

В., Белолюбский И. Н., Протодяконов К. Е., ван дер Плихт Й. Палеонтологические и археозоологические исследования в бассейне р. Яна // Вестник СВФУ. 2017. № 1 (57). С. 20–35.

15. Grigoriev S. E., Fisher C. D., Obada T., Shirley E. A., Rountrey A. N., Savvinov G. N., Garmaeva D. K., Novgorodov G. P., Cheprasov M. Yu., Vasilev S. E., Goncharov A. E., Masharskiy A., Egorova V. E., Petrova P. P., Egorova E. E., Akhremenko Ya. A., Johannes van der Plicht, Galanin A. A., Fedorov S. E., Ivanov E. V., Tikhonov A. N. A woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) carcass from Maly Lyakhovsky Island (New Siberian Islands, Russian Federation) // Quaternary International XXX. 2017. P. 1–15.

16. Галанин А. А., Дьячковский А. П., Лыткин В. М., Бурнашева М. П., Шапошников Г. И., Куть А. А. Результаты определения абсолютного возраста образцов в радиоуглеродной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН // Наука и образование. 2015. № 4. С. 45–49

17. Боескоров Г.Г., Тихонов А.Н., Сузуки Н. Юкагирский мамонт: / Министерство науки и профессионального образования Республики Саха (Якутия), Академия наук Республики Саха (Якутия), Институт прикладной экологии Севера АН РС(Я). – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет, 2007. – 251 с.

УДК 528.88

## ОБЗОР МЕТОДОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОДЕРЖАНИЕМ АТМОСФЕРНОГО СО<sub>2</sub>

*Романюк В.А., Шумилов И.В., Ващенко Д.А.*

*Сахалинский государственный университет,  
Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290*

## OVERVIEW OF ATMOSPHERIC CO<sub>2</sub> OBSERVATION METHODS

*V.A. Romanyuk, I.V. Shumilov, D.A. Vashenko*

*Sakhalin State University,  
Russia, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, st. Lenina, 290,  
DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.7.108.1909*

### АННОТАЦИЯ

В работе приведена историческая справка о начале регулярных инструментальных измерений CO<sub>2</sub> в 1950-х годах на удаленных станциях. Отмечено создание Глобальной сети мониторинга атмосферы ВМО, объединяющей на сегодняшний день около 100 наземных станций по всему миру. Подробно рассмотрены современные аналитические методы измерения CO<sub>2</sub>, такие как оптическая спектроскопия, хроматография, масс-спектрометрия. Отдельное внимание уделено анализу изотопного состава CO<sub>2</sub>. Значительная часть работы посвящена применению данных дистанционного зондирования с использованием специализированных спутниковых миссий, таких как GOSAT, OCO-2, TanSat и др. Показана роль спутниковых наблюдений в изучении пространственно-временной динамики CO<sub>2</sub>. В заключении подчеркивается важность комплексного подхода, интегрирующего наземные, авиационные и спутниковые данные для получения детальной картины распределения CO<sub>2</sub> в атмосфере. Это критически важно для понимания глобального углеродного цикла и прогноза климатических изменений.

### ABSTRACT

The paper provides a historical background on the beginning of regular instrumental measurements of CO<sub>2</sub> in the 1950s at remote stations. The establishment of the WMO Global Atmospheric Monitoring Network, which today unites about 100 ground stations around the world, is noted. Modern analytical methods of CO<sub>2</sub> measurement such as optical spectroscopy, chromatography, mass spectrometry are considered in detail. Special attention is paid to the analysis of CO<sub>2</sub> isotopic composition. A significant part of the work is devoted to the application of remote sensing data using specialized satellite missions such as GOSAT, OCO-2, TanSat and others. The role of satellite observations in studying the spatial and temporal dynamics of CO<sub>2</sub> is shown. The conclusion emphasizes the importance of a comprehensive approach that integrates ground, airborne and satellite data to obtain a detailed picture of the atmospheric CO<sub>2</sub> distribution. This is critical for understanding the global carbon cycle and predicting climate change.

**Ключевые слова:** CO<sub>2</sub>, мониторинг, дистанционное зондирование земли, атмосфера.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>, monitoring, remote sensing of the earth, atmosphere.

### Введение

Диоксид углерода (CO<sub>2</sub>) является одним из важнейших парниковых газов в атмосфере Земли. На протяжении многих лет ученые проводят регулярные наблюдения за концентрацией CO<sub>2</sub>, чтобы отслеживать изменения и понимать влияние этого газа на климатическую систему. Первые

инструментальные замеры CO<sub>2</sub> в атмосфере начали проводиться в 1950-х годах с помощью инфракрасных анализаторов в обсерватории на Мауна-Лоа (Гавайи) и в Антарктиде [Keeling, 1960; <https://www.climate.gov/>]. Измерения показали, что до индустриальной эры уровень CO<sub>2</sub> был относительно стабилен на уровне около 280 частей

на миллион (ч./млн.), однако к 1960-м годам он уже вырос до 317 ч./млн. [IPCC, 2007]. С тех пор наблюдения на Мауна-Лоа, которые до сих пор продолжаются, стали "золотым стандартом" для мониторинга глобальных тенденций CO<sub>2</sub>.

С 1980-х годов была создана Глобальная сеть мониторинга атмосферы (ГСНА) Всемирной метеорологической организации, объединившая данные наблюдений за CO<sub>2</sub> со станций по всему

миру (рис. 1) [WMO, 2020, 2021]. Эта сеть позволила получить более детальную картину пространственного и временного распределения CO<sub>2</sub> в атмосфере. Кроме наземных станций, с 2000-х годов для мониторинга CO<sub>2</sub> стали использоваться данные со спутников, например, с японского спутника GOSAT [Morino et al., 2011]. Спутниковые наблюдения дополняют наземные данные, особенно в удаленных районах.

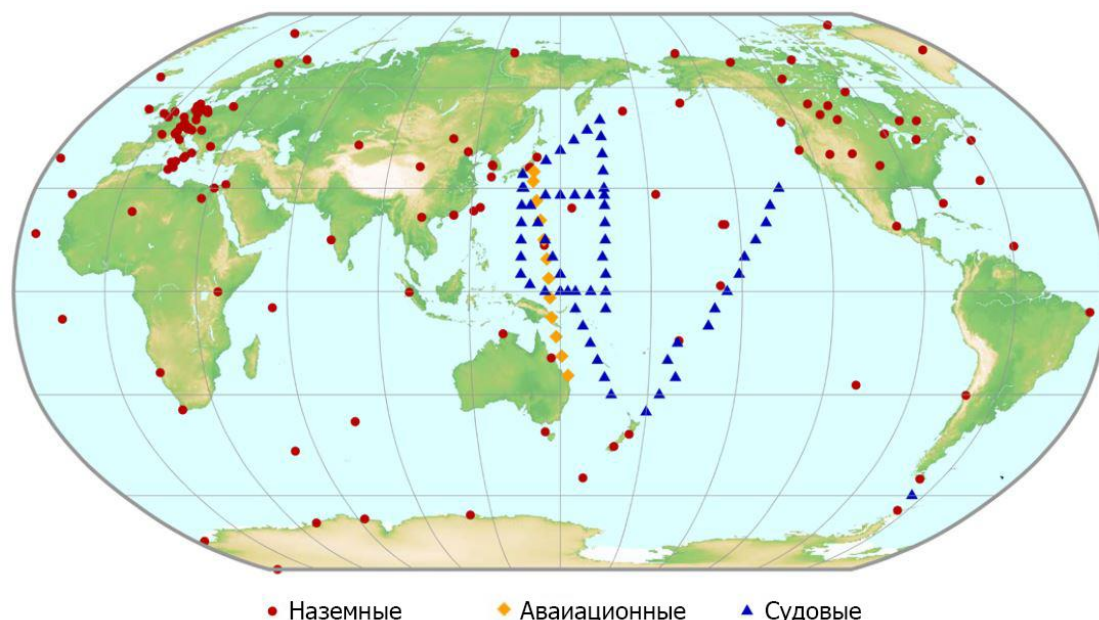


Рис. 1. Глобальная сеть мониторинга атмосферы (ГСНА) Всемирной метеорологической организации на 2021 г., собирающая данные в том числе о содержании CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>.

В настоящее время для измерения CO<sub>2</sub> применяется несколько основных методов. На многих станциях по-прежнему используются инфракрасные газоанализаторы, основанные на поглощении инфракрасного излучения молекулами CO<sub>2</sub>. Также широко применяется хроматографический метод, при котором пробы воздуха пропускают через колонки с адсорбентом, разделяя компоненты, включая CO<sub>2</sub> [Worthy et al., 2003]. Для анализа отобранных проб в лабораторных условиях часто используется масс-спектрометрия. Кроме концентрации, важным параметром являются изотопные вариации CO<sub>2</sub>, поскольку они несут информацию об источниках эмиссии [Francey et al., 1999]. Для анализа изотопного состава применяются такие методы, как лазерная спектроскопия и масс-спектрометрия высокого разрешения. Изотопные данные помогают разделить вклады от разных процессов, влияющих на бюджет CO<sub>2</sub>.

#### Наземная сеть мониторинга за содержанием CO<sub>2</sub> в атмосфере

Регулярные инструментальные наблюдения за концентрацией CO<sub>2</sub> в атмосфере начались в конце 1950-х годов на удаленных станциях Мауна-Лоа (Гавайи) (рис. 2) и Антарктида [Keeling et al., 1976]. Эти измерения выявили рост глобального фонового

уровня CO<sub>2</sub>, связанный с антропогенными выбросами от сжигания ископаемого топлива. В дальнейшем для мониторинга CO<sub>2</sub> по всему миру была создана Глобальная сеть наблюдений за атмосферой (ГСНА) Всемирной метеорологической организации. Основу ГСНА составляют наземные станции, измеряющие CO<sub>2</sub> и другие парниковые газы стандартизированными методами. Станции классифицируются по типам в зависимости от локальных источников загрязнения [WMO, 2021]:

- фоновые - расположены вдали от крупных источников, измеряют глобальный фон.
- региональные - отражают усредненный уровень CO<sub>2</sub> для данного региона.
- сельские, пригородные - испытывают влияние локальных источников.

● городские - расположены в крупных городах.

По состоянию на 2022 год в состав ГСНА ВМО входит около 100 станций по всему миру, от Арктики до Антарктиды [WMO, <https://gawsis.meteoswiss.ch>]. Крупнейшими сетями являются американская NOAA ESRL GMD (25 станций) и европейская ICOS (более 130 станций) [Masarie et al., 2014].

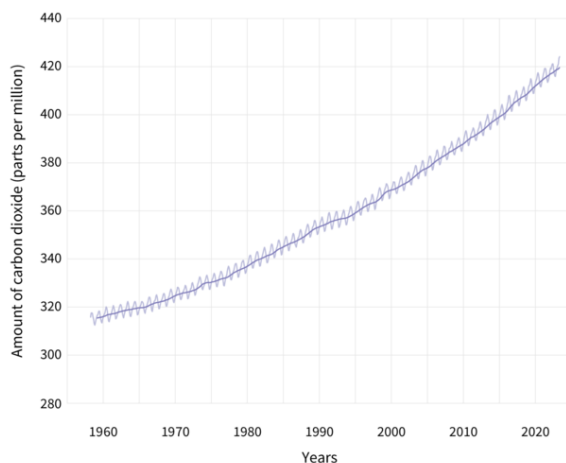


Рис. 2. Среднемесячные измерения углекислого газа станцией обсерватории Мауна-Лоа на Гавайях с 1958 года в частях на миллион (ppm).

Для измерений CO<sub>2</sub> традиционно используются инфракрасные газоанализаторы, основанные на поглощении ИК-излучения молекулами CO<sub>2</sub>. В последние десятилетия все чаще применяются хроматографические и оптические (например, квантово-каскадные лазеры) методы, отличающиеся высокой точностью и стабильностью [Chen et al., 2021]. Данные со станций передаются в центральные архивы ВМО практически в режиме реального времени. Это позволяет оперативно анализировать пространственно-временную динамику CO<sub>2</sub> на различных масштабах: от суточных вариаций до межгодового тренда. Например, интенсивное поглощение CO<sub>2</sub> растительностью приводит к сезонному минимуму концентрации в Северном полушарии летом и максимуму зимой [Pickett-Heaps et al., 2011]. Межгодовое увеличение обусловлено ростом антропогенных выбросов. Различия между фоновыми станциями отражают вклад региональных источников и стоков CO<sub>2</sub>.

Дальнейшее развитие наземной сети предполагает автоматизацию измерений, создание новых станций в недостаточно охваченных районах (Африка, Азия), интеграцию с авиационными и спутниковыми данными. Это позволит получать все более подробную и точную информацию о распределении CO<sub>2</sub> в атмосфере Земли. Такая информация критически важна для понимания

углеродного цикла и прогнозирования климатических изменений.

### История и современное состояние спутникового мониторинга CO<sub>2</sub>

Первые эксперименты по дистанционному зондированию содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере из космоса были предприняты в конце 1990-х годов с использованием спектрометров на спутниках для исследования атмосферы. В частности, в 1996-97 гг. японский спутник ADEOS осуществил глобальные измерения CO<sub>2</sub> в ближнем инфракрасном диапазоне с помощью ИК-Фурье спектрометра IMG [Rayner, O'Brien, 2001]. Эти данные продемонстрировали потенциал дистанционного зондирования CO<sub>2</sub>, хотя их точность была еще недостаточной.

В 2002 году на околоземную орбиту на борту спутника NASA Aqua был выведен атмосферный инфракрасный зонд (AIRS) предоставляющий данные, необходимые для наблюдения за земной атмосферой. Комплект приборов AIRS состоит из гиперспектрального прибора AIRS с 2378 инфракрасными каналами и 4 каналами видимого/ближнего инфракрасного диапазона, а также прибора AMSU-A с 15 микроволновыми каналами. Данные AIRS применяются для создания ежедневных глобальных карт углекислого газа с точностью выше 2 частей на миллион (рис. 3), а также других газовых примесей, включая озон, метан и окись углерода [<https://airs.jpl.nasa.gov/>].

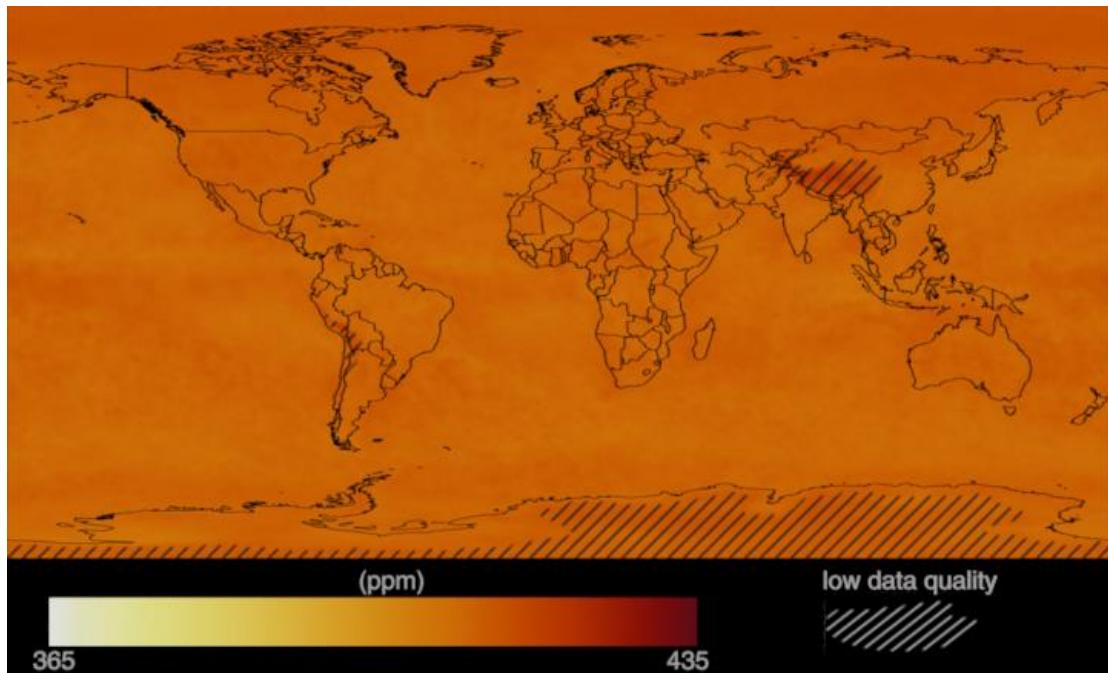


Рис. 3. Карта-схема глобального распределения концентрации  $CO_2$  в средней тропосфере в частях на миллион (ppm) в декабре 2020 г. по данным атмосферного инфракрасного зонда (AIRS) космического аппарата NASA Aqua.

Новый этап в спутниковом мониторинге  $CO_2$  начался в 2009 г. с запуском японского спутника GOSAT со спектрометром TANSO-FTS, специально предназначенным для регистрации  $CO_2$  (рис. 4) и  $CH_4$  по отраженному от поверхности Земли солнечному излучению [Yoshida et al., 2013]. Высокая чувствительность TANSO-FTS в области поглощения  $CO_2$  (~1,6 и 2 мкм) позволила получать глобальные карты распределения  $CO_2$  с точностью

около 2 частей на миллион и предоставляет уникальные сведения о газовом составе атмосферы Земли, необходимые для климатических исследований. Для повышения точности данные GOSAT совмещаются с наземными измерениями методом усвоения данных [Kulawik et al., 2022]. Также проводятся валидационные измерения  $CO_2$  с самолетов.

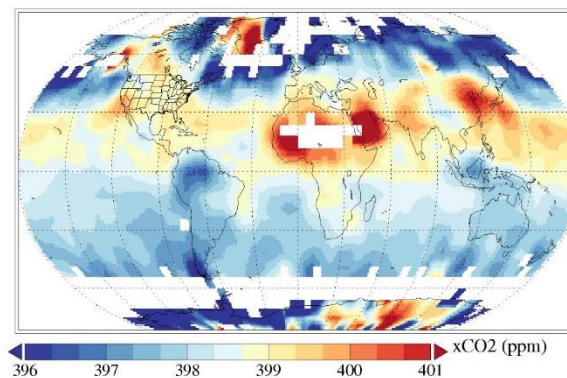


Рис. 4. Карта-схема глобального распределения средней концентрации  $CO_2$  в атмосфере в частях на миллион (ppm) в 2015 г. по данным спектрометра TANSO-FTS японского космического аппарата GOSAT.

В 2014 году НАСА был запущен спутник OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2), который предназначен для получения точных данных о пространственном распределении и временных вариациях концентрации углекислого газа в атмосфере Земли. Благодаря использованию современного спектрометра высокого разрешения, работающего в инфракрасном диапазоне, OCO-2 может регистрировать даже небольшие вариации  $CO_2$  (рис. 5) по всей планете. Съемка выполняется с пространственным разрешением около 2-3 км как

в надиr, так и под углом до 45 градусов. Ширина полосы захвата при сканировании составляет порядка 10 км. Благодаря оптимальным орбитальным параметрам спутник обеспечивает полное покрытие поверхности Земли каждые 16 дней. Высокоточные данные этой миссии дополняют наземные наблюдения и играют важную роль в понимании глобального круговорота углерода и изменений климата [https://www.nasa.gov/mission\_pages/oco2/index.html, Frankenberg et al., 2014]. В 2019 г. был выведен на

орбиту OCO-3, который несет практически идентичный OCO-2 спектрометр [https://ocov2.jpl.nasa.gov/instrument]. Отличие заключается в возможности гибкой наводки на

цель, что дает преимущество в детальном зондировании локальных областей размером до 30×30 км [Taylor et al., 2020].

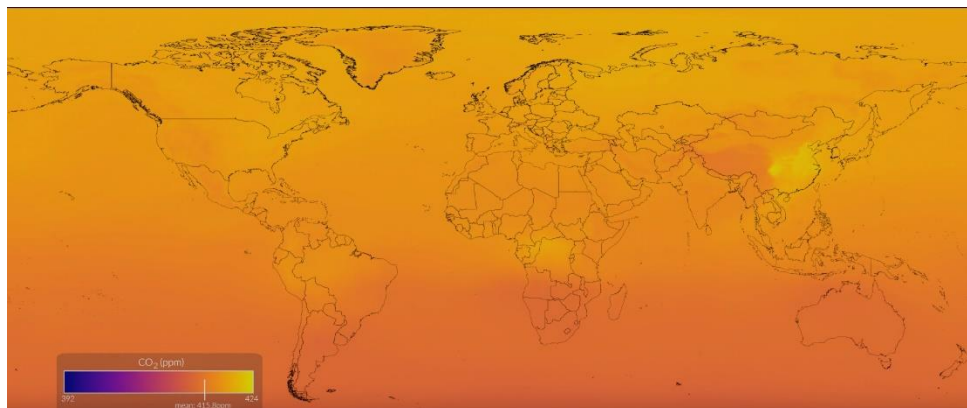


Рис. 5. Карта-схема глобального распределения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере в частях на миллион (ppm) в январе 2022 г. по данным с космического аппарата NASA OCO-2.

В 2016 г. Китай запустил спутник TanSat с дополняющим GOSAT спектрометром в SWIR, работающий в ближнем инфракрасном диапазоне 0,75-2,1 мкм. Благодаря высокому спектральному разрешению прибор может регистрировать полосы поглощения CO<sub>2</sub> даже в слабоконцентрированных состояниях. Пространственное разрешение составляет около 2 км. Измерения ведутся как в надир, так и под углом до 45°, что позволяет получать данные о концентрации CO<sub>2</sub> как вблизи поверхности, так и на разных высотах в атмосфере. Ширина полосы обзора - 60 км. TanSat вносит существенный вклад в глобальные исследования круговорота углерода и изменения климата посредством детального мониторинга CO<sub>2</sub> с помощью современных спутниковых технологий.

В 2017 г. начала работу европейская миссия Sentinel-5 Precursor, ориентированная на мониторинг загрязнения атмосферы. Ее спектрометр TROPOMI с высоким пространственным разрешением работает в ультрафиолетовом, видимом, ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах спектра и позволяет регистрировать концентрации озона, метана, формальдегида, аэрозолей и диоксида азота. [Hu et al., 2022].

Таким образом, в настоящее время уже развернута орбитальная группировка, обеспечивающая регулярный мониторинг глобального распределения CO<sub>2</sub>. Эти данные дополняют наземную сеть GAW, особенно в труднодоступных районах океанов, Сибири и тропиков.

Спутниковые наблюдения позволяют отслеживать региональные источники и стоки CO<sub>2</sub>, сезонную и межгодовую динамику его концентрации, что важно для понимания глобального углеродного цикла и климатических процессов [Chatterjee et al., 2020]. Перспективным направлением является совмещение данных разных спутников в интегрированных продуктах с использованием мультисенсорного подхода. Это

позволит получать все более детальную и точную информацию о распределении CO<sub>2</sub> в атмосфере.

На данный момент Россия не имеет специализированных спутников для мониторинга CO<sub>2</sub> в атмосфере. Отечественные космические аппараты, такие как метеорологические спутники серии "Метеор" и "Электро", оснащены приборами для наблюдения облачности, температуры подстилающей поверхности и других метеопараметров. Однако, они не несут специальной аппаратуры для регистрации CO<sub>2</sub>. В настоящее время в России ведутся разработки перспективных спутников для мониторинга состава атмосферы, включая парниковые газы. В частности, в рамках Федеральной космической программы планируется создание гидрометеорологических и климатических спутников нового поколения. Предполагается, что они будут оснащены современными спектрометрическими комплексами, способными проводить измерения CO<sub>2</sub> из космоса по примеру зарубежных аналогов. Ожидается, что развертывание отечественной орбитальной группировки для мониторинга CO<sub>2</sub> и других парниковых газов позволит получать регулярные данные об их содержании над территорией России. Это будет способствовать изучению пространственного распределения CO<sub>2</sub>, оценке потоков углерода и в конечном итоге - контролю источников выбросов парниковых газов в России.

#### Данные о содержании CO<sub>2</sub> в атмосфере в архивах моделей реанализа

CAMS-EGG4 – набор данных, являющийся частью реанализа состава атмосферы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), посвященного парниковым газам: двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>) и метану (CH<sub>4</sub>). В этом наборе данных моделируются потоки CO<sub>2</sub> для получения представления об изменчивости в широком диапазоне масштабов от суточного до межгодового. Реанализ объединяет данные модели с наблюдениями со всего мира в глобально полный

и непротиворечивый набор данных с использованием модели атмосферы, основанной на законах физики и химии. Этот принцип, называемый ассимиляцией данных, основан на методе, используемом центрами численного прогнозирования погоды и центрами прогнозирования качества воздуха. Система усвоения способна оценивать погрешности между наблюдениями и отделять данные хорошего качества от данных плохого качества. Модель атмосферы позволяет проводить оценки в местах с низким охватом данными или для атмосферных загрязнителей, для которых нет прямых наблюдений. Система наблюдения сильно видоизменилась с течением времени, по этой причине набор данных CAMS-EGG4 доступен только начиная с 2003 года. Шаг сетки CAMS-EGG4 составляет до 0,75 градуса с 3-часовой периодичностью данных [<https://ads.atmosphere.copernicus.eu/>].

#### Заключение

Регулярные инструментальные измерения атмосферного CO<sub>2</sub>, которые были инициированы в середине XX века на удаленных станциях, зафиксировали рост концентрации этого парникового газа, обусловленный антропогенной деятельностью. Для организации глобального мониторинга CO<sub>2</sub> под эгидой Всемирной метеорологической организации была развернута масштабная наземная сеть GAW, насчитывающая в настоящее время порядка 100 станций на всех континентах, включая Антарктиду.

Для прецизионных измерений CO<sub>2</sub> в атмосфере применяются широкий спектр современных аналитических методов, среди которых оптическая спектроскопия высокого разрешения, мультикомпонентная хроматография с различными детекторами, а также изотопная масс-спектрометрия. Последняя позволяет получать данные об изотопном составе CO<sub>2</sub>, что важно для идентификации источников его эмиссии.

Начиная с 2000-х годов важную роль в глобальном мониторинге CO<sub>2</sub> играют спутниковые наблюдения, реализованные в рамках специализированных орбитальных миссий GOSAT, OCO-2, TanSat, AIRS и др. Их преимуществом является возможность зондирования труднодоступных районов и получения информации о пространственно-временном распределении CO<sub>2</sub>. Интеграция спутниковых данных с наземными наблюдениями методами усвоения данных повышает точность и детальность мониторинга CO<sub>2</sub>.

Для глубокого понимания глобального углеродного цикла и прогноза будущих климатических изменений необходим комплексный подход, объединяющий разнородную информацию о CO<sub>2</sub> из наземных, авиационных и спутниковых источников. Дальнейшее развитие систем мониторинга CO<sub>2</sub> и других парниковых газов в России будет способствовать изучению их пространственно-временной динамики и контролю антропогенных выбросов на национальном уровне.

Исследование выполнено в рамках государственного задания «Углеродный баланс биоморфолитосистем побережья и прилегающих морских акваторий окраинных морей Дальнего Востока (FEFF-2022–0027)».

#### Список литературы:

1. Chatterjee A. et al. Reductions in India's crop yield due to ozone. *Geophysical Research Letters*, 2020, Vol. 47, No. 13, e2020GL08725.
2. Chen H. et al. (2021) Adaptation and experiences of optical spectroscopic techniques in atmospheric greenhouse gas observations. *Appl. Spectrosc. Rev.*, 1-55.
3. Copernicus. The Earth observation component of the European Union's Space program. <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/>
4. Eldering A. et al. The Orbiting Carbon Observatory-3: measuring atmospheric carbon dioxide from space. *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 258, p.112359.
5. Francey, R.J. et al. (1999) A 1000-year high precision record of  $\delta^{13}C$  in atmospheric CO<sub>2</sub>. *Tellus B*, 51(2), 170-193.
6. Frankenberg, C., O'Dell, C., Berry, J., Guanter, L., Joiner, J., Köhler, P., Pollock, R. and Taylor, T.E., 2014. Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. *Remote Sensing of Environment*, 147, pp.1-12.
7. Hu H. et al. Sentinel-5P TROPOMI atmospheric CO<sub>2</sub> retrieval: description and validation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, Vol. 15, No. 3, pp. 1501-1520.
8. IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
9. Keeling C.D. et al. (1976) Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus*, 28(6), 538-551.
10. Keeling, C.D. (1960) The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Tellus*, 12, 200-203.
11. Kulawik S.S. et al. Evaluation of ACOS-GOSAT, BESD-SCIAMACHY, CarbonTracker, and MACC through comparisons to TCCON. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, Vol. 9, No. 12, pp. 6083-6103.
12. Liu Y. et al. The TanSat mission: preliminary global observations. *Science Bulletin*, 2018, Vol. 63, No. 21, pp. 1400-1402.
13. Masarie K.A. et al. (2014) NOAA/GML CO<sub>2</sub> reference gases and uncertainty. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119(13), 8266–8282.
14. Morino, I. et al. (2011) Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra. *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 1061–1076.
15. National Aeronautics and Space Administration. The Atmospheric Infrared Sounder on NASA's Aqua Satellite mission. <https://airs.jpl.nasa.gov/>
16. NOAA Climate Program. [www.climate.gov](http://www.climate.gov)

17. Pickett-Heaps C. et al. (2011) Atmospheric CO<sub>2</sub> inversion validation using vertical profile measurements. *J. Geophys. Res.*, 116(D12), D12305.
18. Rayner P.J., O'Brien D.M. The utility of remotely sensed CO<sub>2</sub> concentration data in surface source inversions. *Geophysical Research Letters*, 2001, Vol. 28, No. 1, pp. 175-178.
19. Taylor T.E. et al. (2020) OCO-3 early science observations of terrestrial chlorophyll fluorescence from the ISS. *Proc. SPIE 11531, Earth Observing Systems XXV*, 115310A.
20. WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - No.18: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2021.
21. World Meteorological Organization (2020) WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 16.
22. World Meteorological Organization (2021) Guide to the Global Observing System. WMO-No. 488.
23. World Meteorological Organization. GAW Station Information System. <https://gawsis.meteoswiss.ch>
24. Worthy, D.E. et al. (2003) Seven years of continuous methane observations at a remote boreal site in Ontario, Canada. *J. Geophys. Res.*, 108(D13), 4407.
25. Yoshida Y. et al. Retrieval algorithm for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the greenhouse gases observing satellite. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, Vol. 6, No. 3, pp. 717-734.