Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 363–365.

УДК 528.88, 551.51
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-363
ORCID: 0000-0002-5361-0334

АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО МЕТАНА ПО НАЗЕМНЫМ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

В.С. Стародубцев[1], В.С. Соловьев[1], П.Г. Мордовской[2]

[1]Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук,
[2]Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
Якутск, Россия, starodubjr@ikfia.ysn.ru

ANALYSIS OF ATMOSPHERIC METHANE VARIATIONS BASED ON IN-SITU AND SATELLITE DATA IN THE ARCTIC REGION

V.S. Starodubtsev[1], V.S. Solovyev[1], P.G. Mordovskoi[2]

[1]Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS
Yakutsk, Russia, starodubjr@ikfia.ysn.ru
[2]Yakut Science Center SB RAS

Аннотация. Представлен анализ вариаций атмосферного метана на арктической станции Барроу за 1986–2024 гг. по наземным и спутниковым данным. Выявлен устойчивый положительный тренд CH_4 с ускорением после 2010 г. Амплитуда сезонного цикла достигает 57.5 ppb. Основные источники: нефтегазовая инфраструктура, заболоченные участки и дегазация при таянии морского льда. Сравнение наземных и спутниковых данных показало недоучёт последними кратковременных пиковых выбросов. Сделан вывод о переходе арктического метанового цикла в фазу нестабильности из-за деградации мерзлоты и пожаров.

Ключевые слова: метан, Арктика, станция Барроу, наземный мониторинг, спутниковые данные.

Abstract. This study presents an analysis of atmospheric methane variations at the Arctic station Barrow (Utqiaġvik, Alaska) over the period of 1986–2024 using in-situ and satellite data. A sustained positive CH_4 trend with an acceleration after 2010 is identified. The seasonal cycle amplitude reaches up to 57.5 ppb. Main sources include oil and gas infrastructure, wetlands, and degassing from melting sea ice. Comparison of in-situ and satellite data shows that satellites underestimate short-term peak emissions. It is concluded that the Arctic methane cycle is transitioning into an unstable phase due to permafrost degradation and wildfires.

Keywords: methane, Arctic, Barrow station, in-situ monitoring, satellite data.

ВВЕДЕНИЕ

Метан (CH_4) является вторым по значимости парниковым газом после углекислого газа (CO_2), однако его потенциал глобального потепления за 20-летний период примерно в 84 раза выше, чем у CO_2. В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост концентрации метана в атмосфере, причины которого до конца не ясны. Особое внимание вызывает Арктический регион, который выступает как один из наиболее уязвимых и быстро меняющихся климатических поясов. Арктика содержит огромные запасы природного метана в виде газогидратов, а также является зоной активного разложения органического вещества в многолетнемёрзлых породах. Повышение температуры в данном регионе происходит в 2–3 раза быстрее, чем в среднем по планете («арктическое усиление»), что создаёт риск высвобождения значительных объёмов древнего метана при деградации мерзлоты и таянии подводных гидратов. Мониторинг метана в Арктике традиционно осуществляется двумя способами: наземными измерениями на фоновых станциях (например, Алерт, Барроу, Тикси, Териберка) и спутниковыми наблюдениями (TROPOMI, GOSAT, SCIAMACHY, AIRS и др.). Наземные данные обладают высокой точностью и временным разрешением, но имеют ограниченное пространственное покрытие. Спутниковые технологии, напротив, обеспечивают картографирование больших территорий, но пока уступают наземным в чувствительности в условиях низких температур, наличия облачности и снежного покрова, характерных для высоких широт. Анализ вариаций атмосферного метана в арктическом регионе осложняется несколькими факторами: сезонной цикличностью, влиянием природных и антропогенных источников, а также сложными атмосферными процессами переноса. Совместное использование наземных и спутниковых данных позволяет компенсировать недостатки каждого метода и даёт возможность более надёжно оценивать пространственно-временную структуру аномалий CH_4. Целью настоящей работы является анализ вариаций концентрации метана в Арктическом регионе за период 1986-2024 гг. на основе совместной обработки данных наземной станции фонового мониторинга Барроу и спутниковых измерений.

ОБСУЖДЕНИЕ

За весь 39-летний период наблюдений (1986–2024) на станции Барроу фиксируется устойчивый положительный тренд концентраций метана (рис.1), что согласуется с общемировыми тенденциями. В ранний период (1986–1994 гг.)

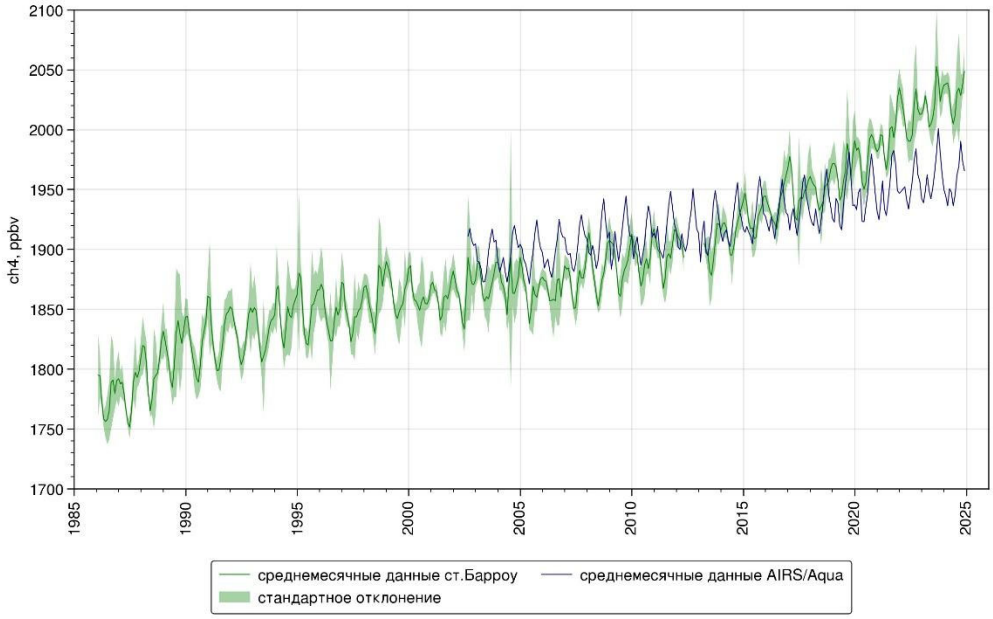

Рис. 1. Среднемесячные данные ст. Барроу (1986-2024 гг.), AIRS/Aqua (2002-2024 гг.)

средний темп роста оценивался в ~8.5 ppb·yr⁻¹ [E.J. Dlugokencky et al., 1995]. Ключевым событием, отразившимся на глобальном тренде, стала фаза нулевого роста в конце 1990-х – начале 2000-х годов, которая в данных станции Барроу проявилась как период стабилизации. Общепринятого пояснения этому до сих пор нет, предполагается, что основная причина этого явления — снижение антропогенных эмиссий (в частности, сокращение утечек при добыче углеводородов) [Lawrence, Mao, 2019].

С начала 2010-х годов и до 2024 года наблюдается возобновление ускоренного роста концентраций с новой силой. Этот период характеризуется не просто возвращением к прежним темпам, а их значительным превышением, что связывается с активизацией климатических триггеров (волны тепла, увеличение площади пожаров, деградация мерзлоты).

Одной из наиболее характерных особенностей станции Барроу является ярко выраженная сезонная изменчивость. Амплитуда сезонного цикла здесь значительно превышает аналогичные показатели для средних широт. По оценкам 1986–1994 гг., амплитуда достигала ~57.5±11.4 ppbv, что почти вдвое выше, чем на станции Мауна-Лоа (30.6±4.2 ppbv) [E.J. Dlugokencky et al., 1995]. Эта аномалия объясняется сочетанием геокриологических условий и биогеохимической активности. Анализ временных рядов за весь период 1986–2024 гг. подтверждает, что максимумы концентраций в теплый сезон обусловлены высвобождением метана из оттаивающей криолитозоны и микробной активностью в термокарстовых озерах и на дренированных участках тундры. В последние десятилетия наблюдается смещение пика эмиссии на более ранние сроки (июнь–июль), что прямо коррелирует с ранним сходом снежного покрова и более интенсивным летним прогреванием. Минимумы концентраций приходятся на март–апрель. Традиционно это связывалось с низкой микробной активностью в промерзшей почве. Однако новые данные (2020–2024 гг.) показывают менее глубокие минимумы, что является косвенным индикатором наличия таликов (непромерзающих зон) под руслами рек или зон термокарста, которые продолжают продуцировать метан даже при отрицательных температурах воздуха. Зафиксированы аномалии, когда синоптические процессы приносят на станцию воздушные массы с обогащенных метаном участков суши (в том числе из района Прадхо-Бей), что создает эффект «субрегиональной фоновой концентрации» в зимний период.

Сопоставление наземных (in-situ) данных станции Барроу с данными спутниковых измерений (AIRS/Aqua) за 2002–2024 гг. обнаруживает хорошее совпадение долгосрочных трендов. Наземные данные фиксируют резкие (до ~5% и более) часовые и суточные скачки [Стародубцев В.С., Соловьев В.С., 2020], которые «сглаживаются» при спутниковой съемке из-за большого пространственного разрешения (от 5.5x7 км² до 27x32 км²) и малого количества повторных пролетов над исследуемой территорией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За весь период наблюдений зафиксирован устойчивый положительный тренд концентрации CH_4. При этом выделяются три характерных этапа: умеренный рост (1986–1998 гг.), период стабилизации с минимальными темпами прироста (1999–2006 гг.) и резкое ускорение роста после 2010 г., достигшее максимальных значений в 2019–2024 гг.

Амплитуда сезонного цикла CH_4 в Барроу (до 57.5±11.4 ppbv) значительно превышает среднеширотные значения. Выявлено смещение летнего пика эмиссии на более ранние сроки (июнь–июль), что коррелирует с ростом летних температур и ранним сходом снежного покрова. В зимние минимумы за последние годы наблюдается менее глубокое падение концентраций, указывающее на наличие таликов (непромерзающих зон), продолжающих продуцировать метан.

Наземные и спутниковые измерения (AIRS) демонстрируют хорошее согласие по долгосрочным трендам и сезонному ходу. Однако спутники систематически сглаживают кратковременные (часы–сутки) пиковые выбросы, которые фиксируются наземной станцией. Недоучёт таких эпизодов может приводить к занижению реального метанового потока в климатических моделях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 125102712109-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Edward J. Dlugokencky, L. Paul Steele, Patricia M. Lang, Kenneth A. Masarie Atmospheric methane at Mauna Loa and Barrow observatories: Presentation and analysis of in situ measurements // Journal of geophysical research. 1995. V. 100, I. D11. P. 23103-23113. https://doi.org/10.1029/95JD02460

Cristopher Lawrence, Huiting Mao Anthropogenic and Natural Factors Affecting Trends in Atmospheric Methane in Barrow, Alaska // Atmosphere. 2019. V. 10. I. 4. https://doi.org/10.3390/atmos10040187

Стародубцев В. С., Соловьев В. С. Особенности вариаций концентрации метана в летне-осенний период на арктической станции Барроу (Аляска) по наземным и спутниковым данным // Вестн. Северо-Восточного федер. ун-та им. М. К. Аммосова. 2020. № 1(75). С. 40–50.