

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ CH₄ В ПРИЗЕМНОМ АТМОСФЕРНОМ СЛОЕ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ БАЗЫ ДАННЫХ CAMS

С. К. Джолумбетов, Ю. И. Маркелов

Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

На основе базы данных реанализа CAMS были исследованы пространственные и временные вариации концентрации CH₄ вблизи поверхности на территории РФ за период 2009–2019 гг. В работе также оцениваются влияния на изменение концентрации метана следующих параметров: антропогенные выбросы; температура и влажность почвы; атмосферные осадки; выбросы в результате пожаров; скорость ветра; биогенные выбросы; высота приземного слоя атмосферы. Высокое содержание метана и антропогенных выбросов в основном располагается в юго-западной части РФ, а также на территории Среднего Урала и Южной Сибири. Во всех федеральных округах, за исключением УрФО, для антропогенных выбросов наблюдается положительный тренд. Максимальный прирост концентрации CH₄ получен для ПФО на 98 ppb со среднегодовой скоростью 9,75 ppb/год. Предполагается, что такой рост в большей степени обусловлен антропогенными выбросами. Было выявлено, что мощные пожары на территории ДФО, СФО и УрФО как напрямую, так и косвенно влияют на увеличение концентрации метана. Для ДФО обнаружена средняя положительная связь с горизонтальной скоростью ветра. Биогенные выбросы являются ключевым фактором, влияющим на изменение содержания CH₄, для ЦФО, а также СКФО и ЮФО, которые обусловлены увеличением температуры и влажности почвы, соответственно. Таким образом, можно предположить, что на территории РФ за период 2009–2019 гг. наибольший вклад в процесс увеличения концентрации метана вносят природные источники, такие как пожары и почвенная эмиссия, однако в отдельных случаях увеличение связано с антропогенными выбросами.

Ключевые слова: парниковые газы; концентрация CH₄; реанализ; база данных CAMS; таяние многолетних мерзлых грунтов; биогенные и антропогенные выбросы.

1. Введение

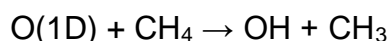
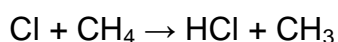
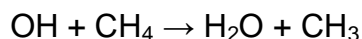
После начала индустриальной эры глобальное значение концентрации CH₄ увеличилось с 722 ppb в 1750 г. до 1877 ppb в 2019-м и продолжает расти со средней скоростью за последние десять лет – 7,3 ppb/год [1]. Доля влияния метана на радиационный форсинг в атмосфере составляет около 16 %, что намного меньше значения для CO₂ (около 82 %). Однако значение сечения поглощения теплового излучения для метана в 20–25 раз больше, чем для углекислого газа [2].

Таким образом, резкое увеличение концентрации CH_4 в атмосфере может привести к значительному усилению парникового эффекта, что в свою очередь может отразиться на изменении климата. Следовательно, важно получать полную и точную информацию о содержании метана в атмосфере, которое определяется интенсивностью его источников и стоков. Химическим путем метан в атмосфере не образуется, поэтому его поступление в атмосферу полностью определяется потоками с земной поверхности [3]. По своему происхождению метан делят на несколько групп [4–6]:

- биогенный и абиогенный (возникает в результате химической трансформации органического и неорганического вещества соответственно);
- бактериальный (образуется в результате деятельности бактерий);
- термогенный (возникает при химической трансформации в условиях высоких температуры и давления);
- пирогенный (образуется при горении органики неископаемого происхождения).

По некоторым оценкам, основная часть метана образуется в результате процессов с участием анаэробных метаногенных бактерий, которые разлагают органическое вещество в донных отложениях болот и других водоемов, в желудках животных, а также на свалках отходов [3, 6]. Помимо этого, источники метана делят на естественные (природного происхождения) и антропогенные (образовавшиеся в ходе деятельности человека). К естественным источникам относятся: заболоченные территории; моря, океаны и озера; насекомые; жвачные животные; пожары; метангидраты; многолетние мерзлые грунты. К антропогенным источникам относятся: сжигание биомассы и ископаемого топлива; добыча угля, нефти и переработка газа; сельское хозяйство; обращение с твердыми отходами [2, 5, 6].

Удаление метана из атмосферы происходит в основном за счет химических реакций с гидроксил-радикалом (OH), атомарным хлором (Cl) и возбужденным атомарным кислородом O(1D) [2, 4, 6]. Ниже представлены соответствующие реакции:



Интенсивность стока метана в тропосфере в большей степени обусловлена взаимодействием с OH, поскольку высокие содержания Cl и O(1D) находятся в верхних слоях атмосферы. За счет химической реакции с OH из атмосферы удаляется примерно 90 % метана [6].

На сегодняшний день практикуется два метода оценки источников и стоков метана: снизу вверх (bottom-up) и сверху вниз (top-down). Значения эмиссии метана, полученные этими методами, заметно разнятся между собой и имеют высокую неопределенность [2, 6]. Однако стоит отметить, что в обоих случаях заболоченные территории и влажные почвы, а также сельское хозяйство являются доминирующими для естественных и антропогенных источников, составляя соответственно около 80 и 60 % [6]. Считается, что положительная обратная связь между климатом и метаном обусловлена в основном за счет ускоренного метаногенеза, поэтому биогенные выбросы являются основным фактором в формировании такой обратной связи, в то время как лесные пожары и термогенные выбросы считаются вторичными [7]. Данный факт согласуется с тем, что в последние годы наблюдается уменьшение показателя $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ (соотношение

изотопов углерода ¹³C/¹²C в метане), которое связывают с увеличением интенсивности эмиссии заболоченных территорий и сельского хозяйства [6, 8]. Также эту тенденцию можно объяснить возможным уменьшением выбросов в результате пожаров, поскольку при горении биомассы образуются тяжелые изотопы [8,9].

По оценкам [10] на 2019 г., эмиссии метана с заболоченных территорий составляют 180 ± 10 Тг CH₄/год, эмиссии сельскохозяйственной деятельности и отходов, а также эмиссии, связанные с использованием ископаемого топлива, составляют 263 ± 24 Тг CH₄/год и 82 ± 12 Тг CH₄/год соответственно. В топ-5 стран-эмитентов входят Бразилия, Китай, Индия, Россия и США, а их общее значение эмиссии составляет половину от глобальных антропогенных выбросов. Поскольку время жизни метана в атмосфере находится в диапазоне 8–12 лет, то есть вероятность получить быстрый отклик на снижение антропогенных выбросов. На сегодняшний день для полного понимания содержания метана в атмосфере и его влияния на климат активно используются наземные и спутниковые измерения, а также результаты моделирования (реанализ). Плюсы и минусы этих методов кратко рассмотрены в работе [11].

В настоящей работе представлены пространственные и временные вариации концентрации CH₄, полученные на основе данных реанализа службы мониторинга атмосферы Коперник (Copernicus Atmosphere Monitoring Service – CAMS; <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/>) вблизи поверхности на территории Российской Федерации (РФ) за 2009–2019 гг. Для выявления качества полученных данных результаты реанализа сравнивались с наземными измерениями. Помимо этого, в работе рассмотрены межгодовая и сезонная изменчивость концентрации CH₄, а также факторы, которые напрямую или косвенно могут влиять на ее изменение: антропогенные выбросы; температура и влажность почвы; атмосферные осадки; выбросы в результате пожаров; скорость ветра; биогенные выбросы; высота приземного слоя атмосферы.

2. Материалы и методы

2.1. Концентрация CH₄

В работе используются значения концентрации метана, полученные в результате реанализа [12]. База данных CAMS формируется и производится с использованием ассимиляции данных методом 4DVar в интегрированной системе прогнозирования CY42R1. Система инверсии, которая генерирует продукт глобальной атмосферной инверсии, называется PYVAR [13]. Для выявления особенностей пространственных и временных вариаций использовались среднесуточные значения концентрации CH₄ вблизи поверхности версии 19r1s с пространственным разрешением 3° по долготе и 2° по широте. Для выбранной версии в качестве исходных параметров реанализа использовались как наземные, так и спутниковые измерения. Также рассматривались среднемесячные значения концентрации CH₄ во всем столбе атмосферы с пространственным разрешением 0,75°. Содержание метана в атмосфере исследовалось на территории РФ за 2009–2019 гг., однако для концентрации CH₄ в столбе атмосферы данные доступны лишь до 2018 г. Помимо этого, территория РФ была разделена на восемь частей: Центральный федеральный округ (ЦФО), Южный федеральный округ (ЮФО), Северо-Кавказский федеральный округ (СКФО), Северо-Западный федеральный округ (СЗФО), Уральский федеральный округ (УрФО), Приволжский федеральный округ (ПФО), Сибирский федеральный округ (СФО) и Дальневосточный федеральный округ (ДФО).

Для извлечения необходимой информации использовалось программное обеспечение Panoply 4.10.10 и R 4.0.0. Визуализация полученных результатов проводилась в программе QGIS 3.12.2. Для оценки точности полученных данных результаты реанализа сравниваются с наземными пунктами мониторинга Тикси (71,586°; 128,918°), Териберка (69,199°; 35,099°) и Екатеринбурга (56,85°; 60,65°). Первые две станции имеют региональный статус глобальной службы атмосферы (Global Atmosphere Watch – GAW; <https://community.wmo.int/activityareas/gaw>) и их измерения хранятся в Мировом центре данных по парниковым газам (the World Data Centre for Greenhouse Gases – WDCGG, Япония; <https://gaw.kishou.go.jp/>). Пункт мониторинга в Екатеринбурге расположен на территории Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (ИПЭ УрО РАН). Непрерывные измерения проводятся на базе газоанализатора Picarro G2401.

2.2. Антропогенные выбросы CH₄

Основным глобальным антропогенным источником метана является сельское хозяйство: животноводство, рисовые поля и твердые отходы [10, 14]. В работе [8] обнаружено значительное увеличение антропогенных выбросов метана над Южной Азией, тропической Африкой и Бразилией, что совпадает с быстрорастущим поголовьем скота в этих регионах, в то время как в США, Европе и России не было обнаружено существенной тенденции антропогенных выбросов с высокими темпами производства или использования ископаемого метана. База данных о выбросах для глобального и атмосферного исследования (Emissions Database for Global Atmospheric Research – EDGAR; <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>) предоставляет информацию об антропогенных выбросах парниковых газов (ПГ) в виде временных рядов и карт с пространственным распределением [15]. Помимо этого, представлены данные о выбросах по виду деятельности человека (энергетика, нефтяная промышленность, сельскохозяйственная деятельность и т. д.). В работе используются среднегодовые значения суммарных выбросов CH₄ из EDGARv6.0 с пространственным разрешением 0,1°. Однако данные доступны лишь до 2018 г.

2.3. Выбросы углерода в результате пожаров

Считается, что образование метана в результате пожаров вносит незначительный вклад в общее значение глобальной эмиссии [7, 10, 14]. Однако в региональном масштабе пожары могут являться мощными источниками ПГ и вносить значительные изменения в динамику их концентрации [11]. Глобальная база данных по выбросам пожаров (Global Fire Emission Database – GFED; <https://www.globalfiredata.org/>) объединяет спутниковую информацию о пожарной активности и продуктивности растительности, чтобы оценить площади выгорания и выбросы от пожаров. GFED предоставляет как общее значение выбросов углерода, так и по вкладам различных типов пожара: пожары саванны, лугов и кустарников; бореальные лесные пожары; умеренные лесные пожары; торфяные пожары; сжигание сельскохозяйственных отходов. В работе используются среднемесячные значения общих выбросов углерода GFEDv4 с пространственным разрешением 0,25°. Рассматриваются значения с марта по октябрь, так как для территории РФ пожары наблюдаются только в эти месяцы.

2.4. Биогенные выбросы CH₄

К основным биогенным выбросам относятся как естественные, так и антропогенные источники метана: водно-болотные угодья; насекомые (термиты); рисовые поля; животноводство; твердые бытовые отходы [14]. Их общее значение эмиссии на 2016 г. составляет 302–665 Тг CH₄/год. Заболоченные территории и животноводство вносят наибольший вклад в общую эмиссию биогенных выбросов и

в совокупности составляют порядка 60 % [10, 14]. В работе [16] было показано, что именно заболоченные территории преобладают в межгодовом изменении концентрации метана. Помимо информации о концентрации ПГ в атмосфере, CAMS предоставляет кадастры данных о выбросах антропогенного и природного происхождения. Эти кадастры основаны на сочетании существующих наборов данных и новой информации, описывающей антропогенные выбросы от использования ископаемого топлива на суше, судоходстве и авиации, а также естественные выбросы от растительности, почвы, океана и термитов [17]. В работе используются среднемесячные значения биогенных выбросов метана CAMS-GLOB-BIO_v3.1 с пространственным разрешением 0,25°.

2.5. Влажность почвы и атмосферные осадки

Удаление метана из атмосферы с помощью осадков не происходит вследствие его малой растворимости в воде [6]. Однако большое количество атмосферных осадков может привести к увеличению площади влажных почв, которые являются источником метана [2]. Интенсивность такого источника напрямую зависит от влажности почвы и увеличивается (уменьшается) при ее росте (спаде). Глобальная система ассимиляции данных о суше (the Global Land Data Assimilation System – GLDAS; <https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas>) предоставляет данные о состоянии поверхности земли и потоков, используя передовые методы моделирования и ассимиляцию спутниковых и наземных измерений [18]. Результаты расчета доступны в центре данных и информационных услуг Годдарда по наукам о Земле (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center – GES DISC; <https://disc.gsfc.nasa.gov/>). В работе используются данные GLDAS-2 v2.1 среднемесячных значений атмосферных осадков и влажности почвы на глубине 0–200 см с пространственным разрешением 0,25° [19].

2.6. Температура почвы, скорость ветра и высота приземного слоя атмосферы

Основная часть метана образуется в результате процессов с участием анаэробных метаногенных бактерий, которые разлагают органическое вещество [3,6]. Метаболическая активность и репродуктивная способность этих микроорганизмов находится в функциональной зависимости от температуры [20]. Таким образом, интенсивность эмиссии метана из влажных почв увеличивается (уменьшается) при увеличении (уменьшении) температуры почвы [2]. При увеличении температуры почвы выше чем на 2 °C происходит уменьшение влажности почвы, что в свою очередь уменьшает эмиссию метана [21]. Еще одним фактором, влияющим на изменение содержания ПГ в атмосфере, является скорость и направление ветра. Их связь с концентрацией ПГ позволяет оценить влияние местных или региональных источников, а также дальний перенос [22]. Помимо этого, высота пограничного слоя атмосферы (ПСА) также является важной характеристикой, поскольку метан имеет большую скорость перемешивания в атмосфере (1 месяц) в сравнении со временем жизни [2, 4–6]. Реанализ современной эры для исследования и приложений, вторая версия (Modern Era Reanalysis for Research and Applications – MERRA-2; gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2) использует ассимиляцию спутниковых и наземных измерений и предоставляет большой перечень метеорологических параметров. Данные MERRA-2 доступны в GES-DISC. В работе используются среднемесячные значения температуры почвы на глубине 0–150 см, горизонтальной скорости ветра вблизи поверхности и высоты пограничного слоя атмосферы с пространственным разрешением 0,5° x 0,625° [23].

3. Результаты и обсуждения

3.1. Сравнение наземных измерений с данными реанализа

На рис. 1 представлена диаграмма рассеяния среднемесячных значений концентрации CH_4 для наземных пунктов мониторинга в Екатеринбурге, Тикси, Териберке и результатов реанализа CAMS. В круглых скобках указаны значения коэффициента корреляции r . Исходя из полученных результатов, можно заметить, что для Екатеринбурга и Тикси наблюдается наибольший разброс, а значения реанализа чуть занижены в сравнении с наземными измерениями. Среднее значение концентрации CH_4 по всей выборке для реанализа завышают наземные измерения для Териберки на 0,04 % и занижают на 0,49 и 0,62 % для Екатеринбурга и Тикси соответственно. В целом можно сделать вывод, что данные реанализа хорошо воспроизводят наземные измерения концентрации CH_4 и могут быть использованы для дальнейшего исследования.

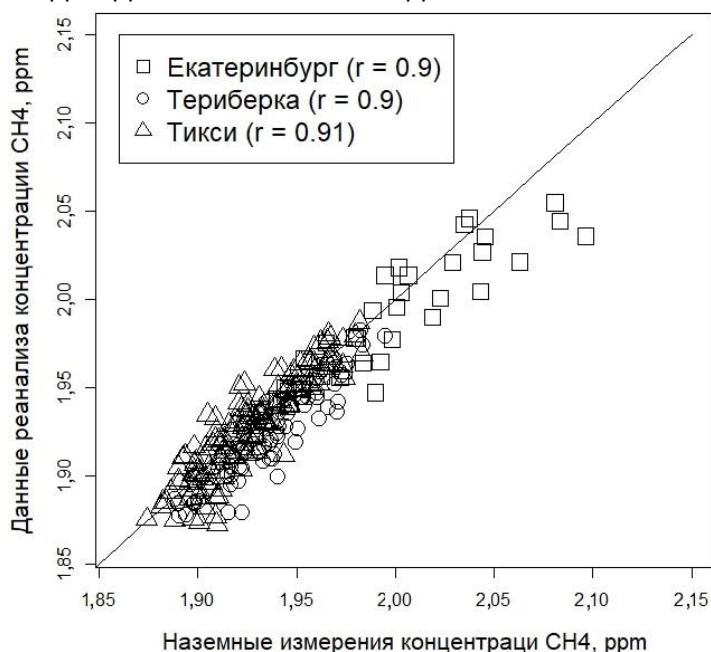


Рис. 1. Сравнение наземных измерений с реанализом

3.2. Пространственное распределение

На рис. 2, 3 представлены пространственные распределения средних значений исследуемых параметров за 2009–2019 гг. На рис. 4, 5 приведены пространственные распределения их среднегодового прироста. Прирост за год рассчитывался как среднее разниц среднегодовых значений. Высокое содержание метана вблизи поверхности и в столбе атмосферы располагается в юго-западной части страны, а также на территории Среднего Урала и Южной Сибири. Помимо этого, наблюдаются локальные области с повышенным значением концентрации метана у поверхности вблизи таких городов, как Москва, Самара, Сургут, Новосибирск, Новокузнецк, Иркутск, Владивосток, Хабаровск и Магадан. Полученный результат согласуется с пространственным распределением антропогенных выбросов, так как на данных территориях располагается скопление мощных антропогенных источников. В этой же области наблюдаются высокие значения биогенных выбросов, для которых характерно уменьшение в сторону северных широт. Похожая картина наблюдается для распределения температуры почвы и согласуется с полученными результатами, поскольку интенсивность эмиссии метана из почвы имеет прямую зависимость от температуры [2,20,21].

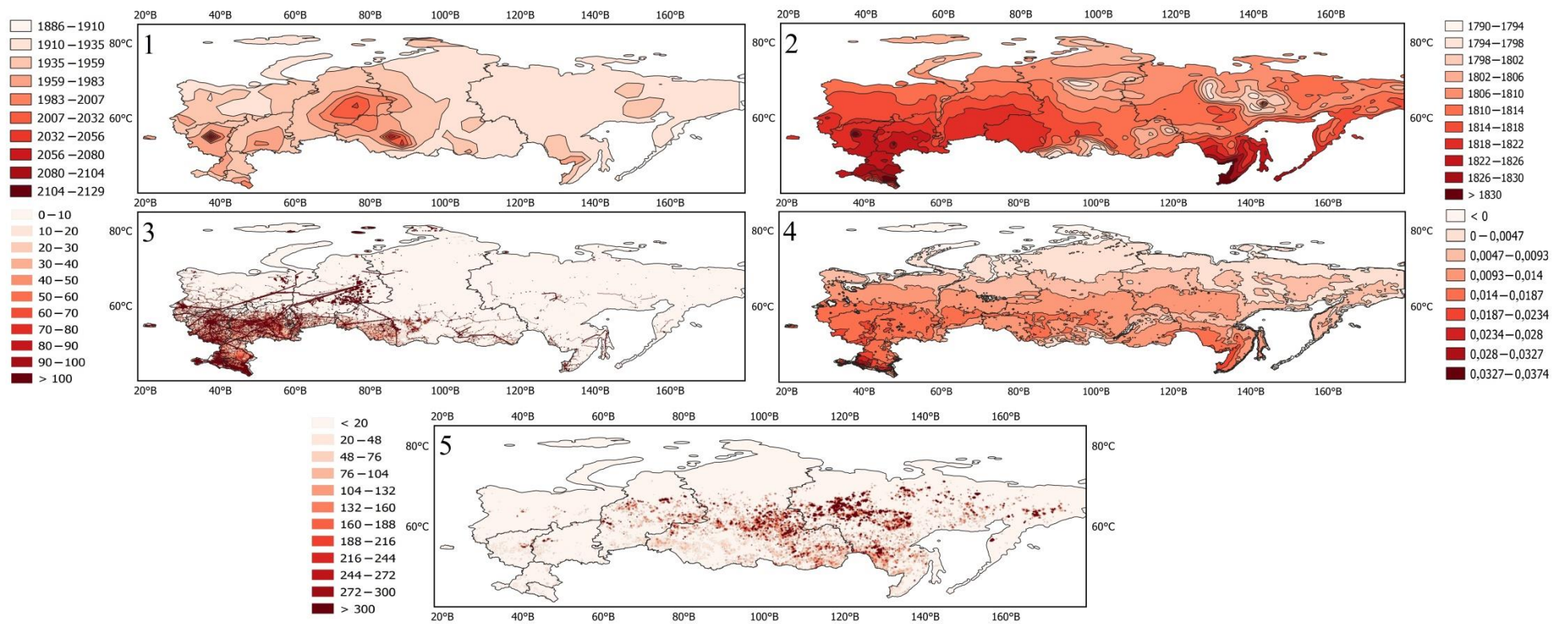


Рис. 2. Пространственные распределения средних значений за 2009–2019 гг. следующих параметров: 1 – концентрация CH₄ вблизи поверхности, ppb (2° x 3°); 2 – концентрация CH₄ в столбе атмосферы, ppb (0,75° x 0,75°); 3 – антропогенные выбросы CH₄, т (0,1° x 0,1°); 4 – биогенные выбросы CH₄, 10⁻¹⁵·кг/(м²·с) (0,25° x 0,25°); 5 – выбросы углерода в результате пожаров, гС/(м²·мес) (0,25° x 0,25°)

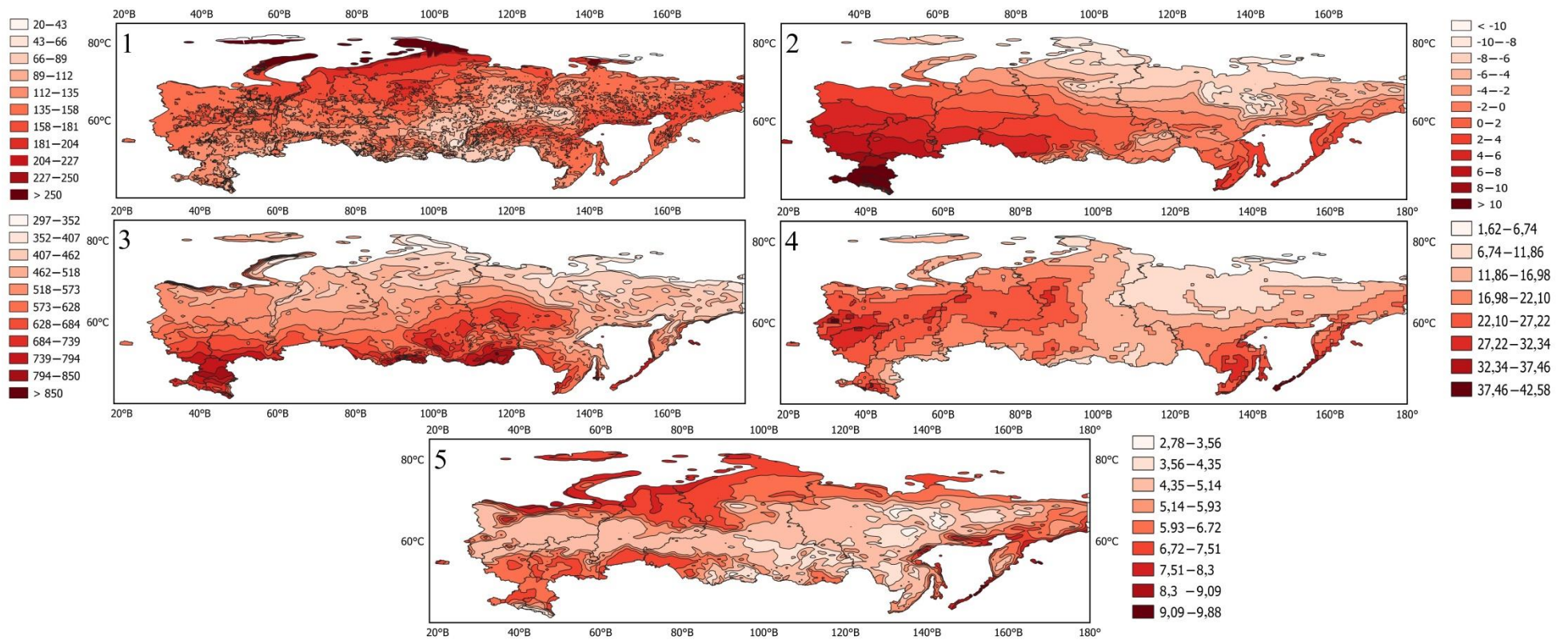


Рис. 3. Пространственные распределения средних значений за 2009–2019 гг. следующих параметров: 1 – влажность почвы на глубине 0 – 200 см, $\text{кг}/\text{м}^2$ ($0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$); 2 – температура почвы на глубине 0–150 см, $^{\circ}\text{C}$ ($0,5^{\circ} \times 0,625^{\circ}$); 3 – высота ПСА, м ($0,5^{\circ} \times 0,625^{\circ}$); 4 – атмосферные осадки, $10^{-5} \cdot \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ($0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$); 5 – скорость ветра близ поверхности (горизонтальная составляющая), м/с ($0,5^{\circ} \times 0,625^{\circ}$)

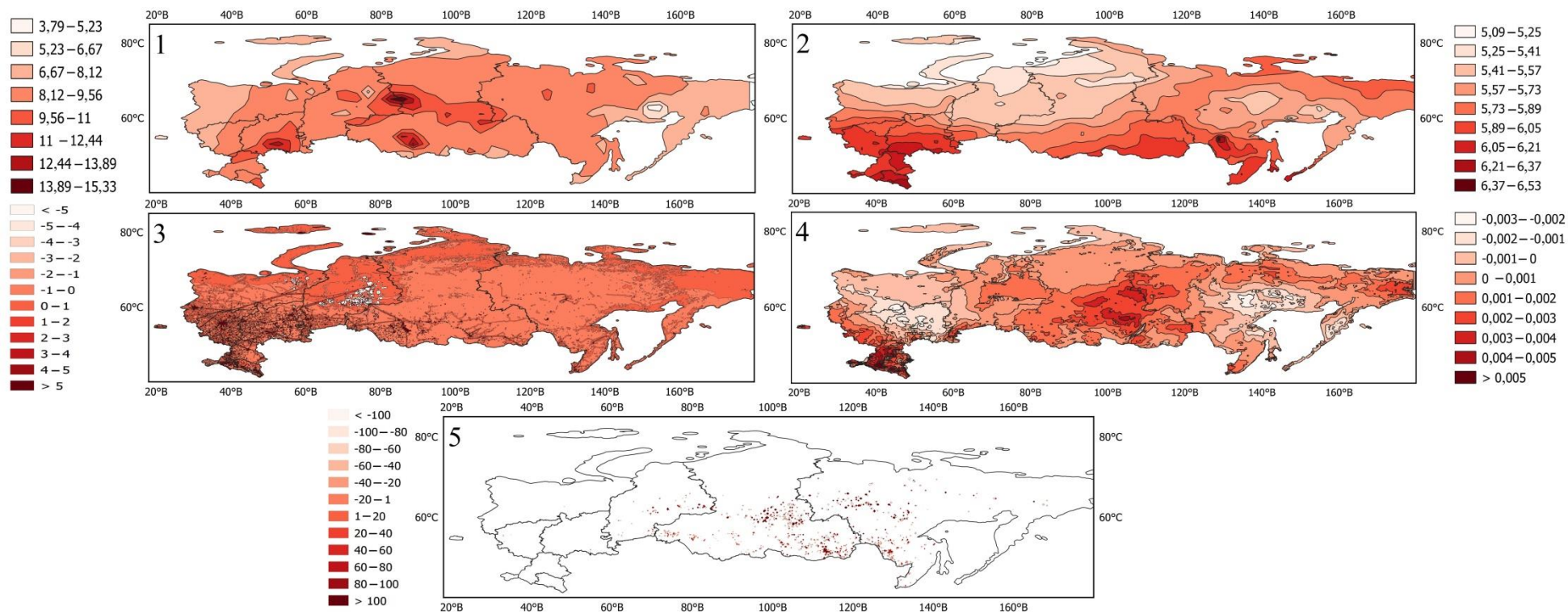


Рис. 4. Пространственные распределения среднегодового прироста за 2009–2019 гг. следующих параметров 1 – концентрация CH₄ вблизи поверхности, ppb/год (2° x 3°); 2 – концентрация CH₄ в столбе атмосферы, ppb/год (0,75° x 0,75°); 3 – антропогенные выбросы CH₄, тонны/год (0,1° x 0,1°); 4 – биогенные выбросы CH₄, 10⁻¹⁵ кг/(м²·с·год) (0,25° x 0,25°); 5 – выбросы углерода в результате пожаров, гC/(м²·мес·год) (0,25° x 0,25°)

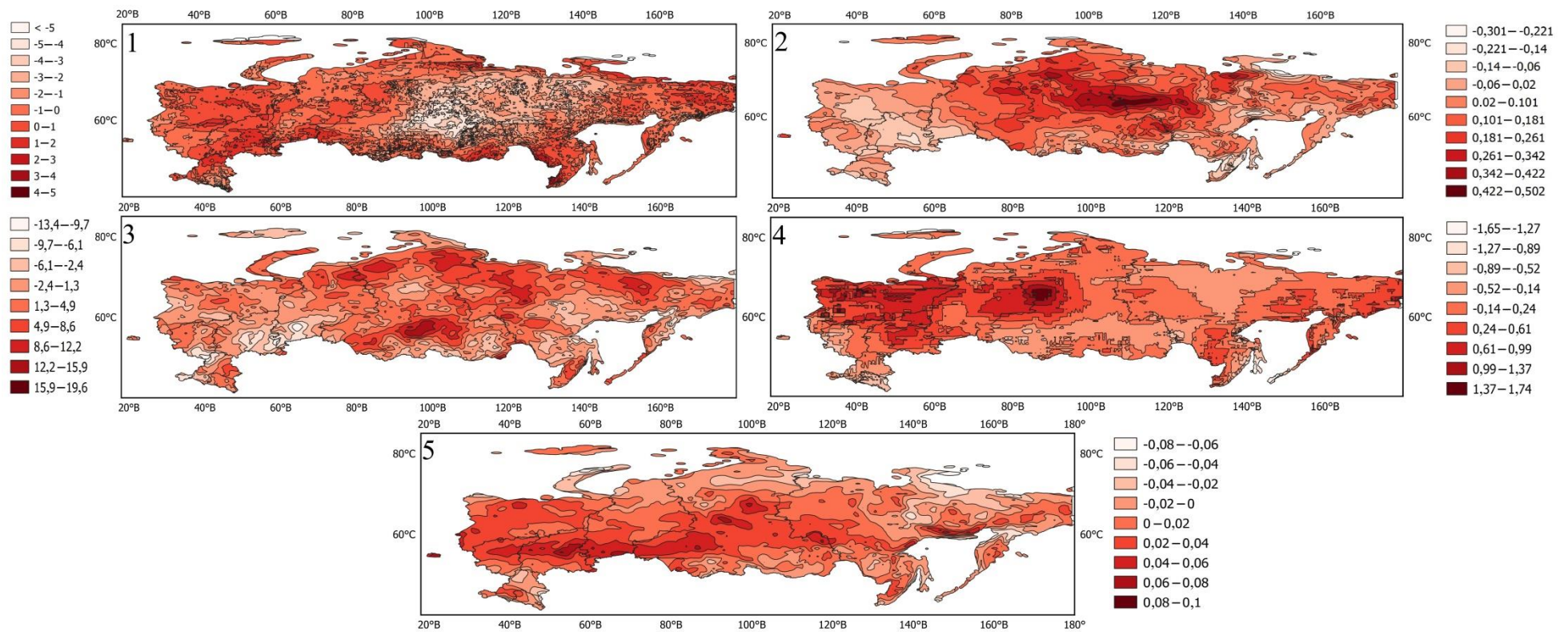


Рис.5. Пространственные распределения среднегодового прироста за 2009–2019 гг. следующих параметров: 1 – влажность почвы на глубине 0 – 200 см, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{год})$ ($0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$); 2 – температура почвы на глубине 0–150 см, $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($0,5^{\circ} \times 0,625^{\circ}$); 3 – высота ПСА, $\text{м}/\text{год}$ ($0,5^{\circ} \times 0,625^{\circ}$); 4 – атмосферные осадки, $10^{-5} \cdot \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{год})$ ($0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$); 5 – скорость ветра близ поверхности (горизонтальная составляющая), $\text{м}/(\text{с} \cdot \text{год})$ ($0,5^{\circ} \times 0,625^{\circ}$)

Стоит отметить, что большое количество атмосферных осадков наблюдается в области высоких значений концентрации метана. Однако распределение влажности почвы показало, что максимальные значения располагаются преимущественно в более высоких широтах, а минимальные в юго-восточной и западной частях СФО и ДФО соответственно. Именно на этих территориях находится большое количество мощных пожаров, значение эмиссии которых превышает $300 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$, а также их прирост за год.

Здесь же наблюдается максимальное среднегодовое увеличение температуры почвы, в то время как влажность почвы имеет минимальный прирост. Таким образом, можно сделать вывод, что большое количество мощных пожаров на данной территории приводит к увеличению температуры почвы, тем самым уменьшая ее влажность. Уменьшение влажности почвы должно было привести к уменьшению эмиссии метана [2, 21]. Однако на данной территории наблюдаются высокие значения прироста концентрации CH_4 за год, достигая 11–14 ppb/год, что говорит о дополнительных источниках, приводящих к росту концентрации метана. СФО и ДФО имеют большие площади многолетних мерзлых грунтов, в результате деградации которых высвобождается накопленный органический углерод в виде CO_2 и CH_4 . Увеличение температуры почвы приводит к таянию верхних мерзлых грунтов, что в свою очередь увеличивает высоту активного слоя, в котором микроорганизмы разлагают органическое вещество, выделяя CO_2 и CH_4 [24]. Данное предположение согласуется с результатами пространственного распределения прироста биогенных выбросов, максимальные значения которых наблюдаются именно на этой территории. Аналогичная картина наблюдается на границе УрФО и СФО, вблизи городов Янов Стан и Красноселькуп, за исключением того, что здесь также получены высокие значения среднегодового роста атмосферных осадков и влажности почвы. Пространственное распределение прироста антропогенных выбросов на данной территории имеет минимальные значения. Однако вблизи Самары, Новосибирска и Новокузнецка, где наблюдаются высокие значения прироста концентрации метана, располагается большое количество антропогенных источников со среднегодовым увеличением, превышающим 5 т/год. Из полученных результатов можно предположить, что высокое содержание метана в атмосфере обусловлено антропогенными источниками. Однако наибольший вклад в изменение концентрации за 2009–2019 гг. вносят природные источники, такие как пожары и деградация мерзлых грунтов. В отдельных случаях это обусловлено увеличением влажности и температуры почвы.

3.3. Временные вариации

На рис. 6 показана динамика среднемесячных значений концентрации CH_4 вблизи поверхности. За исследуемый период на территории РФ содержание метана увеличилось на 86 ppb: с 1904 (2009 г.) до 1990 ppb (2019 г.) со среднегодовой скоростью изменения 8,63 ppb/год, что превышает значение глобального прироста – 7,3 ppb/год [1]. Если рассматривать федеральные округа, то наибольшее изменение произошло в ПФО – на 98 ppb со среднегодовым приростом 9,75 ppb/год. На данной территории были замечены высокое содержание метана и прирост за год с максимумом возле г. Самары. Наименьшее изменение за исследуемый период наблюдается для СЗФО и ЦФО – на 79 и 82 ppb, а их среднегодовой прирост равен 7,95 и 8,15 ppb/год соответственно. Анализ сезонной изменчивости концентрации CH_4 показал, что максимальные значения достигаются в зимнее время (декабрь, февраль), исключением являются ДФО и УрФО, для них максимумы наблюдаются

в октябре и июле соответственно. Причем летний максимум для УрФО по значению превосходит максимумы остальных округов в зимнее время, что говорит о значительном превышении эмиссии над стоком. Также стоит отметить, что у всех федеральных округов, за исключением ДФО, в феврале наблюдается локальный максимум с последующим снижением до минимума, который приходится на июнь, кроме СФО и УрФО, для них он наблюдается в мае.

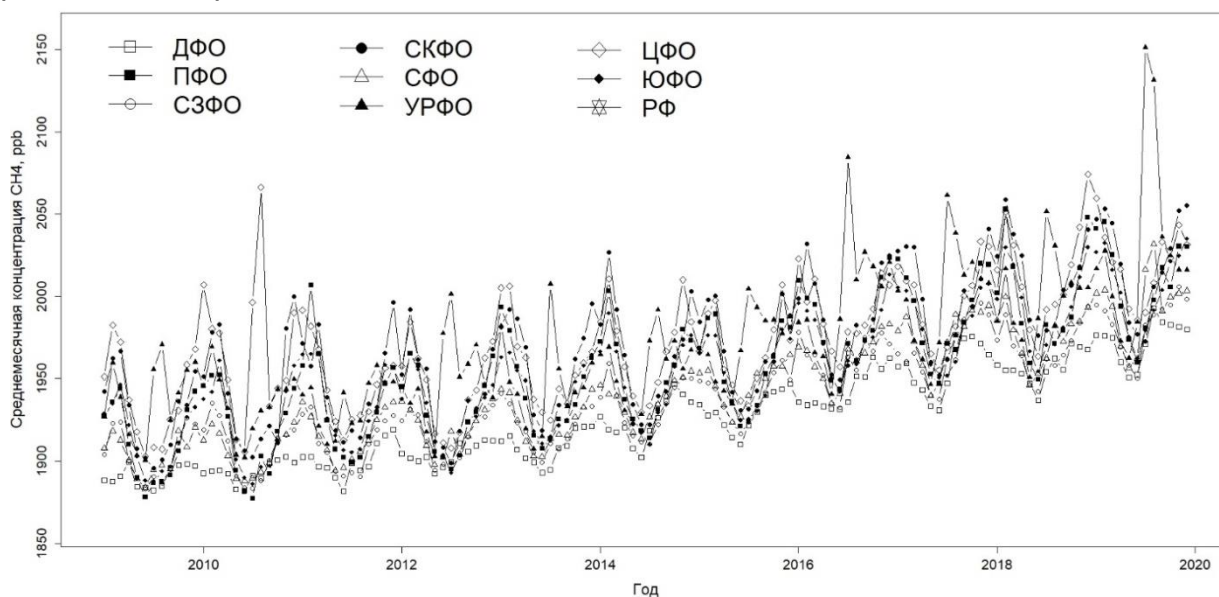


Рис. 6. Среднемесячные значения концентрации CH_4 вблизи поверхности на территории РФ

Была также рассмотрена межгодовая изменчивость концентрации метана и всех исследуемых параметров. На рис. 7 представлена динамика среднегодовых изменений всех параметров. На графике изменения среднегодовых значений концентрации CH_4 в столбе атмосферы имеются два четко выраженных максимума в 2012 и 2016 гг. для всех федеральных округов с приростом до 15 ppb/год. Для концентрации вблизи поверхности в 2016 г. наблюдается похожее изменение, однако в 2012 г. для многих федеральных округов произошло уменьшение, исключением является УрФО. Кроме того, в УрФО в 2016 и 2019 гг. среднегодовое изменение имеет максимальные значения и достигает 28–29 ppb, а значение амплитуды составляет 144 и 189 ppb соответственно. Было выявлено, что максимальное увеличение концентрации метана в 2016 г. произошло в июле и достигло 80 ppb, а в 2019 г. – 100 ppb в июле и августе.

Кроме концентрации CH_4 вблизи поверхности на территории УрФО в 2016 г., резкое увеличение также произошло для выбросов углерода в результате пожаров, температуры почвы и биогенных выбросов. Для всех параметров максимальное изменение наблюдается также в июле и составляет 321 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$, 2,5 °C и $2 \cdot 10^{-17}$ $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ соответственно. Стоит отметить, что для атмосферных осадков, влажности почвы и скорости ветра произошло уменьшение среднегодового значения. На территории УрФО, в Ханты-Мансийском автономном округе, находится высокое содержание органического углерода в почве на глубине 0–300 см и составляет порядка 400 $\text{кг}/\text{м}^2$, что почти в два раза больше, чем для территорий СФО и ДФО [11]. Анализ пространственного распределения среднегодовых изменений концентрации метана показал, что увеличение в 2016 г. происходило именно на данной территории. Таким образом, в июле 2016 г. в УрФО наблюдались засушливые условия с минимальным количеством осадков, которые привели к образованию большого количества мощных пожаров, вызвавших увеличение температуры почвы, деградацию мерзлых грунтов и как следствие высвобождение органического углерода в виде CH_4 .

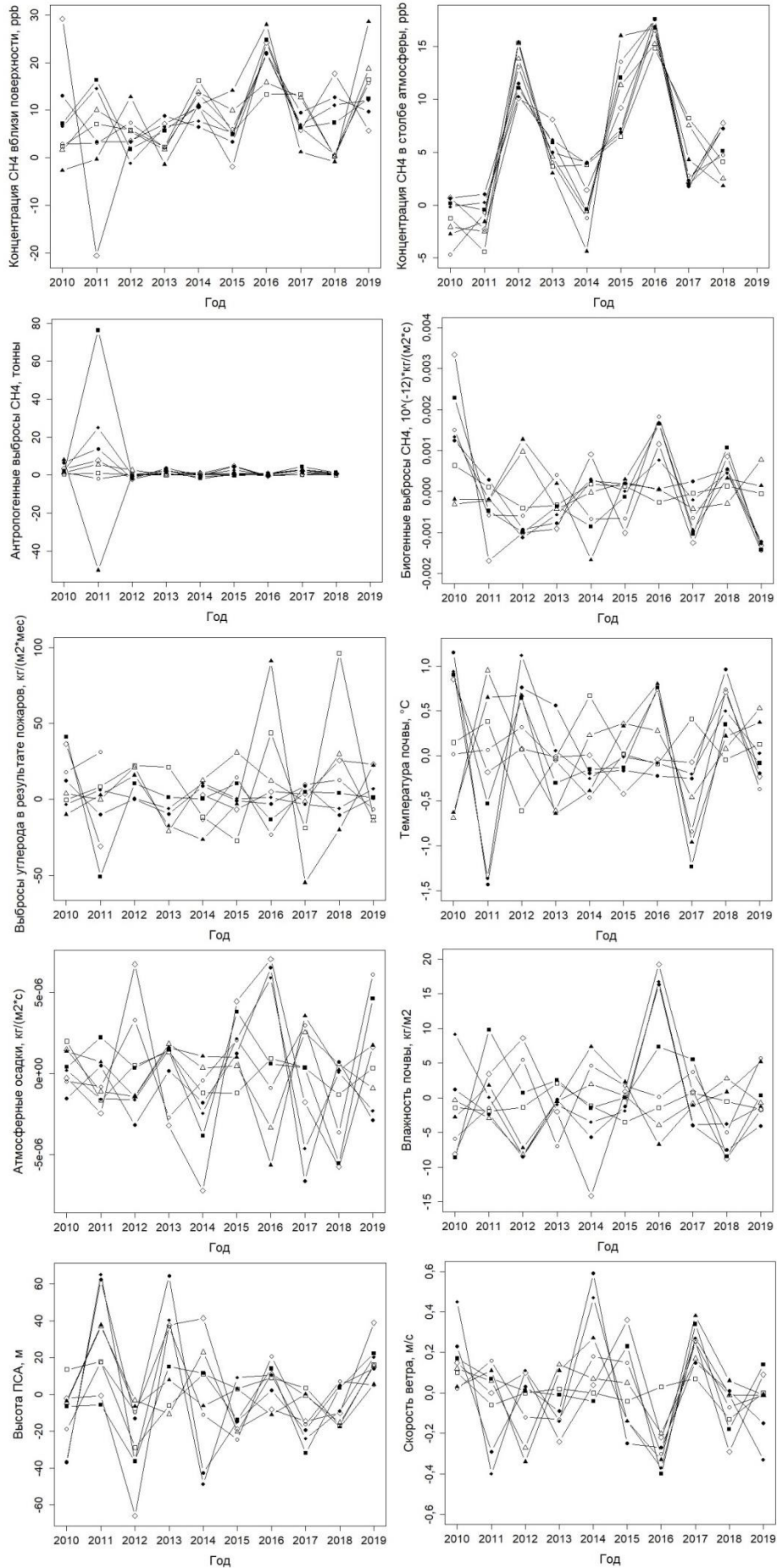


Рис. 7. Динамика изменения среднегодовых значений

В июле 2019 г. на территории УрФО наблюдается увеличение выбросов от пожаров и увеличение температуры почвы и биогенных выбросов, их значения значительно меньше в сравнении с 2016 г. и составляют $100 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$ $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ и $1,6 \cdot 10^{-18} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Присутствует также увеличение атмосферных осадков и влажности почвы. Несмотря на такое отличие с 2016 г., среднегодовое значение концентрации метана резко увеличивается. Возможно, такой результат обусловлен влиянием антропогенных выбросов, но на сегодняшний день данные по ним доступны лишь до 2018 г. Однако можно предположить, что для УрФО антропогенные выбросы имеют слабое влияние на среднегодовое изменение концентрации метана, поскольку в 2011 г. наблюдается уменьшение выбросов на 50 т, в то время как значение концентрации практически не изменилось. Также стоит отметить, что начиная с 2012 г. среднегодовое значение антропогенных выбросов для УрФО находится в пределах 70 т и практически не меняется, в то время как для остальных федеральных округов наблюдается положительный тренд. Наибольшее изменение достигается в ПФО в 2011 г. с увеличением среднегодовых выбросов на 76 т. Данный результат согласуется с изменением концентрации метана вблизи поверхности, которое имеет максимальное значение за этот год.

В 2010 г. на территории ЦФО наблюдается увеличение концентрации метана вблизи поверхности на 30 ppb с максимальными изменениями в июле и августе на 88 и 159 ppb соответственно. В эти же месяцы температура почвы увеличилась на $2,85$ и $4,1 \text{ }^\circ\text{C}$, а биогенные выбросы на $4 \cdot 10^{-17}$ и $2,32 \cdot 10^{-18} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Поскольку интенсивность эмиссии метана из почвы напрямую зависит от температуры, то ее значительное увеличение могло привести к резкому росту концентрации за год [2, 21]. Температура также влияет на образование метана при анаэробном брожении твердых бытовых отходов [25]. Анализ пространственного распределения среднегодовых изменений концентрации метана показал, что в 2010 г. максимальное увеличение произошло в Московской области и составило почти 200 ppb. Данная территория густонаселена и имеет большое количество полигонов твердых бытовых отходов. Таким образом, можно предположить, что резкое увеличение концентрации метана в 2011 г. в ЦФО в большей степени обусловлено антропогенными выбросами. Стоит также отметить, что за весь исследуемый период подобное увеличение температуры почвы не наблюдается, что говорит в пользу выдвинутого предположения.

Для оценки степени влияния того или иного параметра на изменение концентрации метана вблизи поверхности были рассчитаны коэффициенты корреляции среднегодовых изменений для каждого параметра с концентрацией CH_4 вблизи поверхности. Помимо этого, для общего представления получены средние значения за весь исследуемый период. Результаты представлены в табл. 1 и 2. Из полученных результатов можно предположить, что на территории ДФО изменение концентрации CH_4 вблизи поверхности в большей степени обусловлено высвобождением метана из многолетних мерзлых грунтов за счет повышения температуры почвы.

Следует отметить, что ДФО единственный округ, в котором наблюдается положительная связь со скоростью ветра. Это может свидетельствовать о переносе метана в другие регионы или приходе более чистых воздушных масс со стороны океана, благодаря чему уменьшалась концентрация. Поэтому, несмотря на максимальное значение выбросов в результате пожаров, коэффициент корреляции для этого параметра имеет отрицательное значение со средней степенью взаимосвязи. Такой результат можно наблюдать в 2018 г., когда значение выбросов от пожаров увеличилось в два раза, а концентрация метана не изменилась. Для более полного понимания необходимо рассмотреть скорость и направление ветра на различных высотах.

Таблица 1. Средние значения исследуемых параметров за 2009–2019 гг. для федеральных округов РФ

Параметр	ДФО	ПФО	СЗФО	СКФО	СФО	УрФО	ЦФО	ЮФО	РФ
CH ₄ близи поверхности, ppb	1 926	1 956	1 937	1 970	1 942	1 969	1 974	1 955	1 940
CH ₄ в столбе атмосферы, ppb	1 811	1 821	1 813	1 825	1 810	1 815	1 822	1 826	1 812
Антропогенные выбросы, т	5,56	180	36,34	292	51,28	79,13	195	185	49,79
Выбросы от пожаров, г С/м ² /мес	127	42,12	41,59	30,21	87,38	61,85	41,93	33,55	104
Биогенные выбросы, 10 ⁻¹⁵ *кг/м ² /с	2,30	4,27	3,02	4,45	2,75	2,95	4,67	4,56	2,81
Атмосферные осадки, 10 ⁻⁵ *кг/м ² /с	1,51	2,21	2,40	2,34	1,70	2,28	2,69	1,92	1,83
Влажность почвы, кг/м ²	143	132	163	122	142	151	141	115	144
Высота ПСА, м	507	642	533	711	561	519	657	761	544
Температура почвы, °С	-3,10	5,95	2,09	10,80	-1,72	1,27	6,82	11,26	-0,55
Скорость ветра, м/с	5,37	6,00	5,99	5,44	5,63	6,13	5,91	6,56	5,67

Таблица 2. Коэффициент корреляции среднегодовых изменений параметров с концентрацией CH₄ вблизи поверхности

Параметр	ДФО	ПФО	СЗФО	СКФО	СФО	УрФО	ЦФО	ЮФО	РФ
CH ₄ в столбе атмосферы	0,32	0,24	0,52	0,46	0,32	0,74	0,37	0,34	0,43
Антропогенные выбросы	-0,10	0,36	-0,10	-0,32	0,19	0,18	-0,54	0,30	-0,34

Окончание табл. 2

Параметр	ДФО	ПФО	СЗФО	СКФО	СФО	УрФО	ЦФО	ЮФО	РФ
Выбросы от пожаров	-0,47	-0,59	-0,91	0,05	-0,18	0,73	0,84	0,20	-0,39
Биогенные выбросы	-0,18	0,29	0,04	0,23	0,38	0,42	0,84	0,34	-0,06
Атмосферные осадки	-0,08	0,09	0,38	0,50	-0,45	-0,53	0,05	0,46	-0,11
Влажность почвы	-0,13	0,50	0,57	0,74	-0,10	-0,01	-0,11	0,71	0,38
Высота ПСА	0,50	0,54	0,07	-0,10	0,58	-0,21	0,06	0,48	0,45
Температура почвы	0,45	0,13	0,01	0,25	0,54	0,57	0,67	-0,54	0,39
Скорость ветра	0,29	-0,59	-0,32	-0,08	-0,16	-0,56	-0,29	-0,58	-0,14

Максимальная положительная связь антропогенных выбросов с концентрацией метана получена для ПФО, что согласуется с ранее полученными результатами. Помимо этого, увеличение концентрации на данной территории, а также в СКФО и ЮФО может быть обусловлено биогенными выбросами за счет увеличения влажности почвы. В УрФО, СФО и ЦФО также присутствует положительная связь с биогенными выбросами, интенсивность эмиссии которых в большей степени обусловлена увеличением температуры почвы. Для СФО и УрФО еще одним фактором в изменении концентрации CH₄ также может являться деградация мерзлых грунтов.

Представленные результаты в табл. 2 получены на основе среднегодовых значений параметра для всей территории федерального округа, поэтому для более точной оценки влияния различных параметров на изменение концентрации метана необходимо рассматривать карты с пространственным распределением коэффициента корреляции среднегодовых изменений параметров с концентрацией CH₄ вблизи поверхности.

4. Выводы

1. На основе базы данных реанализа CAMS были исследованы пространственные и временные вариации концентрации CH₄ вблизи поверхности на территории РФ за 2009–2019 гг. Было выявлено, что высокое содержание метана в основном наблюдается в юго-западной части РФ, а также на территории Среднего Урала и Южной Сибири. Отмечаются локальные максимумы возле Москвы, Самары, Сургута, Новосибирска, Новокузнецка и Иркутска. Полученный результат согласуется с пространственным распределением антропогенных выбросов, максимальное значение которых за весь исследуемый период выявлено в СКФО и составляет порядка 300 т метана в год. Максимальный прирост концентрации CH₄ наблюдается в ПФО со среднегодовой скоростью 9,75 ppb/год. Предполагается, что такой рост в большей степени обусловлен антропогенными выбросами.

2. Мощные пожары на территории ДФО, СФО и УрФО являются основным фактором, влияющим на прирост концентрации метана как напрямую – при сгорании органического материала, так и косвенно – при деградации многолетних мерзлых грунтов за счет увеличения температуры почвы. Наиболее ярко это проявляется в условиях повышенной засухи, как в 2016 г. в УрФО. Стоит отметить, что для ДФО прослеживается положительная взаимосвязь с горизонтальной скоростью ветра, что указывает на возможный принос более чистых воздушных масс со стороны океана либо перенос в другие регионы.

3. Обнаружена сильная положительная взаимосвязь концентрации CH_4 с температурой почвы на территории ЦФО, особенно в 2010 г., когда прирост температуры почвы по сравнению с предыдущим годом в августе составил более 4°C , при этом увеличение содержания метана составило 200 ppb. Увеличение температуры почвы приводит к увеличению интенсивности эмиссии биогенных выбросов, которые могут быть как естественными, так и антропогенными. Для более полного понимания необходимо рассмотреть среднемесячные значения антропогенных выбросов с разбивкой на типы источников. Увеличение концентрации CH_4 в СКФО и ЮФО также может быть обусловлено биогенными выбросами, однако уже за счет увеличения влажности почвы.

4. Исходя из полученных результатов, можно предположить, что на территории РФ за 2009–2019 гг. наибольший вклад в процесс увеличения концентрации метана вносят природные источники, такие как пожары и почвенная эмиссия, однако в отдельных случаях это связано с антропогенными выбросами, для которых наблюдается положительный тренд во всех федеральных округах РФ за исключением УрФО.

5. Список литературы

1. WMO (World Meteorological Organization) 2020. WMO Greenhouse Gas Bulletin. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through. 2019. № 16 (23 November 2020).
2. Елисеев, А. В. Глобальный цикл метана: обзор / А. В. Елисеев // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2018. – Т. 1. – С. 52–70. – DOI 10.21513/2410-8758-2018-1-52-70. – EDN XRRDPF.
3. Король, И. Л. Атмосферный метан и глобальный климат / И. Л. Король, А. А. Киселев // *Природа*. – 2004. – № 7(1067). – С. 47–52. – EDN OPLRBB.
4. Ульбаев, Т. С. Роль метана в парниковом эффекте / Т. С. Ульбаев, М. П. Коротеев, И. В. Артамонова // *Природообустройство*. – 2009. – № 1. – С. 44-49. – EDN KUVSQJ.
5. Бажин, Н. М. Метан в атмосфере / Н. М. Бажин // *Соросовский образовательный журнал*. – 2000. – Т. 6. – № 3. – С. 52–57.
6. Роль метана в изменении климата / Под ред. А. Г. Ишкова. – М.: НИИПЭ, 2018. – 135 с.
7. Cheng C. H. Impact of interannual and multidecadal trends on methane-climate feedbacks and sensitivity / C. H. Cheng, S. A. T. Redfern // *Nature communications*. – 2022. – Vol. 13, – No. 1. – P. 1–11. – DOI <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31345-w>.
8. Attribution of the accelerating increase in atmospheric methane during 2010-2018 by inverse analysis of GOSAT observations / Y. Zhang, D. J. Jacob, X. Lu [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2021. – Vol. 21, No 5. – P. 3643–3666. – DOI 10.5194/acp-21-3643-2021. – EDN BRUWRT.
9. Бажин, Н. М. Метан в окружающей среде: аналит. обзор / Н. М. Бажин. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2010. – 56 с.
10. The 2019 methane budget and uncertainties at 1° resolution and each country through Bayesian integration Of GOSAT total column methane data and a priori inventory estimates / J. R. Worden, D. H. Cusworth, Z. Qu [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2022. – Vol. 22, No. 10. – P. 6811–6841. – DOI 10.5194/acp-22-6811-2022
11. Dzholumbetov, S. K. Spatial and Temporal Variations in CO_2 Concentration in the Surface Atmospheric Layer of the Territory of the Russian Federation Based on the CAMS Database / S. K. Dzholumbetov // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2022. – Vol. 58, No 2. – P. 158 – 167. – DOI 10.1134/S0001433822020049. – EDN GHSDAU.

12. CAMS global inversion-optimised greenhouse gas fluxes and concentrations. A. Inness, M. Ades, A. Agustí-Panareda, [et. al.] Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) Atmosphere Data Store (ADS). (Accessed on <29-Dec-2020>), <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-reanalysis-eac4?tab=overview>
13. European Union (2016). Copernicus Knowledge Base for the Copernicus Climate Change Service and the Copernicus Atmosphere Service, implemented by ECMWF. Available at: [Accessed 20.01.2021]. <http://copernicus-support.ecmwf.int/knowledgebase>
14. *Shakin V. V.* Atmospheric methane: Natural and anthropogenic sources / V. V. Shakin, S. V. Vlasov, A. V. Doronin // *Scholars J. of Research in Agriculture and Biology*. – 2019. – Vol. 4., No. 1. – P. 262 – 274. – DOI <http://dx.doi.org/10.29003/m1986.978-5-317-06580-5>
15. High resolution temporal profiles in the Emissions Database for Global Atmospheric Research / M. Crippa, E. Solazzo, G. Huang [et al.] // *Scientific Data*. – 2020. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–17. – DOI 10.1038/s41597-020-0462-2.
16. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability / P. Bousquet, P. Ciais, J. B. Miller [et al.] // *Nature*. – 2006. – Vol. 443. – No. 7110. – P. 439–443. – DOI <https://doi.org/10.1038/nature05132>
17. CAMS global emission inventories. A. Inness, M. Ades, A. Agustí-Panareda, [et. al.] Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) Atmosphere Data Store (ADS). (Accessed on <27-Jan-2021>), <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-emission-inventories?tab=overview>
18. The global land data assimilation system / M. Rodell, P. R. Houser, U. Jambor [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological society*. – 2004. – Vol. 85, No. 3. – P. 381–394. – DOI 10.1175/BAMS-85-3-381
19. *Beaudoin, H. and Rodell M.*, NASA/GSFC/HSL (2020), GLDAS Noah Land Surface Model L4 monthly 0.25 x 0.25-degree V2.1, Greenbelt, Maryland, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [13-Jun-2022], 10.5067/SXAVCZFAQLNO
20. *Баадер В.* Биогаз: теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер / пер. М. И. Серебрянов. – М.: Колос, 1982. – 148 с.
21. *Cao M.* Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change / M. Cao, K. Gregson, S. Marshall // *Atmospheric environment*. – 1998. – Vol. 32, No. 19. – P. 3293–3299. – DOI <https://doi.org/10.1016/S1352-2310%2898%2900105-8>
22. *Гуляев Е. А.* Концентрация диоксида углерода, метана и монооксида углерода в приземном слое атмосферы г. Екатеринбурга / Е. А. Гуляев, К. Л. Антонов, Ю. И. Маркелов // *Физика. Технологии. Инновации (ФТИ-2020)*. – Екатеринбург, 2020. – С. 80–91.
23. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 tavgU_2d_flux_Nx: 2d, diurnal, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Surface Flux Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [07-Jun-2022], 10.5067/LUHPNWAKYIO3.
24. Future projection of greenhouse gas emissions due to permafrost degradation using a simple numerical scheme with a global land surface model / T. Yokohata, A. Ito, K. Tanaka [et al.] // *Progress in Earth and Planetary Science*. – 2020. – Vol. 7, No 1. – P. 56. – DOI 10.1186/s40645-020-00366-8. – EDN HMKWLE.
25. *Zhao, H.* Methane Emissions from Landfills / H. Zhao. Columbia: Department of Earth and Environmental Engineering Fu Foundation School of Engineering and Applied Science Columbia University, 2019. – 96 p.

Сведения об авторах:

Джолумбетов Сергей Курмангазеевич, м. н. с. лаборатории эколого-климатических проблем Арктики Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Маркелов Юрий Иванович, канд. физ.-мат. н., заведующий лабораторией эколого-климатических проблем Арктики Института промышленной экологии УрО РАН.

SPATIAL AND TIME VARIATIONS OF CH₄ CONCENTRATION IN THE SURFACE ATMOSPHERIC LAYER OF THE TERRITORY OF THE RUSSIAN FEDERATION BASED ON THE CAMS DATABASE

S. K. Dzholumbetov, Yu. I. Markelov

*Institute of Industrial Ecology, Ural Branch, Russian Academic of Sciences,
Ekaterinburg, Russia*

Based on the CAMS reanalysis database, spatial and temporal variations in the CH₄ concentration near the surface on the territory of the Russian Federation for the period 2009-2019 were studied. The work also evaluates the impact of the following parameters on the change in methane concentration: anthropogenic emissions; soil temperature and moisture; precipitation; emissions from fires; wind speed; biogenic emissions; the height of the surface layer of the atmosphere. The high content of methane and anthropogenic emissions is mainly located in the southwestern part of the Russian Federation, as well as in the middle Urals and southern Siberia. In all federal districts, with the exception of the Ural Federal District, a positive trend is observed for anthropogenic emissions. The maximum increase in CH₄ concentration was obtained for the PFD by 98 ppb with an average annual rate of 9.75 ppb/year. It is assumed that this growth is largely due to anthropogenic emissions. It was found that powerful fires in the territory of the Far Eastern Federal District, Siberian Federal District and Ural Federal District, both directly and indirectly affect the increase in methane concentration. For the Far Eastern Federal District, an average positive relationship with the horizontal wind speed was found. Nutrient emissions are a key factor influencing the change in the CH₄ content for the Central Federal District, as well as the North Caucasus Federal District and the Southern Federal District, which are caused by an increase in temperature and soil moisture, respectively. Thus, it can be assumed that in the territory of the Russian Federation for the period 2009-2019. The greatest contribution to the process of increasing the concentration of methane is made by natural sources, such as fires and soil emissions. However, in some cases, the increase is associated with anthropogenic emissions.

Key words: greenhouse gases; CH₄ concentration; reanalysis; CAMS database; permafrost thawing; biogenic and anthropogenic emissions.

References

1. WMO (World Meteorological Organization) 2020. WMO Greenhouse Gas Bulletin. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through. 2019. No. 16 (November 23, 2020).
2. Eliseev, A. V. Global methane cycle: a review / A. V. Eliseev // Fundamental and applied climatology. – 2018. – Vol. 1. – P. 52–70. – DOI 10.21513/2410-8758-2018-1-52-70. – EDN XRRDPF.
3. Korol, I. L. Atmospheric methane and global climate / I. L. Korol, A. A. Kiselev // Priroda. – 2004. – No. 7 (1067). – P. 47 – 52. – EDN OPLRBB.
4. Ulbaev, T. S. The role of methane in the greenhouse effect / T. S. Ulbaev, M. P. Koroteev, I. V. Artamonova // Prirodopodobie. – 2009. – No. 1. – P. 44–49. – EDN KUVSQQ.
5. Bazhin, N. M. Methane in the atmosphere / N. M. Bazhin // Soros Educational J. – 2000. – Vol. 6, No. 3. – P. 52–57.
6. The role of methane in climate change / Ed. A. G. Ishkova. – M. : NIPE, 2018. – 135 p.
7. Cheng, C. H. Impact of interannual and multidecadal trends on methane-climate feed-backs and sensitivity / C. H. Cheng, S. A. T. Redfern // Nature communications. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – P. 1–11. – DOI <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31345-w>
8. Zhang, Y. Attribution of the accelerating increase in atmospheric methane during 2010-2018 by inverse analysis of GOSAT observations / Y. Zhang, D. J. Jacob, X. Lu [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2021. – Vol. 21, No 5. – P. 3643–3666. – DOI 10.5194/acp-21-3643-2021. – EDN BRUWRT.

9. *Bazhin, N. M.* Methane in the environment: analyt. review / N. M. Bazhin. – Novosibirsk: State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. – 56 p.
10. The 2019 methane budget and uncertainties at 1° resolution and each country through Bayesian integration Of GOSAT total column methane data and a priori inventory estimates / J. R. Worden, D. H. Cusworth, Z. Qu [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2022. – Vol. 22, No. 10. – P. 6811–6841. – DOI <https://doi.org/10.5194/acp-22-6811-2022>
11. *Dzholumbetov, S. K.* Spatial and Temporal Variations in CO₂ Concentration in the Surface Atmospheric Layer of the Territory of the Russian Federation Based on the CAMS Database / S. K. Dzholumbetov // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2022. – Vol. 58, No 2. – P. 158–167. – DOI 10.1134/S0001433822020049. – EDN GHSDAU.
12. CAMS global inversion-optimised greenhouse gas fluxes and concentrations / A. Inness, M. Ades, A. Agustí-Panareda, [et. al.] Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) Atmosphere Data Store (ADS). (Accessed on <29-Dec-2020>).
13. European Union (2016). Copernicus Knowledge Base for the Copernicus Climate Change Service and the Copernicus Atmosphere Service, implemented by ECMWF. Available at: [Accessed 20.01.2021]. <http://copernicus-support.ecmwf.int/knowledgebase>
14. *Shakin, V. V.* Atmospheric methane: Natural and anthropogenic sources / V. V. Shakin, S. V. Vlasov, A. V. Doronin // *Scholars J. of Research in Agriculture and Biology*. – 2019. – Vol. 4, No. 1. – P. 262–274. – DOI <http://dx.doi.org/10.29003/m1986.978-5-317-06580-5>
15. High resolution temporal profiles in the Emissions Database for Global Atmospheric Research / M. Crippa, E. Solazzo, G. Huang [et al.] // *Scientific Data*. – 2020. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–17. – DOI 10.1038/s41597-020-0462-2.
16. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability / P. Bousquet, P. Ciais, J. B. Miller [et al.] // *Nature*. – 2006. – Vol. 443, No. 7110. – P. 439–443. – DOI <https://doi.org/10.1038/nature05132>
17. CAMS global emission inventories / A. Inness, M. Ades, A. Agustí-Panareda, [et. al.] Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) Atmosphere Data Store (ADS). (Accessed on <27-Jan-2021>), <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-emission-inventories?tab=overview>
18. The global land data assimilation system / M. Rodell, P. R. Houser, U. Jambor [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological society*. – 2004. – Vol. 85, No. 3. – P. 381–394. – DOI 10.1175/BAMS-85-3-381
19. *Beaudoin, H. and Rodell, M.*, NASA/GSFC/HSL (2020), GLDAS Noah Land Surface Model L4 monthly 0.25 x 0.25-degree V2.1, Greenbelt, Maryland, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [13-Jun-2022], 10.5067/SXAVCZFAQLNO
20. *Baader, V.* Biogas: theory and practice / V. Baader, E. Done, M. Brenderfer. – M. : Kolos, 1982. – 148 p.
21. *Cao, M.* Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change / M. Cao, K. Gregson, S. Marshall // *Atmospheric environment*. – 1998. – Vol. 32, No. 19. – P. 3293–3299. – DOI <https://doi.org/10.1016/S1352-2310%2898%2900105-8>
22. *Gulyaev, E. A.* Concentration of carbon dioxide, methane and carbon monoxide in the surface layer of the atmosphere in Yekaterinburg / E. A. Gulyaev, K. L. Antonov, Yu. I. Markelov // *Physics. Technology. Innovations (FTI-2020)*. – Yekaterinburg. – 2020. – P. 80–91.
23. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 tavgU_2d_flux_Nx: 2d, diurnal, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Surface Flux Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [07-Jun-2022], 10.5067/LUHPNWAKYIO3
24. Future projection of greenhouse gas emissions due to permafrost degradation using a simple numerical scheme with a global land surface model / T. Yokohata, A. Ito, K. Tanaka [et al.] // *Progress in Earth and Planetary Science*. – 2020. – Vol. 7, No 1. – P. 56. – DOI 10.1186/s40645-020-00366-8. – EDN HMKWLE.
25. *Methane Emissions from Landfills* / H. Zhao. Columbia: Department of Earth and Environmental Engineering Fu Foundation School of Engineering and Applied Science Columbia University, 2019. – 96 p.