

УДК 551.510.42

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ CO<sub>2</sub> В ПРИЗЕМНОМ АТМОСФЕРНОМ СЛОЕ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ БАЗЫ ДАННЫХ CAMS

© 2022 г. С. К. Джолумбетов\*

*Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН,  
ул. Софьи Ковалевской, 20, Екатеринбург, 620000 Россия*

*\*e-mail: S.K.Dzholumbetov@ecko.uran.ru*

Поступила в редакцию 10.10.2021 г.

После доработки 29.11.2021 г.

Принята к публикации 08.12.2021 г.

На основе данных реанализа Copernicus Atmosphere Monitoring Service были исследованы пространственные и временные вариации концентрации CO<sub>2</sub> вблизи поверхности на территории Российской Федерации за период 2010–2019 гг. Было выявлено, что в юго-западной части страны наблюдаются высокие значения концентрации CO<sub>2</sub> и антропогенных выбросов. Однако прирост за десять лет на данной территории минимален. Максимальный прирост наблюдается в Дальневосточном, Уральском и Сибирском федеральных округах, достигая значений 2.48, 2.41 и 2.39 ppm/год соответственно. Помимо этого, в этих частях Российской Федерации достигаются максимальные значения выбросов углерода в результате пожаров, а также наблюдается максимальное изменение температуры почвы. Такое изменение температуры может привести к значительному высвобождению углерода, накопленного многолетними мерзлыми грунтами. Возможно, именно эти два фактора привели к максимальному приросту концентрации CO<sub>2</sub> на данной территории за период 2010–2019 гг. Было выявлено, что в 2016 году для Уральского и Приволжского федеральных округов увеличение среднегодовой концентрации CO<sub>2</sub> достигло 5.8 и 5.65 ppm, а значение амплитуды составило 31.73 и 26.07 ppm соответственно. Такой результат может быть обусловлен резким увеличением выбросов углерода в результате пожаров на 310% в Уральском федеральном округе, а также изменением температуры почвы примерно на 0.8°C, что в свою очередь могло увеличить почвенную эмиссию в обоих регионах Российской Федерации. Значительного влияния антропогенных выбросов на изменение концентрации CO<sub>2</sub> не наблюдается. Таким образом, можно сделать вывод, что наибольший вклад в процесс увеличения концентрации углекислого газа за десять лет обусловлен его природными источниками, такими как пожары, почвенная эмиссия.

**Ключевые слова:** парниковые газы, реанализ, база данных CAMS, пространственные вариации концентрации CO<sub>2</sub>, выбросы в результате пожара, таяние многолетних мерзлых грунтов

**DOI:** 10.31857/S0002351522020043

### 1. ВВЕДЕНИЕ

После начала индустриальной эры глобальное значение концентрации CO<sub>2</sub> увеличилось с 278 ppm в 1750 до 410.5 ppm в 2019 и продолжает расти со средней скоростью за последние десять лет – 2.37 ppm/год [1]. Углекислый газ является одним из основных антропогенных парниковых газов (ПГ). На его долю приходится около 82% увеличения радиационного воздействия за последнее десятилетие. Глобальный углеродный цикл, имеет с климатом обратную положительную связь, усиливающую на 10–15% отклик температуры на антропогенные выбросы CO<sub>2</sub> [2]. Основные источники и поглотители CO<sub>2</sub> находятся вблизи поверхности Земли, поэтому важно получать точную информацию о концентрации углекислого газа в тропосфе-

ре, контролировать антропогенные выбросы, а также подробно изучать факторы, влияющие на изменение содержания CO<sub>2</sub> [3].

На сегодняшний день по всему земному шару расположено множество наземных станций мониторинга ПГ в атмосфере. Для общего понимания состава атмосферы и его изменений, результаты измерений предоставляются в открытом доступе, формируя большие базы данных. К основным организациям, в которых были созданы такие базы данных, можно отнести: всемирный центр данных по парниковым газам (the World Data Centre for Greenhouse Gases – WDCGG, Япония; <https://gaw.kishou.go.jp/>), исследовательские лаборатории системы Земли национального управления океанических и атмосферных исследований

(National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory – NOAA/ESRL, США; <https://gml.noaa.gov/ccgg/obspack/>), а также интегрированная система наблюдения за углеродом (the Integrated Carbon Observation System – ICOS, Финляндия; <https://icos-atc.lscce.ipsl.fr/>). Несмотря на то, что наземные измерения предоставляют высокоточные данные, они не позволяют получить глобальное пространственное и временное распределение, а измерения над морем или в арктических регионах несут за собой существенные финансовые затраты. Также существенным минусом наземных измерений является отсутствие единого метода измерения, что может привести к большим неопределенностям [3]. Помимо этого, наземные измерения не позволяют получить информацию о распределении концентрации ПГ по высоте, поэтому некоторые исследователи используют аэрологические методы измерения, например, в работе [4] с помощью самодельного зондирования изучается вертикальное распределение ПГ над Западной Сибирью.

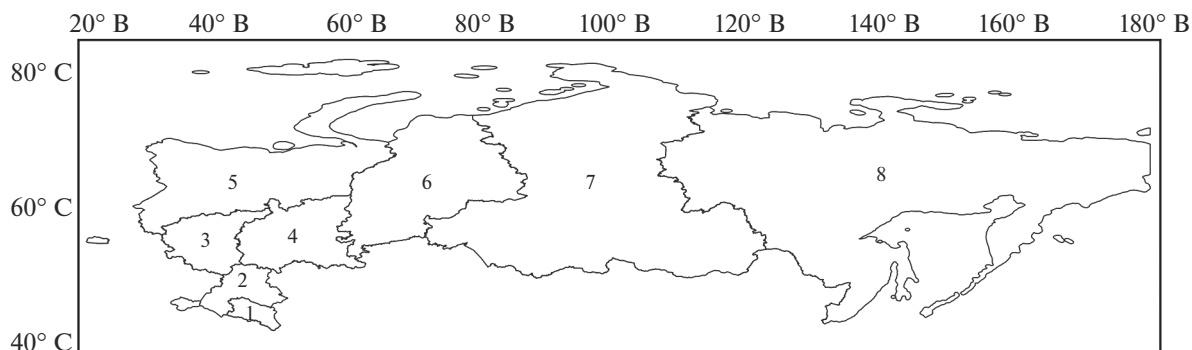
В последние годы стали широко использоваться спутниковые измерения концентрации ПГ. Они исключают недостатки наземных измерений и в совокупности с данными метеорологических станций и методов математического моделирования позволяют получить глобальное трехмерное пространственное распределение ПГ. На бортах спутников устанавливаются приборы, которые измеряют спектр отраженного и испускаемого земной поверхностью и атмосферой излучения в инфракрасной (ИК) области. ИК спектрометрам необходимо регистрировать излучение в диапазоне примерно 3–16 мкм, так как полосы поглощения углекислого газа находятся в области 4.3 и 15.4 мкм [5]. На сегодняшний день к основным спутникам, измеряющим содержание ПГ в тропосфере, можно отнести (название прибора/название спутника): AIRS/AQUA [6], TES/AURA [7], TANSO-FTS/GOSAT [8], IASI/Metop-A [9], SCIAMACHY/ENVISAT [10]. Большинство результатов спутниковых измерений доступно 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/>). Благодаря спутниковым измерениям многие исследователи провели обширную работу по изучению пространственного и временного распределения концентрации CO<sub>2</sub>, а также факторов, влияющих на ее изменение в атмосфере [3, 11].

Несмотря на то, что спутниковые измерения охватывают практически всю поверхность Земли, они имеют некоторые недостатки. К главным из них можно отнести: измерения при отсутствии облаков, малая чувствительность сигнала в нижней тропосфере, наличие температурной инверсии [12]. Помимо этого, для контроля достовер-

ности и качества спутниковых измерений проводятся сравнение с наземными измерениями. Сеть наблюдения за общим содержанием углерода (Total Carbon Column Observing Network – TCCON; <https://tccodata.org/>) имеет множество наземных спектрометров Фурье и предоставляет интегральное значение концентрации CO<sub>2</sub> во всем столбе атмосферы. Примерами сравнения спутниковых и наземных измерений могут служить работы [13, 14].

Экспериментальные данные в совокупности с моделями атмосферы могут использоваться для получения точной оценки атмосферных переменных (в том числе и значений концентрации ПГ). Такой процесс получения оценки называется реанализом (ретроспективный анализ). Реанализ – это данные численных расчетов с моделью атмосферы, в которых используются данные наблюдений на нижней границе атмосферы и данные в свободной атмосфере (в том числе температура, скорость ветра, влажность), полученные с помощью станционных, аэрологических и спутниковых наблюдений [15]. На сегодняшний день можно выделить четыре основных организации, которые реализовали проекты по атмосферному реанализу (организация/проект): Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium Range Weather Forecasts – ECMWF)/Европейский реанализ пятого поколения (European ReAnalysis – ERA5) [16]; Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (The National Aeronautics and Space Administration – NASA)/реанализ современной эры для исследования и приложений, вторая версия (Modern Era Reanalysis for Research and Applications – MERRA-2) [17], Японское метеорологическое агентство (Japan Meteorological Agency – JMA)/Японский 55-летний проект реанализа (Japanese 55-year Reanalysis Project – JRA-55) [18], NOAA/национальный центр прогноза окружающей среды, вторая версия (the National Centers for Environmental Prediction – NCEP-2) [19]. При поддержке ECMWF была реализована программа Copernicus, которая была создана для наблюдения за окружающей средой. Значения концентрации ПГ, их антропогенные выбросы и потоки находятся в хранилище данных атмосферы Коперник (Copernicus Atmosphere Monitoring Service – CAMS; <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/>).

В работе представлены пространственные и временные вариации концентрации CO<sub>2</sub>, полученные на основе данных реанализа CAMS в приземном атмосферном слое Российской Федерации (РФ) за 2010–2019 гг. Для выявления качества полученных данных, результаты реанализа сравнивались с наземными измерениями. Помимо этого, были рассмотрены межгодовая и сезонная изменчивость концентрации CO<sub>2</sub>, а также факторы, которые могут влиять на ее изменение.



**Рис. 1.** Расположение федеральных округов Российской Федерации: 1 – СКФО; 2 – ЮФО; 3 – ЦФО; 4 – ПФО; 5 – СЗФО; 6 – УРФО; 7 – СФО; 8 – ДФО.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 2.1. Концентрация $CO_2$

В работе используются значения концентрации углекислого газа, полученные в результате реанализа [20]. 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 [21]. В качестве исходных параметров реанализа используются результаты наземного измерения баз данных WDCGG, ICOS, NOAA/ESRL, а также спутниковые измерения. CAMS предоставляет значения концентрации  $CO_2$  для 60 различных уровней давления по вертикали, с верхним уровнем 0.1 гПа и временным разрешением 3 часа, сутки и месяц. Помимо этого, доступны данные по потоку углекислого газа вблизи поверхности, а также среднее значение концентрации во всем столбе атмосферы.

Для выявления особенностей пространственных и временных вариаций использовались значения концентрации  $CO_2$  версии 20r1 с разрешением 3 часа и пространственным разрешением  $3.75^\circ$  по долготе и  $1.9^\circ$  по широте. Для выбранной версии в качестве исходных параметров реанализа использовались только наземные измерения. Рассматривалось содержание  $CO_2$  вблизи поверхности на территории РФ за 2010–2019 гг. Помимо этого, территория Российской Федерации (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). На рис. 1 территориальное расположение федеральных округов.

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 Тиски ( $71.586^\circ$ ,  $128.918^\circ$ ), Териберка ( $69.199^\circ$ ,  $35.099^\circ$ ) и Екатеринбург ( $56.85^\circ$ ,  $60.65^\circ$ ). Первые две станции имеют региональный статус глобальной службы атмосферы (Global Atmosphere Watch – GAW; <https://community.wmo.int/activity-areas/gaw>) и их измерения хранятся в базе данных WDCGG. 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. Калибровка прибора осуществляется каждый месяц с использованием поверочных газовых смесей. Помимо значений концентрации  $CO_2$  в работе также рассматриваются различные факторы, которые могут влиять на ее изменение: изменение растительного покрова; выбросы углерода в результате пожаров; антропогенные выбросы  $CO_2$ ; изменение температуры почвенного покрова, таяние многолетнемерзлых грунтов.

### 2.2. Вегетационный индекс

Нормализованный относительный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) – это интегральный показатель вегетационной активности наземной растительности. NDVI определяется как разность между интенсивностью отраженного света в красном и инфракрасном диапазонах, деленной на сумму этих интенсивностей [22]. Для растительности значения вегетационного индекса варьируются от 0 до 1. В работе используются среднемесячные значения NDVI продукта MOD13C2 версии 6, полученные на основе спутниковых измерений MODIS/Terra с пространственным разрешением  $0.05^\circ$  [23].

### 2.3. Выбросы в результате пожаров

Природные пожары — один из основных источников атмосферных газовых примесей и аэрозолей. Углерод сгоревшей при пожаре древесной растительности, соединившись с кислородом воздуха, превращается в CO<sub>2</sub> и выделяется в атмосферу. Не полностью сгоревшая масса деревьев разлагается и может выделять CO<sub>2</sub> в течение нескольких лет [24]. Помимо этого, наблюдается положительная обратная связь между глобальным потеплением и лесными пожарами. 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 GFED версии 4 с пространственным разрешением 0.25°. Рассматриваются значения с апреля по октябрь, так как для территории РФ пожары наблюдаются именно в эти месяцы.

### 2.4. Антропогенные выбросы CO<sub>2</sub>

Хозяйственная деятельность человека приводит к нарушению естественных циклов биогенных элементов, а также сопровождается антропогенными выбросами CO<sub>2</sub> в атмосферу. Основными источниками таких выбросов являются сжигание ископаемого и неископаемого топлива, производство электроэнергии, перевозки людей и грузов, а также переработка минерального сырья и утилизация отходов. Было выявлено, что за последние десятилетия выбросы CO<sub>2</sub> превысили поглощение биотой суши и океана. Это означает, что углекислый газ накапливается в атмосфере и вносит вклад в современное изменение климата [25]. База данных о выбросах для глобальных и атмосферных исследований (Emissions Database for Global Atmospheric Research — EDGAR; <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>) предоставляет информацию об антропогенных выбросах ПГ и загрязнениях воздуха на Земле в виде временных рядов и карт с пространственным распределением. Помимо этого, представлены данные о выбросах по виду деятельности человека (энергетика, нефтяная промышленность и т.д.). В работе используются годовые значения суммарных выбросов CO<sub>2</sub> с пространственным разрешением 0.1°. Однако данные доступны до 2018 года.

### 2.5. Содержание углерода в многолетних мерзлых грунтах

Территории с многолетнемерзлыми грунтами — это районы, где температура почвенных горизонтов оставалась ниже 0°C более двух лет. Почвенное органическое вещество разлагается микроорганизмами и в результате этого процесса в атмосферу поступают ПГ, в том числе и CO<sub>2</sub>. Однако при промерзании верхних слоев почвы активность микроорганизмов уменьшается, замедляя процесс разложения [26]. В более глубоких незамерзших слоях почвы микроорганизмы по-прежнему остаются активными. В последние годы наблюдается повышение температуры поверхности Земли, из-за чего происходит таяние многолетних мерзлых грунтов, приводя к высвобождению накопленного в них углерода. По некоторым оценкам, большое количество эмиссии углерода из многолетних мерзлых грунтов ускорит изменение климата [27]. База данных северных приполярных почв (The Northern Circumpolar Soil Carbon Database — NCSCD; <https://bolin.su.se/data/ncscd/>) содержит информацию о запасах почвенного органического углерода в многолетних мерзлых грунтах на глубине 0–300 см., а также долю покрытия различных типов почв. В работе используется оценка содержания органического углерода в многолетних мерзлых грунтах с пространственным разрешением 1°. Помимо этого, были рассмотрены среднемесячные значения температуры почвы для глубины 0–150 см, полученные из базы данных MERRA-2 с пространственным разрешением 0.5° по широте и 0.625° по долготе [28].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 3.1. Сравнение наземных измерений с данными реанализа

На рис. 2 представлена диаграмма рассеяния среднемесячных значений концентрации CO<sub>2</sub> для наземных измерений пунктов мониторинга Екатеринбург, Териберка, Тикси и результатов реанализа CAMS. В круглых скобках указаны значения коэффициента корреляции  $r$ . Исходя из полученных результатов, можно заметить, что наибольший разброс имеют данные для Екатеринбурга: завышение реанализа в диапазоне 395–405 ppm и занижение в диапазоне 425–435 ppm. Среднее значение концентрации CO<sub>2</sub> по всей выборке для реанализа превышает наземные измерения на 0.79, 0.22 и 0.18% для Екатеринбурга, Териберки и Тикси соответственно. В целом, можно сделать вывод, что данные реанализа хорошо воспроизводят наземные измерения концентрации CO<sub>2</sub> и могут быть использованы для дальнейшего исследования.

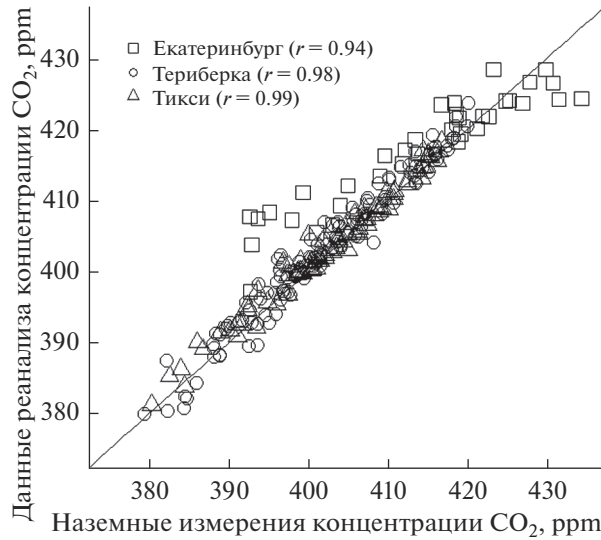


Рис. 2. Сравнение наземных измерений с реанализом.

### 3.2. Пространственное распределение концентрации $CO_2$

На рис. 3 представлено пространственное распределение средних значений за исследуемый период следующих величин: концентрации  $CO_2$ , стандартного отклонения, амплитуды и прироста за год. Под амплитудой понимается разница максимального и минимального среднемесячного значения внутригодового изменения концентрации  $CO_2$ . Прирост за год рассчитывался как среднее разниц среднегодовых значений. Повышенное содержание  $CO_2$  наблюдается в юго-западной части страны. Такой результат вполне ожидаем, так как данная территория является наиболее густонаселенной и развитой, а также содержит большое количество мегаполисов, которые представляют собой мощный источник антропогенных выбросов  $CO_2$  [29]. Несмотря на это, прирост за год на этой территории минимален, в то время как в сибирской и дальневосточной частях наблюдаются максимальные значения. Похожая картина про-

слеживается для распределения стандартного отклонения, за исключением повышенного значения вблизи Московской области. Помимо этого, можно заметить, что максимальные значения амплитуды находятся в сибирской и частично в дальневосточной частях РФ. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что за исследуемый период на данной территории присутствуют мощные источники  $CO_2$ , которые приводят к наибольшему приросту концентрации.

### 3.3. Временные вариации концентрации $CO_2$

На рис. 4 показана динамика среднемесячных значений концентрации  $CO_2$ . За десять лет на территории РФ содержание углекислого газа вблизи поверхности увеличилось на 21.51 ppm с 394.9 ppm (2010 г.) до 416.42 ppm (2019 г.) со среднегодовой скоростью изменения 2.39 ppm/год, что согласуется с глобальным приростом 2.37 ppm/год [1]. Если же рассматривать федеральные округа, то наибольшее изменение произошло в ДФО на 22.3 ppm

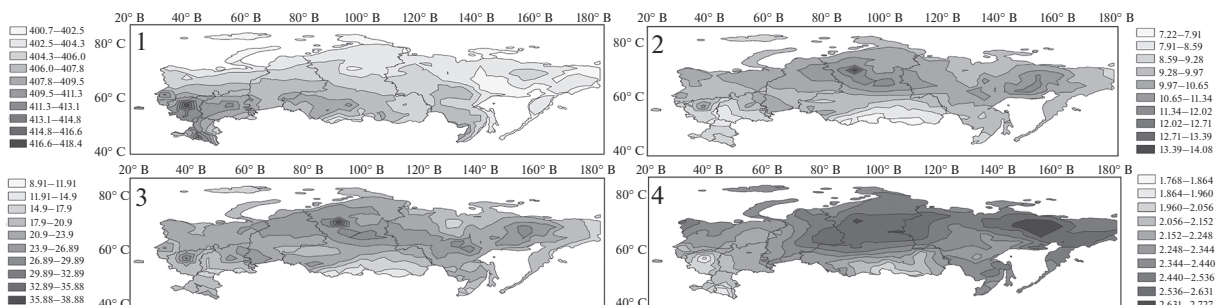


Рис. 3. Пространственное распределение с разрешением  $1.9^\circ \times 3.75^\circ$  за период 2010–2019 гг.: 1 – значение концентрации  $CO_2$ , ppm; 2 – стандартное отклонение, ppm; 3 – амплитуда, ppm; 4 – прирост концентрации, ppm/год.

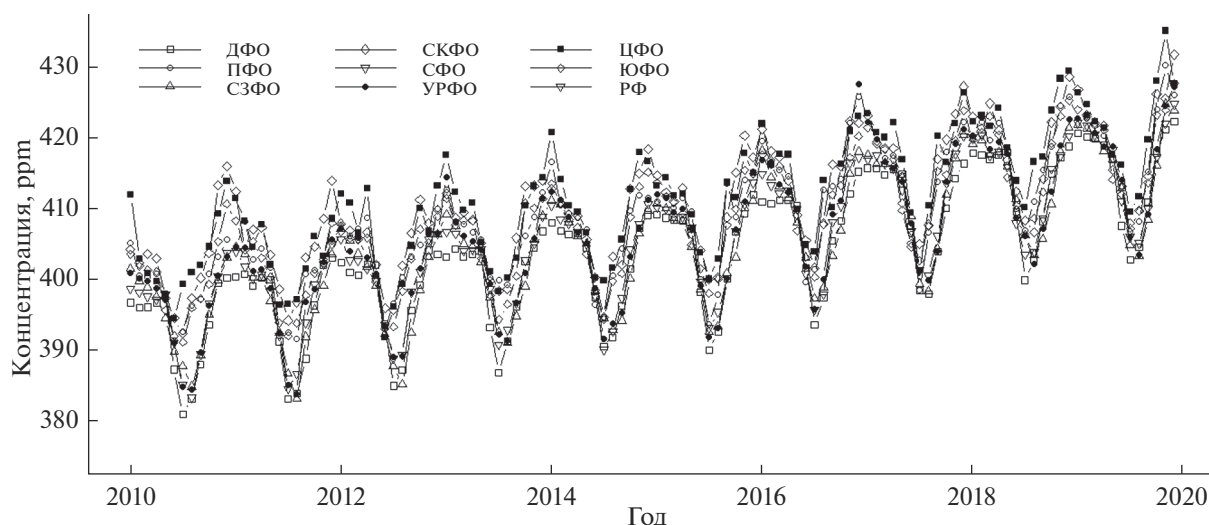


Рис. 4. Среднемесячные значения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере над территорией РФ.

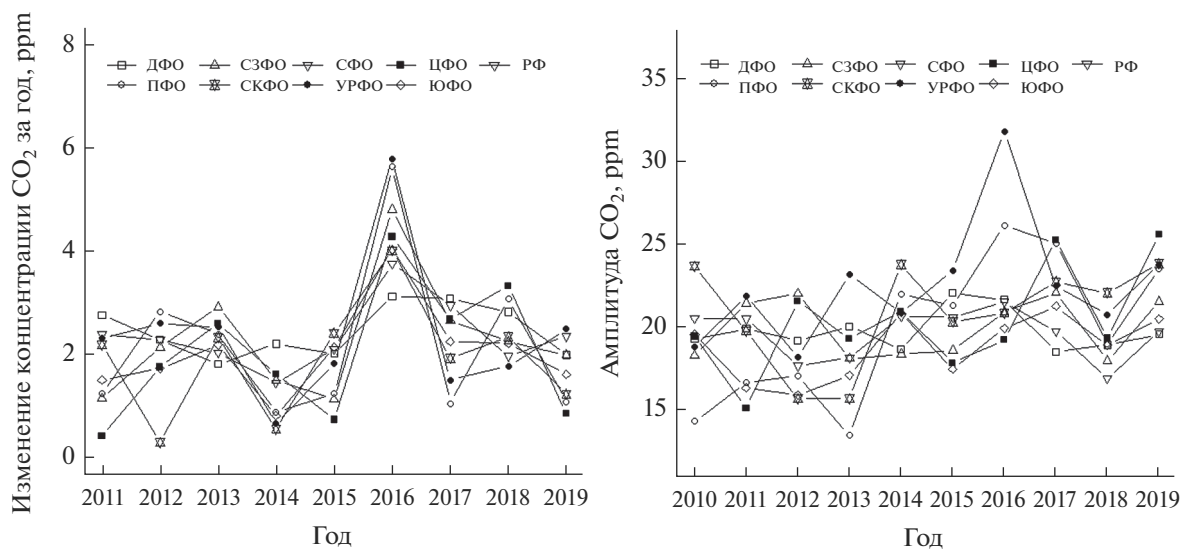


Рис. 5. Динамика изменения среднегодовых значений концентрации и амплитуды CO<sub>2</sub> в атмосфере над территорией РФ.

со среднегодовым приростом 2.48 ppm/год. В то время как в ЦФО, где наблюдаются высокие значения концентрации CO<sub>2</sub>, увеличение произошло лишь на 18.69 ppm, со среднегодовым приростом 2.05 ppm/год. Также было выявлено, что максимальное среднее значение амплитуды за десять лет наблюдается для УРФО и составляет 22.44 ppm. Анализ сезонной изменчивости концентрации CO<sub>2</sub> показал, что максимальные значения достигаются в зимнее время (декабрь, январь), а минимальные в летнее (июль-август). Однако для отдельных федеральных округов в определенные года весной наблюдаются локальные максимумы. Например, для ЦФО, ДФО и ПФО в апреле про-

исходит увеличение концентрации CO<sub>2</sub>, а для СКФО в марте. Также стоит отметить, что минимумы для УРФО и СЗФО достигаются в августе, в то время как для остальных федеральных округов в июле.

Помимо этого, была рассмотрена межгодовая изменчивость концентрации CO<sub>2</sub>. На рис. 5 показана динамика изменения среднегодовых значений концентрации и амплитуды.

Из рис. 5 (левый график) видно, что в 2016 г. для всех федеральных округов наблюдается резкое увеличение значение концентрации CO<sub>2</sub>. Наибольший прирост за год достигается в УРФО и ПФО и составляет 5.8 и 5.65 ppm соответственно.

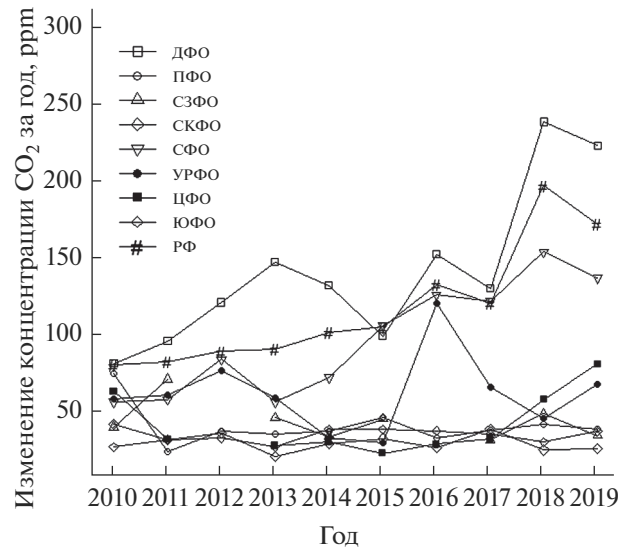


Рис. 6. Динамика среднегодовых значений выбросов углерода в результате пожаров на территории РФ.

Также следует отметить, что для этих же федеральных округов наблюдается увеличение амплитуды (рис. 5 правый график) до 31.73 и 26.07 ppm соответственно. Для объяснения тех или иных особенностей полученных результатов были рассмотрены возможные факторы, приводящие к таким последствиям.

#### 3.4. Временные вариации выбросов углерода в результате пожаров

На рис. 6 представлена динамика выбросов углерода в результате пожаров. Стоит отметить, что за десять лет для РФ наблюдается положительный тренд выбросов от пожаров. Наибольший вклад вносят ДФО и СФО, что согласуется с обнаруженным ранее фактом — именно в этих частях страны наблюдается максимальный прирост концентрации за год (рис. 3.1). На рис. 7 показано пространственное распределение выбросов углерода в результате пожаров. Представленные значе-

ния являются результатом усреднения за весь исследуемый период. Можно заметить, что в ДФО и СФО находится большее количество мощных пожаров, превышающих значение 300 гС/(м<sup>2</sup> месяц). Таким образом, пожары могут являться одним из факторов, которые привели к повышенному приросту CO<sub>2</sub> за год на данной территории РФ. Также стоит отметить, что для УРФО в 2016 г., относительно 2015, наблюдается резкое увеличение значения выбросов на 310%, преимущественно в Ямало-Ненецком и Ханты-Мансийском автономных округах. Исходя из полученного результата, можно сделать вывод, что пожары на данной территории в 2016 г. являются одной из причин, повлиявших на увеличение концентрации CO<sub>2</sub> и амплитуды.

Согласно [30] глобальный прирост концентрации CO<sub>2</sub> в 2016 г. составил 3.3 ppm, что является рекордным значением. Такой результат они объясняют влиянием такого явления как Эль-Ниньо. Возможно, из-за события Эль-Ниньо в 2016 г. на

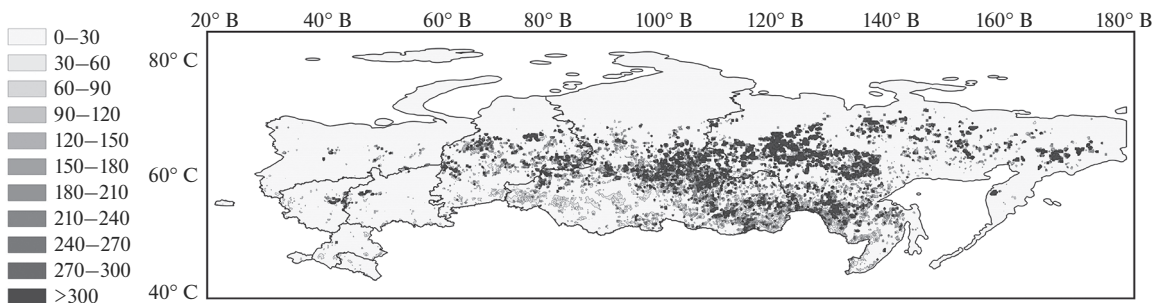


Рис. 7. Пространственное распределение выбросов углерода в результате пожаров, усредненное за период 2010–2019 гг. (0.25° × 0.25°), гС/(м<sup>2</sup> месяц).

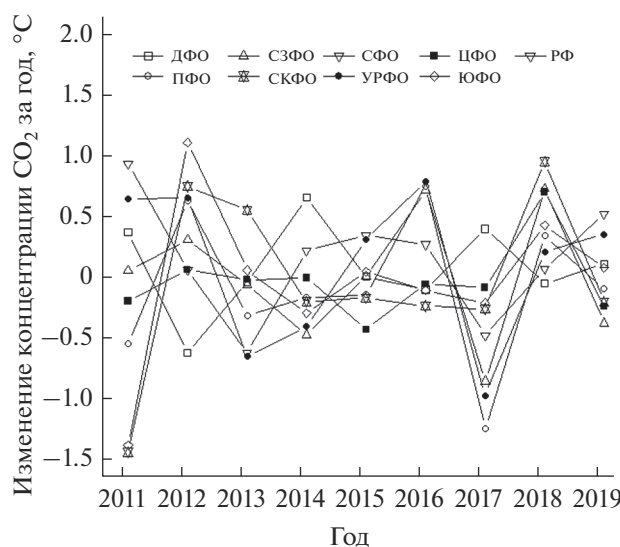


Рис. 8. Динамика изменения среднегодовых значений температуры почвы на глубине 0–150 см.

территории РФ присутствовала сильная засуха, которая поспособствовала возникновению большого количества пожаров, что привело к резкому увеличению концентрации CO<sub>2</sub>.

### 3.5. Временные вариации температуры почвы

На рис. 8 представлена динамика изменения среднегодовых значений температуры почвы на глубине 0–150 см. В 2016 г. для УРФО, ПФО и СЗФО наблюдается резкое увеличение температуры почвы в районе 0.8°C. Известно, что одним из основных факторов, влияющих на динамику почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>, является температура почвы с коэффициентом корреляции равным 0.99 [32]. При определенных условиях можно утверждать, что, чем выше температура почвы, тем выше значение эмиссии CO<sub>2</sub>. Возможно, по этой причине в 2016 году на территории УРФО, ПФО и СЗФО наблюдаются максимальные приросты за год. Также стоит отметить, что в 2014 и 2017 гг. для ДФО наблюдается максимальное изменение за год для температуры почвы (рис. 8) и концентрации CO<sub>2</sub> (рис. 5). Такой результат, также может указывать на сильную взаимосвязь этих параметров. Помимо этого, было выявлено, что за десять лет на территории РФ среднегодовое значение температуры почвы увеличилось на 88%, а максимальное увеличение наблюдается для СФО, УРФО и ДФО на 1.44, 1.05 и 0.84°C соответственно. На данных территориях имеются большие площади многолетних мерзлых грунтов, в результате деградации которых высвобождается накопленный органический углерод в виде CO<sub>2</sub> или CH<sub>4</sub> [26]. На рисунке 9 представлено пространственное распределение оценки содержания накопленно-

го углерода в многолетних мерзлых грунтах на глубине 0–300 см. Максимальное содержание углерода наблюдается на территории Ханты-Мансийского автономного округа и достигает значений до 400 кг/м<sup>2</sup>.

На рис. 10 представлено пространственное распределение среднего значения прироста температуры почвы за год на глубине 0–150 см за десять лет. Можно заметить, что максимальный прирост наблюдается на территории СФО (Красноярский край), ДФО (Республика Саха) и частично в УРФО (Ямало-Ненецкий автономный округ). Именно на данных территориях наблюдается максимальный прирост концентрации CO<sub>2</sub>. Такое изменение температуры почвы могло привести к высвобождению накопленного углерода в виде CO<sub>2</sub>.

Еще одним показателем деградации многолетних мерзлых грунтов может служить озеленение тундры [33]. На рис. 11 показано пространственное распределение среднего значения скорости изменения NDVI в год за исследуемый период. Следует отметить, что в местах максимального прироста температуры почвы наблюдается значительное изменение вегетационного индекса, что в свою очередь может указывать на таяние многолетних мерзлых грунтов. Однако нельзя однозначно утверждать, что такое изменение NDVI обусловлено лишь увеличением температуры почвы. Таким образом, исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что помимо выбросов углерода в результате пожара, деградация многолетних мерзлых грунтов также может вносить существенный вклад в изменение концентрации CO<sub>2</sub> на территории РФ. Однако для полного понимания этого процесса следует провести дополнительные исследования.



**Таблица 1.** Среднегодовые значения антропогенных выбросов CO<sub>2</sub>, кг/(м<sup>2</sup> с)

Год	ДФО	ПФО	СЗФО	СКФО	СФО	УРФО	ЦФО	ЮФО	РФ
2010	1.01	7.70	4.43	6.89	2.42	6.34	20.73	10.26	4.77
2011	1.07	8.74	4.63	7.22	2.62	5.98	21.78	10.76	4.99
2012	1.02	8.18	5.14	6.82	2.27	6.01	21.69	11.05	4.90
2013	1.00	8.07	4.97	6.74	2.21	5.66	21.35	10.60	4.76
2014	1.00	8.12	4.98	7.15	2.16	5.63	21.04	10.48	4.73
2015	1.03	8.15	5.05	7.21	2.16	5.80	20.67	10.43	4.76
2016	0.99	8.09	4.95	7.37	2.11	5.70	20.30	10.28	4.67
2017	1.00	8.29	5.03	7.76	2.15	5.75	20.85	10.55	4.76
2018	1.02	8.50	5.22	7.89	2.21	5.96	21.53	10.86	4.92

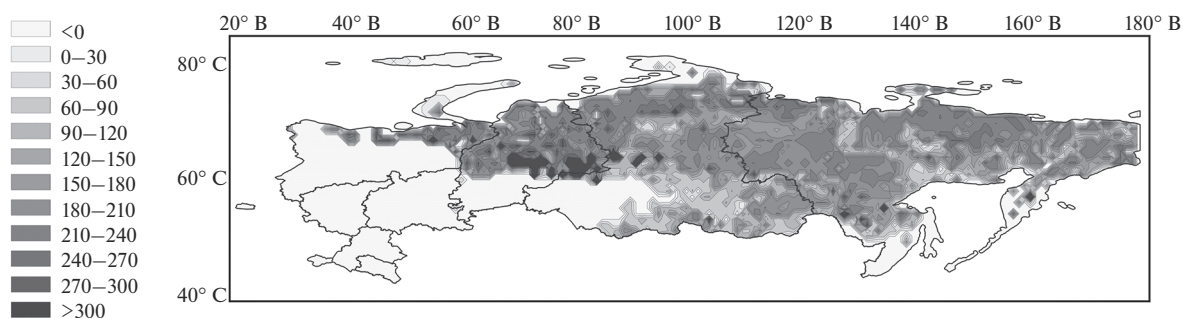
### 3.6. Временные вариации антропогенных выбросов

В табл. 1 представлены среднегодовые значения антропогенных выбросов CO<sub>2</sub>, включающие в себя все возможные источники, такие как сжигание ископаемого топлива, процессы производства неметаллических минералов, производства металлов, производство мочевины, известкование в сельском хозяйстве и использование растворителей.

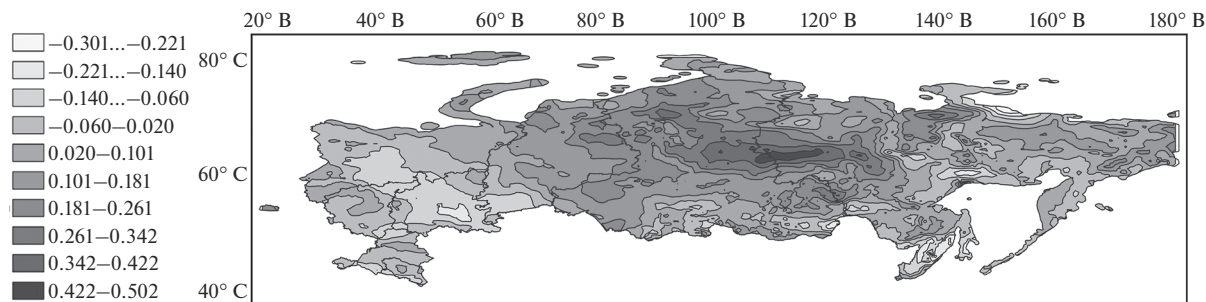
За период с 2010 по 2018 гг. среднегодовое значение антропогенных выбросов CO<sub>2</sub> для РФ увеличилось на 4.8%. Четкого положительного тренда не наблюдается. Если рассматривать федеральные округа, то наибольшие значения выбросов достигаются в ЦФО, минимальные в ДФО. Максимальный прирост за девять лет составил 17.8 и

14.4% для СЗФО и СКФО соответственно, в то время как для УРФО и СФО наблюдается уменьшение на 5.9 и 8.9% соответственно. На рис. 12 показано пространственное распределение антропогенных выбросов CO<sub>2</sub>, усредненных за весь период. Источники, мощность которых превышает 5 кг/(м<sup>2</sup> с), сконцентрированы в юго-западной части РФ. Именно на этой территории наблюдается повышенное значение концентрации CO<sub>2</sub> (рис. 3.1) и минимальный прирост за десять лет (рис. 3.4).

Также отчетливо видны места с высоким значением выбросов на территории СФО и ДФО. В этих местах располагаются города Норильск и Якутск соответственно. В точке, где располагает-



**Рис. 9.** Пространственное распределение содержания углерода в многолетних мерзлых грунтах на глубине 0–300 см на территории РФ (1° × 1°), кг/м<sup>2</sup>.



**Рис. 10.** Пространственное распределение прироста температуры почвы на глубине 0–150 см (0.5° × 0.625°), °С/год.

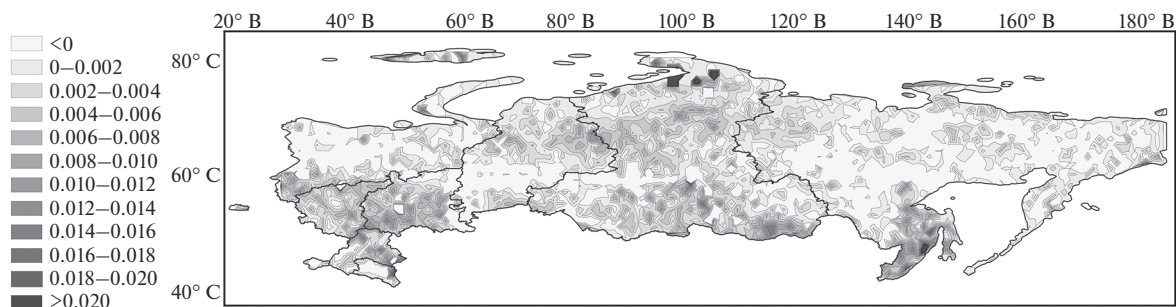


Рис. 11. Пространственное распределение прироста вегетационного индекса ( $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ), NDVI/год.

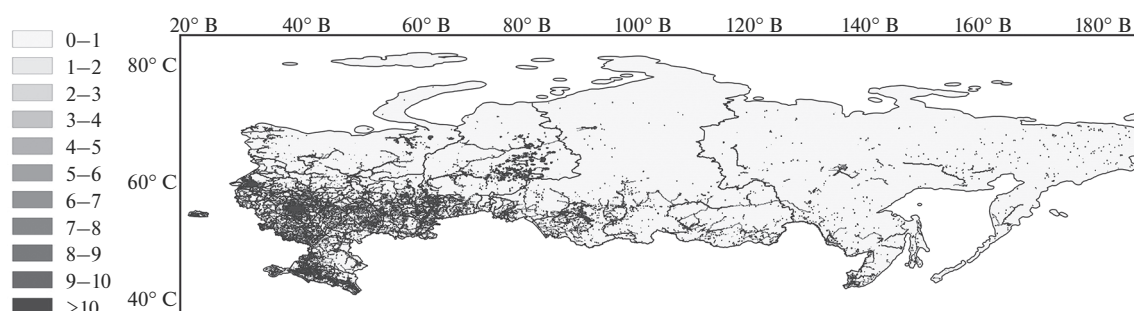


Рис. 12. Пространственное распределение антропогенных выбросов CO<sub>2</sub>, усредненных за период 2010–2019 гг. ( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ), кг/(м<sup>2</sup> с).

ся г. Норильск наблюдается максимальное значение амплитуды равное около 35 ppm. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что в местах, где антропогенные выбросы CO<sub>2</sub> имеют высокие значения, достигаются максимальное содержание концентрации CO<sub>2</sub>. Однако в масштабах страны значительного влияния антропогенных выбросов на изменение концентрации за исследуемый период не обнаружено. Для более полного понимания взаимосвязи этих параметров необходимо произвести локальные исследования с численными расчетами. На данном этапе работы можно предположить, что на территории РФ за период 2010–2019 гг. рост концентрации CO<sub>2</sub> в большей степени обусловлен увеличением потоков природных источников углекислого газа.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных реанализа SAMS были исследованы пространственные и временные вариации концентрации CO<sub>2</sub> вблизи поверхности на территории РФ за период 2010–2019 гг. Было выявлено, что в юго-западной части страны наблюдаются высокие значения концентрации CO<sub>2</sub> и антропогенных выбросов. Однако прирост за десять лет на данной территории минимален, в то время как в ДФО, УРФО и СФО он максимален и достигает 2.48, 2.41 и 2.39 ppm/год. Показано, что в этих частях РФ достигаются максимальные значения выбросов углерода в результате природных пожаров, а

также наблюдается максимальное изменение температуры почвы за десять лет. Такое изменение температуры может привести к значительному высвобождению углерода, накопленного многолетними мерзлыми грунтами. Возможно, именно эти два фактора привели к максимальному приросту концентрации CO<sub>2</sub> за период 2010–2019 гг.

Было выявлено, что в 2016 г. для УРФО и ПФО увеличение среднегодовой концентрации CO<sub>2</sub> достигло 5.8 и 5.65 ppm, а значение амплитуды составило 31.73 и 26.07 ppm соответственно. Такое результат может быть обусловлен резким увеличением выбросов углерода в результате пожаров на 310% в УРФО, а также изменением температуры почвы примерно на 0.8°C, что в свою очередь могло увеличить почвенную эмиссию в обоих регионах РФ.

Значительного влияния антропогенных выбросов на изменение концентрации CO<sub>2</sub> не наблюдается. Таким образом, можно сделать вывод, что наибольший вклад в процесс увеличения концентрации за десять лет может быть обусловлен природными источниками, такими как пожары и почвенная эмиссия.

#### 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 CO<sub>2</sub>: основные процессы и взаимодействие с климатом // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Т. 4. С. 9–31.
3. *Caو L. et al.* The global spatiotemporal distribution of the mid-tropospheric CO<sub>2</sub> concentration and analysis of the controlling factors // *Remote Sens.* 2019. V. 11. № 1. P. 94.
4. *Аршинов М.Ю. и др.* Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. Т. 22. №. 5. С. 457–464.
5. *Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю., Шмаков И.А.* Содержание метана в тропосфере Западной Сибири по данным AIRS/Aqua // *Изв. Алтайского государственного университета*. 2012. № 1. С. 191–196.
6. *Parkinson C.L.* Aqua: an Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables // *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.* 2003. V. 41. № 2. P. 173–183.
7. *Beer R., Glavich T.A., Rider T.M.* Tropospheric emission spectrometer for Earth Observing System's Aura satellite // *Applied Optics*. 2001. V. 40. № 15. P. 2356–2367.
8. *Yokota T. et al.* Global concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT: First preliminary results // *Sola*. 2009. V. 5. P. 160–163.
9. *Cayla F., Javelle P.* IASI instrument overview // *Optics and Photonics*. 1995. V. 2553. P. 1–20.
10. *Burrows J.P. et al.* SCIAMACHY-Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography // *Acta Astronautica*. 1995. V. 35. № 7. P. 445.
11. *Ly Z. et al.* Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration in China and Its Influencing Factors // *Atmosphere*. 2020. V. 11. № 3. P. 231.
12. *Успенский А.Б. и др.* Мониторинг концентрации диоксида углерода и общего содержания метана в тропосфере над Сибирью по данным спутниковых ИК-зондировщиков AIRS, IASI // *Исследование Земли из космоса*. 2011. № 1. С. 14–21.
13. *Gavrilov N.M., Timofeev Y.M.* Comparisons of satellite (GOSAT) and ground-based spectroscopic measurements of CO<sub>2</sub> content near St. Petersburg // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50. № 9. P. 910–915.
14. *Рокотян Н.В. и др.* Амплитуда сезонного цикла CO<sub>2</sub> в атмосфере Уральского региона по результатам наземного и спутникового ИК-зондирования // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27. № 9. С. 819–825.
15. *Бокучава Д.Д., Семенов В.А.* Анализ аномалий приземной температуры воздуха в Северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. Т. 1. С. 28–51.
16. *Dee D.P. et al.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011. V. 137. № 656. P. 553–597.
17. *Gelaro R. et al.* The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // *J. Clim.* 2017. V. 30. № 14. P. 5419–5454.
18. *Kobayashi S. et al.* The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics // *J. Meteorol. Soc. of Japan*. 2015. V. 93. № 1. P. 5–48.
19. *Kanamitsu M. et al.* NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // *Bull. American Meteorol. Soc.* 2002. V. 83. № 11. P. 1631–1643.
20. *Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A. et al.* (2019): CAMS global reanalysis (EAC4). Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) Atmosphere Data Store (ADS). (Accessed on <05-Dec-2019>), <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-reanalysis-eac4?tab=overview>
21. 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>
22. *Guo M. et al.* Assessment of global carbon dioxide concentration using MODIS and GOSAT data // *Sensors*. 2012. V. 12. № 12. P. 16368–16389.
23. *Didan, K.* MOD13C2 MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05 Deg CMG V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v006/>
24. *Тарко А.М., Курбатова А.И., Грузовец Е.А.* Применение методов системного анализа в исследованиях лесных пожаров на территории Российской Федерации // *Географическая среда и живые системы*. 2021. № 1. С. 17–41.
25. *Б.Г. Федоров.* Российский углеродный баланс. Москва: Научный консультант, 2017. 82 с.
26. *Yokohata T. et al.* Future projection of greenhouse gas emissions due to permafrost degradation using a simple numerical scheme with a global land surface model // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2020. V. 7. № 1. P. 1–14.
27. *Schaefer K. et al.* The impact of the permafrost carbon feedback on global climate // *Environ. Res. Lett.* 2014. V. 9. № 8. P. 085003.
28. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 tavgM\_2d\_Ind\_Nx: 2d Monthly mean Time-Averaged Single-Level Assimilation Land Surface Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [25.06.2021], [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2TMNXLND\\_5.12.4/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2TMNXLND_5.12.4/summary)
29. *Miller J.B. et al.* Large and seasonally varying biospheric CO<sub>2</sub> fluxes in the Los Angeles megacity revealed by atmospheric radiocarbon // *Proc. Natl. Acad. of Sci.* 2020. V. 117. № 43. P. 26681–26687.
30. WMO (World Meteorological Organization) 2017. WMO Greenhouse Gas Bulletin. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016, № 16 (13 October 2017).
31. WMO (World Meteorological Organization) 2016. WMO Greenhouse Gas Bulletin. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2015, № 16 (24 October 2016).
32. *Комарова Т.В.* Экологическая оценка почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> в сукцессионном ряду зарастания залежи на территории Центрально-Лесного заповедника. Москва: диссертация на соискание ученой степени, 2019. 159 с.
33. *Frost G.V. et al.* Tundra Greenness // *NOAA Arctic Report Card*. 2019.

## Spatial and Temporal Variations CO<sub>2</sub> Concentration in the Surface Atmospheric Layer of the Territory of the Russian Federation Based on the CAMS Database

S. K. Dzholumbetov\*

*Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
st. Sofia Kovalevskoy, 20, Yekaterinburg, 620000 Russia*

*\*e-mail: S.K.Dzholumbetov@ecko.uran.ru*

Based on the data of the Copernicus Atmosphere Monitoring Service reanalysis, the spatial and temporal variations in the CO<sub>2</sub> concentration near the surface on the territory of the Russian Federation were investigated for the period 2010–2019. It was revealed that in the southwestern part of the country there are high values of CO<sub>2</sub> concentration and anthropogenic emissions. However, the growth over ten years in this area is minimal. The maximum increase is observed in the Far Eastern, Ural and Siberian federal districts, reaching values of 2.48, 2.41 and 2.39 ppm/year, respectively. In addition, these parts of the Russian Federation have the highest carbon emissions from fires and the highest soil temperature changes. This change in temperature can lead to a significant release of carbon stored in permafrost. It is possible that these two factors led to the maximum increase in CO<sub>2</sub> concentration in this area for the period 2010–2019. It was found that in 2016 for the Ural and Volga Federal Districts the increase in the average annual CO<sub>2</sub> concentration reached 5.8 and 5.65 ppm, and the amplitude value was 31.73 and 26.07 ppm, respectively. This result may be due to a sharp increase in carbon emissions from fires by 310% in the Urals Federal District, as well as a change in soil temperature by about 0.8°C, which in turn could increase soil emissions in both regions of the Russian Federation. No significant influence of anthropogenic emissions on the change in CO<sub>2</sub> concentration is observed. Thus, it can be concluded that the greatest contribution to the increase in the concentration of carbon dioxide over ten years is due to its natural sources, such as fires, soil emissions and.

**Keywords:** greenhouse gases, reanalysis, CAMS database, spatial variations in CO<sub>2</sub> concentration, fire emissions, melting permafrost