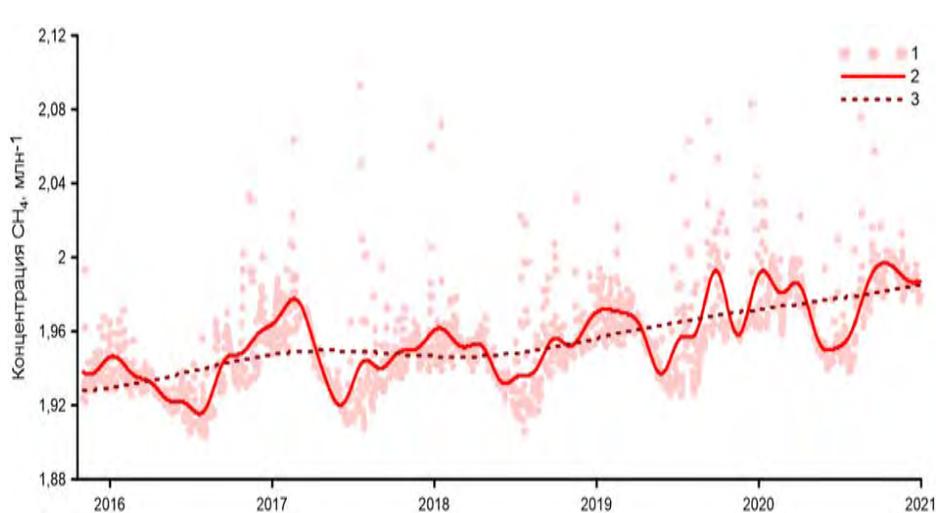
Мыс Баранова



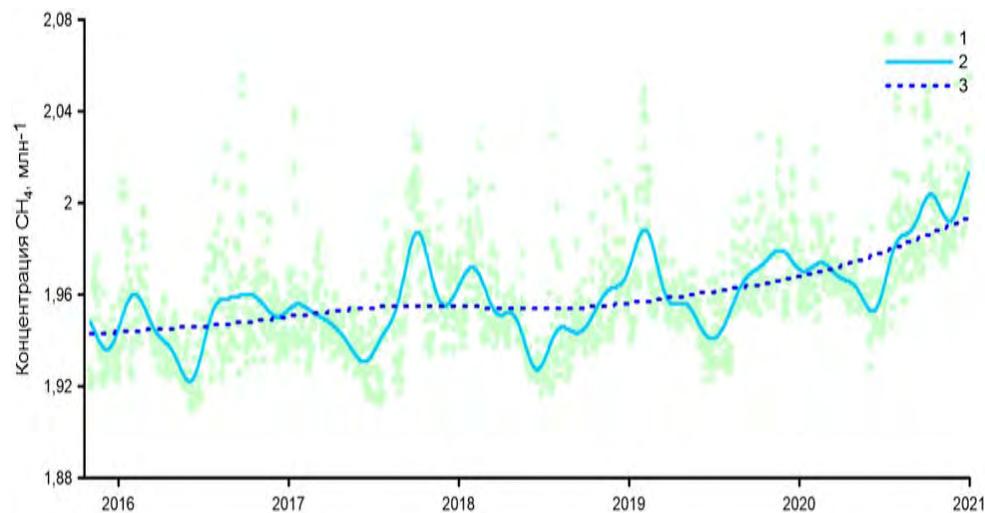
Алерт



Барроу

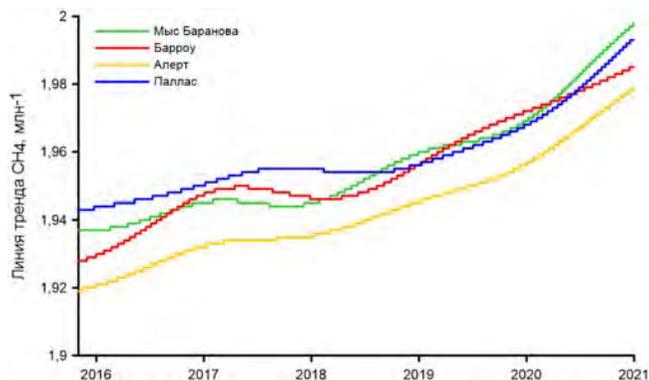


Паллас



Межгодовая изменчивость метана, где 1 – среднесуточные значения концентрации CH_4 , 2 – сезонный ход, 3 – линия тренда

Среднегодовые значения CH_4 , млн⁻¹

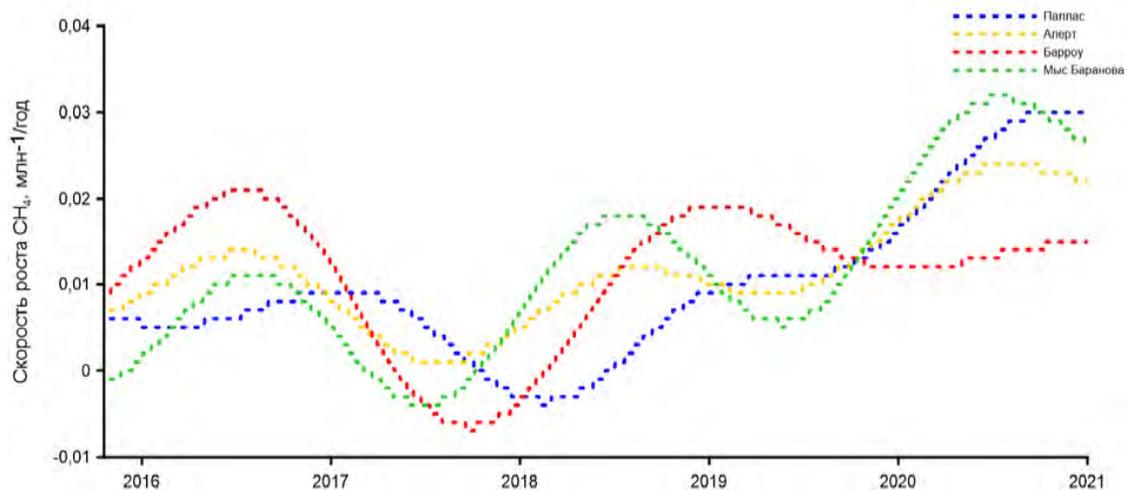


Линии тренда

Год	Мыс Баранова	Алерт	Барроу	Паллас	Бюллетень ВМО
2016	1.940±0.002	1.926±0.002	1.938±0.001	1.946±0.001	1.853±0.002
2017	1.945±0.003	1.933±0.002	1.945±0.001	1.951±0.001	1.859±0.002
2018	1.952±0.002	1.941±0.002	1.954±0.001	1.952±0.002	1.869±0.002
2019	1.963±0.003	1.950±0.002	1.964±0.001	1.962±0.001	1.877±0.002
2020	1.983±0.003	1.968±0.002	1.978±0.002	1.979±0.002	1.889±0.002

Среднегодовой прирост CH_4 , млн⁻¹/год

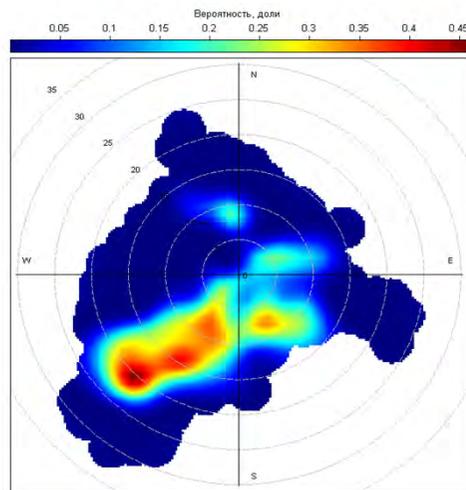
Год	Мыс Баранова	Алерт	Барроу	Паллас	Бюллетень ВМО
2016	$(9.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	$(12.3 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	$(18.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(9.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$
2017	$(-0.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(3.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	$(-0.9 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$	$(4.3 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
2018	$(14.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(10.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	$(9.5 \pm 0.7) \cdot 10^{-3}$	$(1.2 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$
2019	$(7.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	$(9.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}$	$(17.7 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}$	$(12.2 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
2020	$(28.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(22.3 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	$(13.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}$	$(25.7 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-3}$



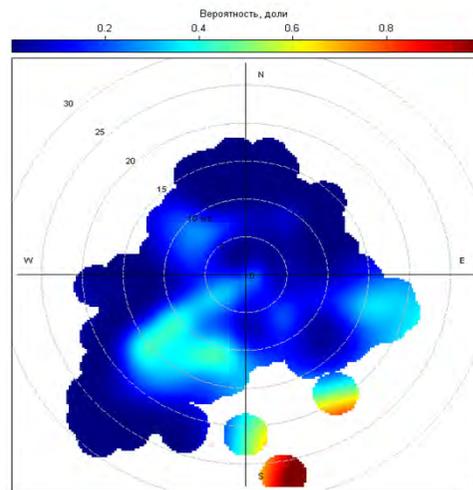
Среднегодовой прирост CH_4 на станциях мониторинга

Вероятностная модель для определения очагов переноса повышенных концентраций

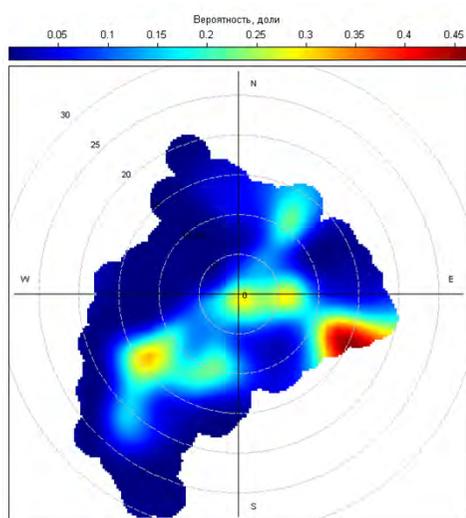
а)



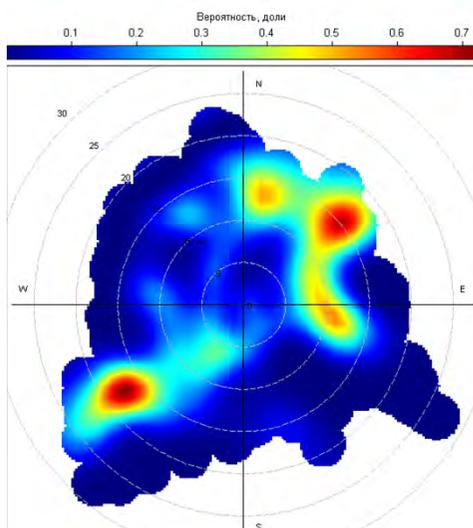
б)



в)



г)



Условная вероятность:

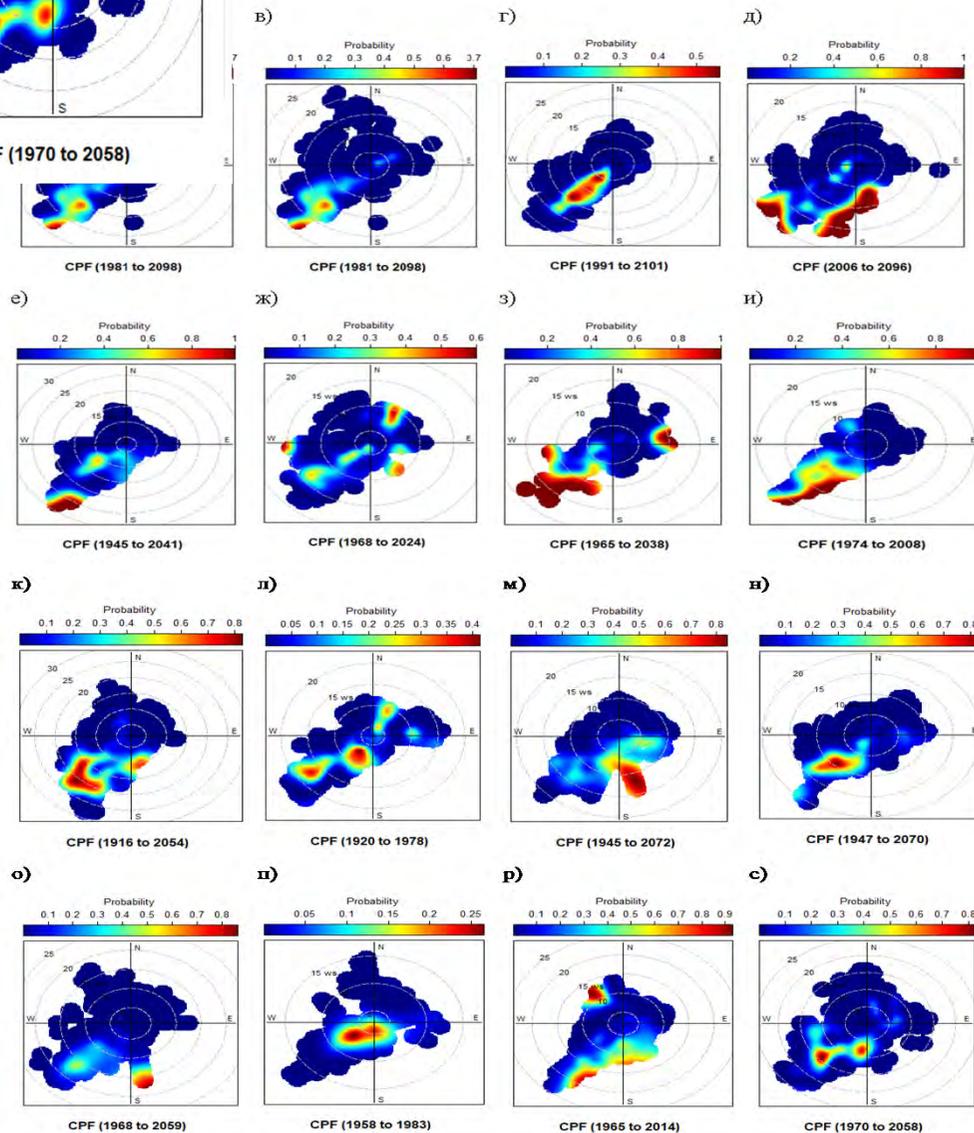
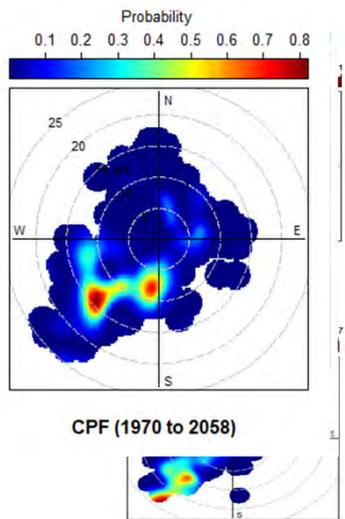
$$CPF = \frac{m_{i,j}}{n_{i,j}}$$

где $m_{i,j}$ – количество попаданий концентраций газа выше заданного порога, в то время как $n_{i,j}$ – общее число прихода концентраций из того же интервала по скорости и направлению ветра (Ashbaugh et al., 1985).

Верхний порог – 80%-й квантиль

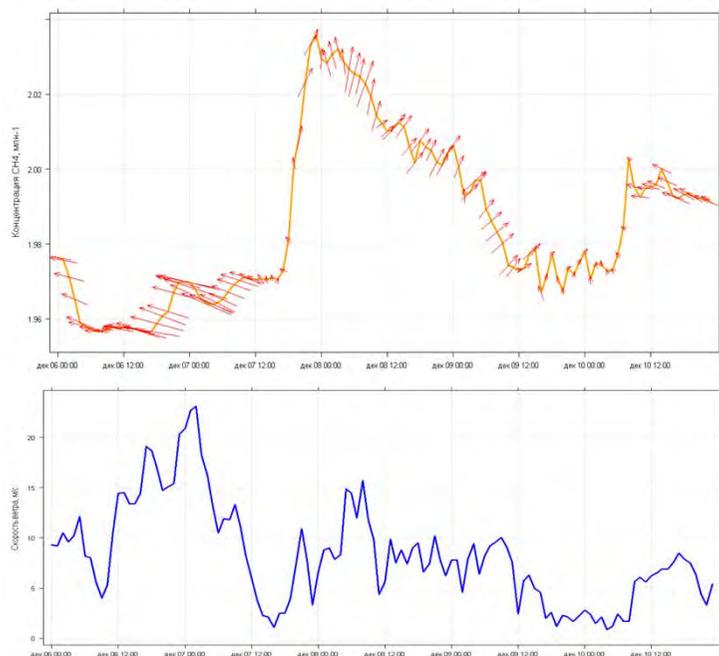
Применение вероятностной модели для анализа переноса повышенных концентраций метана показало прямую зависимость с местной орографией в холодное время года (зима, осень). Концентрации этих газов выше 80%-го квантиля в это время приходят только при сильных ветрах (от 15 м/с) юго-западного направления. Летом и осенью появляются очаги повышенных концентраций метана при северо-западных и северо-восточных направлениях ветра, причем они находятся не при самых высоких скоростях, в диапазоне 7 – 15 м/с, что вероятно может быть связано с какими-либо локальными источниками, либо особенностями циркуляции в теплый период. Повышенные концентрации при юго-восточном и южном направлении ветра наиболее вероятно связаны с континентальным переносом.

Результаты вероятностной модели относительно распределения метана (в млн⁻¹) в районе НИС по сезонам: а – зима; б – весна; в – лето; г – осень. В скобках – концентрации CH₄ с 80% по 100% квантилей.

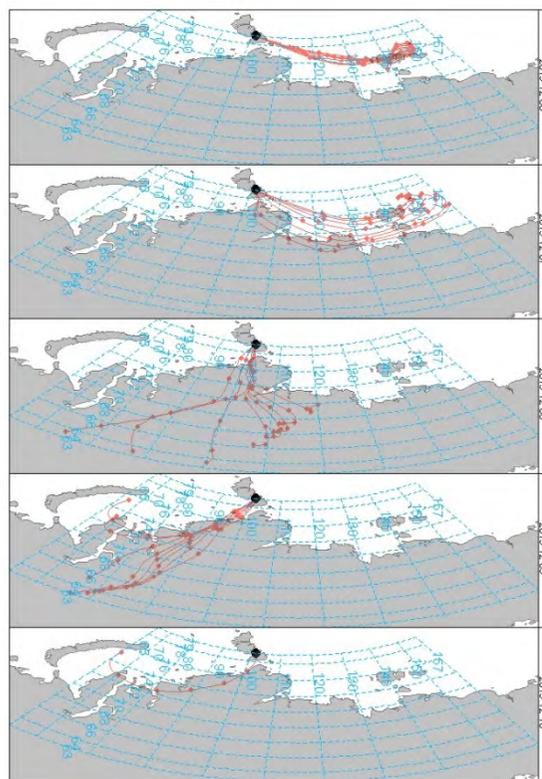


Результаты вероятностной модели относительно распределения метана (в млрд⁻¹) в районе НИС:
 а – зима 2015 года;
 б, в, г, д – зимы 2016 – 2019 гг.;
 е, ж, з, и – весна 2016 – 2019 гг.;
 к, л, м, н – лето 2016 – 2019 гг.;
 о, п, р, с – осень 2016 – 2019 гг.

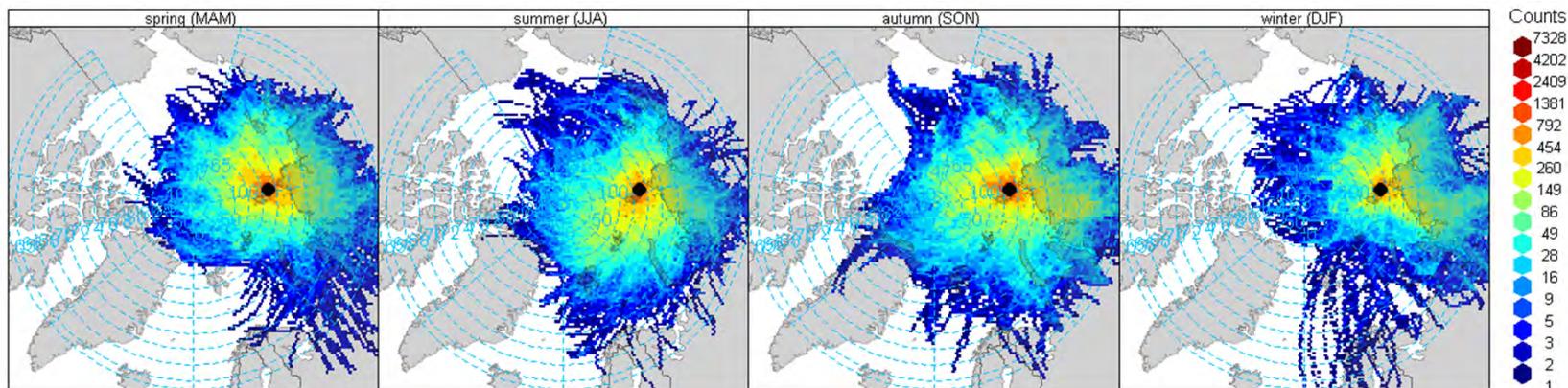
Эпизод с повышением концентрации CH_4 8 – 9.12.2019 г.



Вверху: рост концентрации CH_4 с уровня 1.97 до 2.03 $млн^{-1}$ за 08.12.19 г.; красные стрелки – направление ветра. Внизу: скорость ветра, м/с. Справа: обратные траектории HYSPLIT за 8-9.12.19 г.



Приведён эпизод повышения концентрации метана в период с 8 по 9 декабря 2019 г., когда за несколько часов она выросла на 0.06 $млн^{-1}$. Такой резкий рост был связан с приходом воздушных масс с континентальных районов Западной Сибири (8-9 декабря). Как показали обратные траектории, до этого на станцию приходили воздушные массы с побережья СЛО (6-7 декабря). При смене воздушных масс на станции была также зафиксирована резкая смена направления ветра с юго-восточного на юго-западный. Скорость ветра опустилась с 20 м/с до 10 м/с. Поскольку станция «Мыс Баранова» является удаленной от промышленных источников загрязнения, влияние континентального переноса оказывается достаточно велико. Анализ обратных траекторий за 2015 – 2020 гг. (частотный анализ пакета Openair, **Ropkins, K. and Carslaw, D., 2012**) показывает, что зимой частоты прихода континентальных воздушных масс несколько выше, чем в другие сезоны.

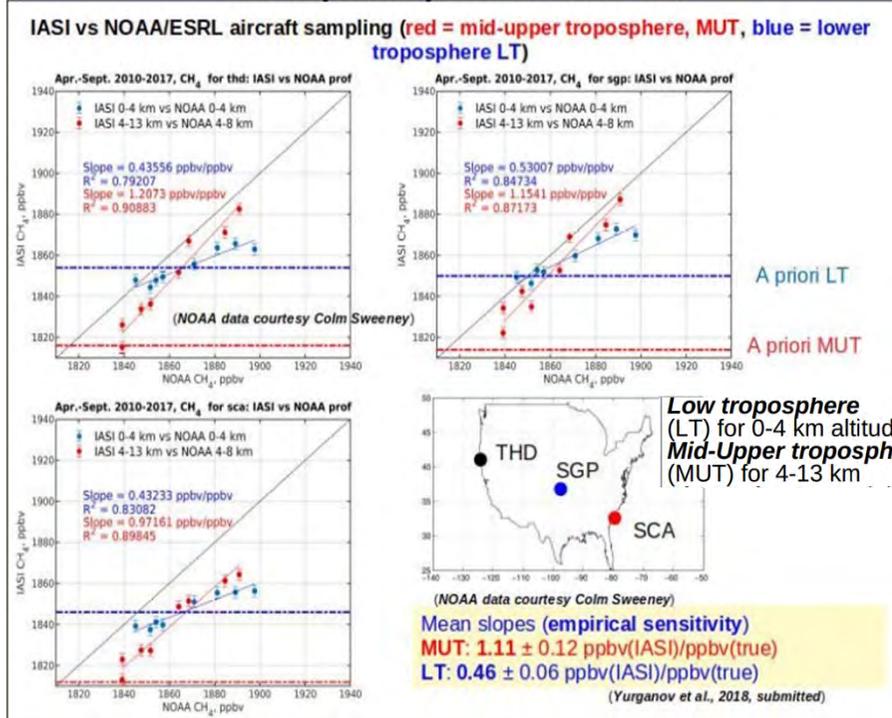


Частоты прихода воздушных масс на станцию «Мыс Баранова» (отмечена черным кругом) с гексагональных ячеек по результатам анализа обратных траекторий за 2015 – 2020 гг.

IASI-1 (Infrared Atmospheric Sounder Interferometer) is a polar orbiting instrument deployed on European MetOP-A satellite. It looks downward (*nadir*) with a plus/minus 1100 km swath from the track. Space nadir resolution is 12 km, effective resolution 24x24 km. It revisits high latitude sites at least twice daily, at ~9:30 am and ~9:30 pm of local time.

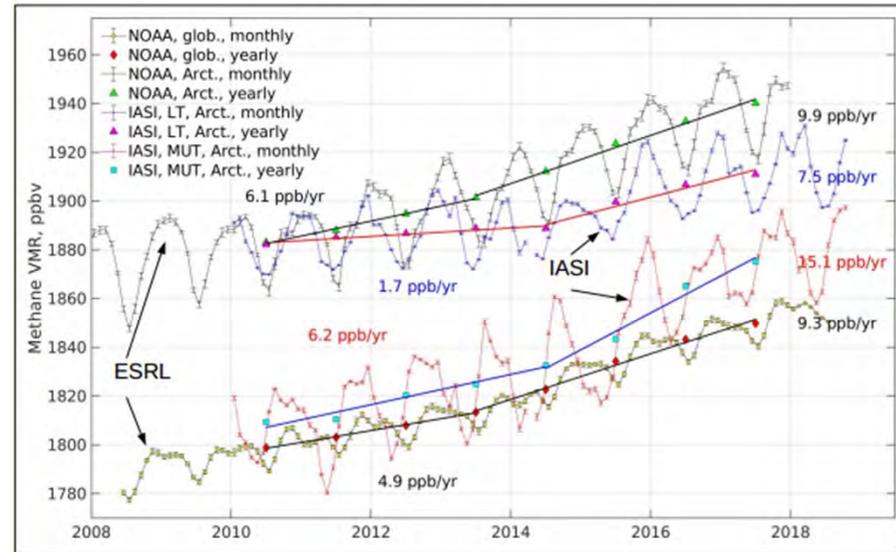
VALIDATION USING NOAA AIRCRAFTS

Ideal sensitivity (slope of a regression line) = 1.0 ppb/ppb
Sensitivity to LT is just a half of that to MUT



RECENT GLOBAL AND ARCTIC METHANE TRENDS

Note an acceleration in 2013-2014
(lines of linear regression are plotted for annual means)



Monthly and annual means.

NOAA/ESRL data for surface sampling in the Arctic (upper curve, 10 coastal stations) and global (lower curve). IASI [50° N-85° N] data for LT (upper curve) and MUT (lower curve). A more gradual trend for LT is explained by a lower sensitivity of IASI to LT (see validation). Yurganov et al. (2017).

Yurganov L. et al., 2018. *SATELLITE YEAR-ROUND METHANE MEASUREMENTS FOR THE ARCTIC: TOWARDS ELUCIDATION OF METHANE GROWTH AFTER 2014.*

Заключение

- проведенная процедура по сопоставимости данных ВМО подтвердила исправность используемого на НИС газоанализатора Picarro G2401. Все калибровочные значения по метану укладываются в заданные ВМО рамки (± 0.002 млн⁻¹);
- за рассматриваемый промежуток времени прослеживаются положительные тренды: среднегодовой прирост метана за пятилетний период на ЛБ Мыс Баранова составил 11.7 ± 0.5 млрд⁻¹/год, причём максимальный прирост наблюдался с 2019 по 2020 гг., как и на станциях Алерт и Паллас (порядка 20 млрд⁻¹/год). 2017-й год отличается наличием отрицательного прироста метана на станциях ЛБ Мыс Баранова и Барроу;
- по данным о среднегодовом приросте нельзя сделать выводы об устойчивом росте концентраций метана ни для одной станции, хотя среднегодовые значения метана на всех станциях демонстрируют устойчивый рост из года в год. Среднегодовое значение на ЛБ Мыс Баранова за пятилетний период составило 1956 ± 21 млрд⁻¹;
- амплитуда годового хода метана на всех станциях находится в пределах 0.04 – 0.07 млн⁻¹. Годовой минимум метана на ЛБ Мыс Баранова и станции Алерт наблюдается в среднем на 190 сутки, в Палласе и Барроу - он наступает на 30-40 дней раньше;
- показатели среднегодовых значений метана, приведенные в Бюллетенях ВМО по парниковым газам за 2016 – 2020 гг., во все годы ниже рассчитанных среднегодовых значений на станциях;
- удалённое от промышленных источников расположение станции делает её чувствительной к приходу континентальных воздушных масс.

Библиография

1. Reum F., Gockede M., V.Lavric J et al. Accurate measurements of atmospheric carbon dioxide and methane mole fractions at the Siberian coastal site Ambarchik. // Atmos. Meas. Tech., 2019. Vol. 12, P. 5717 – 5740.
2. Thoning K.W., Tans P.P., and Komhyr W.D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974 – 1985.// J. Geophys. Res. Atmospheres, 1989. Vol.94, No. D6, P. 8549 – 8565.
3. Openair – Data Analysis Tools for the Air Quality Community. Ropkins, K. and Carslaw, D. // The R Journal, V.4, 2012.
4. Ashbaugh L. L, Malm W.C. and Sadeh W.Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at Grand Canyon National Park. // Atmospheric Environment, 1985. Vol. 19.8, P.1263–1270. DOI: 10.1016/0004-6981(85)90256-2
5. World Meteorological Organization Greenhouse Gas Bulletin, 2020. Vol. 16, P. 1-9.
6. World Meteorological Organization Greenhouse Gas Bulletin, 2017. Vol. 13, P. 1-8.
7. World Meteorological Organization Greenhouse Gas Bulletin, 2018. Vol. 14, P. 1-8.
8. World Meteorological Organization Greenhouse Gas Bulletin, 2019. Vol. 15, P. 1-8.
9. World Meteorological Organization Greenhouse Gas Bulletin, 2021. Vol. 17, P. 1-10.
10. Andrews A.E. et al. CO₂, CO and CH₄ measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts. // Atmos. Meas. Tech., 2014. Vol. 7, P. 647 – 687.

Автор выражает благодарность:

Махотиной И.А. – за предоставленные данные о стратификации приземного слоя
Т. Лаурила, Э. Асми – за консультации по работе с прибором Picarro G2401 и обработке получаемых данных

Работа выполнена в рамках ЦНТП Росгидромета 1.5.3.3.