

Динамика эмиссии метана из водно-болотных угодий Западно-Сибирской равнины по данным TROPOMI за 2019–2025 гг.

О. С. Сизов

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, 119333, Россия

E-mail: kabanin@yandex.ru

Работа посвящена оценке пространственно-временной дифференциации эмиссии метана из водно-болотных угодий Западно-Сибирской равнины (ЗСР) за период 2019–2025 гг. Исходными данными служат измерения прибора TROPOMI (*англ.* TROPOspheric Monitoring Instrument) (спутник Sentinel-5P), маска болот CGLS-LC100 (*англ.* Copernicus Global Land Service Land Cover 100m), температура воздуха ERA5-Land (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis) и вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) на основе измерений сенсора MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Обработка выполнена на платформе Google Earth Engine. Для каждой из восьми природных зон рассчитано превышение концентрации метана над водно-болотными угодьями относительно неболотных территорий (ΔCH_4) по 42 месячным композитам средневзвешенной объёмной доли CH_4 в столбе сухого атмосферного воздуха (XCH_4) за тёплый сезон. Среднее значение ΔCH_4 по ЗСР составило 7,9 ppb. Максимум превышения приурочен не к зонам с наибольшей заболоченностью, а к южной (12,4 ppb) и средней (10,9 ppb) тайге — при сочетании обводнённости и летней температуры. Выявлен температурный лаг 1–2 мес. между максимумом приземной температуры и максимумом ΔCH_4 , а также широтный градиент сезонной фазы от августа в южной тайге к октябрю в северной с проявлением осеннего импульса эмиссии. В зоне распространения многолетнемерзлых пород (севернее $\sim 62^\circ$ с. ш.) ΔCH_4 снижается до уровня, сопоставимого с шумом, что отражает подавление метаногенеза криогенными условиями. Суммарная эмиссия CH_4 при площади водно-болотных угодий 673 тыс. км² оценена в 8,83 Тг/год (доверительный диапазон 5,3–12,3 Тг/год), из которых около 69 % приходится на таёжные зоны, а 36 % — на среднюю тайгу. Валидация результатов выполнена по наземным наблюдениям на станциях Мухрино, Бакчар и Зотино при ограниченной выборке синхронных измерений. Результаты могут служить основой для уточнения региональных оценок бюджета метана и построения зонально-дифференцированных прогнозов эмиссии парниковых газов в условиях климатических изменений.

Ключевые слова: TROPOMI, Google Earth Engine, Sentinel-5P, парниковые газы, CH_4 , эмиссия, водно-болотные угодья, Западная Сибирь

Одобрена к печати: 18.05.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-390-405

Введение

Метан (CH_4) — второй по радиационному воздействию парниковый газ после углекислого газа (IPCC..., 2021). Среднегодовая атмосферная концентрация CH_4 увеличилась с 1803 ppb (*англ.* parts per billion — частей на миллиард) в 2010 г. до 1920 ppb в 2023 г., причём темпы роста ускорились с 5–6 ppb/год в первой половине 2010-х гг. до 10–17 ppb/год в 2020–2022 гг. (Lan et al., 2024). Причины ускоренного роста остаются предметом дискуссии. В числе основных факторов рассматриваются усиление эмиссий из водно-болотных угодий тропической и бореальной зон, рост добычи и транспортировки углеводородов, а также расширение животноводства и рисоводства (Saunois et al., 2020).

Водно-болотные угодья следует считать крупнейшим по площади природным источником атмосферного метана — от 145 до 185 Тг CH_4 /год, или 20–30 % совокупных глобальных эмиссий (McNicol et al., 2023; Saunois et al., 2020). Метаногенез в торфяных почвах протекает в анаэробных условиях при участии метаногенных архей и определяется прежде всего температурой субстрата, уровнем грунтовых вод и доступностью органического вещества. Температурная чувствительность метаногенеза в бореальных торфяниках ($Q_{10} = 4...8$)

в 2–4 раза выше, чем в тропических болотах ($Q_{10} = 2...3$), что обуславливает потенциально более сильный отклик бореальных экосистем на повышение температуры (Segers, 1998; Durocher et al., 2014).

Западно-Сибирская равнина (ЗСР) представляет собой крупнейший болотный регион мира с общей площадью водно-болотных угодий, по различным оценкам, от 590 до 780 тыс. км², что составляет около 14–18 % глобальной площади торфяников (Glagolev et al., 2011; Terentieva et al., 2016; Xu et al., 2018). Мощность торфяных залежей достигает 10 м, а суммарные запасы углерода в торфах ЗСР оцениваются приблизительно в 70 Гт С (Sheng et al., 2004), что составляет около 12 % мирового пула торфяного углерода. Болотные экосистемы ЗСР расположены в восьми природных зонах — от тундры на севере до степи на юге, причём наибольшая концентрация верховых олиготрофных болот приурочена к средней и южной тайге (Лапшина, 2004; Лисс и др., 2001). Выровненный рельеф равнины и затруднённый сток создают условия для устойчивого заболачивания, а деградация вечной мерзлоты в северных зонах приводит к неуклонному расширению территории, потенциально вовлекаемой в активный метаногенез.

Существующие оценки суммарной эмиссии CH₄ из водно-болотных угодий ЗСР значительно отличаются. На основе модели Vc8 (*англ.* Bog Complex 8), построенной по результатам многолетних камерных измерений на 36 ключевых участках, получена оценка 2,93 Тг С-CH₄/год (3,91 Тг CH₄/год) (Glagolev et al., 2011). Инверсионная оценка, использующая атмосферные данные, составила 3,0 Тг CH₄/год (Kim et al., 2011). При этом глобальные карты водно-болотных угодий, применяемые в современных инверсионных моделях (Wetland CH₄ Area, Distribution, and Methane emissions (WAD2M); Climate Change Initiative Land Cover), систематически недооценивают площадь болот ЗСР: расхождение с региональными оценками достигает 87 % (Terentieva et al., 2016). Более поздние работы на основе данных международной сети измерений потоков метана FLUXNET-CH₄ (*англ.* Flux Network CH₄) дают суммарные значения 145–185 Тг CH₄/год для болот в глобальном масштабе (McNicol et al., 2023; Ying et al., 2025), однако вклад ЗСР до настоящего времени не определён из-за отсутствия наземных калибровочных станций с открытыми данными. Таким образом, ЗСР остаётся наименее изученным с точки зрения эмиссии метана регионом среди крупнейших болотных территорий мира.

Запуск спутника Sentinel-5P с прибором TROPOMI (*англ.* TROPOspheric Monitoring Instrument) в октябре 2017 г. открыл принципиально новые возможности для регионального мониторинга атмосферного метана. Прибор TROPOMI обеспечивает ежедневное глобальное покрытие с пространственным разрешением 5,5×7 км в коротковолновом инфракрасном диапазоне (2,3 мкм) и точностью единичного измерения средневзвешенной объёмной доли CH₄ в столбе сухого атмосферного воздуха (XCH₄) около 1 % (Lorente et al., 2021). Работы последних лет продемонстрировали практическую возможность измерений XCH₄ над крупными болотными массивами (Lindqvist et al., 2024), однако дистанционный анализ концентрации CH₄ над водно-болотными угодьями ЗСР не проводился.

Цель работы заключается в оценке динамики и пространственно-временной дифференциации эмиссии метана из водно-болотных угодий ЗСР по данным спутникового прибора TROPOMI за 2019–2025 гг. с учётом зональной структуры территории.

Территория, данные и методы исследования

Территория исследования. Западно-Сибирская равнина (площадь около 2,9 млн км²) занимает территорию от восточного склона Урала на западе до Енисея на востоке, от побережья Карского моря на севере до Казахского мелкосопочника на юге. В пределах равнины выделяются восемь природных зон, последовательно сменяющихся с севера на юг: тундра, лесотундра, северная тайга, средняя тайга, южная тайга, подтайга, лесостепь и степь. На *рис. 1* показаны границы зон, полученные на основе карты физико-географического районирования Национального атласа России (Национальный..., 2004), которые использовались для зонального анализа.

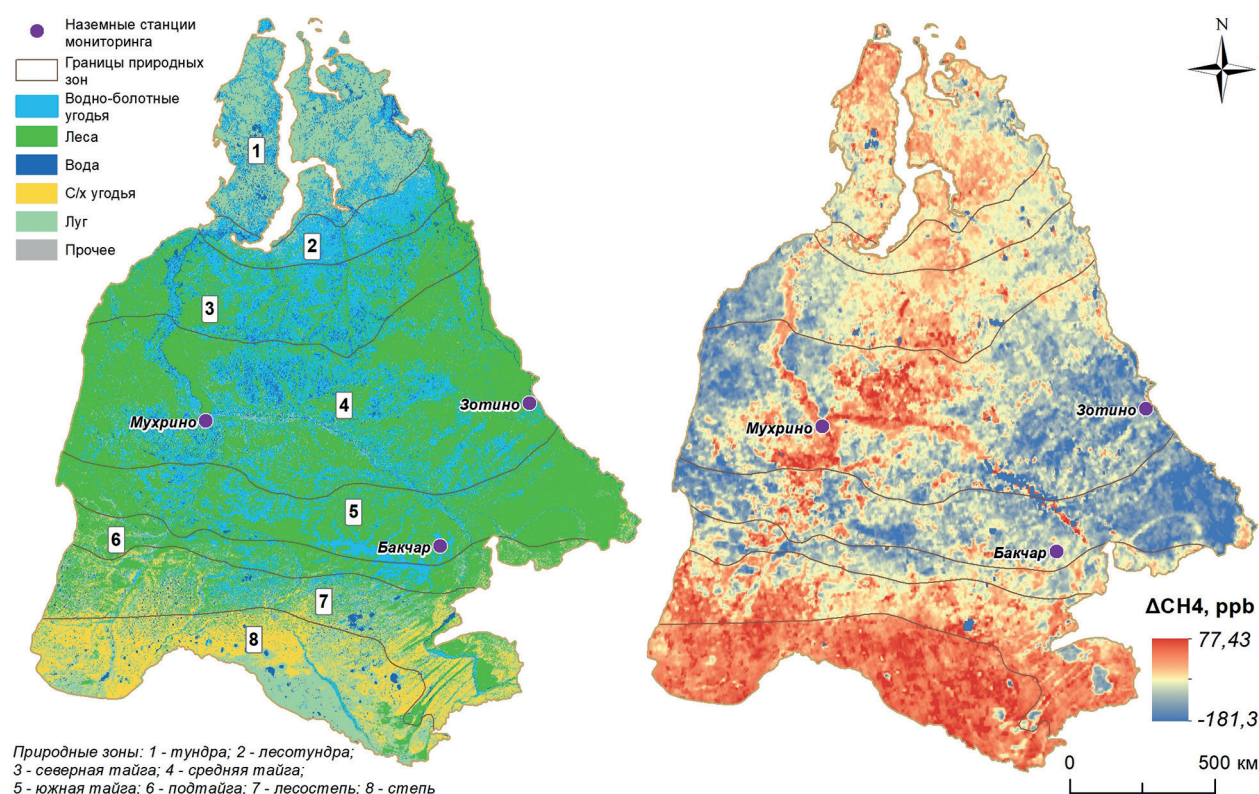


Рис. 1. Территория исследования: природные зоны (Национальный..., 2004) и типы земного покрова (Buchhorn et al., 2020) ЗСР (слева); превышение концентрации метана над водно-болотными угодьями относительно лесного фона (ΔCH_4) по данным TROPOMI/Sentinel-5P за сентябрь 2019–2025 гг. (справа)

Система водно-болотных угодий ЗСР — одна из крупнейших в мире по площади и запасам торфа (Xu et al., 2018). Доминирующим типом считаются верховые олиготрофные болота грядово-мочажинного комплекса, приуроченные преимущественно к средней и южной тайге (Лапшина, 2004; Лисс и др., 2001). Основными микроландшафтами болот ЗСР выступают гряды (кустарничково-сфагновые возвышенные элементы), мочажины (обводнённые понижения, заполненные осоками и сфагновыми мхами), рямы (облесённые сфагновые массивы) и озёрки (открытые водные участки) (Sabrekov et al., 2011). Вклад отдельных микроландшафтов в эмиссию CH_4 различается на порядки: по данным камерных измерений, медианный поток метана из мочажин средней тайги составляет $2,76 \text{ мг C-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, тогда как из гряд — лишь $0,09 \text{ мг C-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (Sabrekov et al., 2011, 2013). Таким образом, основным источником метана в пределах болотного пикселя представляются мочажины, занимающие, как правило, 30–50 % площади грядово-мочажинного комплекса.

Метаногенез в торфяной толще ЗСР лимитирован двумя основными факторами. В северных зонах (тундра, лесотундра) процесс сдерживается низкой температурой и наличием многолетней мерзлоты (мощность сезонно-талого слоя до 0,3–0,5 м). В южных зонах (подтайга, лесостепь) лимитирующим фактором становится высокая дренированность территории и недостаточное обводнение. Оптимальные условия для метаногенеза — сочетание высокой обводнённости, достаточной температуры субстрата и мощных торфяных залежей — реализуются в северной, средней и южной тайге, где и сосредоточена основная часть болотных массивов ЗСР.

Исходные данные. Спутниковые данные получены с прибора TROPOMI (Sentinel-5P). В работе использовался продукт третьего уровня обработки (COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CH4), содержащий значения средневзвешенной объёмной доли CH_4 в столбе сухого атмосферного воздуха (XCH_4 , ppb). Период анализа охватывал тёплый сезон (май – октябрь)

2019–2025 гг. В зимние месяцы низкие углы Солнца и устойчивый снежный покров приводят к резкому снижению качества и полноты измерений XCH_4 в ближнем инфракрасном диапазоне (Lorente et al., 2021), а собственно эмиссия CH_4 из болот в холодный период минимальна (Panikov, Dedysh, 2000). Для каждого месяца строились композитные изображения посредством вычисления медианы отфильтрованных по качеству ($qa_value > 50$) ежедневных сцен. Всего сформировано 42 месячных композита (7 лет $\times$ 6 мес.). Пространственное разрешение данных TROPOMI составляет $5,5 \times 7$ км. Наименьшим числом валидных наблюдений характеризуется композит за август 2022 г.

В качестве маски водно-болотных угодий использована карта CGLS-LC100 (*англ.* Copernicus Global Land Service Land Cover 100m) с пространственным разрешением 100 м, класс 90 — herbaceous wetland (Buchhorn et al., 2020; <https://land.copernicus.eu/global/products/lc>). Класс 90 не охватывает тундровые болота, классифицируемые в продукте CGLS-LC100 преимущественно как кустарниковая (класс 20) или травянистая (класс 30) растительность; это ограничение учитывалось при интерпретации результатов для тундровой и лесотундровой зон. Для расчёта фоновых значений XCH_4 использовались участки лесной растительности (классы 111–126). Выбор CGLS-LC100 дополнительно обоснован масштабом данных TROPOMI — переход к более детализированным региональным картам видится избыточным при используемом методе агрегации. Кроме того, ежегодное обновление CGLS-LC100 и глобальная согласованность алгоритма классификации обеспечивают воспроизводимость результатов и совместимость с международными проектами по эмиссии метана.

Средняя месячная температура воздуха на высоте 2 м рассчитывалась по данным реанализа ERA5-Land (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis) (Muñoz-Sabater et al., 2021). Значения NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) получены из продукта MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) MOD13A1 V061 (Didan, 2021) — 16-дневные композиты Terra с разрешением 500 м. Для валидации результатов дистанционных измерений привлекались опубликованные данные камерных и башенных измерений потоков CH_4 на станциях Мухрино (Dyukarev et al., 2024; Sabrekov et al., 2011, 2013), Бакчар (Veretennikova, Dyukarev, 2021) и Зотино (ZOTTO) (Winderlich et al., 2014). Всего извлечено девять измерений CH_4 в различных типах микроландшафтов с указанием их месяца и года.

Методика исследования. Обработка данных выполнена на платформе GEE (*англ.* Google Earth Engine) (Gorelick et al., 2017) с использованием JavaScript. Методика включает пять последовательных этапов: построение маски водно-болотных угодий и расчёт площадей; вычисление превышения ΔCH_4 ; зональный и сезонный анализ; валидацию по наземным данным; оценку суммарной эмиссии. Растр CGLS-LC100 обрезался по границе ЗСР и реклассифицировался в бинарную маску (1 — болото, 0 — прочее). Для каждой из восьми природных зон рассчитывалась площадь болот и их доля от общей площади зоны. Для агрегации маски к разрешению TROPOMI (~ 7 км) вычислялась субпиксельная доля болотных площадей (*англ.* wetland fraction) методом reduceResolution.

Превышение концентрации метана (*англ.* enhancement) определялось как разность:

$$\Delta\text{CH}_4 = \text{XCH}_4(\text{болота}) - \text{XCH}_4(\text{не-болота}),$$

где $\text{XCH}_4(\text{болота})$ — средняя концентрация метана для пикселей болотного класса 90 CGLS-LC100, $\text{XCH}_4(\text{не-болота})$ — средняя концентрация метана для лесных классов 111–126 CGLS-LC100. Положительное значение ΔCH_4 рассматривается как индикатор повышенной эмиссии CH_4 с поверхности водно-болотных угодий.

Для каждой природной зоны вычислялись средние за тёплый период (май–октябрь) 2019–2025 гг. значения шести показателей: доля болот (в %), средняя температура воздуха (в °C), средний NDVI, средние XCH_4 над водно-болотными угодьями и над фоновыми лесными территориями (в ppb), а также ΔCH_4 (в ppb). Сезонный ход анализировался посредством осреднения по годам для каждого месяца и по месяцам для каждого года.

Сопоставление спутниковых и наземных данных проводилось в двух форматах: извлечение временных рядов TROPOMI XCH_4 в радиусе 10 км от каждой из трёх станций с расчётом

сезонного хода и прямое сопоставление TROPOMI ΔCH_4 с наземным потоком CH_4 для шести наземных записей с привязкой к месяцу и году.

Суммарная эмиссия CH_4 из водно-болотных угодий ЗСР оценивалась с использованием эмпирической передаточной функции:

$$E = \bar{F}ST,$$

где E — суммарная эмиссия (в Тг CH_4 /год), $\bar{F}$ — средневзвешенный поток CH_4 с единицы площади водно-болотных угодий (в мг $\text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$), S — площадь водно-болотных угодий (в м^2), T — продолжительность сезона эмиссии (в ч). Удельные потоки $F_{\text{мочажины}} = 6,03 \text{ мг } \text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ и $F_{\text{гряды}} = 0,04 \text{ мг } \text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ получены осреднением камерных измерений на станции Мухрино за 2020–2023 гг.: четырёх серий для мочажин (диапазон 2,76–11,0 мг $\text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, включая обводнённые участки) и двух серий для гряд (0–0,08 мг $\text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) (Chechin et al., 2024; Dyukarev et al., 2024). При базовом сценарии (50 % мочажин) $\bar{F} = (6,03 \times 0,5) + (0,04 \times 0,5) = 3,035 \text{ мг } \text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Длительность сезона эмиссии принималась равной 180 дням (май – октябрь), или 4320 ч. Для оценки чувствительности результата выполнялся расчёт при доле мочажин 30, 50 и 70 %.

Результаты исследования

Маска водно-болотных угодий. По данным CGLS-LC100 (класс 90), общая площадь водно-болотных угодий в пределах ЗСР составила 673 тыс. км^2 . Это значение близко к оценке по модели Вс8 (685 тыс. км^2) (Glagolev et al., 2011) и укладывается в диапазон 590–780 тыс. км^2 (Terentieva et al., 2016). Распределение болот по природным зонам неравномерно (таблица). Наибольшая абсолютная площадь болотных массивов приурочена к средней тайге (243 тыс. км^2) при площади самой зоны 853 тыс. км^2 . Наибольшая относительная заболоченность зафиксирована в лесотундре — 60,1 %. В северной тайге доля болот составила 41,2 %, в средней тайге — 28,5 %, в южной — 17,7 %, в подтайге — 17,4 %, в лесостепи — 8,4 %, в степи — 2,9 %. В тундровой зоне доля болотных массивов составила 23,1 %, однако эта величина, по всей вероятности, занижена вследствие ограниченной способности CGLS-LC100 выделять тундровые болота.

Характеристики природных зон ЗСР и показатели превышения концентрации метана над водно-болотными угодьями по данным TROPOMI за тёплый период 2019–2025 гг.

№ зоны	Природная зона	Общая площадь, тыс. км^2	Площадь болот, тыс. км^2	Доля болот, %	Температура воздуха, °С	NDVI	XCH_4 (болота), ppb	XCH_4 (фон), ppb	ΔCH_4 , ppb	Эмиссия, Тг CH_4 /год
1	Тундра	300	69	23,1	5,5	0,365	1861,0	1861,4	−0,3	0,91
2	Лесотундра	127	77	60,1	7,4	0,453	1856,2	1852,3	+3,9	1,00
3	Северная тайга	331	136	41,2	8,8	0,516	1856,7	1848,6	+8,0	1,79
4	Средняя тайга	853	243	28,5	11,0	0,602	1860,2	1849,3	+10,9	3,19
5	Южная тайга	467	83	17,7	12,7	0,635	1861,8	1849,4	+12,4	1,09
6	Подтайга	135	24	17,4	13,3	0,610	1865,7	1857,2	+8,4	0,31
7	Лесостепь	380	32	8,4	14,0	0,588	1871,2	1872,9	−1,7	0,42
8	Степь	325	9	2,9	15,9	0,535	1879,6	1884,3	−4,6	0,12
—	ЗСР (итого)	2918	673	23,1	—	—	—	—	+7,9	8,83

Примечание: Номера зон в первой колонке соответствуют обозначениям на рис. 1.

Превышение концентрации CH_4 над водно-болотными угодьями. Пространственное распределение превышения ΔCH_4 по болотным пикселям в сентябре показано на *рис. 1*. Среднее значение превышения ΔCH_4 по всей территории ЗСР за тёплый период 2019–2025 гг. составило 7,9 ppb. Положительные значения ΔCH_4 устойчиво фиксировались во все месяцы тёплого сезона, что свидетельствует о наличии воспроизводимого метанового сигнала над водно-болотными угодьями, детектируемого по данным TROPOMI.

Статистическая значимость превышения оценивалась двухвыборочным t -критерием Уэлча отдельно для каждого из 42 месячных композитов на основе расчёта средних значений, значений стандартного отклонения и числа валидных пикселей TROPOMI для маски водно-болотных угодий (CGLS класс 90) и лесных территорий (CGLS классы 111–126). Различия XCH_4 оказались статистически значимыми ($p < 0,001$) в 41 из 42 композитов; единственный незначимый случай (июнь 2024 г., $\Delta\text{CH}_4 = -0,1$ ppb, $p = 0,30$) соответствует фактически нулевому различию средних. Размер эффекта D-Коэна (*англ.* Cohen's d), вычисленный относительно объединённого пиксельного стандартного отклонения, составил в среднем 0,53 (медиана 0,52; диапазон 0,06–1,11) для композитов с положительным превышением, что соответствует малому или среднему эффекту и подтверждает воспроизводимость болотного сигнала во всех месяцах сезона за весь период наблюдений.

Сезонный ход ΔCH_4 , осреднённый по годам, демонстрирует выраженную динамику: от 3 ppb в мае до 12 ppb в сентябре с последующим спадом до 7 ppb в октябре (*рис. 2*). Максимум ΔCH_4 приходится на сентябрь, тогда как максимум температуры воздуха — на июль (17,1 °C). Сдвиг между пиками составляет 1–2 мес. и объясняется инерцией прогрева торфяной толщи: метаногенез протекает в анаэробных горизонтах на глубине 0,3–1,0 м, прогрев которых запаздывает относительно приземной температуры. Аналогичный температурный лаг описан для бореальных болот Финноскандии и Канады (Knox et al., 2021; Rinne et al., 2018).

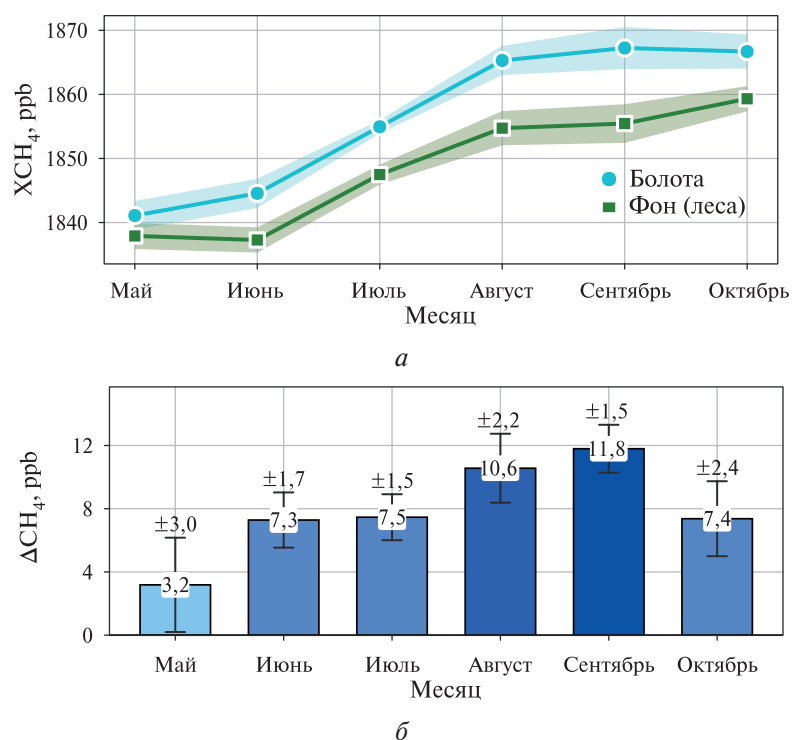


Рис. 2. Сезонный ход концентрации метана на территории ЗСР по данным TROPOMI/Sentinel-5P за тёплый период 2019–2025 гг.: *а* — средние значения и стандартная ошибка определения концентрации XCH_4 ; *б* — превышение ΔCH_4 в пределах водно-болотных угодий по отношению к фоновым лесным участкам (месячные значения рассчитаны как среднее за 2019–2025 гг.)

Отдельного внимания заслуживают повышенные значения ΔCH_4 в октябре (7 ppb) при температуре воздуха около 2 °С. Это явление, известное как *autumn flush* (осенний прилив), связано с выдавливанием метана, накопленного в торфяной толще за лето, при промерзании верхних горизонтов (Mastepanov et al., 2008). Промерзающий сверху слой торфа формирует барьер, препятствующий вертикальной диффузии, что приводит к импульсному выбросу CH_4 через незамёрзшие участки.

Межгодовой анализ показал устойчивый рост абсолютных значений XCH_4 в тёплый сезон: над болотными пикселями ЗСР тренд составил +10,3 ppb/год, над лесными — +12,3 ppb/год, что отражает глобальный тренд роста атмосферного метана. Более быстрый рост XCH_4 над фоновыми территориями приводит к тому, что расчётное превышение ΔCH_4 демонстрирует тенденцию к снижению (–2,0 ppb/год), однако статистическая значимость тренда при семи точках невелика. Аномально высокое значение ΔCH_4 зафиксировано в 2020 г. (15,5 ppb), что совпадает с аномально тёплым летом в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре и согласуется с результатами работы (Yuan et al., 2024).

Помимо реального биогеохимического тренда, определённый вклад в наблюдаемое снижение ΔCH_4 после 2020 г. может вносить алгоритмическая перекалибровка продукта TROPOMI OFFL в 2022–2023 гг. (обновление версий). Разделение этих двух факторов требует привлечения независимых источников и выходит за рамки настоящей работы.

Зональная дифференциация. Результаты зонального анализа приведены в таблице и на рис. 3. Максимальные значения ΔCH_4 получены для южной (12,4 ppb) и средней тайги (10,9 ppb). Северная тайга и подтайга демонстрируют промежуточные значения — 8,0 и 8,4 ppb соответственно. В лесотундре, несмотря на наибольшую долю болот (60,1 %), ΔCH_4 составляет лишь 3,9 ppb, что объясняется низкой средней температурой тёплого периода (7,4 °С) и, как следствие, подавленным метаногенезом.

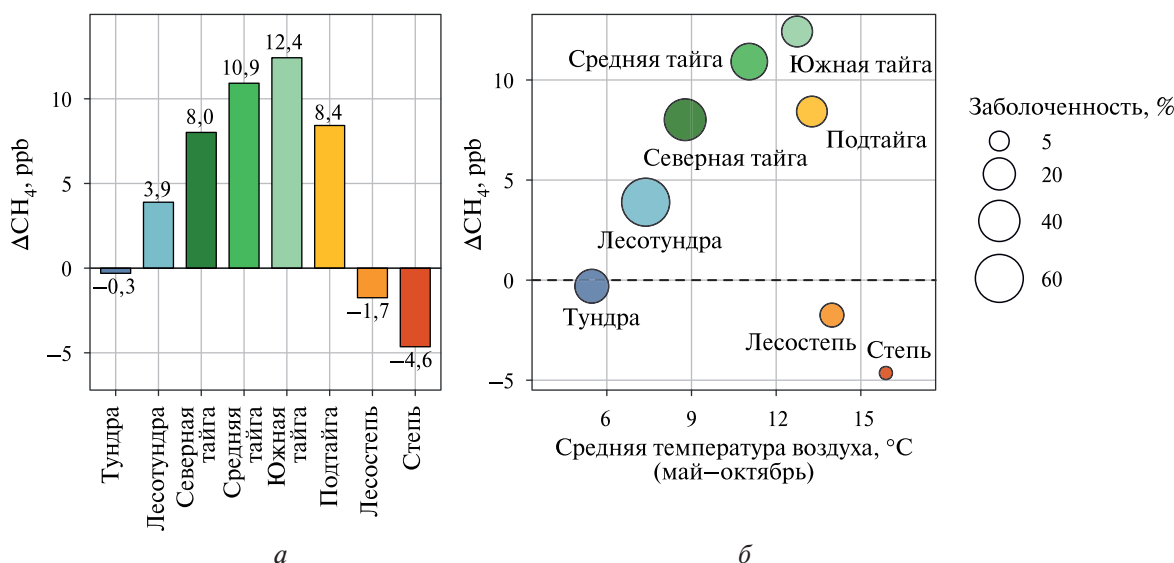


Рис. 3. Зональная структура превышения метана ΔCH_4 над водно-болотными угодьями ЗСР за тёплый период 2019–2025 гг.: а — средние значения ΔCH_4 по восьми природным зонам; б — связь ΔCH_4 со средней температурой воздуха за май–октябрь по данным ERA5-Land (размер маркеров пропорционален доле болот в зоне)

В лесостепной и степной зонах получены отрицательные значения ΔCH_4 (–1,7 и –4,6 ppb соответственно). Вероятная причина заключается в присутствии антропогенных источников метана (нефтегазовая инфраструктура, животноводство), повышающих фоновый уровень XCH_4 над неболотными пикселями.

Принципиальным результатом зонального анализа является то, что максимум ΔCH_4 приурочен не к зоне с наибольшей заболоченностью (лесотундра, 60 %), а к южной тайге (17,7 %

болот). Превышение определяется не общей площадью водно-болотных угодий, а производением заболоченности на интенсивность метаногенеза, которая, в свою очередь, контролируется температурой. Расчёт связи ΔCH_4 с произведением заболоченности на температуру воздуха по восьми природным зонам на основе линейной регрессии показал коэффициент детерминации $R^2 = 0,40$ ($p = 0,10$). Тем не менее ограниченная статистическая значимость при восьми точках не препятствует качественной интерпретации совместного контроля превышения этими двумя факторами.

В тундровой зоне ΔCH_4 статистически неотличим от нуля ($-0,3$ ppb). Помимо низкой температуры, определяющей слабый метаногенез, вклад в этот результат вносит ограниченная репрезентативность маски болот: тундровые водно-болотные угодья не выделяются продуктом CGLS-LC100 как класс 90.

Сезонный ход по природным зонам. Анализ сезонного хода ΔCH_4 по отдельным зонам выявил закономерное смещение фазы максимума с юга на север (рис. 4). В южной тайге максимум ΔCH_4 приходится на август (16,1 ppb) с последующим спадом к октябрю (7,4 ppb). В средней тайге пик сдвинут на август – сентябрь (14,2 и 13,0 ppb). В северной тайге максимальное значение ΔCH_4 зафиксировано в октябре (10,2 ppb), что указывает на выраженный *autumn flush*.

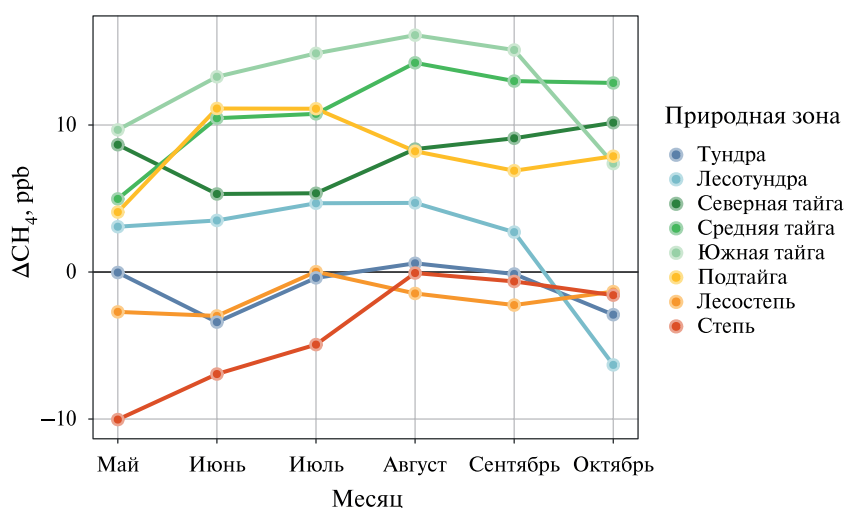


Рис. 4. Сезонный ход превышения метана ΔCH_4 по природным зонам ЗСР за тёплый период 2019–2025 гг.

Подтайга демонстрирует двухвершинный сезонный ход с пиками в июне–июле (11,1 ppb) и октябре (7,9 ppb). Лесотундра показывает слабый положительный ΔCH_4 в июне–августе (3–5 ppb) с переходом в отрицательные значения в октябре (–6,3 ppb). Тундровая зона характеризуется ΔCH_4 , близким к нулю во все месяцы сезона. Широтный градиент проявляется не только в амплитуде превышения, но и в его сезонной фазе: чем севернее расположена зона, тем позже наступает максимум ΔCH_4 и тем сильнее выражен осенний импульс эмиссии.

Валидация по наземным данным. Временные ряды TROPOMI XCH_4 извлечены для трёх станций за 2019–2025 гг. Всего получено 112 валидных месячных средних (Мухрино — 35, Бакчар — 40, Зотино — 37). Средние значения XCH_4 составили: Мухрино — 1862,4 ppb, Бакчар — 1857,0 ppb, Зотино — 1856,7 ppb. Более высокая концентрация XCH_4 на станции Мухрино согласуется с её расположением в центре обширного болотного массива.

Сезонный ход XCH_4 на станциях различается по фазе максимума: на Зотино пик фиксируется в июле с последующим устойчивым снижением, на Мухрино — в сентябре, на Бакчар выявлена двухвершинная структура с максимумами в июле и октябре (рис. 5). При осреднении за весь тёплый сезон порядок станций по средним значениям ΔCH_4 сохраняется:

Зотино (8,6 ppb) $\approx$ Мухрино (7,7 ppb) $>$ Бакчар (5,2 ppb). Основным результатом валидации следует считать согласованность порядка величин TROPOMI ΔCH_4 и наземных потоков CH_4 на станции Мухрино, а также совпадение фаз сезонного хода между спутниковыми и наземными измерениями. Прямое количественное сопоставление XCH_4 с поверхностным потоком ограничено малым числом синхронных измерений ($n = 6$ пар) и нелинейной зависимостью двух величин.

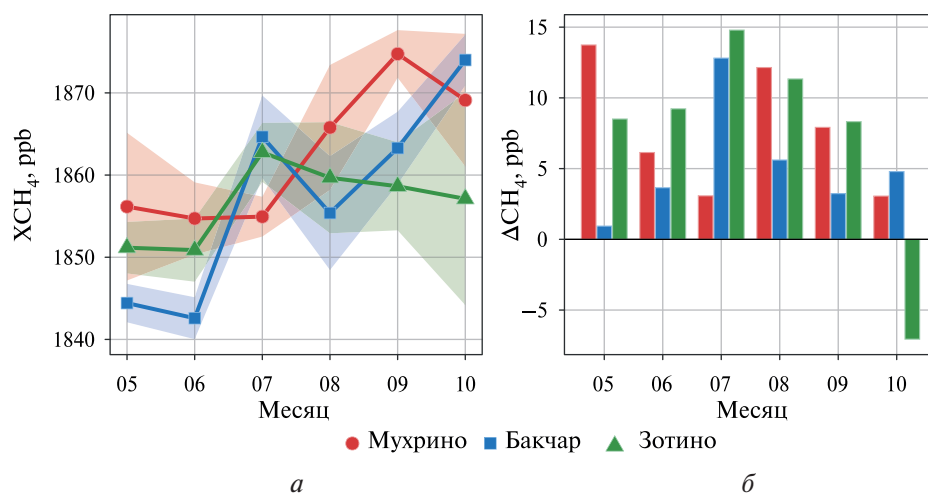


Рис. 5. Спутниковые данные TROPOMI/Sentinel-5P на станциях наземного мониторинга Мухрино, Бакчар и Зотино за тёплый период 2019–2025 гг.: а — средние месячные значения XCH_4 в 10-км буферных зонах вокруг станций (в ppb); б — превышение ΔCH_4 относительно лесного фона (в ppb)

Оценка суммарной эмиссии. При площади водно-болотных угодий 673 тыс. км², средневзвешенном потоке $3,035 \text{ мг } \text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (50 % мочажин) и продолжительности сезона 4320 ч суммарная эмиссия CH_4 из болот ЗСР составила 8,83 Тг CH_4 /год. Анализ чувствительности к доле мочажин дал диапазон от 5,3 Тг/год (при 30 %) до 12,3 Тг/год (при 70 %). Полученная базовая оценка превышает значение по модели Vc8 (4,28 Тг CH_4 /год) (Glagolev et al., 2011), однако при доле мочажин 30 % результат (5,3 Тг/год) практически совпадает с инверсионной оценкой (Kim et al., 2011) и укладывается в диапазон неопределённости обоих подходов.

Зональная декомпозиция (таблица) показала, что наибольший вклад в суммарную эмиссию вносит средняя тайга (3,19 Тг/год) — благодаря обширной площади водно-болотных угодий (243 тыс. км²) в сочетании с высоким ΔCH_4 (10,9 ppb). Далее следуют северная тайга (1,79 Тг/год) и южная тайга (1,09 Тг/год); три таёжные зоны в сумме обеспечивают 6,07 Тг/год, или 69 % общей оценки. Вклад лесотундры и тундры составил соответственно 1,00 и 0,91 Тг/год и, по-видимому, занижен вследствие ограниченной репрезентации тундровых болот в продукте CGLS-LC100.

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что превышение концентрации метана над водно-болотными угодьями ЗСР контролируется двумя факторами — заболоченностью территории и температурой тёплого периода. Лесотундра при максимальной заболоченности (60,1 %) демонстрирует лишь 3,9 ppb превышения вследствие низкой температуры (7,4 °C). Степь при высокой температуре (15,9 °C) даёт отрицательный ΔCH_4 из-за ничтожной доли болот (2,9 %) и присутствия антропогенных источников. Максимум ΔCH_4 в южной (12,4 ppb) и средней (10,9 ppb) тайге соответствует зонам, в которых произведение заболоченности на температуру достигает наибольших значений. Подобная закономерность согласуется с общими пред-

ставлениями о температурном контроле метаногенеза в бореальных торфяниках (Segers, 1998; Yvon-Durocher et al., 2014).

Помимо пространственной структуры, принципиальное значение имеет временная динамика ΔCH_4 . Сдвиг максимума превышения относительно максимума температуры воздуха на 1–2 мес. является устойчивым результатом как для ЗСР в целом, так и для отдельных природных зон. Причина этого лага связана с инерционностью прогрева торфяной толщи, в которой метаногенез протекает на глубинах 0,3–1,0 м и более. Время прогрева субстрата до температуры, оптимальной для метаногенных архей (10–15 °C), составляет несколько недель после достижения максимума приземной температуры. Аналогичные задержки зафиксированы для болот Финляндии (Rinne et al., 2018), а также подтверждаются при глобальном анализе сезонности болотных эмиссий по данным FLUXNET-CH₄ (Knox et al., 2021).

Для территории ЗСР повышенные значения ΔCH_4 в октябре при температуре, близкой к нулю, наиболее выражены в северной тайге (10,2 ppb), отражая два механизма:

- импульсный выброс метана при промерзании верхних горизонтов торфа, формирующим газонепроницаемый барьер (Mastepanov et al., 2008);
- снижение мощности пограничного слоя атмосферы в осенний период, приводящее к концентрации приземного CH_4 в тонком слое и, соответственно, к более выраженному превышению в столбовых измерениях TROPOMI.

Разделение вклада этих механизмов средствами спутникового мониторинга затруднительно, однако наличие *autumn flush* именно в северных зонах, где промерзание наступает раньше, косвенно подтверждает ведущую роль первого механизма.

Интерпретация полученных результатов требует учёта ряда методических ограничений. Прибор TROPOMI измеряет среднюю концентрацию метана в столбе атмосферы (XCH_4), а не поверхностный поток. Значение XCH_4 интегрирует вклад всех горизонтов атмосферы и зависит от атмосферного переноса, высоты пограничного слоя и вертикального профиля CH_4 . Связь между ΔCH_4 и поверхностным потоком носит опосредованный характер, что ограничивает возможности количественной интерпретации превышения в единицах потока. Маска болот на основе класса 90 продукта CGLS-LC100 не охватывает тундровые водно-болотные угодья. Это приводит к занижению расчётной площади болот в тундровой и лесотундровой зонах. Дополнительную неопределённость вносит невозможность разделения болотных микроландшафтов (гряды, мочажины, ямы) на разрешении CGLS (100 м) и тем более TROPOMI (7 км).

Сопоставление с другими крупными болотными регионами мира позволяет оценить вклад ЗСР в глобальный бюджет метана. Болота Амазонии эмитируют 24–35 Тг CH_4 /год при площади около 800 тыс. км² (McNicol et al., 2023), канадские бореальные болота — 12–20 Тг CH_4 /год при площади 1130 тыс. км² (Knox et al., 2021), водно-болотные угодья бассейна Конго — 10–15 Тг CH_4 /год (Ying et al., 2025), болота Фенноскандии — 3–5 Тг CH_4 /год при площади около 170 тыс. км² (Tsuruta et al., 2019). По отношению к глобальной болотной эмиссии (145–185 Тг CH_4 /год) (Saunois et al., 2020) вклад ЗСР составляет около 5 %, что сопоставимо с вкладом Фенноскандии и значительно уступает Амазонии.

Однако водно-болотные угодья ЗСР характеризуются высоким потенциалом усиления метановых эмиссий при потеплении климата, который определяется следующими условиями:

- мощность торфяных залежей до 10 м;
- запасы торфяного углерода около 70 Гт С (Sheng et al., 2004);
- плоский рельеф, исключающий эффективный дренаж;
- постепенный сдвиг границы многолетней мерзлоты на север;
- высокая температурная чувствительность процесса ($Q_{10} \approx 3\text{...}5$ по работам (Segers, 1998; Yvon-Durocher et al., 2014)).

Удельная эмиссия метана в ЗСР, оцениваемая приблизительно в 13 г $\text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, сопоставима со средними значениями для канадских бореальных болот. Результаты исследования

(Yuan et al., 2024) подтверждают ускоренный рост болотных эмиссий CH_4 именно из бореальной зоны, причём существенная часть аномалий 2016 и 2020 гг. приходится на территорию ЗСР. Полученная в настоящей работе аномалия ΔCH_4 в 2020 г. (15,5 ppb при среднем 7,9 ppb за 2019–2025 гг.) хорошо согласуется с указанными результатами. Исходя из значений Q_{10} и текущей температуры субстрата (8–12 °C в средней тайге), при потеплении на 2 °C можно ожидать увеличения эмиссии на 30–50 %, что составит 3–4 Тг CH_4 /год дополнительно, что сопоставимо с суммарной эмиссией всей Фенноскандии.

Для наглядной демонстрации полученных результатов на платформе Google Earth Engine разработано приложение WetCH4 Monitor (<https://nodal-thunder-481307-u1.projects.earthengine.app/view/wetch4-monitor>), которое также обеспечивает возможность проведения анализа для других болотных регионов в режиме пользовательского анализа (*англ.* Custom Area of Interest). Исходники скриптов и таблицы с исходными расчётами представлены в публичном репозитории (<https://github.com/SizovOleg/WetCH4-Monitor>).

Перспективными направлениями развития работы представляются построение зонально-дифференцированной передаточной функции с использованием зональных значений ΔCH_4 и температуры субстрата, привлечение данных непрерывных вихревых измерений CH_4 на станции Мухрино для уточнения сезонного хода потоков, а также проведение анализа в зимний период с привлечением данных о потоках CH_4 через снежный покров. Учитывая критическое значение метана в динамике глобальных климатических процессов, ключевую роль при проведении подобных исследований играет доступность исходных наблюдений существующих и создаваемых наземных станций по стандартам международной сети FLUXNET-CH4.

Заключение

Проведённое исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Данные TROPOMI показывают устойчивое превышение концентрации метана над водно-болотными угодьями ЗСР. Среднее значение ΔCH_4 за тёплый период составило 7,9 ppb, положительные значения воспроизводимо фиксировались во все месяцы сезона.
2. Максимум ΔCH_4 приурочен к южной (12,4 ppb) и средней (10,9 ppb) тайге. Превышение определяется произведением заболоченности территории на температуру тёплого периода, что объясняет отсутствие сигнала в лесотундре (высокая заболоченность, низкая температура) и в степи (высокая температура, малая заболоченность).
3. Выявлен устойчивый температурный лаг в два месяца между максимумами температуры воздуха (июль) и ΔCH_4 (сентябрь), который обусловлен инерцией прогрева торфяной толщи. В октябре в северной тайге зафиксирован дополнительный импульс ΔCH_4 (*autumn flush*, 10,2 ppb), связанный с выдавливанием метана при промерзании верхних горизонтов. Установлен широтный градиент сезонной фазы: максимум ΔCH_4 смещается от августа в южной тайге к октябрю в северной.
4. Получена оценка суммарной эмиссии CH_4 из водно-болотных угодий ЗСР — 8,83 Тг/год при базовом сценарии (50 % мочажин), с диапазоном чувствительности 5,3–12,3 Тг/год. Около 69 % суммарной эмиссии приходится на три таёжные зоны; максимальный вклад (36 %) даёт средняя тайга. Расхождение с существующими региональными оценками определяется главным образом неопределённостью в удельном потоке CH_4 .
5. При температурном отклике, характерном для бореальных торфов ($Q_{10} = 4\ldots 8$), и прогнозируемом потеплении на 2 °C ожидаемый рост эмиссии CH_4 из водно-болотных угодий ЗСР составит 30–50 %, или 3–4 Тг CH_4 /год дополнительно. Совокупность природных факторов — мощные торфяные залежи, плоский рельеф, деградирующая мерзлота, высокий Q_{10} — позволяет прогнозировать значительный потенциал усиления эмиссии метана на территории ЗСР на фоне глобального потепления.

6. Созданное на платформе Google Earth Engine приложение WetCH₄ Monitor обеспечивает воспроизводимость результатов и возможность применения разработанных инструментов анализа к любому болотному региону мира в интерактивном режиме.

В целом полученные результаты могут служить основой для уточнения региональных и глобальных оценок бюджета метана с учётом вклада водно-болотных угодий ЗСР, а также для разработки зонально-дифференцированных прогнозов метановых эмиссий в условиях меняющегося климата.

Работа выполнена по госзаданию ИПНГ РАН по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата» (№ 122022800264-9).

Литература

1. Лапина Е. Д. Флора болот юго-востока Западной Сибири. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004. 295 с.
2. Лисс О. Л., Абрамова Л. И., Аветов Н. А., Березина Н. А., Инишева Л. И., Курнишкова Т. В., Слука З. А., Толпышева Т. Ю., Шведчикова Н. К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К, 2001. 584 с.
3. Национальный атлас России. Т. 2: Природа. Экология. М.: Роскартография, 2004. 495 с.
4. Buchhorn M., Lesiv M., Tsendbazar N.-E. et al. Copernicus Global Land Cover Layers — Collection 2 // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 6. Article 1044. DOI: 10.3390/rs12061044.
5. Chechin D. G., Repina I. A., Artamonov A. Yu. et al. Quantifying spatial heterogeneities of surface heat budget and methane emissions over West-Siberian peatland: Highlights from the Mukhrino 2022 campaign // Forests. 2024. V. 15. No. 1. Article 102. DOI: 10.3390/f15010102.
6. Didan K. MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2021. DOI: 10.5067/MODIS/MOD13A1.061.
7. Dyukarev E. A., Veretennikova E. E., Sabrekov A. F. et al. Methane and carbon dioxide fluxes correlation according to automatic chamber observations at the Mukhrino bog ridge and hollow complex // Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2024. V. 15. No. 4. P. 276–288. DOI: 10.18822/edgccc636456.
8. Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I. et al. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // Environmental Research Letters. 2011. V. 6. No. 4. Article 045214. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045214.
9. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
10. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.
11. Kim H.-S., Maksyutov S., Glagolev M. V. et al. Evaluation of methane emissions from West Siberian wetlands based on inverse modeling // Environmental Research Letters. 2011. V. 6. No. 3. Article 035201. DOI: 10.1088/1748-9326/6/3/035201.
12. Knox S. H., Bansal S., McNicol G. et al. Identifying dominant environmental predictors of freshwater wetland methane fluxes across diurnal to seasonal time scales // Global Change Biology. 2021. V. 27. No. 15. P. 3582–3604. DOI: 10.1111/gcb.15661.
13. Lan X., Thoning K. W., Dlugokencky E. J. Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements, Version 2024-08. NOAA Global Monitoring Laboratory, 2024. DOI: 10.15138/P8XG-AA10.
14. Lindqvist H., Kivimäki E., Häkkinen T. et al. Evaluation of Sentinel-5P TROPOMI methane observations at northern high latitudes // Remote Sensing. 2024. V. 16. No. 16. Article 2979. DOI: 10.3390/rs16162979.
15. Lorente A., Borsdorff T., Butz A. et al. Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements // Atmospheric Measurement Techniques. 2021. V. 14. No. 1. P. 665–684. DOI: 10.5194/amt-14-665-2021.
16. Mastepanov M., Sigsgaard C., Dlugokencky E. J. et al. Large tundra methane burst during onset of freezing // Nature. 2008. V. 456. No. 7222. P. 628–630. DOI: 10.1038/nature07464.
17. McNicol G., Fluett-Chouinard E., Ouyang Z. et al. Upscaling wetland methane emissions from the FLUXNET-CH₄ eddy covariance network (UpCH₄ v1.0): Model development, network assess-

- ment, and budget comparison // *AGU Advances*. 2023. V. 4. No. 5. Article e2023AV000956. DOI: 10.1029/2023AV000956.
18. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth System Science Data*. 2021. V. 13. No. 9. P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
 19. Panikov N. S., Dedys S. N. Cold season CH₄ and CO₂ emission from boreal peat bogs (West Siberia): Winter fluxes and thaw activation dynamics // *Global Biogeochemical Cycles*. 2000. V. 14. No. 4. P. 1071–1080. DOI: 10.1029/1999GB900097.
 20. Rinne J., Tuittila E.-S., Peltola O. et al. Temporal variation of ecosystem scale methane emission from a boreal fen in relation to temperature, water table position, and carbon dioxide fluxes // *Global Biogeochemical Cycles*. 2018. V. 32. No. 7. P. 1087–1106. DOI: 10.1029/2017GB005747.
 21. Sabrekov A. F., Kleptsova I. E., Glagolev M. V., Maksyutov S. S., Machida T. Methane emission from middle taiga oligotrophic hollows of Western Siberia // *Tomsk State Pedagogical University Bull.* 2011. No. 5 (107). P. 135–143.
 22. Sabrekov A. F., Glagolev M. V., Kleptsova I. E. et al. Methane emission from mires of the West Siberian taiga // *Eurasian Soil Science*. 2013. V. 46. No. 12. P. 1182–1193. DOI: 10.1134/S1064229314010098.
 23. Saunois M., Stavert A. R., Poulter B. et al. The Global Methane Budget 2000–2017 // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. No. 3. P. 1561–1623. DOI: 10.5194/essd-12-1561-2020.
 24. Segers R. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes // *Biogeochemistry*. 1998. V. 41. No. 1. P. 23–51. DOI: 10.1023/A:1005929032764.
 25. Sheng Y., Smith L. C., MacDonald G. M. et al. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. V. 18. No. 3. Article GB3004. DOI: 10.1029/2003GB002190.
 26. Terentjeva I. E., Glagolev M. V., Lapshina E. D. et al. Mapping of West Siberian taiga wetland complexes using Landsat imagery: implications for methane emissions // *Biogeosciences*. 2016. V. 13. No. 16. P. 4615–4626. DOI: 10.5194/bg-13-4615-2016.
 27. Tsuruta A., Aalto T., Backman L. et al. Methane budget estimates in Finland from the CarbonTracker Europe-CH₄ data assimilation system // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2019. V. 71. No. 1. Article 1565030. DOI: 10.1080/16000889.2018.1565030.
 28. Veretennikova E. E., Dyukarev E. A. Comparison of methane fluxes of open and forested bogs of the southern taiga zone of Western Siberia // *Boreal Environment Research*. 2021. V. 26. P. 43–59.
 29. Winderlich J., Gerbig C., Kolle O., Heimann M. Inferences from CO₂ and CH₄ concentration profiles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) on regional summertime ecosystem fluxes // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. No. 7. P. 2055–2068. DOI: 10.5194/bg-11-2055-2014.
 30. Xu J., Morris P. J., Liu J., Holden J. PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis // *Catena*. 2018. V. 160. P. 134–140. DOI: 10.1016/j.catena.2017.09.010.
 31. Ying Q., Poulter B., Watts J. D. et al. WetCH₄: a machine-learning-based upscaling of methane fluxes of northern wetlands during 2016–2022 // *Earth System Science Data*. 2025. V. 17. No. 6. P. 2507–2534. DOI: 10.5194/essd-17-2507-2025.
 32. Yuan K., Zhu Q., Riley W. J. et al. Boreal–Arctic wetland methane emissions modulated by warming and vegetation activity // *Nature Climate Change*. 2024. V. 14. No. 3. P. 282–288. DOI: 10.1038/s41558-024-01933-3.
 33. Yvon-Durocher G., Allen A. P., Bastviken D. et al. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales // *Nature*. 2014. V. 507. No. 7493. P. 488–491. DOI: 10.1038/nature13164.

Dynamics of methane emissions from wetlands of Western Siberian Plain based on TROPOMI data for 2019–2025

O. S. Sizov

Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow 119333, Russia

E-mail: kabanin@yandex.ru

The study addresses the spatiotemporal differentiation of methane emissions from wetlands of the Western Siberian Plain (WSP) for the 2019–2025 period. Input data include TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) measurements (Sentinel-5P satellite), the CGLS-LC100 (Copernicus Global Land Service Land Cover 100m) wetland mask, ERA5-Land (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis) air temperature and MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Data processing was performed on the Google Earth Engine platform. For each of the eight natural zones, the excess methane concentration over wetlands relative to non-wetland areas (ΔCH_4) is calculated from 42 monthly composites of the column-averaged dry-air mole fraction of CH_4 (XCH_4) covering the warm season. The mean ΔCH_4 across the WSP is 7.9 ppb. The maximum enhancement is associated not with the zones of the highest wetland coverage, but with the southern (12.4 ppb) and middle (10.9 ppb) taiga, where wetland extent combines with sufficient summer temperatures. A temperature lag of 1–2 months between the maximum surface air temperature and the ΔCH_4 maximum is identified, along with a latitudinal gradient of the seasonal phase — from August in the southern taiga to October in the northern taiga with a pronounced autumn emission pulse. In the permafrost zone (north of $\sim 62^\circ \text{N}$), ΔCH_4 drops to noise-level values, reflecting suppression of methanogenesis under cryogenic conditions. Total CH_4 emission, given a wetland area of 673,000 km^2 , is estimated at 8.83 Tg/year (confidence range 5.3–12.3 Tg/year), of which about 69 % is attributed to the taiga zones, and 36 % to the middle taiga alone. Results are validated against ground-based observations at Mukhrino, Bakchar and Zotino stations within the constraints of a limited set of synchronous measurements. The results may serve as a basis for refining regional methane budget estimates and for developing zonally differentiated greenhouse gas emission forecasts under climate change conditions.

Keywords: TROPOMI, Google Earth Engine, Sentinel-5P, greenhouse gases, CH_4 , emissions, wetlands, Western Siberia

Accepted: 18.05.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-390-405

References

1. Lapshina E. D., *Flora bolot yugo-vostoka Zapadnoi Sibiri* (Bog flora of the southeast of Western Siberia), Tomsk: Tomsk University Press, 2004, 295 p. (in Russian).
2. Liss O. L., Abramova L. I., Avetov N. A., Berezina N. A., Inisheva L. I., Kurnishkova T. V., Sluka Z. A., Tolpysheva T. Yu., Shvedchikova N. K., *Bolotnye sistemy Zapadnoi Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* (Wetland systems of Western Siberia and their environmental importance), Tula: Grif i K, 2001, 584 p. (in Russian).
3. *Natsional'nyi atlas Rossii. T. 2: Priroda. Ekologiya* (National Atlas of Russia. V. 2: Nature. Ecology), Moscow: Roskartografiya, 2004, 495 p. (in Russian).
4. Buchhorn M., Lesiv M., Tsendbazar N.-E. et al., Copernicus Global Land Cover Layers — Collection 2, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 6, Article 1044, DOI: 10.3390/rs12061044.
5. Chechin D. G., Repina I. A., Artamonov A. Yu. et al., Quantifying spatial heterogeneities of surface heat budget and methane emissions over West-Siberian peatland: Highlights from the Mukhrino 2022 campaign, *Forests*, 2024, V. 15, No. 1, Article 102, DOI: 10.3390/f15010102.
6. Didan K., *MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V061*, NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2021, DOI: 10.5067/MODIS/MOD13A1.061.
7. Dyukarev E. A., Veretennikova E. E., Sabrekov A. F. et al., Methane and carbon dioxide fluxes correlation according to automatic chamber observations at the Mukhrino bog ridge and hollow complex, *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2024, V. 15, No. 4, pp. 276–288, DOI: 10.18822/edccc636456.

8. Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I. et al., Regional methane emission from West Siberia mire landscapes, *Environmental Research Letters*, 2011, V. 6, No. 4, Article 045214, DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045214.
9. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, V. 202, pp. 18–27, DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
10. IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al. (eds.), Cambridge: Cambridge University Press, 2021, 2391 p., DOI: 10.1017/9781009157896.
11. Kim H.-S., Maksyutov S., Glagolev M. V. et al., Evaluation of methane emissions from West Siberian wetlands based on inverse modeling, *Environmental Research Letters*, 2011, V. 6, No. 3, Article 035201, DOI: 10.1088/1748-9326/6/3/035201.
12. Knox S. H., Bansal S., McNicol G. et al., Identifying dominant environmental predictors of freshwater wetland methane fluxes across diurnal to seasonal time scales, *Global Change Biology*, 2021, V. 27, No. 15, pp. 3582–3604, DOI: 10.1111/gcb.15661.
13. Lan X., Thoning K. W., Dlugokencky E. J., *Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements, Version 2024-08*, NOAA Global Monitoring Laboratory, 2024, DOI: 10.15138/P8XG-AA10.
14. Lindqvist H., Kivimäki E., Häkkinen T. et al., Evaluation of Sentinel-5P TROPOMI methane observations at northern high latitudes, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, No. 16, Article 2979, DOI: 10.3390/rs16162979.
15. Lorente A., Borsdorff T., Butz A. et al., Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first two years of measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, V. 14, No. 1, pp. 665–684, DOI: 10.5194/amt-14-665-2021.
16. Mastepanov M., Sigsgaard C., Dlugokencky E. J. et al., Large tundra methane burst during onset of freezing, *Nature*, 2008, V. 456, No. 7222, pp. 628–630, DOI: 10.1038/nature07464.
17. McNicol G., Fluett-Chouinard E., Ouyang Z. et al., Upscaling wetland methane emissions from the FLUXNET-CH₄ eddy covariance network (UpCH₄ v1.0): Model development, network assessment, and budget comparison, *AGU Advances*, 2023, V. 4, No. 5, Article e2023AV000956, DOI: 10.1029/2023AV000956.
18. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al., ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth System Science Data*, 2021, V. 13, No. 9, pp. 4349–4383, DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
19. Panikov N. S., Dedysh S. N., Cold season CH₄ and CO₂ emission from boreal peat bogs (West Siberia): Winter fluxes and thaw activation dynamics, *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, V. 14, No. 4, pp. 1071–1080, DOI: 10.1029/1999GB900097.
20. Rinne J., Tuittila E.-S., Peltola O. et al., Temporal variation of ecosystem scale methane emission from a boreal fen in relation to temperature, water table position, and carbon dioxide fluxes, *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, V. 32, No. 7, pp. 1087–1106, DOI: 10.1029/2017GB005747.
21. Sabrekov A. F., Kleptsova I. E., Glagolev M. V., Maksyutov S. S., Machida T., Methane emission from middle taiga oligotrophic hollows of Western Siberia, *Tomsk State Pedagogical University Bull.*, 2011, No. 5 (107), pp. 135–143.
22. Sabrekov A. F., Glagolev M. V., Kleptsova I. E. et al., Methane emission from mires of the West Siberian taiga, *Eurasian Soil Science*, 2013, V. 46, No. 12, pp. 1182–1193, DOI: 10.1134/S1064229314010098.
23. Saunio M., Stavert A. R., Poulter B. et al., The Global Methane Budget 2000–2017, *Earth System Science Data*, 2020, V. 12, No. 3, pp. 1561–1623, DOI: 10.5194/essd-12-1561-2020.
24. Segers R., Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes, *Biogeochemistry*, 1998, V. 41, No. 1, pp. 23–51, DOI: 10.1023/A:1005929032764.
25. Sheng Y., Smith L. C., MacDonald G. M. et al., A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool, *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, V. 18, No. 3, Article GB3004, DOI: 10.1029/2003GB002190.
26. Terentieva I. E., Glagolev M. V., Lapshina E. D. et al., Mapping of West Siberian taiga wetland complexes using Landsat imagery: implications for methane emissions, *Biogeosciences*, 2016, V. 13, No. 16, pp. 4615–4626, DOI: 10.5194/bg-13-4615-2016.
27. Tsuruta A., Aalto T., Backman L. et al., Methane budget estimates in Finland from the CarbonTracker Europe-CH₄ data assimilation system, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2019, V. 71, No. 1, Article 1565030, DOI: 10.1080/16000889.2018.1565030.
28. Veretennikova E. E., Dyukarev E. A., Comparison of methane fluxes of open and forested bogs of the southern taiga zone of Western Siberia, *Boreal Environment Research*, 2021, V. 26, pp. 43–59.
29. Winderlich J., Gerbig C., Kolle O., Heimann M., Inferences from CO₂ and CH₄ concentration profiles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) on regional summertime ecosystem fluxes, *Biogeosciences*, 2014, V. 11, No. 7, pp. 2055–2068, DOI: 10.5194/bg-11-2055-2014.

30. Xu J., Morris P.J., Liu J., Holden J., PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis, *Catena*, 2018, V. 160, pp. 134–140, DOI: 10.1016/j.catena.2017.09.010.
31. Ying Q., Poulter B., Watts J.D. et al., WetCH₄: a machine-learning-based upscaling of methane fluxes of northern wetlands during 2016–2022, *Earth System Science Data*, 2025, V. 17, No. 6, pp. 2507–2534, DOI: 10.5194/essd-17-2507-2025.
32. Yuan K., Zhu Q., Riley W.J. et al., Boreal–Arctic wetland methane emissions modulated by warming and vegetation activity, *Nature Climate Change*, 2024, V. 14, No. 3, pp. 282–288, DOI: 10.1038/s41558-024-01933-3.
33. Yvon-Durocher G., Allen A.P., Bastviken D. et al., Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales, *Nature*, 2014, V. 507, No. 7493, pp. 488–491, DOI: 10.1038/nature13164.