

Двадцатая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

Обнаружение пространственно-временных аномалий эмиссий метана на постпожарных территориях в зоне вечной мерзлоты приарктических территорий с использованием данных ДЗЗ

Черепанова Е.В., Феоктистова Н.В.

Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»
Москва, 2022

Введение

В последние десятилетия было зафиксировано множество эпизодов выбросов эмиссий метана как на Арктическом шельфе, так и на суше, предположительно связанных с резким потеплением в Арктике, и, как следствие, с активизацией процессов дестабилизации вечной мерзлоты и высвобождения залежей метана [Анисимов О. А. и др., 2020; Богоявленский В.И. и др., 2020; Семилетов И.П. и др., 2019; Chuvilin E, 2020; Jin, 2021; Natali M, 2021]. На севере Западной Сибири аномалии эмиссий метана чаще всего носят очаговый и периодический характер и вызваны смешанным природно-антропогенным воздействием, так как обнаруживаются в зоне разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений.

По мнению многих исследователей значительное повышение летних температур до 38°C , а также ежегодный рост числа и интенсивности пожаров на приарктических территориях Восточной Сибири, наблюдаемых с 2018 года, могут приводить к площадным аномальным эмиссиям метана не только во время пожаров, но также к долгосрочным выбросам в последующие сезоны и годы в результате деградации вечной мерзлоты и динамики рельефа наземных экосистем [Бондур, Гинзбург, 2016; Бондур и др., 2016, 2020 (а,б); Воронова и др., 2020; Jin, 2021, Köster, 2018, Ponomarev E, 2020].

Актуальность обнаружения аномалий эмиссий метана связана с тем, что его долгосрочные выбросы на территориях, пройденных огнем и подверженных ускоренным процессам деградации мерзлоты, должны быть учтены при расчетах глобального бюджета выбросов и стоков парниковых газов. Кроме того, они важны также для понимания круговорота углерода на планете в целом. В настоящее время, в большинстве моделей такие источники эмиссий метана либо не учитываются, либо рассчитываются на основе косвенных модельных оценок.

Из-за относительного невысокого пространственного разрешения существующих спутниковых систем мониторинга парниковых газов и ограничений в их использовании для высоких широт, большинство исследований посвящено анализу глобального распределения концентраций метана над арктическими территориями см., например, работы [Анисимов, 2015, Zou M, 2019].

Обнаружение пространственно-временных аномалий эмиссий метана на постпожарных территориях в зоне вечной мерзлоты приарктических территорий по данным ДЗЗ связано с необходимостью последовательного поиска аномалий концентраций метана на глобальном и региональном уровнях, что предопределяется особенностями расположения территории, основными из которых являются значительные площади и высокие широты рассматриваемых траекторий.

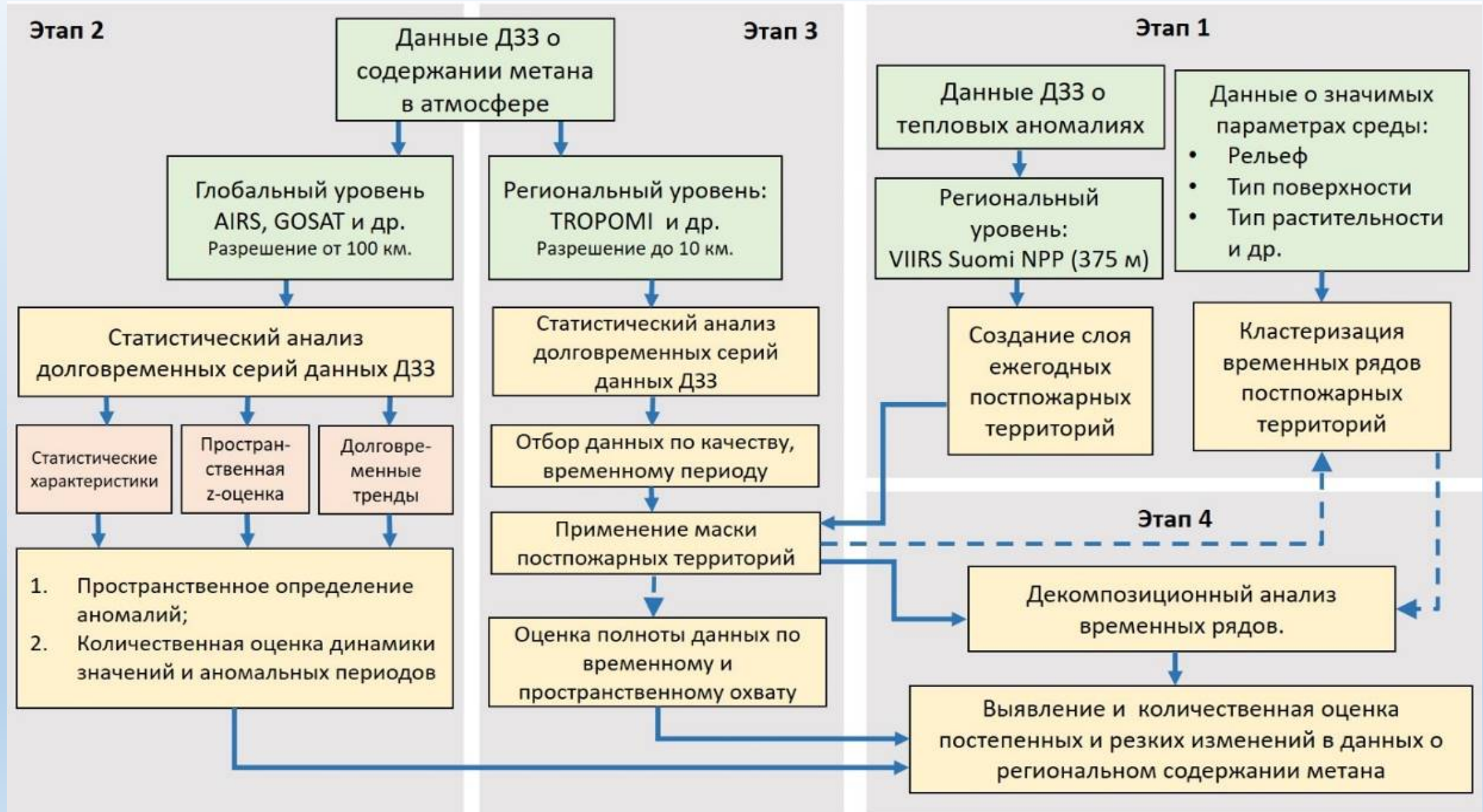
В данной работе впервые предлагается использовать региональный уровень исследования динамики концентраций метана по спутниковым данным для выгоревших территорий с площадью не менее 1000 кв.км, расположенных севернее 62 широты в зоне вечной мерзлоты.

Это обусловлено следующими обстоятельствами:

- современным развитием способов и алгоритмов получения и восстановления значений тропосферных концентраций метана по спутниковым данным;
- наличием более качественных и валидированных спутниковых данных низкого пространственного разрешения;
- относительно короткими временными рядами, слабой валидацией и неопределенностью качества спутниковых данных более высокого пространственного разрешения, доступных в последние 5 лет.

Такой подход позволяет с привлечением современных средств дистанционного зондирования Земли и методов обработки данных обнаружить аномалии концентраций метана над выгоревшими территориями, которые в дальнейшем могут быть сопоставлены с результатами мониторинга постпожарных территорий для уточнения причин обнаруженных аномалий.

Блок-схема метода обнаружения пространственно-временных аномалий эмиссий метана на постпожарных территориях в зоне вечной мерзлоты



Определение границ территорий для анализа пространственно-временных аномалий эмиссий метана на глобальном и региональном уровнях (Этап 1)

Предложенный метод реализуется, исходя из условия, что границы территорий, на которых проводится поиск аномалий эмиссий метана, предопределены на глобальном и региональном масштабах. Так, на глобальном уровне рассматриваются границы зоны распространения многолетнемерзлых пород, простирающиеся на значительные площади в Сибири и Дальнем Востоке.

Границы выгоревших территорий могут быть восстановлены по ежедневным спутниковым данным на основе продуктов о тепловых аномалиях, как например, MOD 14 (1 км) [Giglio, 2015a] или VIIRS Activefire (375 м) [Schroeder, 2014], либо по ежемесячным продуктам о горячах, учитывающих изменения растительного покрова в допожарный и послепожарный период, как например, данные MCD 64 Burned Area (500 м) [Giglio L., 2015 b] или VIIRS NPP 64 Burned Area (500 м) [Giglio L., 2019].

Продукты о горячах имеют нестабильное качество данных в высоких широтах, потому в качестве источника данных нами был выбран продукт VIIRS Activefire, так как он имеет лучшее пространственное разрешение по сравнению с продуктом MOD 14.

Выявление пространственно-временных аномалий содержания метана на глобальном уровне (Этап 2)

На глобальном уровне (вся зона вечной мерзлоты приарктических территорий Российской Федерации) анализируются осредненные продукты 3-го уровня обработки (Level 3) спутниковых данных с пространственным разрешением более 100 км, например, данные GOSAT или AIRS. По долговременным сериям (не менее 10 лет) рассчитываются осредненные попиксельные и региональные статистические характеристики распределения концентраций CH₄ (срок жизни в тропосфере порядка 12 лет [IPCC, 2013]), такие, как среднее, стандартное отклонение, стандартизированная оценка и др.

Определяются тренды динамики концентраций метана, а также выявляются пространственные и временные закономерности возникновения аномалий концентраций метана над изучаемым регионом за исследуемый период.

Для оценки статистической значимости направленных межгодовых изменений концентраций метана используется непараметрический сезонный ранговый тест Манна-Кендалла, который широко применяется для исследования гидрологических и климатических временных серий, имеющих сезонные колебания, в том числе, полученных по космическим данным

Предобработка спутниковых данных для постпожарных территорий (Этап 3)

Обнаружение аномалий концентраций тропосферного метана на региональном уровне проводится непосредственно над постпожарными территориями с использованием ежедневных или осредненных продуктов спутниковых данных (2-й уровень обработки) с пространственным разрешением лучше 10 км.

В настоящее время существует ограниченное число общедоступных спутниковых данных, позволяющих измерять концентрации метана (общее содержание в тропосфере) с пространственным разрешением лучше 10 км. При этом для приарктических территорий доступны данные, поступающие только со спутника Sentinel5 /TROPOMI, запущенного в эксплуатацию с 2018 г. [Lorente, 2021]. Аномалии эмиссий метана, обнаруженные по спутниковым данным на региональном уровне, могут возникнуть по различным причинам, включая:

- ошибки в данных;
- изменение альbedo подстилающей поверхности в результате пожаров;
- активные эмиссии в период горения территории;
- пассивные эмиссии в результате деградации вечной мерзлоты

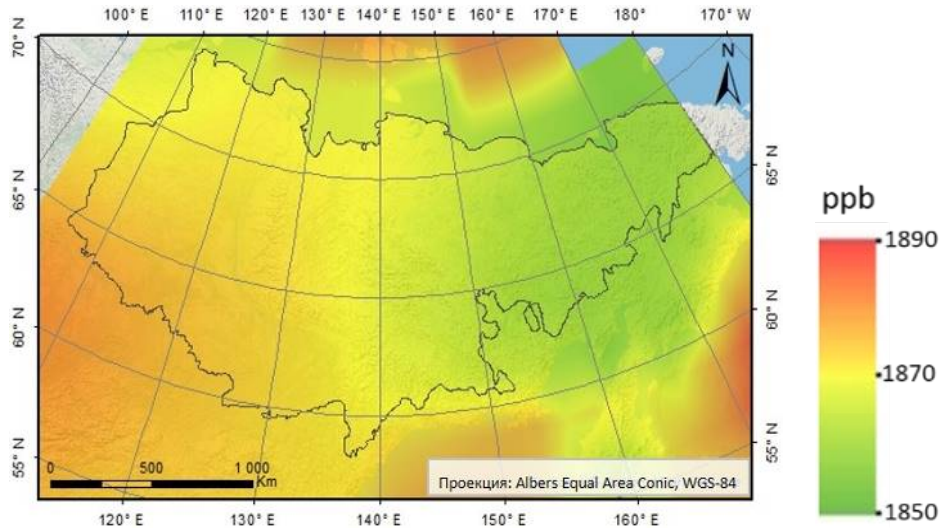
Выявление пространственно-временных аномалий содержания метана для постпожарных территорий на региональном уровне (Этап 4)

На региональном уровне выбор подхода для анализа временных данных направлен на обнаружение и исследование аномальной серии значений концентраций метана в постпожарный период по сравнению с допожарным периодом, а также для выявления возможных постепенных и резких изменений концентраций метана в постпожарный период для определенной территории.

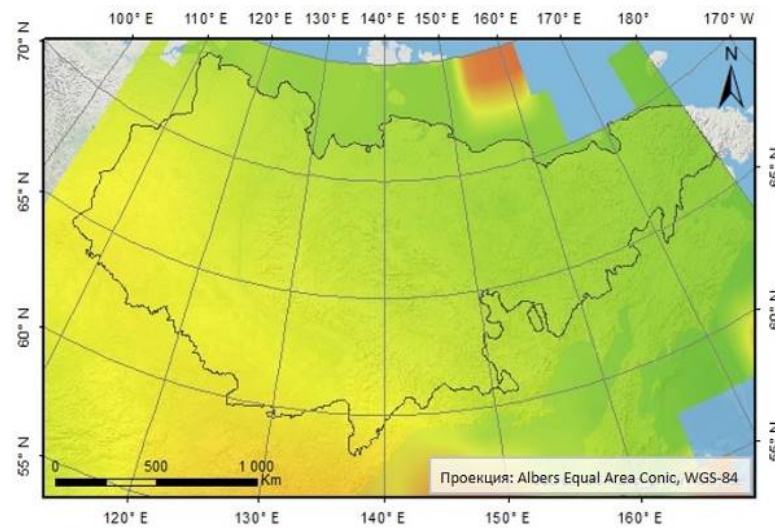
Одним из базовых подходов для обнаружения аномалий концентраций метана над горящими территориями может быть выбран подход, при котором на первом этапе проводится декомпозиция временных рядов с помощью метода LOESS (STL) [Cleveland RB, 1990], в котором используются локально подобранные модели для разложения временного ряда на компоненты тренда, сезонности и остатка.

Пространственная составляющая при обнаружении аномалий концентраций над горящими территориями может быть учтена путем решения задачи кластеризации временных рядов, в рамках которой все горящие территории разделяются на отдельные группы в зависимости от местоположения, типа местности и рельефа и других значимых параметров. В этом случае, поиск аномалий концентраций внутри сезона может быть уточнен для каждой группы.

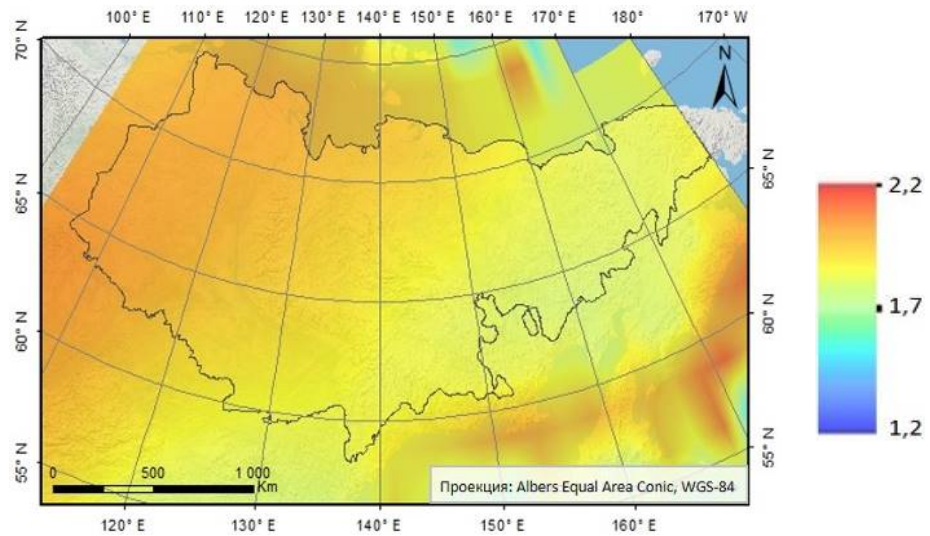
Пространственное распределение усреднённых за месяц значений концентрации CH₄ и стандартизованная оценка (Z-оценка) этих значений для территории распространения многолетней мерзлоты в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке в июле 2021 года и сентябре 2020 года.



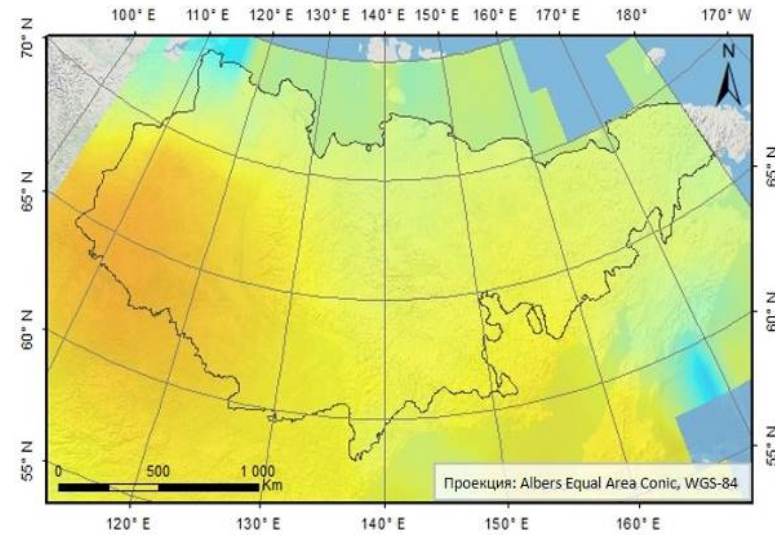
GOSAT FTS SWIR L3 CH₄ июль 2021 г.



GOSAT FTS SWIR L3 CH₄ сентябрь 2020 г.



Z-оценка июль 2021 г.

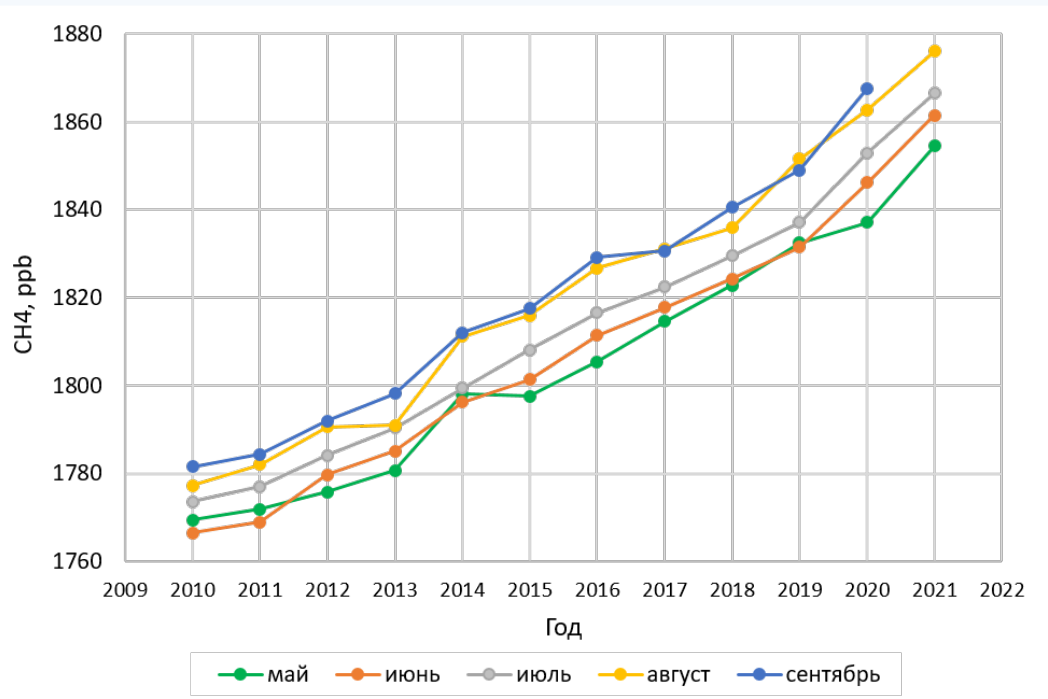


Z-оценка сентябрь 2020 г.

□ Границы области постоянной вечной мерзлоты в пределах Якутии и Чукотки по данным Climate Research Data Package (CRDP v.2), 2019.

Чтобы оценить пространственно-временные изменения концентрации метана за указанный период была рассчитана Z-оценка для каждого пикселя для данных 2020 и 2021 гг. Пороговые значения Z-оценки от 1 до 2 говорят о значительном отклонении от среднего. Территории, на которых эта оценка близка к 2, либо выше могут считаться потенциально аномальными.

Значения Z-оценки, равные 2, были зарегистрированы, например, в сентябре 2020 года (см. рисунок 1.50 г) и июле 2021 года (см. рисунок 1.50 в) в западной части Якутии. Положительные значения Z-оценки в границах всего региона указывают на то, что концентрации метана за рассматриваемый период только нарастали.

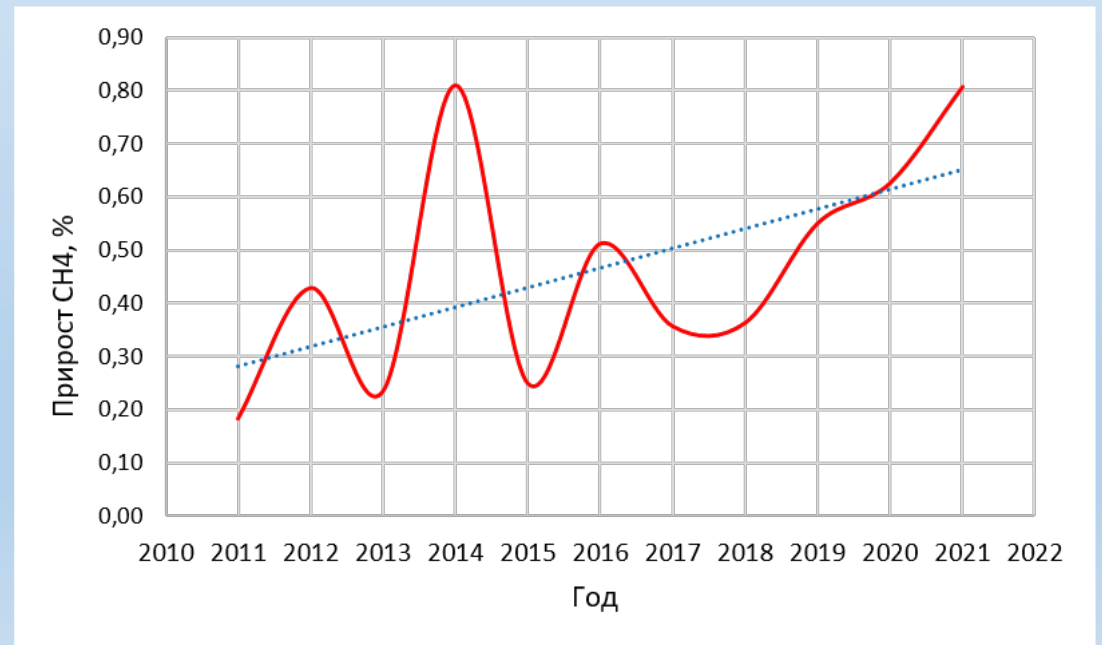


Средние концентрации CH₄ по данным GOSAT за пожароопасный период (май-сентябрь) с 2010 по 2021 годы над зоной постоянной вечной мерзлоты в границах Якутии и Чукотки

Усредненные за май-сентябрь значения концентрации CH₄ (ppb) и показатели линейной регрессии

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Среднее	1773.7	1776.8	1784.5	1789.1	1803.4	1808.1	1817.8	1823.3	1830.6	1840.4	1853.3	1864.6
slope	3.5	3.8	4.3	4.1	4.3	5.4	6.3	4.6	4.7	5.3	7.7	7.0
R2	0.8488	0.8486	0.9744	0.9562	0.7981	0.9689	0.9748	0.9315	0.9689	0.8033	0.9916	0.9850

Наибольшие значения концентрации CH₄ характерны для августа и сентября. Диапазон разброса значений между маем и августом составляет 15 – 30 ppb/год. Рост значений концентрации CH₄ имеет линейный характер (коэффициент детерминации $R^2 \sim 0.98$), а наибольшая скорость увеличения концентрации метана (коэффициент регрессии - slope) наблюдается в августе. Из таблицы видно, что растет не только концентрация метана, но и увеличивается скорость роста концентрации с годами. Также наблюдается сезонность, при которой концентрации метана постоянно нарастают в период с мая по сентябрь.



Для обнаружения аномальных значений концентраций над гарями были выбраны 4 крупных участка, выгоревших в 2020 году, границы которых были восстановлены по тепловым данным, полученных прибором VIIRS спутник Suomi NPP). Основные характеристики отобранных участков представлены в таблице.

Из представленных данных видно, что на севере в зоне лиственничных редколесий значительно больше площадей гарей, расположенных южнее. И хотя, мощность сезонно-талого слоя на севере существенно меньше, чем на более южных участках, обширные выгоревшие площади в пологосклонных и плоскодонных ложбинах (аласах) могут быть причиной более быстрых процессов деградации вечной мерзлоты.

На региональном уровне по ежедневным данным TROPOMI CH4 были рассчитаны среднемесячные попиксельные данные в пределах каждого участка за трехлетний доступный период наблюдений (2019 – 2021 гг).

Основные характеристики выбранных для исследования гарей

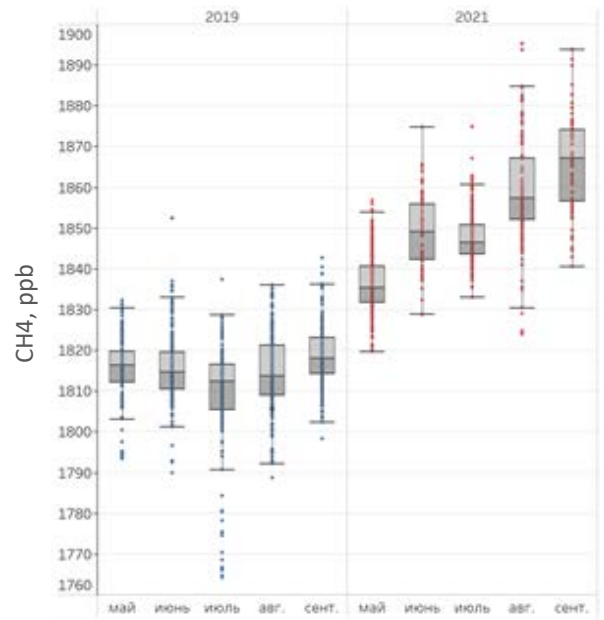
№ Участка гарей	Центральная координата полигона	Площадь	Описание
Участок 1	68.7 с.ш., 150.6 в.д.	5.5 тыс. кв. км.	Преимущественно лиственничные редколесья на аласных и межаласных структурах с высотами местности 50-70 м., мощность сезонно-талого слоя 0.6-0.8 м.
Участок 2	66.8 с.ш., 150.9 в.д.	3.6 тыс. кв. км.	
Участок 3	64.4 с.ш., 111.4 в.д.	2.9 тыс. кв. км.	Лиственничные леса, средние высоты местности 400-500 м., мощность сезонно-талого слоя 1.0-1.5 м.
Участок 4	64.4 с.ш., 123.4 в.д.	1.7 тыс. кв. км.	Лиственничные леса, средние высоты местности 150-200 м., мощность сезонно-талого слоя 1.2-1.7 м.

Динамика концентраций метана (ppb) над горями в допожарный (2019) и постпожарный (2020) год по спутниковым данным TROPOMI для тестовых участков

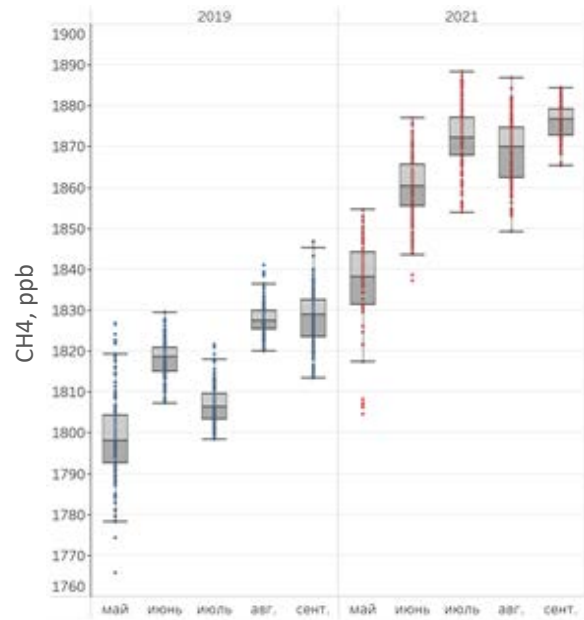
С использованием межквартильного метода были построены графики концентраций метана сезонного весенне-летнего хода за три года для выявления аномальных серий данных в постпожарный период. Из рисунка видно, что для всех исследуемых участков наблюдается меньший разброс значений для условно-фонового допожарного периода, чем для постпожарного периода.

Анализ рисунка показывает, что майские и июньские допожарные значения концентраций метана в 2020 году превышали значения для предыдущего года на 10 – 20 ppb. При этом на более северных участках №1 и №2 майские концентрации метана были даже ниже значений предыдущего года почти на 35 ppb. Однако в июле – августе 2020 года в период активного горения и сразу после наблюдается повышение значений на 20 – 40 ppb для всех участков. Также наглядно показаны колебания среднемесячных значений концентраций метана (ppb) для предпожарного (2019 г.) и послепожарного (2020 г.) года. Видно, что медианные значения концентраций метана в мае 2021 года превышают сентябрьские самые высокие значения для сезона 2019 года на всех участках. Также в 2021 году возросла амплитуда внутрисезонных колебаний концентраций по сравнению с 2019 годом.

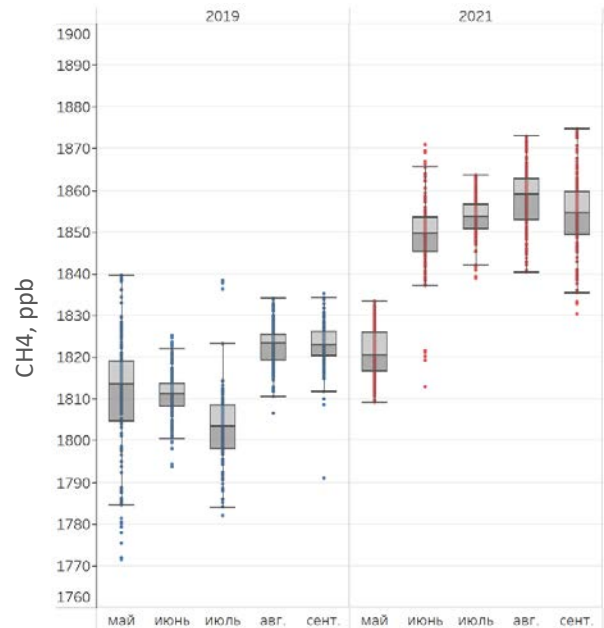
участок №1



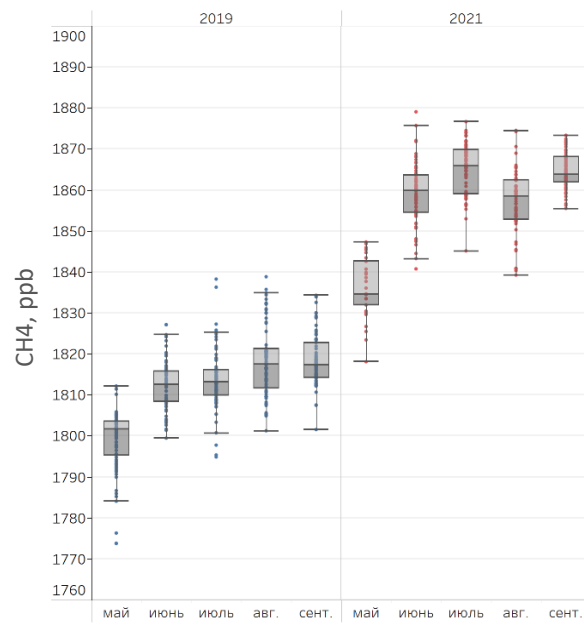
участок №3



участок №2



участок №4



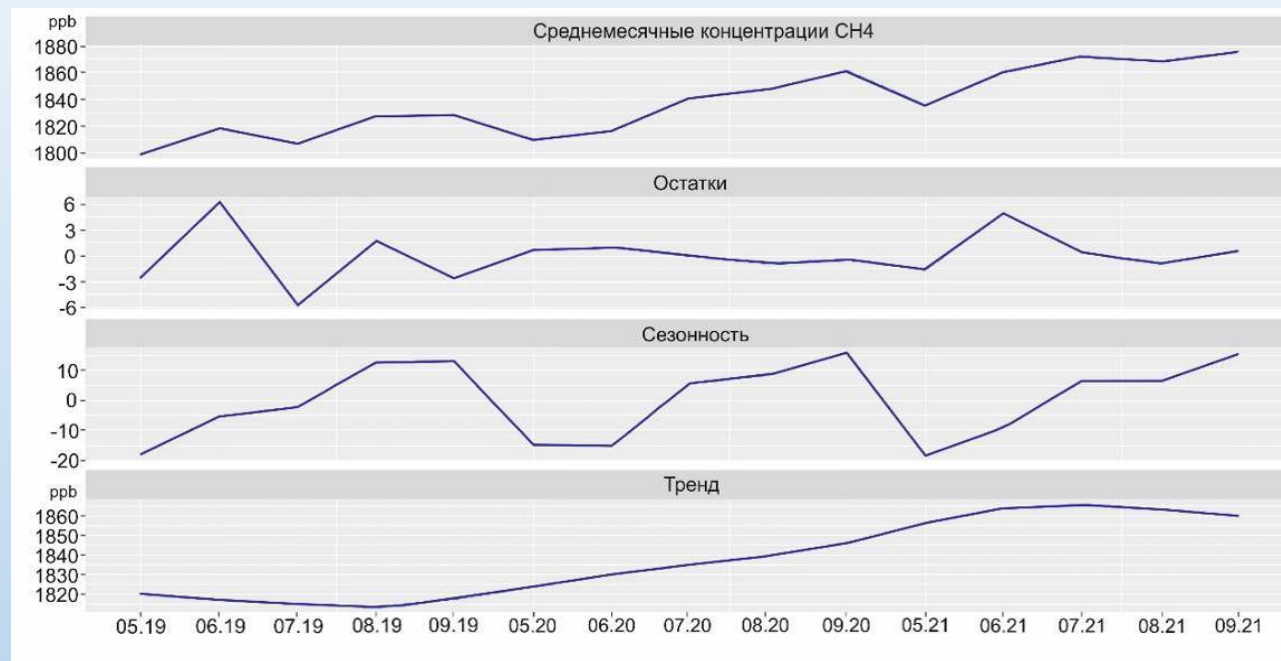
Для каждого участка временные ряды концентраций метана, обнаруженные по спутниковым данным, были проанализированы с помощью процедуры декомпозиции временного ряда на сезонную, трендовую составляющие и на остатки, использующую метод локальных регрессий (LOESS) [Cleveland RB, 1990].

На рисунке показан пример разложения временного ряда на сезонную и трендовую составляющую для участка №3.

Анализ рисунка показывает, что в трехлетних данных прослеживается четкая сезонная изменчивость с плавным повышением значений от мая до сентября. В 2020 году, когда выгорели участки, наблюдался более резкий аномальный рост значений концентраций от месяца к месяцу, по сравнению с предпожарным и послепожарным годом, что также отразилось в линии тренда.

Для проведения теста по поиску аномалий в данных случайной компоненты (остатках) необходим более длительный временной ряд наблюдений. Поэтому на данном этапе, можно только утверждать, что в среднем значения концентраций CH₄ в течение всего сезона в 2020 и 2021 гг. были значительно выше, чем в допожарный период.

Внутресезонная скорость прироста концентраций метана для всех участков была выше, чем для фонового допожарного года. Это указывает на аномальность концентраций метана над выгоревшими участками и, как следствие, на возможный вклад в высокие средние значения содержания метана в тропосфере на глобальном уровне.



Результат декомпозиции временного ряда среднемесячных данных TROPOMI CH₄, усредненных в границах участка №3 за трехлетний период с мая по сентябрь 2019-2021г.

Заключение

Полученные результаты указывают на то, что межгодовые изменения значений концентраций метана имеют ярко выраженную статистически значимую положительную тенденцию к монотонному нарастанию с каждым годом. А так как согласно полученной Z-оценке, в 2021 году отклонения от среднего за весь рассматриваемый период были практически равны $+2\sigma$, то можно предположить, что в целом по всей исследуемой территории наблюдается аномалия концентраций метана в общем столбе тропосферы. Монотонный характер возрастания концентраций указывает на то, что нормальность значений также смещается со временем, а показатель скорости роста изменений концентраций от сезона к сезону становится ведущим при определении аномальных концентраций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России в рамках соглашения №075–15–2020–776

Литература

1. О. А. Анисимов, С. А. Зимов, Е. М. Володин, С. А. Лавров Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 5. – С. 131-143
2. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Никонов Р.А., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. — 2020 — №3(39). — С. 6-22. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22.
3. И. П. Семилетов, О. В. Дударев, Н. Н. Дмитриевский и др. Изучение климатической роли деградации подводной мерзлоты как фактора массивированных выбросов основных парниковых газов в атмосферу над Восточно-арктическими морями России (78-й рейс НИС "академик Мстислав Келдыш") // Итоги экспедиционных исследований в 2018 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген: Материалы конференции: электронный ресурс, Москва, 18–19 февраля 2019 года. – Москва: Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН, 2019. – С. 157-173.
4. Chuvilin E, Ekimova V, Davletshina D, Sokolova N, Bukhanov B. Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic. *Geosciences*. 2020; 10(10):383. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100383>
5. Jin, H.; Ma, Q. Impacts of Permafrost Degradation on Carbon Stocks and Emissions under a Warming Climate: A Review. *Atmosphere* 2021, 12, 1425. <https://doi.org/10.3390/atmos12111425>
6. Natali M, Susan, Holdren P, John, Rogers M, Brendan, Treharne Rachael, Duffy Philip B., Pomerance Rafe, MacDonald Erin Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals. *Proceedings of the National Academy of Sciences* May 2021, 118 (21) e2100163118; DOI: 10.1073/pnas.2100163118
7. Бондур В.Г., Гинзбург А.С. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Доклады академии наук. 2016. Т. 466. № 4. С. 473-477. DOI: 10.7868/S0869565216040186
8. Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л. Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории северной Евразии по данным космического мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2016. №6. С. 3-20. DOI: 10.7868/S0205961416060105
9. Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л. Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исследование Земли из космоса. 2020 (а). № 4. С. 3-17. DOI: 10.31857/S0205961420040028.
10. Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А. Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденции 20-летних изменений // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020 (6), Т. 492, № 1, с. 99–106. DOI: 10.31857/S2686739720050047.
11. Воронова О.С., Зима А.И., Кладов В.Л., Черепанова Е.В. Аномальные пожары на территории Сибири летом 2019 года // Исследования Земли из космоса. 2020. № 1. С. 70–82.
12. Köster E., Köster K., Berninger F., Prokushkin A., Aaltonen H., Zhou X., Pumpanen J. Changes in fluxes of carbon dioxide and methane caused by fire in Siberian boreal forest with continuous permafrost. *Journal of Environmental Management*. 2018. 228. 405-415. DOI:10.1016/j.jenvman.2018.09.051.
13. Ponomarev E.; Masyagina O.; Litvintsev K.; Ponomareva T.; Shvetsov E.; Finnikov K. The Effect of Post-Fire Disturbances on a Seasonally Thawed Layer in the Permafrost Larch Forests of Central Siberia. *Forests* 2020, 11, 790. <https://doi.org/10.3390/f11080790>
14. Анисимов, О. А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере Российской части Арктики в условиях изменения климата / О. А. Анисимов, В. А. Кокорев // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 2. – С. 20. – DOI 10.7868/S0205961415020037.
15. Zou M, Xiong X, Wu Z, Li S, Zhang Y, Chen L. Increase of Atmospheric Methane Observed from Space-Borne and Ground-Based Measurements. *Remote Sensing*. 2019; 11(8):964. <https://doi.org/10.3390/rs11080964>

16. Giglio, L., C. Justice. MOD14A1 MODIS/Terra Thermal Anomalies/Fire Daily L3 Global 1km SIN Grid V006. 2015 (a), distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD14A1.006>. Accessed 2022-01-20.
17. Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., & Csiszar, I. A. (2014). The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 143, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008>
18. Giglio, L., C. Justice, L. Boschetti, D. Roy. MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006. 2015 (b), distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.006>. Accessed 2022-01-20.
19. Giglio, L.. VIIRS/NPP Burned Area Monthly L4 Global 500m SIN Grid V001. 2019, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/VIIRS/VNP64A1.001>. Accessed 2022-01-20
20. IPCC, 2013: Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Groups I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T.F., D. Qin, G.K. Plattner (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p
21. Militino, A.F.; Moradi, M.; Ugarte, M.D. On the Performances of Trend and Change-Point Detection Methods for Remote Sensing Data. *Remote Sens.* 2020, 12, 1008. <https://doi.org/10.3390/rs12061008>
22. Lorente, A., Borsdorff, T., Butz, A., Hasekamp, O., aan de Brugh, J., Schneider, A., Wu, L., Hase, F., Kivi, R., Wunch, D., Pollard, D. F., Shiomi, K., Deutscher, N. M., Velazco, V. A., Roehl, C. M., Wennberg, P. O., Warneke, T., and Landgraf, J.: Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 665–684, <https://doi.org/10.5194/amt-14-665-2021>, 2021.
23. Черепанова Е.В., Феоктистова Н.В., Чудакова М.А. Анализ по космическим данным TROPOMI аномалий концентраций метана над выгоревшими в 2018–2019 гг. территориями бореально-арктической зоны Восточной Сибири // Исследование земли из космоса. 2020. № 5. С. 63–77. DOI: 10.31857/S0205961420050048.
24. Cleveland RB, Cleveland WS, McRae JE, Terpenning I (1990) STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *J Off Stat* 6:3–73
25. Yang Y, Wang Y. Using the BFAST Algorithm and Multitemporal AIRS Data to Investigate Variation of Atmospheric Methane Concentration over Zoige Wetland of China. *Remote Sensing*. 2020; 12(19):3199. <https://doi.org/10.3390/rs12193199>
26. Verbesselt, J.; Hyndman, R.J.; Newnham, G.; Culvenor, D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sens. Environ.* 2010, 114, 106–115.
27. URL: <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/6e2091cb0c8b4106921b63cd5357c97c>
28. Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Nakatsuru, T., Yoshida, Y., Yokota, T., Wunch, D., Wennberg, P. O., Roehl, C. M., Griffith, D. W. T., Velazco, V. A., Deutscher, N. M., Warneke, T., Notholt, J., Robinson, J., Sherlock, V., Hase, F., Blumenstock, T., Rettinger, M., Sussmann, R., Kyrö, E., Kivi, R., Shiomi, K., Kawakami, S., De Mazière, M., Arnold, S. G., Feist, D. G., Barrow, E. A., Barney, J., Dubey, M., Schneider, M., Iraci, L. T., Podolske, J. R., Hillyard, P. W., Machida, T., Sawa, Y., Tsuboi, K., Matsueda, H., Sweeney, C., Tans, P. P., Andrews, A. E., Biraud, S. C., Fukuyama, Y., Pittman, J. V., Kort, E. A., and Tanaka, T.: Bias corrections of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ with TCCON data and their evaluation using aircraft measurement data, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 3491–3512, <https://doi.org/10.5194/amt-9-3491-2016>, 2016.(BIAS CORRECTED)