

Научная статья

УДК 551.510.41

[https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-05](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-05)

Полное содержание CO₂ и CH₄ в атмосфере юга Западной Сибири по данным спутников GOSAT и GOSAT-2

Егор Юрьевич Мордвин¹, Дмитрий Сергеевич Сергиенко²,

Анатолий Алексеевич Лагутин³

¹Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, zion0210@gmail.com

²Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, dsergienko2004@mail.ru

³Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, lagutin@theory.asu.ru

Original article

Total Column Content of CO₂ and CH₄ in the Atmosphere of the South Part of Western Siberia According to Data from GOSAT and GOSAT-2 Satellites

Egor Yu. Mordvin¹, Dmitry S. Sergienko², Anatoly A. Lagutin³

¹Altai State University, Barnaul, Russia, zion0210@gmail.com

²Altai State University, Barnaul, Russia, dsergienko2004@mail.ru

³Altai State University, Barnaul, Russia, lagutin@theory.asu.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования межгодовой изменчивости и сезонной динамики полного содержания диоксида углерода (XCO₂) и метана (XCH₄) в атмосфере юга Западной Сибири (48°–53° с.ш., 60°–90° в.д.) для периода 2009–2024 гг. Информационной основой исследования являются данные Фурье-интерферометра TANSO-FTS, установленного на спутниках GOSAT и GOSAT-2 Японского агентства аэрокосмических исследований. В результате анализа спутниковых данных установлены линейные тренды, показывающие рост содержания обоих газов и демонстрирующие хорошее согласие с глобальными фоновыми оценками. Показано наличие сезонных циклов XCO₂ и XCH₄, имеющих противоположные фазы, что обусловлено особенностями динамики биосферных и физико-химических процессов. Полное содержание CH₄ в годовом цикле имеет выраженный минимум в апреле-мае и максимум в летние месяцы. Максимум содержания CO₂ установлен в марте-апреле, а минимум приходится на конец лета — начало осени. Показано хорошее согласие полученных результатов с независимыми спутниковыми измерениями (OCO-2, TROPOMI), а также с результатами глобальной химической транспортной модели GEOS-Chem. Главный вывод работы заключается в том, что, несмотря на отсутствие наблюдений

Abstract. The paper presents the results of a study of interannual variability and seasonal dynamics of the total column content of carbon dioxide (XCO₂) and methane (XCH₄) in the atmosphere of the south part of Western Siberia (48°–53° N, 60°–90° E) for the period of 2009 to 2024. The research is based on data from the TANSO-FTS Fourier interferometer installed on the GOSAT and GOSAT-2 satellites of the Japan Aerospace Exploration Agency. The analysis of the satellite data reveals linear trends showing an increase in the content of both gases and demonstrating good agreement with global background estimates. The presence of seasonal cycles of XCO₂ and XCH₄ with opposite phases is demonstrated, which is due to the peculiarities of the dynamics of biospheric and physicochemical processes. The total content of CH₄ in the annual cycle has a pronounced minimum in April-May and a maximum in the summer months. The maximum CO₂ content is observed in March-April, with a minimum in late summer, early fall. A good agreement is demonstrated between the obtained results and independent satellite measurements (OCO-2, TROPOMI), as well as the results of the GEOS-Chem global chemical transport model. The main conclusion of the study shows that, despite the lack of winter observations, GOSAT/GOSAT-2 data provide an important additional source of information for studies of the seasonal

в зимний период, данные GOSAT/GOSAT-2 являются важным дополнительным источником информации в исследованиях сезонной и межгодовой динамики парниковых газов в атмосфере юга Западной Сибири.

Ключевые слова: диоксид углерода, CO₂, метан, CH₄, парниковые газы, Западная Сибирь, спутниковый мониторинг, GOSAT, GOSAT-2, сезонный цикл, тренды

Для цитирования: Мордвин Е.Ю., Сергиенко Д.С., Лягутин А.А. Полное содержание CO₂ и CH₄ в атмосфере юга Западной Сибири по данным спутников GOSAT и GOSAT-2 // Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 1 (147). С. 42–49. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-05](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-05).

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание на проведение научных исследований, выполняемых в АлтГУ, проект FZMW-2023-0007).

Введение

Антропогенные парниковые газы, к которым в первую очередь относятся диоксид углерода (CO₂) и метан (CH₄), являются ключевыми драйверами современного изменения климата [1]. Мониторинг их концентраций в атмосфере, понимание пространственно-временной изменчивости, выявление источников и стоков являются критически важными задачами для прогнозирования климатических изменений, а также разработки стратегий по смягчению их последствий [2].

Актуальность данного исследования обусловлена значительной ролью Западной Сибири в глобальном углеродном цикле. Регион характеризуется обширными территориями, включающими разнообразные экосистемы: от степей и лесостепей на юге до крупнейших в мире болотных систем (Васюганские болота) в средней тайге [3]. Эти экосистемы являются естественными аккумуляторами и источниками парниковых газов, чья активность сильно зависит от температурного режима и гидрологического цикла. Изменение климата в Сибири, проявляющееся в росте температур и смене режима увлажнения, может существенно повлиять на баланс углерода в регионе. Для получения достоверных количественных оценок содержания углекислого газа и метана в атмосфере региона требуется проведение комплекса мероприятий по непрерывному мониторингу с использованием сети наземных пунктов, а также технологий аэрокосмического зондирования. Плотность имеющейся сети наземных станций фонового мониторинга в Западной Сибири остается крайне низкой, что создает значительные пробелы во временных рядах данных, а также в их пространственном распределении.

and interannual dynamics of greenhouse gases in the atmosphere of the south part of Western Siberia.

Keywords: carbon dioxide, CO₂, methane, CH₄, greenhouse gases, Western Siberia, satellite monitoring, GOSAT, GOSAT-2, seasonal cycle, trends

For citation: Mordvin E.Yu., Sergienko D.S., Lagutin A.A. Total Column Content of CO₂ and CH₄ in the Atmosphere of the South Part of Western Siberia According to Data from GOSAT and GOSAT-2 Satellites. *Izvestiya of Altai State University*. 2026. No 1 (147). P. 42–49. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-05](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-05).

Funding: the study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment for scientific research carried out at Altai State University, project FZMW-2023-0007).

В связи с этим спутниковые наблюдения предоставляют уникальную возможность для получения непрерывных и пространственно-однородных рядов данных о содержании парниковых газов в атмосфере. Такие спутниковые миссии, как GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite, запущен в 2009 г.) [4] и GOSAT-2 (2018 г.) [5], являлись первым поколением специализированных обсерваторий для мониторинга содержания в атмосфере CO₂ и CH₄ с высокой точностью. Сегодня на орбите Земли работает новое поколение специализированных карбоновых платформ (например, Sentinel-5 Precursor [6] и OCO-2 [7]). Однако совместные измерения GOSAT и GOSAT-2 позволили получить уникальный по продолжительности (свыше 15 лет) и согласованности ряд наблюдений, которые представляют особый интерес в исследованиях динамики содержания парниковых газов и анализа климатических изменений на региональном уровне.

Целью работы является исследование годового хода и межгодовой изменчивости полного содержания углекислого газа и метана в атмосфере юга Западной Сибири по данным спутниковых измерений GOSAT и GOSAT-2 для периода 2009–2024 гг.

Приборы и методы

Информационной основой проведенного в работе исследования являются данные спутниковых миссий GOSAT и GOSAT-2. Спутник GOSAT, являющийся совместным проектом Японского агентства аэрокосмических исследований, Министерства окружающей среды Японии и Национального института экологических исследований, был запущен в 2009 г. с целью глобального мониторинга парниковых газов [4]. GOSAT оснащен Фурье-интерферометром TANSO-FTS (Thermal And

Near-infrared Sensor for carbon Observation — Fourier Transform Spectrometer), который регистрирует спектры солнечного излучения, отраженного от земной поверхности и рассеянного атмосферой, в коротковолновой и тепловой областях ИК-спектра. TANSO-FTS выполняет измерения в нескольких спектральных диапазонах около 0.76 мкм (полоса поглощения O_2), 1.6 и 2.0 мкм (полосы поглощения CO_2 и CH_4) и 5.5–14.3 мкм (тепловой ИК-диапазон). Размер мгновенного поля обзора (IFOV) ~10.5 км. Получаемые спектры позволяют с помощью методов обратного моделирования (retrieve column-averaged) восстанавливать полное содержание CO_2 и CH_4 в атмосфере. Спутник также оснащен камерой TANSO-CAI, которая используется для обнаружения облачности и аэрозолей с целью отбора пригодных для обработки спектров TANSO-FTS.

Спутник GOSAT-2 [5] является продолжением программы GOSAT. Интерферометр TANSO-FTS-2, установленный на борту этой платформы, имеет лучшую чувствительность и спектральное разрешение, что позволило снизить погрешности измерений, а также проводить восстановление содержания XCO_2 и XCH_4 даже в условиях умеренной облачности. Размер IFOV для GOSAT-2 составляет ~9.7 км. Данные GOSAT и GOSAT-2 находятся в открытом доступе [8, 9] и распространяются в формате HDF5 (Hierarchical Data Format). В работе использовались результаты обработки алгоритма TANSO-FTS-2_SWIR_L2 версии 02.20 [10].

Для анализа был выбран регион на юге Западной Сибири с границами 48–53° с.ш. и 60–90° в.д. Эта территория преимущественно представляет собой фоновую область, включающую лесостепные и степные экосистемы, которые активно участвуют в сезонном цикле поглощения CO_2 . Относительно слабое влияние интенсивных точечных антропогенных источников метана (за исключением Кузнецкого угольного бассейна) позволяет изучать региональные биосферно-атмосферные обмены и долгосрочные тренды.

В исследовании использовались данные уровня 2 (L2), прошедшие стандартную фильтрацию по качеству восстановления параметров атмосферы [10]. Для устранения систематических расхождений между наблюдениями GOSAT и GOSAT-2 была выполнена кросс-калибровка по данным, полученным для периода их совместной работы (2018–2024 гг.). В результате установлено, что для XCH_4 смещение между наборами данных не превышает 1 млрд⁻¹, а для XCO_2 разница составляет приблизительно 4 млн⁻¹. Данные GOSAT-2 были скорректированы на эти величины для всего периода.

Для исследования сезонных вариаций содержания углекислого газа в атмосфере и установления многолетнего тренда изменения его концентрации использовалась гармоническая модель, предложенная в [11].

Согласно этой модели ежедневное значение XCO_2 определяется функцией

$$f(t) = a_0 + a_1 t + a_2 \sin(\omega[t - a_3] + \cos^{-1}[a_4 \cos(\omega[t - a_3])]), \quad (1)$$

где t — номер дня, $\omega = 2\pi/365$. Поиск параметров a_0, \dots, a_5 выполняется с использованием нелинейного метода наименьших квадратов (алгоритм Левенберга — Марквардта). Тренд изменения содержания XCO_2 в атмосфере определяется первыми двумя слагаемыми $a_0 + a_1 t$, а амплитуда сезонных колебаний равна $2|a_2|$.

Для XCH_4 , сезонный цикл которого менее выражен и может искажаться шумами разного происхождения, применялся модифицированный подход. Временной ряд данных приводился к стационарному виду вычитанием годового прироста относительно базового 2009 г. Полученные данные аппроксимировались гармонической функцией (1) для оценки параметров сезонного цикла. Тренд рассчитывался аналогично XCO_2 .

Для оценки достоверности результатов, полученных по данным GOSAT/GOSAT-2, было проведено их сопоставление с измерениями следующих независимых спутниковых обсерваторий:

— XCO_2 для периода 2014–2024 гг. согласно орбитальной карбоновой обсерватории OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2);

— XCH_4 для периода 2018–2024 гг. согласно спектрометру TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), установленному на спутнике Sentinel-5 P.

В дополнение выполнено сравнение XCO_2 и XCH_4 с результатами химической транспортной модели GEOS-Chem [12] для периода 2010–2024 гг. в региональной конфигурации (домен: 40–80° с.ш., 45–120° в.д., разрешение ~50 км) и упрощенной химией углеродного цикла (CH_4 -CO-CO₂-OCS). Для коррекции известной тенденции модели к завышению стока CH_4 в схеме (CH_4 -CO-CO₂-OCS) [13] применялся масштабирующий коэффициент 0.85. При моделировании CO_2 масштабирующий коэффициент не использовался.

Все независимые спутниковые данные также подвергались строгой фильтрации по качеству в соответствии с рекомендациями. Сравнение проводилось для пространственно-временных совпадений (коллокаций) в пределах выбранного региона. В [14] отмечается, что такой комплексный подход к валидации с использованием данных различных спутниковых инструментов и численного моделирования является наиболее надежным.

Для количественной оценки точности и согласованности данных использовались стандартные статистические метрики: коэффициент детерминации (R^2), среднеквадратичное отклонение (RMSE) и систематическое смещение (Bias).

Результаты

За 15-летний период наблюдений (2009–2024 гг.) в атмосфере юга Западной Сибири зафиксированы устойчивые тренды роста концентраций парниковых газов (см. рис. 1). Расчет линейного тренда для XCH₄ дает оценки скорости роста $\sim 9.0 \pm 0.1$ млрд⁻¹/год, а для XCO₂ $\sim 2.39 \pm 0.05$ млн⁻¹/год. Полученные значения хорошо согласуются с данными глобально-

го фонового мониторинга, проводимого NOAA GML (Global Monitoring Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration), в котором для аналогичного периода установлены тренды ~ 8.8 млрд⁻¹/год для XCH₄ [15] и ~ 2.62 млн⁻¹/год для XCO₂ [16] соответственно. Это подтверждает репрезентативность спутниковых данных для региона и корректность применяемых методов обработки.

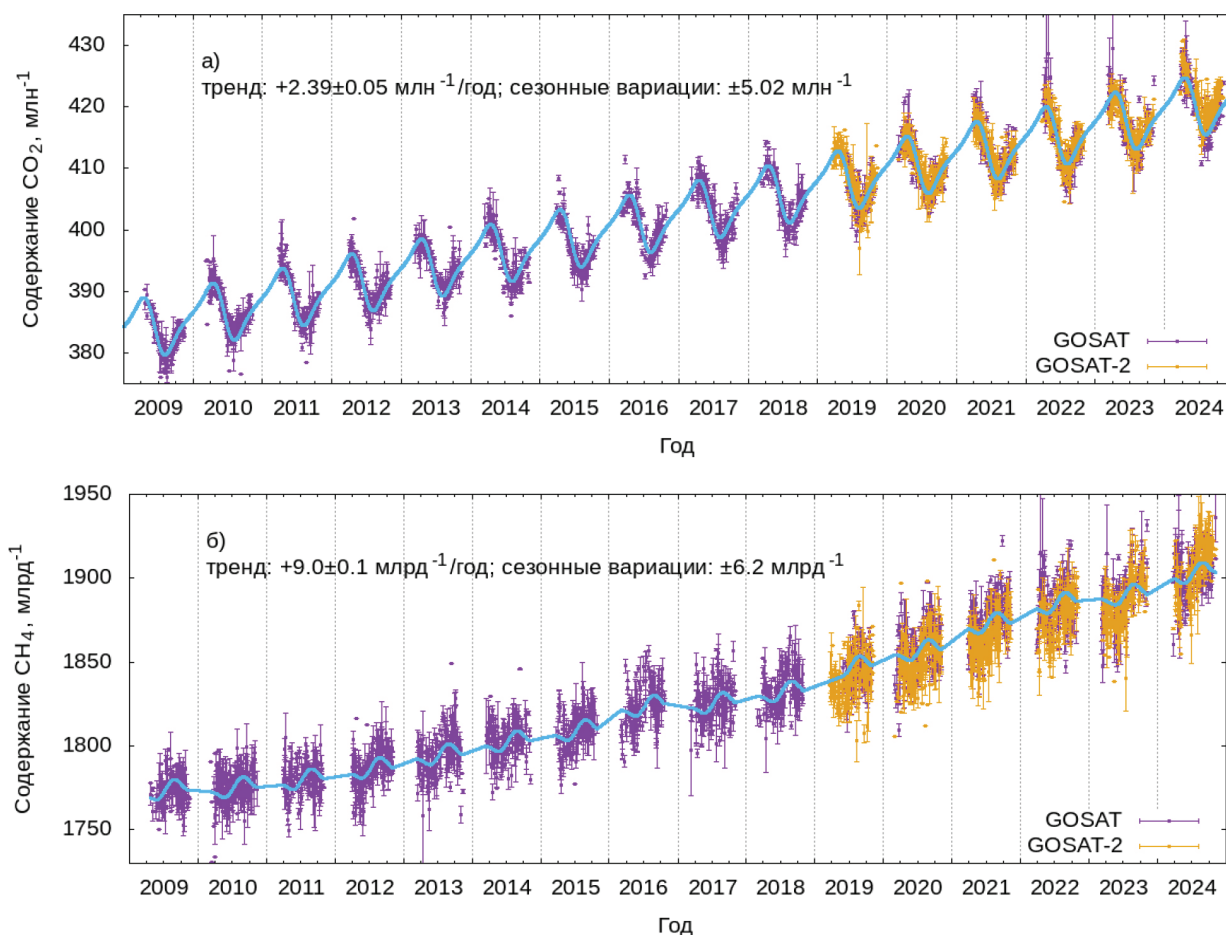


Рис. 1. Годовой ход и межгодовая изменчивость XCO₂ (а) и XCH₄ (б) для атмосферы юга Западной Сибири в 2009–2024 гг. по данным платформ GOSAT и GOSAT-2

Отметим, что на фоне общего тренда в данных XCH₄ установлена выраженная межгодовая изменчивость, которая, по-видимому, связана с климатическими аномалиями и вариациями в балансе источников и стоков. К таким аномалиям, например, относятся годы с экстремальными пожарами в Сибири (такие как 2012, 2019, 2021 гг.) или аномально теплыми и влажными условиями, способствующими повышенной эмиссии метана из болот [17], которые проявляются в наблюдениях GOSAT как положительные аномалии, приводящие к заметным отклонениям от линейного тренда. Подобная чувствительность регионального CH₄ к климатиче-

ским драйверам согласуется с выводами независимых исследований, подчеркивающих роль температуры и осадков в контроле эмиссии метана из бореальных водно-болотных угодий [3, 17].

Анализ среднесезонного цикла выявил четкие и противоположные по фазе паттерны для XCO₂ и XCH₄ (см. рис. 1). Для XCO₂ наблюдается ярко выраженный максимум в конце зимы — начале весны (март-апрель), который объясняется минимальной активностью биоты в холодный период при продолжающейся дыхательной активности почв и разложению органического вещества (гетеротрофное дыхание). Минимум концентрации приходится

на конец лета — начало осени (август-сентябрь), что является прямым следствием интенсивного поглощения CO_2 растительностью в процессе фотосинтеза в течение вегетационного сезона. Форма и амплитуда ($\sim 12\text{--}15$ млн $^{-1}$) этого цикла типичны для бореальных и умеренных экосистем Северного полушария и в первую очередь контролируются сезонной динамикой чистого экосистемного обмена.

Сезонный цикл XCH_4 имеет принципиально иной характер поведения, определяемый микробными процессами в анаэробных средах. Минимум наблюдается в конце весны (апрель-май). Это связано с тем, что основные природные источники метана в регионе (болота, затопленные территории) в этот период еще неактивны из-за низких температур и наличия ледового покрова, в то время как фотохимический сток метана, обусловленный реакцией с гидроксильным радикалом (ОН), достигает своего сезонного максимума в конце весны — начале лета. Максимум концентрации приходится на вторую половину лета (август-

сентябрь), когда температурные условия и уровень вод насыщения почвы способствуют метаногенезу, а интенсивность химического стока снижается. Отмеченный в некоторых работах зимний максимум (январь-февраль) (см., например [18]), связанный с низким стоком и накоплением газа, не отслеживается ввиду отсутствия наблюдений GOSAT/GOSAT-2 для этого периода.

Данные по XCO_2 , полученные с GOSAT и GOSAT-2, демонстрируют высокую согласованность с измерениями OCO-2 как по величине тренда, так и по форме сезонного цикла. Диаграмма рассеяния для пространственно-временных колокаций показана на рисунке 2а. Статистический анализ демонстрирует отличное согласие с $R^2=0.95$ и среднеквадратичным отклонением 1.7 млн $^{-1}$. Систематическое смещение между наборами данных незначительно и равно 0.69 млн, что находится в пределах заявленной точности обоих спутниковых продуктов.

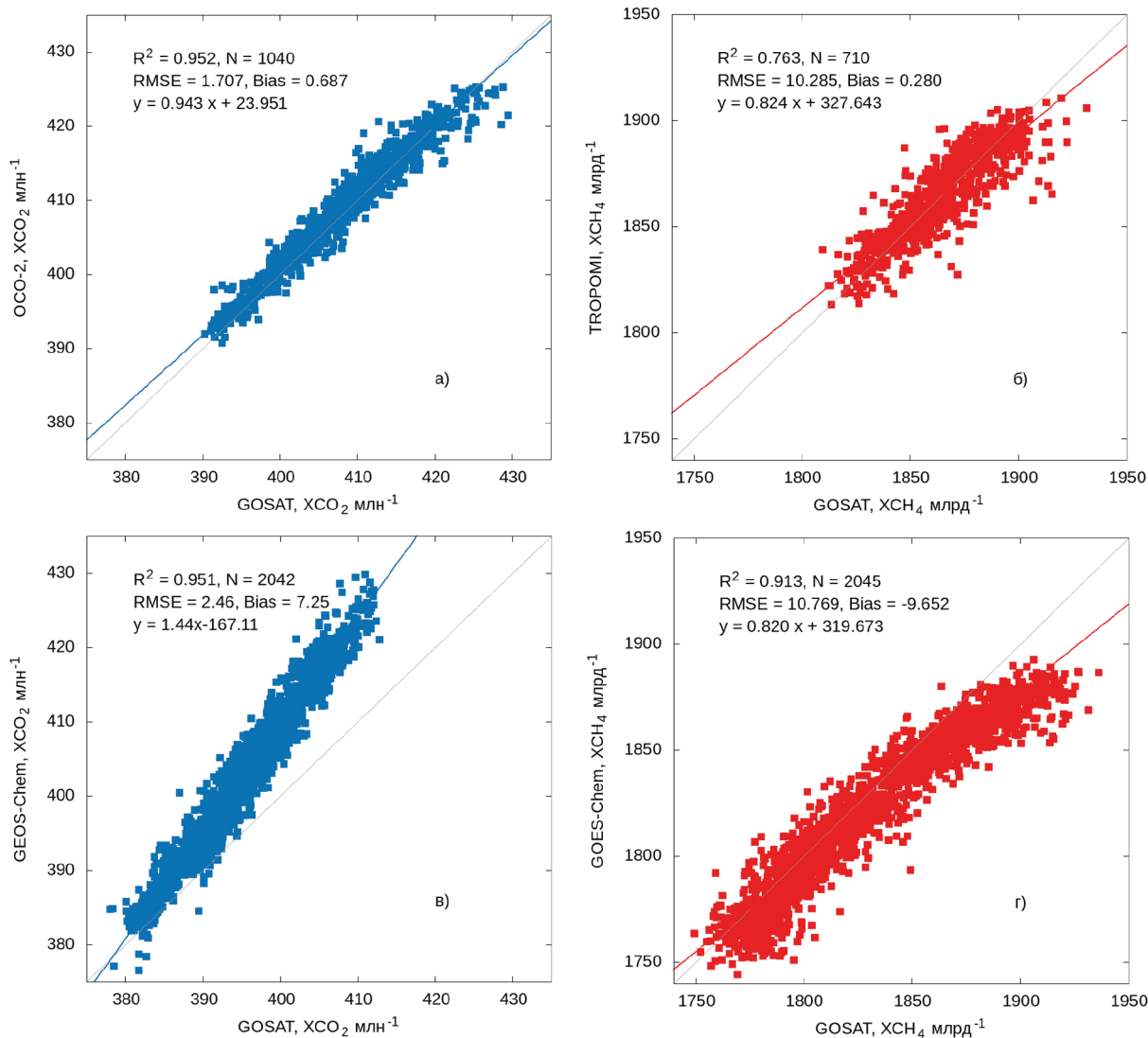


Рис. 2. Диаграммы рассеяния XCO_2 и XCH_4 , полученные по данным: а) OCO-2, б) TROPOMI, в и г) GEOS-Chem

Аналогично, данные по XCH₄ хорошо согласуются с метановым продуктом TROPOMI. Высокое пространственное разрешение TROPOMI позволяет подтвердить, что крупномасштабные особенности распределения XCH₄, фиксируемые GOSAT и GOSAT-2, являются достоверными. Как показано на рисунке 26, корреляция также высока: R²=0.76, RMSE=10 млрд⁻¹ и смещение между данными составляет 0.28 млрд⁻¹.

Сопоставление спутниковых данных с результатами моделирования химической транспортной модели GEOS-Chem (период 2010–2024 г.) показало, что модель в целом адекватно воспроизводит наблюдаемые долгосрочные тренды и общую форму сезонности для обоих газов. Диаграммы рассеяния и статистические метрики приведены на рисунках 2в и 2г. Для XCO₂ наблюдается хорошее согласие (R²=0.95, RMSE=2.5 млн⁻¹), что указывает на удовлетворительное описание моделью основных процессов, контролирующих баланс углекислого газа в регионе (фотосинтез, дыхание, перенос). Однако смоделированный тренд роста XCO₂ превышает наблюдаемый. Это расхождение может указывать на недооценку поглощения (стока) экосистемами, ошибки в химической схеме (например, в скорости фотохимических реакций) или на неточности в инвентаризациях антропогенных и природных источников эмиссии, используемых в модели.

Для XCH₄ согласие несколько ниже (R²=0.91, RMSE=10 млрд⁻¹). Наблюдаемые расхождения, особенно в амплитуде сезонного цикла и абсолютных значениях в летний период, могут указывать на возможные неопределенности в параметризации биогенных источников метана (например, эмиссии из болот)

и/или в полях гидроксильного радикала (ОН), определяющего химический сток CH₄.

Заключение

На основе согласованного ряда данных спутников GOSAT и GOSAT-2 для периода 2009–2024 г. получены количественные оценки изменения концентраций парниковых газов в атмосфере юга Западной Сибири. Установлено, что скорость роста XCH₄ составляет 9.0 млрд⁻¹/год, а XCO₂ — 2.39 млн⁻¹/год, что согласуется с глобальными фоновыми значениями и подтверждает репрезентативность спутниковых данных для региона. Межгодовая изменчивость XCH₄, по-видимому, связана с климатическими аномалиями.

Максимум XCO₂ в конце зимы обусловлен доминированием эмиссии при минимальном фотосинтезе, а летний минимум — активным поглощением растительностью. Цикл CH₄ контролируется в основном температурно-зависимой эмиссией из водно-болотных угодий с максимумом в конце лета и минимумом весной. Зимний максимум XCH₄ не наблюдается в силу отсутствия корректных данных для этого периода.

Высокая степень согласия с независимыми спутниковыми продуктами (OCO-2 для XCO₂ и TROPOMI для XCH₄) подтверждает достоверность полученных результатов и корректность методов калибровки данных GOSAT и GOSAT-2. Модель GEOS-Chem в целом воспроизводит наблюдаемые тренды и сезонность, однако расхождения в амплитуде цикла XCH₄ указывают на возможные неточности в параметризации биогенных источников или полей концентрации гидроксильного радикала (ОН), отвечающего за химический сток CH₄.

Библиографический список

1. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., et al. Global Carbon Budget 2021 // *Earth System Science Data*. 2022. Vol. 14. P. 1917–2005. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>
2. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., et al. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 2021. P. 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
3. Bohn T.J., Melton J.R., Ito A., et al. WETCHIMP-WSL: Intercomparison of Wetland Methane Emissions Models over West Siberia // *Biogeosciences*. 2015. Vol. 12. P. 3321–3349. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3321-201500000000000000>
4. Yokota T., Yoshida Y., Eguchi N., et al. Global Concentrations of CO₂ and CH₄ Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results // *SOLA*. 2009. Vol. 5. P. 160–163. <https://doi.org/10.2151/sola.2009-041>
5. Imasu R., Matsunaga T., Nakajima M., et al. Greenhouse Gases Observing SATellite 2 (GOSAT-2): Mission Overview // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2023. Vol. 10. No 1. <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00562-2>
6. Butz A., Galli A., Hasekamp O., et al. TROPOMI aboard Sentinel-5 CH₄ Retrievals for Aerosol and Precursor: Prospective Performance of Cirrus Loaded Atmospheres // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 267–276.
7. Frankenberg C., Pollock R., Lee R.A.M., et al. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): Spectrometer Performance Evaluation Using Pre-launch Direct Sun Measurements // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2015. Vol. 8. No 1. P. 301–313. <https://doi.org/10.5194/amt-8-301-2015>
8. GOSAT Project // GOSAT Data Archive Service (GDAS). URL: <https://data2.gosat.nies.go.jp> (дата обращения: 01.12.2025).

9. GOSAT-2 Project // GOSAT-2 Product Archive. [URL: <https://prdct.gosat-2.nies.go.jp> (дата обращения: 01.12.2025)].
10. GOSAT-2 TANSO-FTS-2 SWIR L2 Column-averaged Dry-air Mole Fraction Product: Product File Format Descriptions (Ver. 04, Vol. 5). National Institute for Environmental Studies (NIES). Tsukuba: NIES, 2025. 14 p.
11. Jacobs N., Simpson W.R., Graham K.A., et al. Spatial Distributions of XCO₂ Seasonal Cycle Amplitude and Phase over Northern High-latitude Regions // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. Vol. 21. No 22. P. 16661–16687. <https://doi.org/10.5194/acp-21-16661-2021>
12. Bey I., Jacob D.J., Yantosca R.M., et al. Global Modeling of Tropospheric Chemistry with Assimilated Meteorology: Model Description and Evaluation // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2001. Vol. 106. No D19. P. 23073–23095. <https://doi.org/10.1029/2001JD000807>
13. Bukosa B., Fisher J.A., Deutscher N.M., Jones D.B.A. A Coupled CH₄, CO and CO₂ Simulation for Improved Chemical Source Modeling // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. No 5. Article 764. <https://doi.org/10.3390/atmos14050764>
14. Kataoka F., Crisp D., Taylor T.E., et al. The Cross-Calibration of Spectral Radiances and Cross-Validation of CO₂ Estimates from GOSAT and OCO-2 // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. No 11. Article 1158. DOI:10.3390/rs9111158
15. Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J. Trends in Globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ Determined from NOAA Global Monitoring Laboratory Measurements [Data set]. NOAA Global Monitoring Laboratory. Version 2025-12. 2025. <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>
16. Lan X., Tans P., Thoning K., et al. NOAA Greenhouse Gas Marine Boundary Layer Reference [Data set]. NOAA Global Monitoring Laboratory. 2025. <https://doi.org/10.15138/DVNP-F961>
17. Lagutin A.A., Volkov N.V., Mordvin E.Yu. Methane Emission from the Western Siberia's Wetland Ecosystems in 2000–2050 // *Acta Biologica Sibirica*. 2024. Vol. 10. P. 171–188. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10920669>
18. Lagutin A.A., Mordvin E.Y., Volkov N.V. Regression Model for Reconstruction of the Total Methane Content According to the Data from AIRS Hyperspectrometer and Chemical Transport Model MOZART-4 // *Proceedings of SPIE*. 2023. Vol. 12780 (29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics). Article 1278062. <https://doi.org/10.1117/12.2690784>

References

1. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., et al. Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science Data*. 2022. Vol. 14. P. 1917–2005. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>
2. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., et al. *IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 2021. P. 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
3. Bohn T.J., Melton J.R., Ito A., et al. WETCHIMP-WSL: Intercomparison of Wetland Methane Emissions Models over West Siberia. *Biogeosciences*. 2015. Vol. 12. P. 3321–3349. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3321-2015>
4. Yokota T., Yoshida Y., Eguchi N., et al. Global Concentrations of CO₂ and CH₄ Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results. *SOLA*. 2009. Vol. 5. P. 160–163. <https://doi.org/10.2151/sola.2009-041>
5. Imasu R., Matsunaga T., Nakajima M., et al. Greenhouse Gases Observing SATellite 2 (GOSAT-2): Mission Overview. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2023. Vol. 10, No. 1. <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00562-2>
6. Butz A., Galli A., Hasekamp O., et al. TROPOMI Aboard Sentinel-5 CH₄ Retrievals for Aerosol and Precursor: Prospective Performance of Cirrus Loaded Atmospheres. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 267–276.
7. Frankenberg C., Pollock R., Lee R.A.M., et al. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): Spectrometer Performance Evaluation Using Pre-Launch Direct Sun Measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2015. Vol. 8. No 1. P. 301–313. <https://doi.org/10.5194/amt-8-301-2015>
8. GOSAT Project. *GOSAT Data Archive Service (GDAS)*. URL: <https://data2.gosat.nies.go.jp> (accessed: 01.12.2025).
9. GOSAT-2 Project. *GOSAT-2 Product Archive*. URL: <https://prdct.gosat-2.nies.go.jp> (accessed: 01.12.2025).
10. GOSAT-2 TANSO-FTS-2 SWIR L2 Column-Averaged Dry-Air Mole Fraction Product: Product File Format Descriptions (Ver. 04, Vol. 5). National Institute for Environmental Studies (NIES). Tsukuba : NIES, 2025. 14 p.
11. Jacobs N., Simpson W.R., Graham K.A., et al. Spatial Distributions of XCO₂ Seasonal Cycle Amplitude and Phase over Northern High-Latitude Regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. Vol. 21. No 22. P. 16661–16687. <https://doi.org/10.5194/acp-21-16661-2021>
12. Bey I., Jacob D.J., Yantosca R.M., et al. Global Modeling of Tropospheric Chemistry with Assimilated Meteorology: Model Description and Evaluation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2001. Vol. 106. No D19. P. 23073–23095. <https://doi.org/10.1029/2001JD000807>
13. Bukosa B., Fisher J.A., Deutscher N.M., Jones D.B.A. A Coupled CH₄, CO and CO₂ Simulation for Improved Chemical Source Modeling. *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. No 5. Article 764. <https://doi.org/10.3390/atmos14050764>
14. Kataoka F., Crisp D., Taylor T.E., et al. The Cross-Calibration of Spectral Radiances and Cross-Validation of CO₂ Estimates from GOSAT and OCO-2. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. No 11. Article 1158. <https://doi.org/10.3390/rs9111158>
15. Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J. *Trends in Globally-Averaged CH₄, N₂O, and SF₆ Determined from NOAA Global Monitoring Laboratory Measurements [Data set]*. NOAA

Global Monitoring Laboratory. Version 2025-12. 2025. <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>

16. Lan X., Tans P., Thoning K., et al. *NOAA Greenhouse Gas Marine Boundary Layer Reference [Data set]*. NOAA Global Monitoring Laboratory. 2025. <https://doi.org/10.15138/DVNP-F961>

17. Lagutin A.A., Volkov N.V., Mordvin E.Yu. Methane Emission from the Western Siberia's Wetland Ecosystems

in 2000–2050. *Acta Biologica Sibirica*. 2024. Vol. 10. P. 171–188. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10920669>

18. Lagutin A.A., Mordvin E.Y., Volkov N.V. Regression Model for Reconstruction of the Total Methane Content According to the Data from AIRS Hyperspectrometer and Chemical Transport Model MOZART-4. *Proceedings of SPIE*. 2023. Vol. 12780 (29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics). Article 1278062. <https://doi.org/10.1117/12.2690784>

Информация об авторах

Е.Ю. Мордвин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики и теоретической физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

Д.С. Сергиенко, студент Института цифровых технологий электроники и физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

А.А. Лагутин, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и теоретической физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия.

Information about the authors

E.Yu. Mordvin, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Radiophysics and Theoretical Physics Department, Altai State University, Barnaul, Russia;

D.S. Sergienko, Undergraduate Student of Institute of Digital Technologies, Electronics and Physics, Altai State University, Barnaul, Russia;

A.A. Lagutin, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Radiophysics and Theoretical Physics Department, Altai State University, Barnaul, Russia.