

Космический мониторинг парниковых газов в Западной Сибири: технологии и первые результаты

А. А. Лагутин^{1,*}, Е. Ю. Мордвин^{1,2}, Н. В. Волков¹, В. В. Синицин¹

¹Алтайский государственный университет, 656049, Барнаул, Россия

²Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
630090, Новосибирск, Россия

*Контактный автор: Лагутин Анатолий Алексеевич, e-mail: lagutin@theory.asu.ru

Поступила 04 декабря 2023 г., доработана 23 января 2024 г., принята в печать 07 февраля 2024 г.

Представлен обзор созданных в Алтайском государственном университете технологий мониторинга парниковых газов в атмосфере Западной Сибири. Полное содержание метана в атмосфере региона восстановлено с использованием регрессионной модели, обученной на данных гиперспектрального комплекса AIRS/AMSU-ATMS спутников Aqua и NOAA и результатах модифицированной авторами химической транспортной модели MOZART-4. Для получения оценок полного содержания углекислого газа в атмосфере региона использованы данные орбитальных углеродных обсерваторий OCO-2 и OCO-3. Количественные оценки содержания диоксида азота получены по данным спектрорадиометра TROPOMI спутника Sentinel-5 Precursor. Предложена технология получения оценок эмиссии углекислого газа крупными промышленными центрами региона. Обсуждаются первые результаты оценок валовой и чистой первичной продукции для территории региона по данным орбитальных углеродных обсерваторий и радиометра ECOSTRESS.

Ключевые слова: атмосфера Западной Сибири, парниковые газы, гиперспектрометр AIRS/Aqua, радиометры TROPOMI/Sentinel-5P и ECOSTRESS, орбитальные углеродные обсерватории, транспортная химическая модель MOZART-4.

Цитирование: Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю., Волков Н.В., Синицин В.В. Космический мониторинг парниковых газов в Западной Сибири. Вычислительные технологии. 2024; 29(5):72–99. DOI:10.25743/ICT.2024.29.5.007.

Введение

Углекислый газ (диоксид углерода, двуокись углерода, CO₂) и метан (CH₄) являются двумя основными углеродсодержащими парниковыми газами в атмосфере Земли [1, 2], в отличие от водяного пара, основного парникового газа, чей антропогенный вклад в глобальное потепление незначителен, антропогенный вклад CO₂ и CH₄ в радиационный форсинг и связанный с ним температурный режим приземного слоя воздуха весьма существенный. Ежегодный индекс парниковых газов (annual greenhouse gas index — AGGI) Национального управления океанических и атмосферных исследований США (national oceanic and atmospheric administration — NOAA) показывает, что с начала 1990-х гг. вклад в радиационный форсинг этих двух долгоживущих газов увеличился на 49 %, достигнув в 2022 г. суммарного уровня порядка 78 % [3]. Диоксид азота (оксид азота IV, двуокись азота, NO₂), входящий в группу азотсодержащих га-

зов NO_x ($\text{NO}_x \equiv \text{NO} + \text{NO}_2$), формально не является парниковым газом и не включен в “Перечень парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учет выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов”, утвержденный Правительством Российской Федерации. Однако этот газ, имеющий в основном антропогенное происхождение, оказывает существенное влияние на химию атмосферы, образование озона, механизмы образования твердых частиц и скорость атмосферного окисления [4, 5]. Диоксид азота выделяется в результате сжигания ископаемого топлива, в процессе деятельности почвенных микробов, в зонах молниевых разрядов. Удаляется NO_2 в результате реакции в атмосфере с гидроксильной группой OH . Диоксид азота является важным маркером источников антропогенной эмиссии CO_2 и CH_4 .

Результаты наземной, судовой и самолетной диагностики, полученные сетью пунктов мониторинга Глобальной службы атмосферы (Global atmosphere watch), получившей в последние два десятилетия значительное расширение (расположение пунктов мониторинга см., например, в [6]), а также результаты исследований содержания в атмосфере Земли CO_2 и CH_4 , полученные с использованием нового поколения спутниковых приборов, привели к осознанию необходимости пересмотра существующих подходов по принятию политических и экономических решений, направленных на регулирование углеродного бюджета как на уровне отдельных государств, так и на международном уровне. Необходимость пересмотра подходов по принятию решений по парниковым газам на уровне правительств и межправительственном уровне обусловлена низкой эффективностью существующих механизмов. В качестве подтверждения этих выводов служат данные, публикуемые в ежегодном бюллетене Всемирной метеорологической организации (ВМО). В последнем бюллетене, вышедшем в ноябре 2023 г. [6], в очередной раз отмечены продолжающаяся тенденция роста содержания парниковых газов и ежегодные обновления рекордных оценок их концентраций и темпов роста этих концентраций. В частности, в [6] указывается, что скорость увеличения содержания CO_2 в атмосфере в период с 2021 по 2022 г. превысила средние темпы роста, наблюдавшиеся за последние десять лет, на $2.46 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$, для метана скорость роста в этот период составила $10.2 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$. В 2022 г. впервые содержание CO_2 на 50 % превысило доиндустриальный уровень 1750 г. По содержанию метана в 2022 г. установлен самый большой скачок в годовом исчислении с момента начала инструментальных наблюдений, составивший 16 млрд^{-1} .

Успешный опыт ВМО по координации исследований в области прогнозирования погоды и мониторинга климата, полученный за последние 60 лет в рамках двух крупнейших научных проектов — Всемирной службы погоды (World weather watch) и Глобальной службы атмосферы, — стимулировал создание Глобальной службы по надзору за парниковыми газами (Global greenhouse gas watch — GGGW) [7, 8]. Решение о создании GGGW было принято на 19-м Всемирном метеорологическом конгрессе 24 мая 2023 г. Эту инициативу поддержали все 193 страны — члены ВМО.

По замыслу ВМО, основные направления деятельности новой службы будут связаны с интеграцией данных и результатов исследований, поставляемых космическими и наземными системами мониторинга, а также ведущими исследовательскими центрами моделирования и ассимиляции данных [8]. Такой подход, известный как “нисходящий мониторинг” или “top-down”, позволит устранить информационные пробелы для территорий с низким развитием инфраструктуры наблюдений, прежде всего в развивающихся странах, снизить имеющиеся неопределенности в оценках эмиссии газов, которые, по оценкам проекта Global carbon project (GCP), только для CO_2 в сфере землепользова-

ния составляют около 45 %, а также уточнить оценки объемов естественных стоков газов, неопределенность которых для CO_2 составляет 25 % [1].

Системы космического мониторинга, как один из основных объектов инфраструктуры GGGW, будут являться важнейшим источником информации не только для устранения неопределенностей в оценках потоков и стоков газов, но и для достижения ключевой цели проекта GGGW — обеспечения к 2030 г. глобального покрытия территории Земли с пространственным разрешением 1 км [6]. В контексте работ по полноценному осуществлению плана GGGW важную роль будут играть данные региональных центров космического мониторинга по содержанию парниковых газов в атмосфере отдельных регионов.

Целью работы является обсуждение технологий мониторинга парниковых газов в атмосфере Западной Сибири, созданных в Алтайском государственном университете, а также представление предварительных результатов по получению количественных оценок эмиссии углекислого газа крупными промышленными центрами региона и оценок валовой и чистой первичной продукции — ключевых показателей углеродного бюджета региона.

1. Спутниковый мониторинг парниковых газов

Первые регулярные наземные измерения концентрации атмосферного углекислого газа были начаты в конце 1950-х гг. в обсерватории Мауна-Лоа (Гавайи, США) [9]. Измерения этой обсерватории, продолжающиеся до настоящего времени, образуют самый длинный временной ряд данных по концентрации CO_2 в атмосфере. Наблюдения Мауна-Лоа впервые позволили подтвердить антропогенный вклад в рост концентрации CO_2 .

Регулярные наземные глобальные мониторинговые измерения метана были начаты в конце 1970-х гг. [10]. Главным результатом проведенных исследований стал вывод о почти экспоненциальном росте содержания метана в период с 1850 по 1978 г., который сегодня связывают с началом в 1750 г. индустриальной эры.

Существенный прогресс в исследованиях содержания парниковых газов на глобальном уровне был достигнут с началом эры спутникового мониторинга. В конце 1990-х — начале 2000-х гг. Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США (National aeronautics and space administration — NASA) в рамках программы “Система наблюдения за Землей” (Earth observing system — EOS) запустило на орбиту Земли новое поколение спутников Terra [11] и Aqua [12]. Центральным прибором обеих спутниковых платформ, данные которого уже более 20 лет используются для восстановления геофизических параметров атмосферы и подстилающей поверхности Земли, является 36-канальный спектрорадиометр MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) [13–15]. Результаты миссии MODIS, покрывающие временной период почти в 25 лет, привели к пересмотру многих классических концепций и теорий о строении и динамике “системы Земля”, а также стимулировали разработку и запуск новых исследовательских миссий.

Другим важным прибором, данные которого используются для восстановления отношения смеси метана в верхней тропосфере, является гиперспектральный ИК-зондировщик AIRS (atmospheric infrared sounder) [16, 17] на борту спутника Aqua. До выхода из строя в 2016 г. микроволнового зондировщика AMSU-A (advanced microwave sounding unit), также установленного на борту Aqua, оба прибора работали в комплексе, поз-

воляя восстанавливать вертикальные профили температуры и влажности атмосферы при 80 %-ном покрытии области наблюдения облаками. В нашей работе [18] предложен подход для восстановления “всепогодного” режима работы AIRS с использованием данных другого СВЧ-радиометра ATMS (advanced technology microwave sounder) [19], установленного на спутниках Suomi-NPP, NOAA-20 и NOAA-21, входящих в программу NASA метеорологических полярно-орбитальных спутников (joint polar satellite system — JPSS) [20]. В работе [18] показано, что включение в алгоритмы обработки данных ATMS позволяет получать геофизические результаты, практически совпадающие с оригинальными данными AIRS/AMSU, и тем самым продолжить получение уникального более чем 20-летнего ряда гиперспектральных спутниковых данных для проведения климатических исследований и анализа газового состава атмосферы. Наконец, отметим, что еще одним ключевым прибором программы JPSS, данные которого используются в задачах установления пространственного распределения источников парниковых газов, а также для получения оценок эмиссии в этих источниках (см., например, наши работы [21, 22]), является 22-канальный радиометр VIIRS (visible infrared imaging radiometer suite) [23].

Программа глобального спутникового мониторинга содержания в атмосфере метана получила развитие в 2002 г. после запуска спутника ENVISAT (environmental satellite) Европейского космического агентства (European space agency — ESA) со спектрорадиометром SCIAMACHY (scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography) на борту [24]. Несмотря на сравнительно низкое пространственное разрешение 30×60 км, данные SCIAMACHY в совокупности с результатами наземных наблюдений позволили повысить точность оценок эмиссии метана в ряде регионов. Исследования, проведенные в последнюю декаду (см., например, [25]), подтвердили вывод о необходимости включения спутниковых мониторинговых данных для установления структуры источников CH_4 .

В 2009 г. Японское аэрокосмическое агентство (Japan aerospace exploration agency — JAXA) запустило первый из программы спутник GOSAT (greenhouse gases observing satellite) [26], который стал первым специализированным прибором, позволившим получать данные по полному содержанию CO_2 и CH_4 на регулярной основе. В октябре 2018 г. JAXA был запущен второй спутник программы GOSAT-2.

Дальнейшее развитие в решении проблемы получения количественных оценок эмиссии метана, диоксида азота и CO природными и антропогенными источниками достигнуто после запуска ESA в октябре 2017 г. спутника Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) со спектрорадиометром TROPOMI (tropospheric monitoring instrument) на борту [27]. Главной задачей миссии TROPOMI/Sentinel-5P является продолжение после завершения проекта SCIAMACHY мониторинговых наблюдений содержания парниковых газов в атмосфере Земли по уходящему потоку излучения в ближнем ИК-диапазоне.

В июле 2014 г. агентством NASA запущена первая специализированная орбитальная углеродная обсерватория OCO-2 (orbiting carbon observatory) [28, 29], а в мае 2019 г. на борту Международной космической станции (МКС) была размещена обсерватория OCO-3 [30].

Отметим, что на борту МКС с июля 2018 г. работает радиометр ECOSTRESS (ecosystem spaceborne thermal radiometer experiment on space station) [31], главная задача которого — мониторинг экстремальных природных явлений, таких как засухи. Спектральные каналы этой обсерватории по данным о потоках скрытой теплоты позволяют получать продукты обработки, такие как эвапотранспирация (evapotranspiration — ET) и индекс эффективности использования воды (water use efficiency — WUE).

Специализированные углеродные обсерватории OCO-2, OCO-3, ECOSTRESS, а также радиометр TROPOMI превосходят возможности предыдущих космических миссий и позволяют достичь существенно большего прогресса в понимании глобального углеродного цикла и установлении глобального углеродного бюджета. Высокое пространственное разрешение и спектральные характеристики каналов этих приборов позволяют проводить мониторинг жизненного цикла наземной растительности, включая процессы фотосинтеза, тепло- и влагообмена. Уникальные продукты, такие как “флуоресцентное излучение хлорофилла, индуцированное солнечным светом” (solar-induced chlorophyll fluorescence — SIF) [32–34], эвапотранспирация, индекс эффективности использования воды [31, 35] и др., позволяют получать оценки ключевых показателей углеродного бюджета — валовой первичной продукции (gross primary production — GPP) и чистой первичной продукции (net primary production — NPP). Показатель GPP определяется по количеству углерода, усвоенного за конкретный период наземной растительностью в единицу времени в процессе фотосинтетического восстановления CO₂ до органических соединений. Показатель NPP позволяет получать более точные оценки углеродного бюджета, так как эта величина определяет количество переработанного растительностью углерода, а также позволяет оценить долю углерода, выделившегося растением обратно в атмосферу вместе с водяным паром в процессе дыхания. Сегодня спутниковое дистанционное зондирование является основным методом для оценки GPP и NPP на различных пространственных и временных масштабах [32–34].

2. Содержание метана в атмосфере Западной Сибири

В этом разделе представлены результаты многолетних исследований динамики поведения метана в атмосфере Западной Сибири в 2002–2022 гг., полученные в центре космического мониторинга АлтГУ. Необходимость регулярных мониторинговых исследований в рассматриваемой зоне обусловлена присутствием в Сибирском регионе крупнейших болотных комплексов, а также высокой интенсивностью деятельности объектов нефтегазового комплекса России. Информационной основой проводимых исследований являются данные гиперспектрометра AIRS [16, 17] спутника Aqua [12], а также результаты глобальной химической транспортной модели MOZART-4 [36].

Выбор гиперспектрометра AIRS/Aqua в качестве основного прибора, предоставляющего информацию о содержании метана в атмосфере Западной Сибири, обусловлен стабильностью параметров приборов комплекса в течение всего срока работы спутника на орбите (с мая 2002 г.) [37], имеющейся в Алтайском госуниверситете возможностью принимать передаваемый с платформы Aqua весь поток данных и проводить обработку AIRS до уровней 1B и 2 [17], а также двукратным покрытием в сутки рассматриваемой зоны и “всепогодностью” комплекса AIRS-AMSU/Aqua [38]. Всепогодный режим работы комплекса обеспечивался совместным использованием данных гиперспектрометра AIRS и микроволнового зондировщика AMSU-A. В таком подходе восстановление вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы проводилось даже при 80 %-ном покрытии области наблюдения облаками. После выхода из строя в 2016 г. микроволнового зондировщика AMSU-A его измерения были исключены из схемы обработки данных AIRS. Сегодня в NASA используется упрощенная версия алгоритма обработки данных AIRS Only. В нашей работе [18] предложен оригинальный подход для восстановления “всепогодного” режима работы AIRS с использованием данных другого СВЧ-радиометра ATMS [19], установленного на спутниках программы JPSS [20].

В [18] показано, что предложенная технология позволяет получать геофизические результаты, практически совпадающие с оригинальными данными AIRS/AMSU, и тем самым продолжать уникальный более чем 20-летний ряд гиперспектральных спутниковых данных.

Исследования содержания метана в верхней тропосфере с использованием данных AIRS проводятся в двух зонах Западной Сибири, покрывающих большую часть болотных комплексов региона и имеющих следующие координаты границ: зона 1 ($55\text{--}65^\circ$ с. ш., $60\text{--}90^\circ$ в. д.); зона 2 ($45\text{--}55^\circ$ с. ш., $60\text{--}90^\circ$ в. д.).

В исследованиях для решения проблемы низкой чувствительности AIRS к вариациям содержания метана в нижней тропосфере используются данные глобальной транспортной химической модели MOZART-4. В монографии [39] авторами на основании анализа результатов сопоставления спутниковых данных, полученных в верхней тропосфере, в зоне максимальной чувствительности AIRS, с данными наземных наблюдений содержания метана в приземном слое атмосферы впервые предложена технология восстановления полного содержания метана в столбе атмосферы. Главным элементом предложенной технологии является регрессионная модель, полученная в результате машинного обучения на данных AIRS и модифицированной авторами версии модели MOZART-4. Детали модификации обсуждаются в [39].

Последняя версия регрессионной модели, связывающей полное содержание метана в атмосфере $[\text{CH}_4]$ с отношением смеси $\text{CH}_{4\text{AIRS}}$ в области чувствительности AIRS и характеристиками атмосферы и подстилающей поверхности, обсуждается в работе [40].

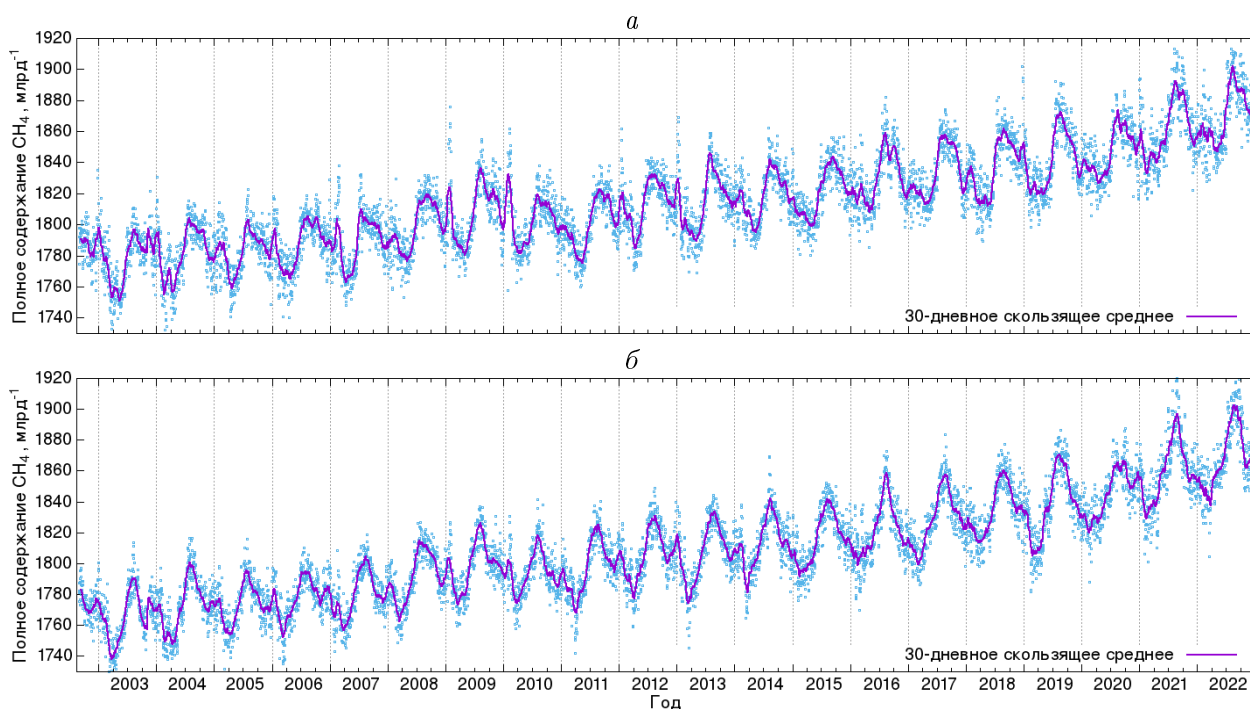


Рис. 1. Годовой ход и межгодовая изменчивость полного содержания метана $[\text{CH}_4]$ в атмосфере Западной Сибири для зоны 1 (а) и для зоны 2 (б). Точки — усредненные по зоне значения содержания метана для каждого прохода спутника, покрывающего данную зону, а линия — 30-дневное скользящее среднее

Fig. 1. Annual variation and interannual variability of the total methane content $[\text{CH}_4]$ in the atmosphere of Western Siberia for zone 1 (a) and for zone 2 (b). The points are zone-averaged methane values for each satellite pass, the line is a 30-day moving average

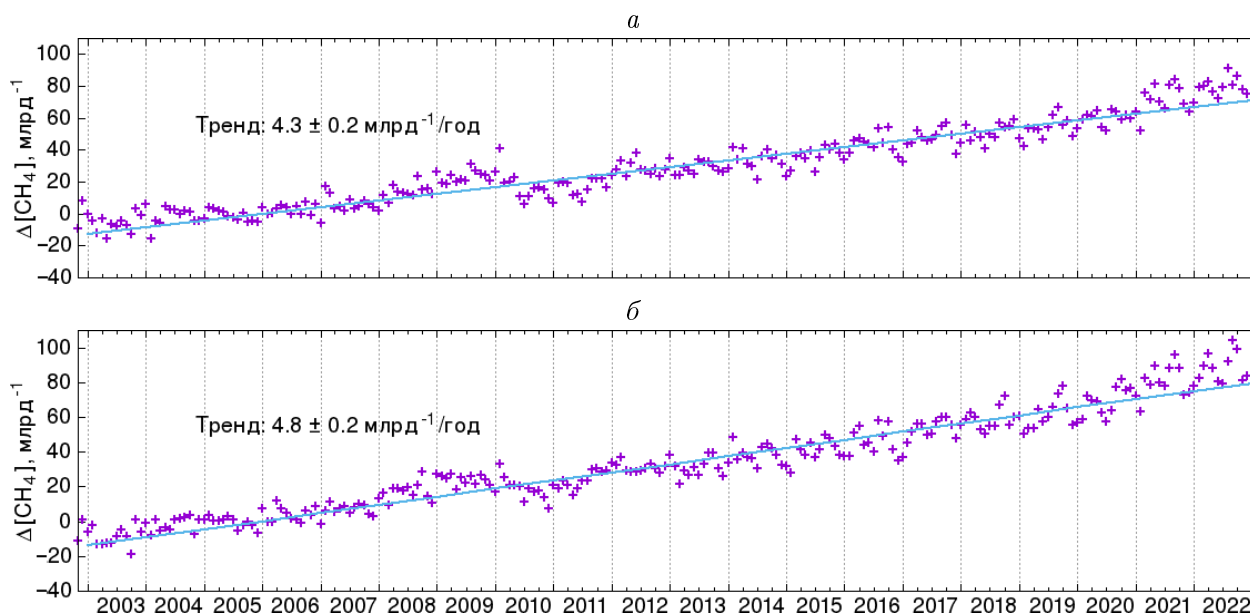


Рис. 2. Аномалии полного содержания метана $\Delta[\text{CH}_4]$ в атмосфере в 2002–2022 гг. для зоны 1 (а) и для зоны 2 (б). Линии — скорости изменения содержания метана (тренды) в соответствующей зоне

Fig. 2. Anomalies of the total methane content $\Delta[\text{CH}_4]$ in the atmosphere in 2002–2023 for zone 1 (a) and for zone 2 (b). The lines shows the rate of change in methane content (trends) within the corresponding zone

На рис. 1 показано поведение полного содержания смеси метана в двух зонах анализа, полученное с использованием созданной авторами регрессионной модели для периода 2002–2022 гг. Аномалии полного содержания метана $\Delta[\text{CH}_4]$ показаны на рис. 2. Данные получены путем вычитания средних многолетних месячных значений из средних месячных данных соответствующего месяца.

Отметим, что подробное описание технологий обработки данных AIRS и восстановления содержания метана в верхней тропосфере приведено в монографии [39]. Результаты верификации созданной модели с использованием данных глобальной сети наземных станций TCCON (total carbon column observing network) [41] показаны в [40].

3. Содержание диоксида азота в тропосфере Западной Сибири

После завершения в 2012 г. миссии SCIAMACHY [24] единственным спутниковым прибором, поставляющим данные о содержании диоксида азота в тропосфере Земли, является спектрорадиометр TROPOMI/Sentinel-5P [27]. В рабочем режиме до 2019 г. сенсор TROPOMI обеспечивал глобальные суточные измерения содержания газов в атмосфере (озона, метана, угарного газа CO, диоксида серы SO_2 , диоксида азота) с разрешением в надире 3.5×7 км. В августе 2019 г. оператору спутника (ESA) удалось повысить разрешение вдоль направления движения спутника с 7 до 5.5 км [42].

Двигаясь по восходящей полярной солнечно-синхронной орбите с временем пересечения экватора $\sim 13:30$ по местному времени, радиометр TROPOMI производит измерения концентраций газовых примесей, а также свойств облаков и аэрозолей в четырех спектральных каналах. Канал в видимом диапазоне 400–496 нм используется для восстановления содержания NO_2 .

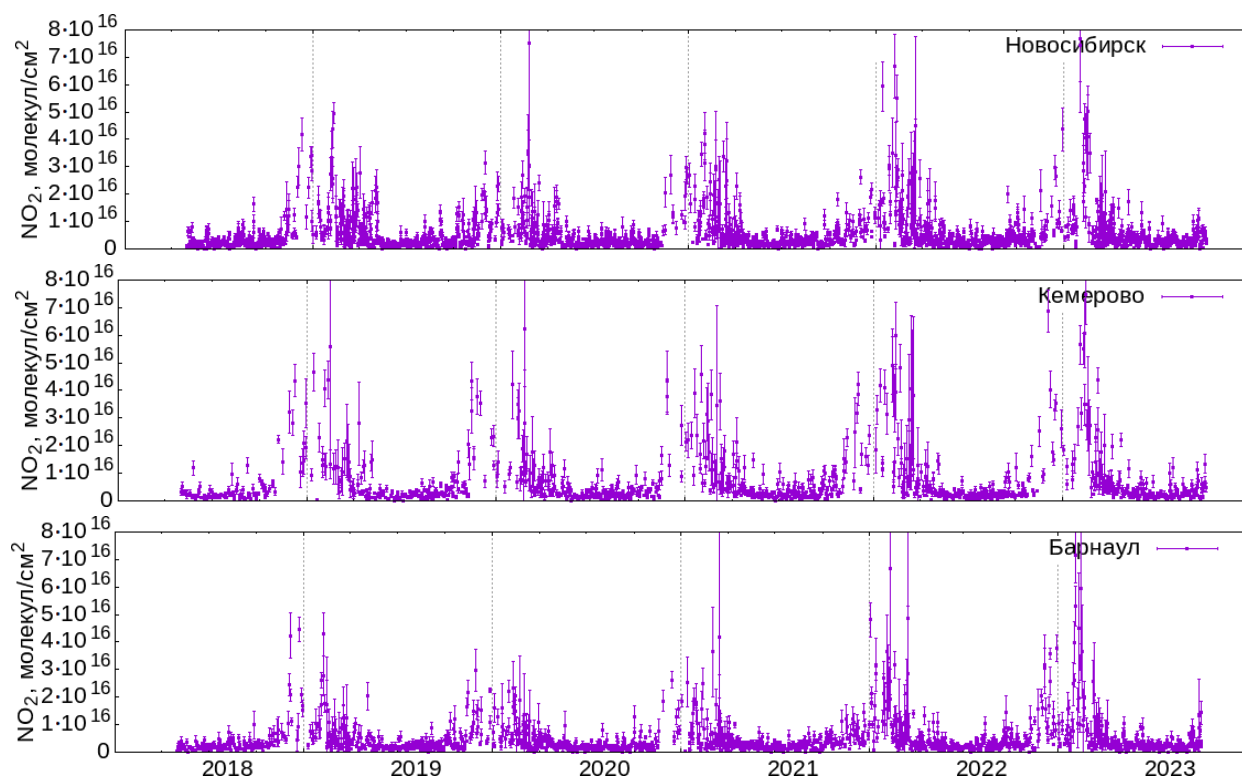


Рис. 3. Годовой ход и межгодовая изменчивость содержания NO_2 в тропосфере Новосибирска, Кемерово и Барнаула для периода 2018–2023 гг. по данным спектрорадиометра TROPOMI/Sentinel-5P

Fig. 3. Annual variation and interannual variability of NO_2 content in the troposphere of Novosibirsk, Kemerovo and Barnaul in 2018–2023 according to the TROPOMI/Sentinel-5P spectroradiometer data

Поскольку NO_2 является короткоживущим газом и имеет в основном антропогенное происхождение (образуется при сжигании ископаемого топлива), данные TROPOMI с высоким пространственным и временным разрешением позволяют получать оценки эмиссии этого газа крупными промышленными центрами региона.

На рис. 3 показаны годовой ход и межгодовая изменчивость содержания NO_2 в тропосфере Новосибирска, Кемерово, Барнаула для периода 2018–2023 гг. Согласно рекомендациям [43] в работе используются данные только для тех пикселей, флаг качества которых имеет значение более 0.75. Видно, что количественные оценки содержания NO_2 в пограничном слое атмосферы этих городов практически совпадают.

Отметим, что превышение концентрации NO_2 в локальных областях по сравнению с фоновыми значениями является маркером эмиссии углекислого газа, образующегося в тех же самых источниках. Этот факт использовался нами для разработки технологии оценок эмиссии CO_2 крупными промышленными центрами Западной Сибири.

4. Содержание углекислого газа по данным углеродных обсерваторий

Для установления характера поведения полного содержания углекислого газа в атмосфере юга Западной Сибири ($48\text{--}53^\circ$ с. ш., $60\text{--}90^\circ$ в. д.) в 2014–2023 гг. в работе используются данные специализированных орбитальных углеродных обсерваторий OCO-2 и OCO-3 [28–30].

Обсерватория ОСО-2 в 2014 г. выведена NASA на солнечно-синхронную орбиту высотой 705 км и временем пересечения экватора на восходящем витке около 13:30 по местному времени. Орбитальный цикл спутника составляет 16 дней. Обсерватория ОСО-2 дополнила группировку спутников A-train. Два спектрометра спутника, регистрирующие уходящее из атмосферы Земли излучение в спектральных каналах с центрами на длинах волн 1.61 и 2.06 мкм, попадают в полосы поглощения углекислого газа [28, 29].

Обсерватория ОСО-3, установленная на японском экспериментальном модуле Кибо на борту МКС, является продолжением программы NASA по изучению глобального углеродного цикла в атмосфере Земли [30]. Конструкция сенсоров ОСО-3 не отличается от ОСО-2 и обеспечивает такую же точность восстановления содержания CO_2 . Существенной особенностью ОСО-3 является ограничение области наблюдения от 52° ю. ш. до 52° с. ш., обусловленное конфигурацией орбиты МКС.

В силу того, что содержание CO_2 в атмосфере Земли имеет сезонный циклический характер, для установления тренда и амплитуды вариаций сезонных значений изменения содержания CO_2 в проведенных исследованиях использовалась эмпирическая модель, предложенная в работе [44], для интерпретации данных спутника GOSAT и верифицированная по результатам измерений глобальной сети наземных станций TCCON [41]. Отметим, что предварительные результаты исследований полного содержания CO_2 в атмосфере региона опубликованы в работах [47, 48].

На рис. 4 показано поведение полного содержания CO_2 в атмосфере юга Западной Сибири ($48\text{--}53^\circ$ с. ш., $60\text{--}90^\circ$ в. д.), полученное по данным орбитальных углеродных обсерваторий ОСО-2 и ОСО-3, загруженным из хранилища NASA ESDS (Earth science data systems) [45, 46]. Анализ данных ОСО-2 проводился для периода 2014–2023 гг., результаты ОСО-3 добавлены в обработку с 2019 г. Линией на рис. 4 показан результат аппроксимации суточных данных ОСО-2 и ОСО-3 эмпирической функцией, предложенной в [44] и используемой нами в работах [47, 48].

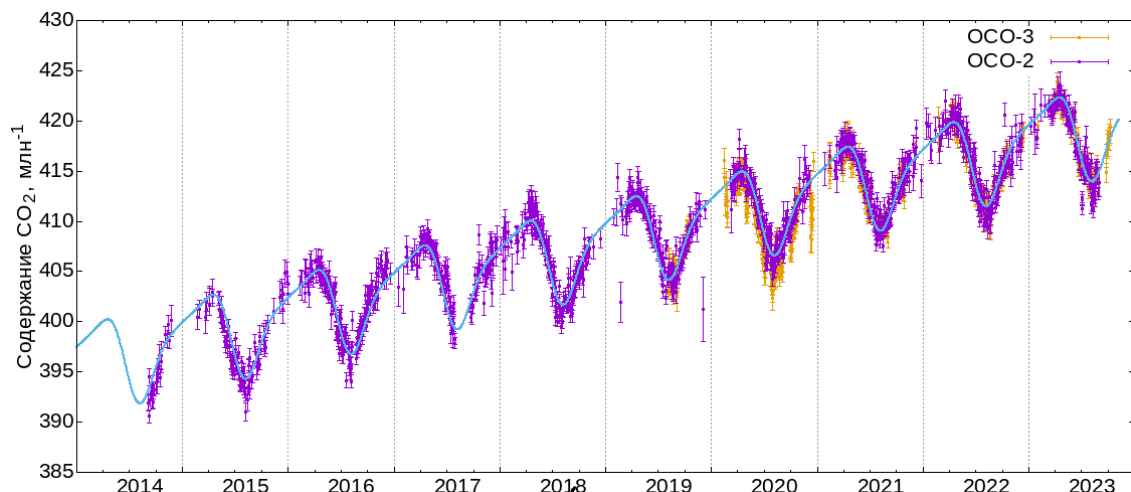


Рис. 4. Годовой ход и межгодовая изменчивость содержания CO_2 в атмосфере юга Западной Сибири ($48\text{--}53^\circ$ с. ш., $60\text{--}90^\circ$ в. д.) в 2014–2023 гг. по данным орбитальных углеродных обсерваторий ОСО-2 и ОСО-3 (точки на графике). Линия — результат аппроксимации данных эмпирической модельной функцией (детали см. в [47, 48])

Fig. 4. Annual cycle and interannual variability of the CO_2 content in the atmosphere of the Western Siberia south ($48\text{--}53^\circ$ N, $60\text{--}90^\circ$ E) according to the orbital carbon observatories OCO-2 and OCO-3 (dots on the graph) in 2014–2023. The blue line is the result of data approximation by the model function (details see in [47, 48])

5. Эмиссия CO_2 крупными промышленными центрами Западной Сибири

В этом разделе обсуждаются результаты разработки технологии получения количественных оценок эмиссии CO_2 крупными промышленными центрами Западной Сибири. Стимулом к разработке технологии послужили результаты работы [50], в которой предложен метод, основанный на совместном анализе данных TROPOMI/Sentinel-5P по содержанию диоксида азота в тропосфере и данных орбитальной углеродной обсерватории OCO-2 по полному содержанию CO_2 в столбе атмосферы.

Подход [50] требует наличия на одну и ту же дату данных измерений обоих спутников. Он был использован нами для получения оценок эмиссии CO_2 предприятиями на территории Западной Сибири. На рис. 5 показана сцена за 29 августа 2020 г. в окрестностях Экибастузской ГРЭС-1, данные для которой анализировались в исследованиях.

Основной этап вычислений при реализации подхода [50] заключается в аппроксимации поперечных относительно направления движения спутника распределений содержания NO_2 и CO_2 , установленных по данным TROPOMI/Sentinel-5P и OCO-2, с использованием вектор-функции Гаусса. Превышение содержания газов в атмосфере крупных промышленных центров приводит к появлению аномалий в поперечных распределениях. Амплитуды максимумов распределений (амплитуды антропогенных аномалий содержания газов ΔNO_2 и ΔXCO_2) и ширина распределения Гаусса на половине высоты (FWHM), установленные в результате аппроксимации, используются для оценки антропогенного потока CO_2 из области источника. Отметим, что в некоторой модификации подход [50] использован в недавней работе [51] для оценок эмиссии NO_2 , CO и CO_2 крупнейшими на планете городскими агломерациями.

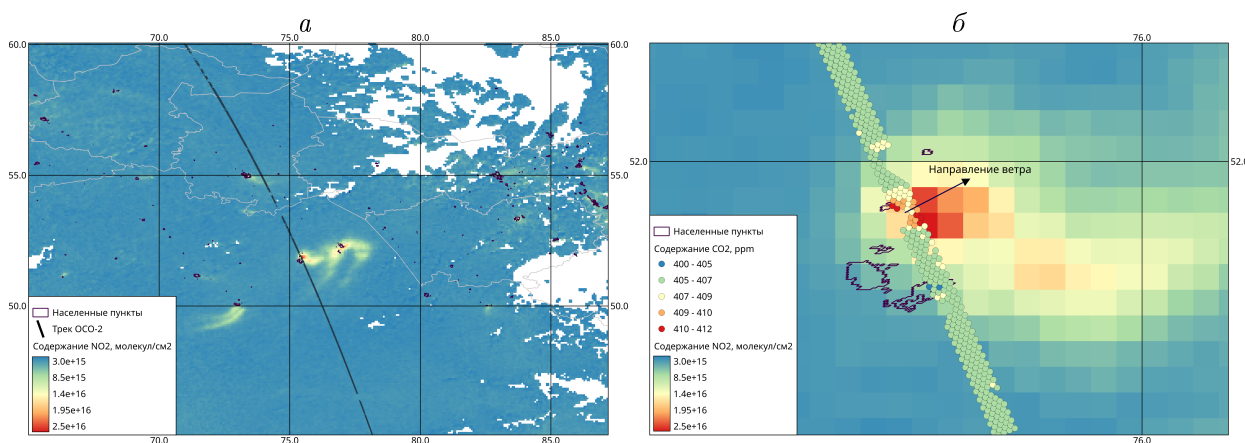


Рис. 5. Пространственное распределение полного содержания NO_2 (молекул/см²) в тропосфере юга Западной Сибири в окрестностях Экибастузской ГРЭС-1 по данным TROPOMI/Sentinel-5P за 29 августа 2020 г.: *a* — трек обсерватории OCO-2 (наклонная линия в центре рисунка); *б* — содержание CO_2 млн⁻¹ (кругами обозначены пиксели сканирования обсерватории OCO-2). Стрелка — направление ветра на текущее время, полученное по данным реанализа ERA5

Fig. 5. Spatial distribution of the NO_2 total content (molecules/cm²) in the troposphere of the Western Siberia south in the vicinity of Ekibastuz GRES-1 according to TROPOMI/Sentinel-5P data for August 29, 2020: *a* is a track of the OCO-2 observatory (the inclined line in the center of the figure); *б* — CO_2 content in million⁻¹ (circles indicate pixels of the OCO-2 observatory). The arrow shows the wind direction at the current time, obtained from the ERA5 reanalysis data

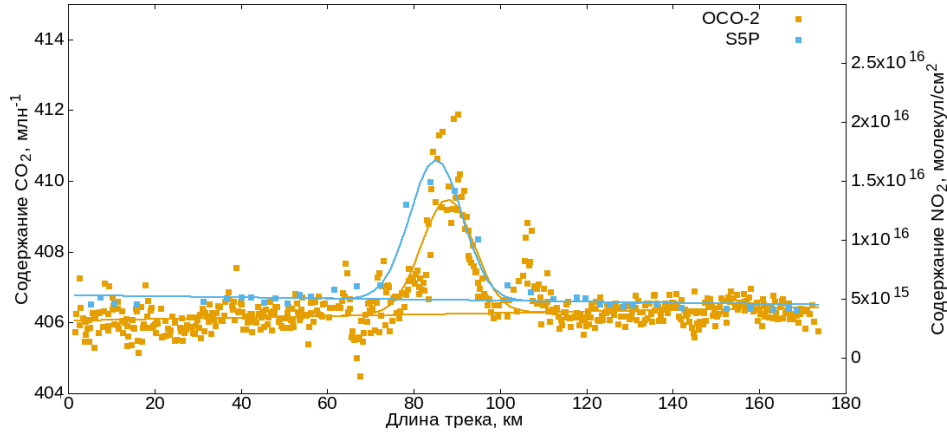


Рис. 6. Результаты аппроксимации поперечных распределений содержания NO_2 и CO_2 , полученные с использованием вектор-функции Гаусса для данных TROPOMI/Sentinel-5P (голубые квадраты) и OCO-2 (желтые квадраты) за 29 августа 2020 г.

Fig. 6. Results of approximation of cross section distributions of NO_2 and CO_2 contents obtained using the Gaussian vector function for TROPOMI/Sentinel-5P (blue squares) and OCO-2 (yellow squares) data for August 29, 2020

Результаты аппроксимации поперечных распределений содержания NO_2 и CO_2 в окрестностях Экибастузской ГРЭС-1, полученные с использованием вектор-функции Гаусса для данных TROPOMI/Sentinel-5P и OCO-2 за 29 августа 2020 г., показаны на рис. 6. Анализ проводился для полосы сканирования OCO-2 длиной порядка 180 км. Установлено, что амплитуда антропогенной аномалии содержания углекислого газа ΔCO_2 составляла 3.24 млн^{-1} при ширине аномалии FWHM, равной 14.2 км.

В случае атмосферы в гидростатическом равновесии со стандартным приземным давлением 1013 гПа поток углекислого газа F_{CO_2} , следуя [50], может быть записан в виде

$$F_{\text{CO}_2} = 0.53 \frac{\text{Мт CO}_2}{\text{год}} \frac{\text{FWHM}}{\text{км}} \frac{\Delta\text{XCO}_2}{\text{млн}^{-1}} \frac{v}{\text{м/с}} [\text{Мт CO}_2/\text{год}]. \quad (1)$$

Значения FWHM, ΔXCO_2 и v — скорости ветра в направлении, перпендикулярном движению спутника, в выражении (1) даются в единицах измерения: километры, частиц/миллион и метры/секунду. Если вектор скорости ветра и скорости спутника образуют угол, отличный от прямого, то в выражении (1) следует использовать нормировочный множитель, равный 1.4, установленный в [50] эмпирическим путем.

Используя результаты аппроксимации и значение эффективной приземной скорости ветра на высоте 10 м на момент пролета спутника $v = 0.6 \text{ м/с}$ по данным ERA5 [52], из (1) удалось получить оценку эмиссии $F_{\text{CO}_2} \approx 20.5 \text{ Мт CO}_2/\text{год}$.

В силу малой статистики одновременных наблюдений одного и того же источника приборами OCO-2 и TROPOMI, узкой полосы сканирования OCO-2 и зависимости результата от наличия облачного покрова авторами впервые предложена технология, основанная на методе [50], для получения количественных оценок антропогенной эмиссии CO_2 крупными промышленными центрами Западной Сибири без использования данных OCO-2. Идея предлагаемого подхода заключается в использовании эмпирически установленной связи для амплитуд аномалий аппроксимирующих функций поперечных распределений содержания NO_2 и CO_2 . В работе [53] для аномалии ΔXCO_2 установлен масштабирующий коэффициент, равный $1.1 \cdot 10^{-16} \text{ млн}^{-1}/(\text{молекул}/\text{см}^2)$. Анализ

данных для Западной Сибири, выполненный авторами, дает значение масштабирующего коэффициента $1.4 \cdot 10^{-16}$ млн⁻¹/(молекул/см²). Таким образом, установленные по данным TROPOMI/Sentinel-5P аномалии содержания диоксида азота свидетельствуют о наличии и углекислого газа, они могут быть использованы для оценок антропогенных аномалий ΔCO_2 :

$$\Delta\text{CO}_2 = 1.4 \cdot 10^{-16} \text{ млн}^{-1}/(\text{молекул}/\text{см}^2) \cdot \text{NO}_2. \quad (2)$$

Разработанная технология апробирована на данных для Новосибирска, Кемерова и Барнаула. С использованием эмпирического результата (2) и выражения (1) при эффективной скорости ветра 5.5 м/с (по данным ERA5) установлено, что годовая эмиссия CO_2 в 2020 г. составляла:

- для Новосибирска 33.17 Мт CO_2 /год;
- Кемерова 13.87 Мт CO_2 /год;
- Барнаула 17.92 Мт CO_2 /год.

6. Технологии оценок GPP и NPP по данным спутниковых наблюдений

Данные спектрорадиометра MODIS, установленного на спутниковых платформах Terra и Aqua, позволили с начала 2000-х гг. проводить мониторинг состояния растительного покрова на глобальном уровне. Основными продуктами этого мониторинга являются нормализованный вегетационный индекс NDVI и улучшенный вегетационный индекс EVI. Регулярные данные по этим индексам дают возможность отслеживать жизненный цикл растений и получать оценки первичной и чистой валовой продукции, т. е. оценки количества углерода, поглощаемого растениями из атмосферы и частично выдыхаемого обратно в процессе метаболизма. Однако использование вегетационных индексов NDVI и EVI для оценок GPP и NPP сопряжено с рядом проблем. Во-первых, алгоритмы обработки данных MODIS позволяют получать только 16-дневные продукты NDVI и EVI, во-вторых, сами индексы не чувствительны к быстрым вариациям потоков тепла и влаги в окружающей среде и, как следствие, к изменениям темпов фотосинтеза и дыхания растений.

Сегодня основным подходом к мониторингу жизненного цикла растений из космоса и получению оценок GPP и NPP на региональном и глобальном уровне является регистрация флуоресцентного излучения хлорофилла, индуцированного солнечным светом. SIF — это флуоресцентное излучение, испускаемое молекулами хлорофилла. Возбужденные фотонами солнечного света молекулы хлорофилла тратят поглощенную энергию на фотосинтез (фотохимическое тушение), переводят ее в тепло в результате нефотохимического тушения и излучают в виде флуоресценции. Регистрируя флуоресценцию хлорофилла и используя установленную линейную корреляцию между SIF и GPP, можно получать более точные оценки объема CO_2 , перерабатываемого растениями, по сравнению с использованием вегетационных индексов [32, 33].

Данные по SIF с пространственным разрешением, пригодным для практического использования, впервые были получены радиометром TROPOMI/Sentinel-5P. По этим данным впервые создана глобальная база данных SIF [33]. Флуоресценция хлорофилла, индуцированная излучением Солнца, также является одним из продуктов алгоритмов обработки данных обсерваторий OCO-2 и OCO-3 [32].

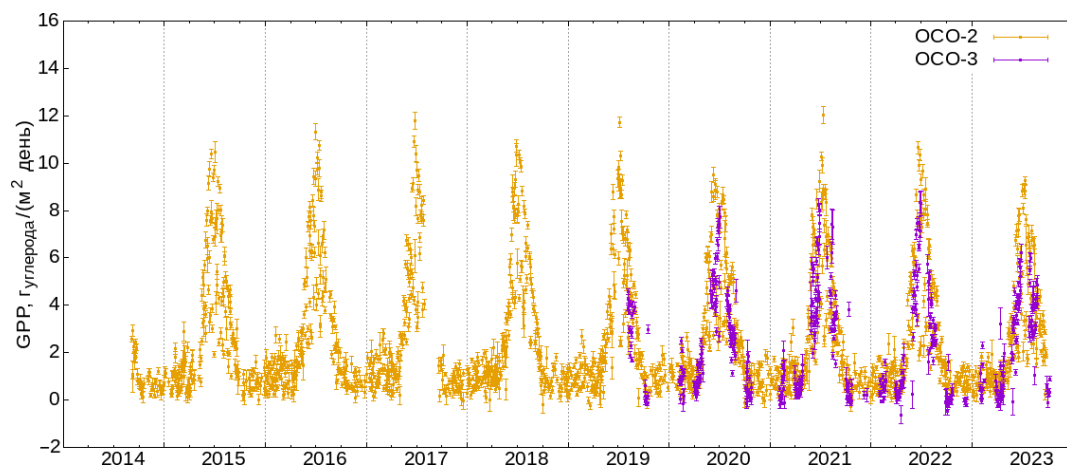


Рис. 7. Годовой ход и межгодовая изменчивость GPP для территории юга Западной Сибири (50–55° с. ш., 75–90° в. д.) в 2014–2023 гг. по данным орбитальных углеродных обсерваторий OCO-2 и OCO-3

Fig. 7. Annual cycle and interannual variability of GPP for the territory of the Western Siberia south (50–55° N, 75–90° E) in 2014–2023 according to the orbital carbon observatories OCO-2 and OCO-3 data

Отметим, что первые результаты исследований GPP для территории юга Западной Сибири по данным о SIF опубликованы нами в работах [48, 54].

На рис. 7 показаны годовой ход и межгодовая изменчивость GPP для территории юга Западной Сибири (50–55° с. ш., 75–90° в. д.). Анализ данных OCO-2 проводился для периода 2014–2023 гг., результаты OCO-3 добавлены в обработку с 2019 г. Видно, что максимальный уровень поглощения CO₂ из атмосферы, обусловленный наземной растительностью, достигает максимума в летние месяцы исследуемого периода и составляет около 10–12 гC/(м²·день).

Новые возможности в исследованиях регионального углеродного бюджета с использованием спутниковых данных появились после размещения на борту МКС в 2018 г. радиометра ECOSTRESS [31], позволяющего получать данные по температуре растительного покрова и подстилающей поверхности с разрешением 70 м. Обсерватория ECOSTRESS предоставляет уникальные продукты: эвапотранспирацию (ET — суммарное количество влаги, уходящее в атмосферу с поверхности листьев растений и почвы) и индекс эффективности использования воды (WUE — отношение количества воды, используемой растениями в процессе метаболизма, к количеству воды, испаряемой через устьица растений в процессе дыхания). В нашей работе [55] предложен подход для получения значений чистой первичной продукции NPP с использованием данных ECOSTRESS по ET и WUE.

На рис. 8 показаны результаты расчетов NPP, полученные для территории Алтайского края по данным радиометра ECOSTRESS за 24 августа 2021 г. Видно, что на участках западного и части центральных степных районов края значения NPP составляют от нуля до 6 гC/(м²·день), в восточных и предгорных районах края с преимущественно лесной растительностью NPP изменяется от 10 до 15 гC/(м²·день). Существенная разница в значениях NPP на западном и восточном экспериментальных участках обусловлена тем фактом, что на восточном полигоне в течение последних десяти лет применяются технологии низкоуглеродного земледелия. На западном полигоне применяются традиционные технологии. Низкие и даже отрицательные значения NPP

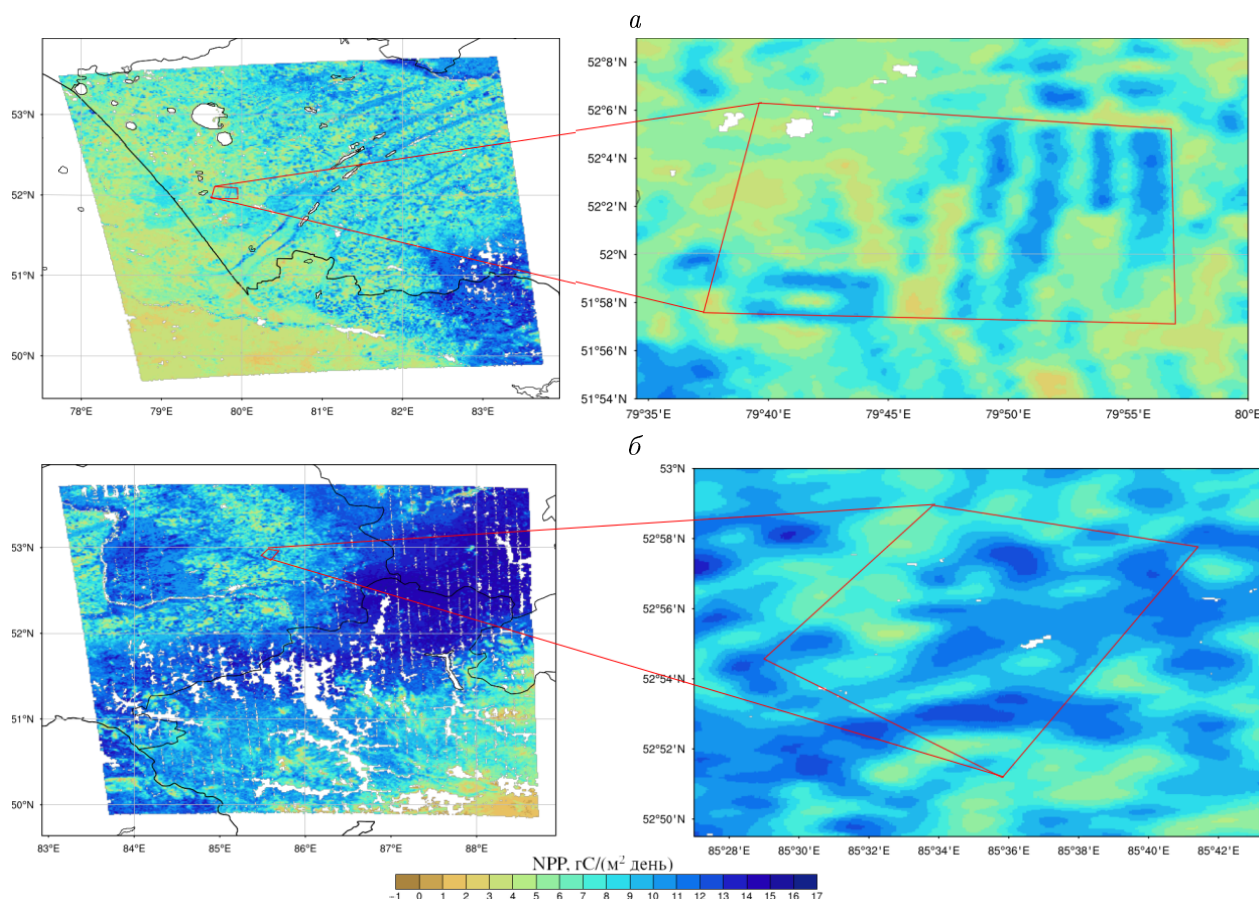


Рис. 8. Чистая первичная продукция по данным радиометра ECOSTRESS за 24 августа 2021 г. для юго-западной (а) и юго-восточной (б) частей Алтайского края. Красными четырехугольниками обозначены границы экспериментальных участков, на которых планируется создание карбоновых полигонов. Распределение NPP на этих участках с высоким разрешением показано на рисунках справа

Fig. 8. The net primary production according to ECOSTRESS radiometer data for August 24, 2021 for the southwestern (a) and southeastern (б) parts of the Altai Krai. The red quadrangles indicate the boundaries of the experimental areas where it is planned to create carbon polygons. The distribution of NPP in these areas is shown at high resolution in figures on the right

в степных районах могут быть обусловлены снижением метаболизма растений в связи с близким окончанием вегетационного периода и/или уборкой урожая на землях сельскохозяйственного назначения.

7. Результаты и выводы

Созданные в Алтайском государственном университете технологии мониторинга парниковых газов в атмосфере Западной Сибири позволили получить следующие результаты.

- Проведено исследование полного содержания метана в атмосфере региона. Количественные оценки получены с использованием регрессионной модели, связывающей полное содержание метана в атмосфере $[\text{CH}_4]$ с отношением смеси $\text{CH}_{4\text{AIRS}}$ в области чувствительности гиперспектрометра AIRS спутника Aqua и характеристиками атмосферы и подстилающей поверхности. Модель обучена на дан-

ных AIRS/AMSU-ATMS и результатах модифицированной авторами химической транспортной модели MOZART-4. Установлено, что в каждом годовом цикле полное содержание метана, как и отношение смеси $\text{CH}_{4\text{AIRS}}$ в верхней тропосфере, имеет зимний (январь–февраль) и летний (июль–сентябрь) максимумы. Скорость роста $[\text{CH}_4]$ в атмосфере Западной Сибири для периода 2002–2022 гг. составляет около 4.55 ± 0.2 млрд⁻¹/год.

- Впервые проведен анализ и получены количественные оценки по содержанию диоксида азота в тропосфере крупных промышленных центров Западной Сибири (Новосибирск, Кемерово, Барнаул) для периода 2018–2023 гг. с использованием данных спектрорадиометра TROPOMI/Sentinel-5P. Показано, что с декабря 2019 г. по апрель 2020 г. содержание NO_2 в тропосфере сократилось практически в два раза. Этот факт, соответствующий результатам глобального мониторинга парниковых газов, представленным в работе [49], связан с пандемией коронавирусной инфекции COVID-19. В силу того, что диоксид азота образуется в тех же источниках, что и углекислый газ, этот вывод можно обобщить и на оценки антропогенной эмиссии CO_2 .
- Впервые получены оценки полного содержания углекислого газа в атмосфере юга Западной Сибири с использованием данных орбитальных углеродных обсерваторий ОСО-2 и ОСО-3. Анализ данных ОСО-2 проводился для периода 2014–2023 гг., результаты ОСО-3 добавлены в обработку с 2019 г. С использованием эмпирической модели, предложенной для интерпретации данных спутника GOSAT и верифицированной по результатам измерений глобальной сети наземных станций TCCON [41], установлены тренд и амплитуда вариаций сезонных значений изменения содержания CO_2 в атмосфере юга Западной Сибири ($48\text{--}53^\circ$ с. ш., $60\text{--}90^\circ$ в. д.) в 2014–2023 гг. Скорость роста содержания CO_2 в атмосфере в 2014–2023 гг. составляла около 2.48 млн⁻¹/год, а амплитуда сезонных колебаний 9.3 млн⁻¹.
- С использованием метода, предложенного в литературе, данных TROPOMI/Sentinel-5P по содержанию NO_2 и данных орбитальной углеродной обсерватории ОСО-2 по содержанию CO_2 впервые разработана технология получения количественных оценок антропогенной эмиссии CO_2 для промышленных центров Западной Сибири без использования данных ОСО-2, которые имеют малую зону покрытия и, в силу наличия облачного покрова, малую статистику достоверных результатов для региона. Разработанная технология апробирована на данных для Новосибирска, Кемерово и Барнаула. Установлено, что эмиссия CO_2 в 2020 г. составляла: порядка 33.17 Мт CO_2 /год для Новосибирска; 13.87 Мт CO_2 /год для Кемерово и 17.92 Мт CO_2 /год для Барнаула.
- С использованием продукта “флуоресценция хлорофилла, индуцированная солнечным светом” специализированных орбитальных углеродных обсерваторий ОСО-2 и ОСО-3 проведено исследование валовой первичной продукции для территории юга Западной Сибири. Впервые получены количественные оценки GPP региона для периода 2014–2023 гг. Показано, что GPP достигает максимума в летние месяцы и составляет 10–12 гС/(м²·день).
- Предложены метод получения количественных оценок чистой первичной продукции с использованием продуктов эвапотранспирации и индекс эффективности использования воды обсерватории ECOSTRESS. На примере природно-климатических зон Алтайского края показано влияние типов растительности и технологий землепользования на величину NPP.

Заключение

В работе представлен обзор технологий мониторинга парниковых газов в атмосфере Западной Сибири, созданных в Алтайском государственном университете и внедренных в цепочку деятельности Центра космического мониторинга АлтГУ.

Показано, что результаты авторов по содержанию парниковых газов в атмосфере региона, большинство из которых получены для Западной Сибири впервые, согласуются с оценками и выводами, публикуемыми ежегодно в бюллетенях Всемирной метеорологической организации и отчетах глобального проекта Global Carbon Project, а также с результатами исследований, полученными для других регионов и опубликованными в литературе. Анализ спутниковых данных по содержанию CH_4 , CO_2 и NO_2 , сделанный авторами, позволил впервые установить ряд существенных особенностей в динамике поведения этих газов в атмосфере Западной Сибири.

Созданные технологии и полученные авторами результаты могут послужить независимым источником информации при проведении исследований и интерпретации данных, получаемых на карбоновых полигонах региона.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FZMW-2023-0007 в рамках государственного задания “Эмиссия парниковых газов источниками Западной Сибири и Алтая в первой половине XXI века: новые данные и оценки влияния на климат, природную среду и инфраструктурные проекты”).

Список литературы

- [1] Friedlingstein P., Jones M.W., O’Sullivan M., Andrew R.M., Bakker D.C.E., Hauck J., Le Quéré C., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Alin S.R., Anthoni P., Bates N.R., Becker M., Bellouin N., Bopp L., Chau T.T.T., Chevallier F., Chini L.P., Cronin M., Currie K.I., Decharme B., Djeutchouang L.M., Dou X., Evans W., Feely R.A., Feng L., Gasser T., Gilfillan D., Gkritzalis T., Grassi G., Gregor L., Gruber N., Gürses Ö., Harris I., Houghton R.A., Hurtt G.C., Iida Y., Ilyina T., Luijkx I.T., Jain A., Jones S.D., Kato E., Kennedy D., Goldewijk K., Knauer J., Korsbakken J.I., Körtzinger A., Landschützer P., Lauvset S.K., Lefèvre N., Lienert S., Liu J., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakao S.-I., Niwa Y., Ono T., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Rosan T.M., Schwinger J., Schwingshackl C., Séférian R., Sutton A.J., Sweeney C., Tanhua T., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F., van der Werf G.R., Vuichard N., Wada C., Wanninkhof R., Watson A.J., Willis D., Wiltshire A.J., Yuan W., Yue C., Yue X., Zaehle S., Zeng J. Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data*. 2022; (14):1917–2005. DOI:10.5194/essd-14-1917-2022. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/14/1917/2022>.
- [2] Saunio M., Stavert A.R., Poulter B., Bousquet P., Canadell J.G., Jackson R.B., Raymond P.A., Dlugokencky E.J., Houweling S., Patra P.K., Ciais P., Arora V.K., Bastviken D., Bergamaschi P., Blake D.R., Brailsford G., Bruhwiler L., Carlson C.M., Carrol M., Castaldi S., Chandra N., Crevoisier C., Crill P.M., Covey K., Curry C.L., Etiope G., Frankenberg C., Gedney N., Hegglin M.I.,

- Höglund-Isaksson L., Hugelius G., Ishizawa M., Ito A., Janssens-Maenhout G., Jensen K.M., Joos F., Kleinen T., Krummel P.B., Langenfelds R.L., Laruelle G.G., Liu L., Machida T., Maksyutov S., McDonald K.C., McNorton J., Miller P.A., Melton J.R., Morino I., Müller J., Murguia-Flores F., Naik V., Niwa Y., Noce S., O'Doherty S., Parker R.J., Peng C., Peng S., Peters G.P., Prigent C., Prinn R., Ramonet M., Regnier P., Riley W.J., Rosentreter J.A., Segers A., Simpson I.J., Shi H., Smith S.J., Paul Steele L., Thornton B.F., Tian H., Tohjima Y., Tubiello F.N., Tsuruta A., Viovy N., Voulgarakis A., Weber T.S., van Weele M., van der Werf G.R., Weiss R.F., Worthy D., Wunch D., Yin Y., Yoshida Y., Zhang W., Zhang Z., Zhao Y., Zheng B., Qi Z., Qiu Z., Zhuang Q. Global methane budget 2020. *Earth System Science Data*. 2020; (12):1561–1623. DOI:10.5194/essd-12-1561-2020. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/12/1561/2020>.
- [3] **Montzka S.A.** The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI). National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory, 2023. Available at: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html> (accessed December 01, 2023).
- [4] **Valin L.C., Russell A.R., Cohen R.C.** Variations of OH radical in an urban plume inferred from NO₂ column measurements. *Geophysical Research Letters*. 2013; (40):1856–1860. DOI:10.1002/grl.50267. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/grl.50267>.
- [5] **Laughner J.L., Cohen R.C.** Direct observation of changing NO_x lifetime in North American cities. *Science*. 2019; (366):723–727. DOI:10.1126/science.aax6832. Available at: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aax6832>.
- [6] **Chevallier F., Crotwell A., Gerbig C., Jordan A., Lan X., Loh Z., Luijkx I., Miller J., Sawa Y., Tarasova O., Vermeulen A., Weiss R., Warneke T., Yver C.** WMO greenhouse gas bulletin. WMO. 2022; (19):11. Available at: <https://public.wmo.int/en/greenhouse-gas-bulletin>.
- [7] WMO strategic plan 2024–2027. World Meteorological Congress. Nineteenth Session, 22 May to 2 June 2023, Geneva, Cg-19/Doc. 3.1(1):18. Available at: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/greenhouse-gases/global-greenhouse-gas-monitoring-infrastructure> (accessed December 01, 2023).
- [8] A WMO-coordinated global greenhouse gas monitoring infrastructure. World Meteorological Congress. Seventy-Sixth Session, 27 February to 3 March 2023, Geneva, EC-76/Inf. 4(3–1):39. Available at: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/greenhouse-gases/global-greenhouse-gas-monitoring-infrastructure> (accessed December 01, 2023).
- [9] **Keeling C.D.** The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*. 1960; (12):200–203.
- [10] **Blake D.R., Mayer E.W., Tyler S.C., Makide Y., Montague D.C., Rowland F.S.** Global increase in atmospheric methane concentrations between 1978 and 1980. *Geophysical Research Letters*. 1982; (9):477–480. DOI:10.1029/GL009i004p00477. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/GL009i004p00477>.
- [11] **Kaufman Y.J., Herring D.D., Ranson K.J., Collatz G.J.** Earth observing system AM1 mission to Earth. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998; (36):1045–1055. DOI:10.1109/36.700989. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/700989>.
- [12] **Parkinson C.L.** Aqua: an Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003; (41):173–183. DOI:10.1109/TGRS.2002.808319. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1196036>.

- [13] **Salomonson V.V., Barnes W.L., Maymon P.W., Montgomery H.E., Ostrow H.** MODIS: advanced facility instrument for studies of the Earth as a system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1989; (27):145–153. DOI:10.1109/36.20292. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/20292>.
- [14] **Justice C.O., Vermote E., Townshend J.R.G., Defries R., Roy D.P., Hall D.K., Salomonson V.V., Privette J.L., Riggs G., Strahler A., Lucht W., Myneni R.B., Knyazikhin Y., Running S.W., Nemani R.R., Zhengming W., Huete A.R., van Leeuwen W., Wolfe R.E., Giglio L., Muller J., Lewis P., Barnsley M.J.** The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998; (36):1228–1249. DOI:10.1109/36.701075. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/701075>.
- [15] **Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Жуков А.П., Лагутин Ал.А., Резников А.Н., Сеницин В.В., Шмаков И.А.** Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 1. MODIS. *Вычислительные технологии*. 2007; 12(2):67–89. Адрес доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12878936>.
- [16] **Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C., Goldberg M.D., Kalnay E., McMillin L.M., Revercomb H., Rosenkranz P.W., Smith W.L., Staelin D.H., Strow L.L., Susskind J.** AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003; (41):253–264. DOI:10.1109/TGRS.2002.808356. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1196043>.
- [17] **Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Лагутин Ал.А., Сеницин В.В., Шмаков И.А.** Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 2. AIRS. *Вычислительные технологии*. 2007; 12(5):78–102. Адрес доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12878970>.
- [18] **Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю., Волков Н.В., Ревякин А.И.** Восстановление всепогодного режима работы гиперспектрального комплекса AIRS/AMSU спутника Aqua с использованием данных СВЧ-радиометра ATMS спутников Suomi-NPP и NOAA-20. *Автометрия*. 2022; 58(2):85–92. DOI:10.15372/AUT20220210. Available at: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=184209&ARTICLE_ID=184219.
- [19] **Weng F., Zou X., Sun N., Yang H., Tian M., Blackwell W.J., Wang X., Lin L., Anderson K.** Calibration of Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013; 118(19):11187–11200. DOI:10.1002/jgrd.50840. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgrd.50840>.
- [20] **Goldberg M.D., Kilcoyne H., Cikanek H., Mehta A.** Joint polar satellite system: the United States next generation civilian polar-orbiting environmental satellite system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013; 118(24):13463–13475. DOI:10.1002/2013JD020389. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013JD020389>.
- [21] **Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V., Tuchina N.V.** Estimation of natural gas flaring volume at the Western Siberia flares using satellite night-time data in the visible and near-infrared range. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019; (2534). Available at: https://ceur-ws.org/Vol-2534/03_keynote.pdf.
- [22] **Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V.** Methane emission by petroleum industry in Western Siberia according to satellite observations. *Proceedings SPIE*. 2021; (11916):119166N. DOI:10.1117/12.2603438. Available at: <https://proceedings.spiedigitallibrary.org/>

- //www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11916/119166N/Methane-emission-by-petroleum-industry-in-Western-Siberia-according-to/10.1117/12.2603438.full.
- [23] **Rausch K., Houchin S., Cardema J., Moy G., Haas E., De Luccia F.J.** Automated calibration of the Suomi national polar-orbiting partnership (S-NPP) visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) reflective solarbands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013; 118(13):13434–13442. DOI:10.1002/2013JD020479. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013JD020479>.
- [24] **De Laat A.T.J., Gloudemans A.M.S., Aben I., Krol M., Meirink J.F., van der Werf G.R., Schrijver H.** Scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric cartography carbon monoxide total columns: statistical evaluation and comparison with chemistry transport model results. *Journal of Geophysical Research*. 2007; (112):D12310. DOI:10.1029/2006JD008256. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JD008256>.
- [25] **Cressot C., Chevallier F., Bousquet P., Crevoisier C., Dlugokencky E.J., Fortems-Cheiney A., Frankenberg C., Parker R., Pison I., Scheepmaker R.A., Montzka S.A., Krummel P.B., Steele L.P., Langenfelds R.L.** On the consistency between global and regional methane emissions inferred from SCIAMACHY, TANSO-FTS, IASI and surface measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014; (14):577–592. DOI:10.5194/acp-14-577-2014. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/14/577/2014/acp-14-577-2014.html>.
- [26] **Feng L., Palmer P.I., Bösch H., Parker R.J., Webb A.J., Correia C.S.C., Deutscher N.M., Domingues L.G., Feist D.G., Gatti L.V., Gloor E., Hase F., Kivi R., Liu Y., Miller J.B., Morino I., Sussmann R., Strong K., Uchino O., Wang J., Zahn A.** Consistent regional fluxes of CH₄ and CO₂ inferred from GOSAT proxy XCH₄: XCO₂ retrievals, 2010–2014. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017; (17):4781–4797. DOI:10.1098/rsta.2010.0240. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/17/4781/2017>.
- [27] **Veefkind J.P., Aben I., McMullan K., Förster H., de Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H.J., de Haan J.F., Kleipool Q., van Weele M., Hasekamp O., Hoogeveen R., Landgraf J., Snel R., Tol P., Ingmann P., Voors R., Kruizinga B., Vink R., Visser H., Levelt P.F.** TROPOMI on the ESA Sentinel-5 precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*. 2012; (120):70–83. DOI:10.1016/j.rse.2011.09.027. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425712000661>.
- [28] **Frankenberg C., Pollock R., Lee R.A.M., Rosenberg R., Blavier J.-F., Crisp D., O'Dell C.W., Osterman G.B., Roehl C., Wennberg P.O., Wunch D.** The orbiting carbon observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using prelaunch direct sun measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2015; (8):301–313. DOI:10.5194/amt-8-301-2015. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/8/301/2015>.
- [29] **Reuter M., Buchwitz M., Schneising O., Krautwurst S., O'Dell C.W., Richter A., Bovensmann H., Burrows J.P.** Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: co-located regional CO₂ and NO₂ enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019; (19):9371–9383. DOI:10.5194/acp-19-9371-2019. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/19/9371/2019>.
- [30] **Eldering A., Taylor T.E., O'Dell C.W., Pavlick R.** The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmospheric*

- Measurement Techniques. 2019; (12):2341–2370. DOI:10.5194/amt-12-2341-2019. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/12/2341/2019>.
- [31] Fisher J.B., Lee B., Purdy A.J., Halverson G.H., Dohlen M.B., Cawse-Nicholson K., Wang A., Anderson R.G., Aragon B., Arain M.A., Baldocchi D.D., Baker J.M., Barral H., Bernacchi C.J., Bernhofer C., Biraud S.C., Bohrer G., Brunsell N., Cappelare B., Castro-Contreras S., Chun J., Conrad B.J., Cremonese E., Demarty J., Desai A.R., de Ligne A., Foltýnová L., Goulden M.L., Griffis T.J., Grünwald T., Johnson M.S., Kang M., Kelbe D., Kowalska N., Lim J.-H., Maïnassara I., McCabe M.F., Missik J.E.C., Mohanty B.P., Moore C.E., Morillas L., Morrison R., Munger J.W., Posse G., Richardson A.D., Russell E.S., Ryu Y., Sanchez-Azofeifa A., Schmidt M., Schwartz E., Sharp I., Šigut L., Tang Y., Hulley G., Anderson M., Hain C., French A., Wood E., Hook S. ECOSTRESS: NASA's next generation mission to measure evapotranspiration from the international space station. *Water Resources Research*. 2020; 56(4):e2019WR026058. DOI:10.1029/2019WR026058. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019WR026058>.
- [32] Li X., Xiao J., He B. Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests. *Remote Sensing of Environment*. 2018; (204):659–671. DOI:10.1016/j.rse.2017.09.034. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425717304467>.
- [33] Li X., Xiao J. TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production. *Remote Sensing of Environment*. 2022; (268):112748. DOI:10.1016/j.rse.2021.112748. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425721004685>.
- [34] Guanter L., Bacour C., Schneider A., Aben I., van Kempen T.A., Maignan F., Retscher C., Köhler P., Frankenberg C., Joiner J., Zhang Y. The TROPoSIF global sun-induced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission. *Earth System Science Data*. 2021; (13):5423–5440. DOI:10.5194/essd-13-5423-2021. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/13/5423/2021>.
- [35] Poppe Terán C., Naz B.S., Graf A., Qu Y., Hendricks Franssen H.-J., Baatz R., Ciais P., Vereecken H. Rising water-use efficiency in European grasslands is driven by increased primary production. *Communications Earth & Environment*. 2023; (4):95. DOI:10.1038/s43247-023-00757-x. Available at: <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00757-x>.
- [36] Emmons L.K., Walters S., Hess P.G., Lamarque J.-F., Pfister G.G., Fillmore D., Granier C., Guenther A., Kinnison D., Laepple T., Orlando J., Tie X., Tyndall G., Wiedinmyer C., Baughcum S.L., Kloster S. Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4). *Geoscientific Model Development*. 2010; (3):43–67. DOI:10.5194/gmd-3-43-2010. Available at: <https://gmd.copernicus.org/articles/3/43/2010>.
- [37] Susskind J., Blaisdell J.M., Iredell L. Improved methodology for surface and atmospheric soundings, error estimates, and quality control procedures: the atmospheric infrared sounder science team version-6 retrieval algorithm. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2014; (8):084994. DOI:10.1117/1.JRS.8.084994. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/journal-of-applied-remote-sensing/volume-8/issue-01/084994/Improved-methodology-for-surface-and-atmospheric-soundings-error-estimates-and/10.1117/1.JRS.8.084994>.
- [38] Susskind J., Barnett C.D., Blaisdell J.M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and*

- Remote Sensing. 2003; (41):390–409. DOI:10.1109/TGRS.2002.808236. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1196056>.
- [39] **Мордвин Е.Ю., Лагутин А.А.** Метан в атмосфере Западной Сибири: монография. Барнаул: Азбука; 2016: 148.
- [40] **Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., 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 SPIE. 2023; (12780):1278062. DOI:10.1117/12.2690784. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12780/1278062/Regression-model-for-reconstruction-of-the-total-methane-content-according/10.1117/12.2690784.full>.
- [41] **Wunch D., Toon G.C., Blavier J.-F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., Wennberg P.O.** The total carbon column observing network. Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2011; (369):2087–2112. DOI:10.1098/rsta.2010.0240. Available at: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2010.0240>.
- [42] **Van Geffen J., Boersma K.F., Eskes H., Sneep M., ter Linden M., Zara M., Veefkind J.P.** S5P TROPOMI NO₂ slant column retrieval: method, stability, uncertainties and comparisons with OMI. Atmospheric Measurement Techniques. 2020; (13):1315–1335. DOI:10.5194/amt-13-1315-2020. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/13/1315/2020>.
- [43] **Eskes H., van Geffen J., Boersma F., Eichmann K.-U., Apituley A., Pedernana M., Sneep M., Veefkind J.P., Loyola D.** Sentinel-5 precursor/TROPOMI level 2 product user manual nitrogendioxide. S5P-KNMI-L2-0021-MA. Royal Netherlands Meteorological Institute; 2022. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/4682535/Sentinel-5P-Level-2-Product-User-Manual-Nitrogen-Dioxide/ad25ea4c-3a9a-3067-0d1c-aaa56eb1746b> (accessed December 01, 2023).
- [44] **Jacobs N., Simpson W.R., Graham K.A., Holmes C., Hase F., Blumenstock T., Tu Q., Frey M., Dubey M.K., Parker H.A., Wunch D., Kivi R., Heikkinen P., Notholt J., Petri C., Warneke T.** Spatial distributions of XCO₂ seasonal cycle amplitude and phase over northern high-latitude regions. Atmospheric Chemistry and Physics. 2021; (21):16661–16687. DOI:10.5194/acp-21-16661-2021. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/21/16661/2021>.
- [45] **OCO-2 Science Team, Gunson M., Eldering A.** OCO-2 level 2 bias-corrected XCO₂ and other select fields from the full-physics retrieval aggregated as daily files, retrospective processing V10r, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2020. DOI:10.5067/E4E140XDMPO2. Available at: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC02_L2_Lite_FP_10r/summary (accessed December 01, 2023).
- [46] **OCO-2/OCO-3 Science Team, Chatterjee A., Payne V.** OCO-3 level 2 bias-corrected XCO₂ and other select fields from the full-physics retrieval aggregated as daily files, retrospective processing v10.4r, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2022. DOI:10.5067/8QR1N7IV81RD. Available at: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC03_L2_Lite_FP_10.4r/summary (accessed December 01, 2023).
- [47] **Mordvin E.Yu., Lagutin A.A., Volkov N.V.** Interannual variability of CO₂ content in the atmosphere of the south of Western Siberia according to satellite observations in 2014–2021. Proceedings SPIE. 2022; (12341):123413R. DOI:10.1117/12.2645052. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12341/2645052/Interannual-variability-of-CO-2-content-in-the-atmosphere-of/10.1117/12.2645052>.

- [48] **Шокин Ю.И., Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю., Волков Н.В.** Технология оценки валовой первичной продукции по данным спутниковых наблюдений. Вычислительные технологии. 2023; 28(2):103–114. DOI:10.25743/ICT.2023.28.2.009. Адрес доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53926693>.
- [49] **Liu Z., Ciais P., Deng Z., Lei R., Davis S.J., Feng S., Zheng B., Cui D., Dou X., Zhu B., Guo R., Ke P., Sun T., Lu C., He P., Wang Y., Yue X., Wang Y., Lei Y., Zhou H., Cai Z., Wu Y., Guo R., Han T., Xue J., Boucher O., Boucher E., Chevallier F., Tanaka K., Wei Y., Zhong H., Kang C., Zhang N., Chen B., Xi F., Liu M., Bréon F.-M., Lu Y., Zhang Q., Guan D., Gong P., Kammen D.M., He K., Schellnhuber H.J.** Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nature Communications*. 2020; (11):5172. DOI:10.1038/s41467-020-18922-7. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-18922-7>.
- [50] **Reuter M., Buchwitz M., Schneising O., Krautwurst S., O'Dell C.W., Richter A., Bovensmann H., Burrows J.P.** Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: colocated regional CO₂ and NO₂ enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019; 19(14):9371–9383. DOI:10.5194/acp-19-9371-2019. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/19/9371/2019>.
- [51] **MacDonald C.G., Mastrogiacomo J.-P., Laughner J.L., Hedelius J.K., Nassar R., Wunch D.** Estimating enhancement ratios of nitrogen dioxide, carbon monoxide and carbon dioxide using satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2023; (23):3493–3516. DOI:10.5194/acp-23-3493-2023. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/23/3493/2023>.
- [52] **Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.** The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020; (146):1999–2049. DOI:10.1002/qj.3803. Available at: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3803>.
- [53] **Hakkarainen J., Ialongo I., Maksyutov S., Crisp D.** Analysis of four years of global XCO₂ anomalies as seen by orbiting carbon observatory-2. *Remote Sensing*. 2019; (11):850. DOI:10.3390/rs11070850. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/7/850>.
- [54] **Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V.** Estimates of the terrestrial gross primary production for the south of Western Siberia in 2014–2021 according to OCO-2 and OCO-3 data. *Proceedings SPIE*. 2022; (12341):123413S. DOI:10.1117/12.2645053. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12341/2645053/Estimates-of-the-terrestrial-gross-primary-production-for-the-south/10.1117/12.2645053>.
- [55] **Volkov N.V., Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Sinitzin V.V.** Net primary production for the south of Altai Krai according to ECOSTRESS radiometer data. *Proceedings SPIE*. 2023; (12780):127803C. DOI:10.1117/12.2690789. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12780/127803C/Net-primary-production-for-the-south-of-Altai-Krai-according/10.1117/12.2690789>.
-

INFORMATION TECHNOLOGIES

DOI:10.25743/ICT.2024.29.5.007

Space monitoring of greenhouse gases in Western Siberia: technologies and first resultsA. A. LAGUTIN^{1,*}, E. YU. MORDVIN^{1,2}, N. V. VOLKOV¹, V. V. SINITSIN¹¹Altai State University, 656049, Barnaul, Russia²Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 630090, Novosibirsk, Russia

*Corresponding author: Anatoly A. Lagutin, e-mail: lagutin@theory.asu.ru

Received December 04, 2023, revised January 23, 2024, accepted February 07, 2024.

Abstract

The purpose of this work is to present technologies developed in the Altai State University aimed at monitoring greenhouse gases in the atmosphere of Western Siberia.

Methods. The total methane content in the region's atmosphere was reconstructed using a regression model trained on data from the AIRS hyperspectrometer of the Aqua satellite as well as the results of the MOZART-4 chemical transport model modified by the authors. To obtain estimates of the total carbon dioxide content in the atmosphere of the Western Siberia south, data from the orbital carbon observatories OCO-2 and OCO-3 were used. Quantitative estimates of the nitrogen dioxide content in the troposphere of the region were obtained from data from the TROPOMI spectroradiometer of the Sentinel-5 Precursor satellite. Emissions of carbon dioxide by large industrial centers of the region were obtained from orbital carbon observatories and the TROPOMI/Sentinel-5P radiometer data. Estimates of gross and net primary production for the region were obtained from data from orbital carbon observatories and the ECOSTRESS radiometer.

Results. The analysis of satellite data on the content of CH₄, CO₂ and NO₂, carried out by the authors, allowsestablishing a number of significant features in the dynamics of the behavior of these gases in the atmosphere of Western Siberia for the first time.

Conclusions. The novel results obtained by the authors on the content of greenhouse gases in the atmosphere of the region of Western Siberia are consistent with both estimates and conclusions published annually in the bulletins of the World Meteorological Organization, reports of the Global Carbon Project and research results published in the literature for other regions.

Keywords: atmosphere of Western Siberia, greenhouse gases, AIRS/Aqua hyperspectrometer, TROPOMI/Sentinel-5P and ECOSTRESS radiometers, orbital carbon observatories, transport chemical model MOZART-4.

Citation: Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V., Sinitsin V.V. Space monitoring of greenhouse gases in Western Siberia: technologies and first results. Computational Technologies. 2024; 29(5):72–99. DOI:10.25743/ICT.2024.29.5.007. (In Russ.)

Acknowledgements. The research is 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).

References

1. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Bakker D.C.E., Hauck J., Le Quéré C., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Alin S.R., Anthoni P., Bates N.R., Becker M., Bellouin N., Bopp L., Chau T.T.T., Chevallier F., Chini L.P., Cronin M., Currie K.I., Decharme B., Djutchouang L.M., Dou X., Evans W., Feely R.A., Feng L., Gasser T., Gilfillan D., Gkritzalis T.,

- Grassi G., Gregor L., Gruber N., Gürses Ö., Harris I., Houghton R.A., Hurtt G.C., Iida Y., Ilyina T., Luijkx I.T., Jain A., Jones S.D., Kato E., Kennedy D., Goldewijk K., Knauer J., Korsbakken J.I., Körtzinger A., Landschützer P., Lauvset S.K., Lefèvre N., Lienert S., Liu J., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Niwa Y., Ono T., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Rosan T.M., Schwinger J., Schwingshackl C., Séférian R., Sutton A.J., Sweeney C., Tanhua T., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F., van der Werf G.R., Vuichard N., Wada C., Wanninkhof R., Watson A.J., Willis D., Wiltshire A.J., Yuan W., Yue C., Yue X., Zaehle S., Zeng J. Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data*. 2022; (14):1917–2005. DOI:10.5194/essd-14-1917-2022. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/14/1917/2022>.
2. Saunois M., Stavert A.R., Poulter B., Bousquet P., Canadell J.G., Jackson R.B., Raymond P.A., Dlugokencky E.J., Houweling S., Patra P.K., Ciais P., Arora V.K., Bastviken D., Bergamaschi P., Blake D.R., Brailsford G., Bruhwiler L., Carlson C.M., Carrol M., Castaldi S., Chandra N., Crevoisier C., Crill P.M., Covey K., Curry C.L., Etiope G., Frankenberg C., Gedney N., Hegglin M.I., Höglund-Isaksson L., Hugelius G., Ishizawa M., Ito A., Janssens-Maenhout G., Jensen K.M., Joos F., Kleinen T., Krummel P.B., Langenfelds R.L., Laruelle G.G., Liu L., Machida T., Maksyutov S., McDonald K.C., McNorton J., Miller P.A., Melton J.R., Morino I., Müller J., Murguía-Flores F., Naik V., Niwa Y., Noce S., O'Doherty S., Parker R.J., Peng C., Peng S., Peters G.P., Prigent C., Prinn R., Ramonet M., Regnier P., Riley W.J., Rosentreter J.A., Segers A., Simpson I.J., Shi H., Smith S.J., Paul Steele L., Thornton B.F., Tian H., Tohjima Y., Tubiello F.N., Tsuruta A., Viovy N., Voulgarakis A., Weber T.S., van Weele M., van der Werf G.R., Weiss R.F., Worthy D., Wunch D., Yin Y., Yoshida Y., Zhang W., Zhang Z., Zhao Y., Zheng B., Qi Z., Qiu Z., Zhuang Q. Global methane budget 2020. *Earth System Science Data*. 2020; (12):1561–1623. DOI:10.5194/essd-12-1561-2020. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/12/1561/2020>.
 3. Montzka S.A. The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI). National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory, 2023. Available at: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html> (accessed December 01, 2023).
 4. Valin L.C., Russell A.R., Cohen R.C. Variations of OH radical in an urban plume inferred from NO₂ column measurements. *Geophysical Research Letters*. 2013; (40):1856–1860. DOI:10.1002/grl.50267. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/grl.50267>.
 5. Laughner J.L., Cohen R.C. Direct observation of changing NO_x lifetime in North American cities. *Science*. 2019; (366):723–727. DOI:10.1126/science.aax6832. Available at: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aax6832>.
 6. Chevallier F., Crotwell A., Gerbig C., Jordan A., Lan X., Loh Z., Luijkx I., Miller J., Sawa Y., Tarasova O., Vermeulen A., Weiss R., Warneke T., Yver C. WMO greenhouse gas bulletin. WMO. 2022; (19):11. Available at: <https://public.wmo.int/en/greenhouse-gas-bulletin>.
 7. WMO strategic plan 2024–2027. World Meteorological Congress. Nineteenth Session, 22 May to 2 June 2023, Geneva, Cg-19/Doc. 3.1(1):18. Available at: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/greenhouse-gases/global-greenhouse-gas-monitoring-infrastructure> (accessed December 01, 2023).
 8. A WMO-coordinated global greenhouse gas monitoring infrastructure. World Meteorological Congress. Seventy-Sixth Session, 27 February to 3 March 2023, Geneva, EC-76/Inf. 4(3–1):39. Available at: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/greenhouse-gases/global-greenhouse-gas-monitoring-infrastructure> (accessed December 01, 2023).
 9. Keeling C.D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*. 1960; (12):200–203.
 10. Blake D.R., Mayer E.W., Tyler S.C., Makide Y., Montague D.C., Rowland F.S. Global increase in atmospheric methane concentrations between 1978 and 1980. *Geophysical Research Letters*. 1982; (9):477–480. DOI:10.1029/GL009i004p00477. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/GL009i004p00477>.
 11. Kaufman Y.J., Herring D.D., Ranson K.J., Collatz G.J. Earth observing system AM1

- mission to Earth. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998; (36):1045–1055. DOI:10.1109/36.700989. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/700989>.
12. **Parkinson C.L.** Aqua: an Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003; (41):173–183. DOI:10.1109/TGRS.2002.808319. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1196036>.
13. **Salomonson V.V., Barnes W.L., Maymon P.W., Montgomery H.E., Ostrow H.** MODIS: advanced facility instrument for studies of the Earth as a system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1989; (27):145–153. DOI:10.1109/36.20292. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/20292>.
14. **Justice C.O., Vermote E., Townshend J.R.G., Defries R., Roy D.P., Hall D.K., Salomonson V.V., Privette J.L., Riggs G., Strahler A., Lucht W., Myneni R.B., Knyazikhin Y., Running S.W., Nemani R.R., Zhengming W., Huete A.R., van Leeuwen W., Wolfe R.E., Giglio L., Muller J., Lewis P., Barnsley M.J.** The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998; (36):1228–1249. DOI:10.1109/36.701075. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/701075>.
15. **Lagutin A.A., Nikulin Yu.A., Zhukov A.P., Lagutin A.I., Reznikov A.N., Sinitsin V.V., Shmakov I.A.** Mathematical technologies for efficient regional satellite monitoring of the atmosphere and land surface parameters. Pt I. MODIS. *Computational Technologies*. 2007; 12(2):67–89. (In Russ.)
16. **Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C., Goldberg M.D., Kalnay E., McMillin L.M., Revercomb H., Rosenkranz P.W., Smith W.L., Staelin D.H., Strow L.L., Susskind J.** AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003; (41):253–264. DOI:10.1109/TGRS.2002.808356. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1196043>.
17. **Lagutin A.A., Nikulin Yu.A., Lagutin A.I., Sinitsin V.V., Shmakov I.A.** Mathematical technologies for regional satellite monitoring of the atmosphere and land surface parameters operating closely to the real time regime. Pt II. AIRS. *Computational Technologies*. 2007; 12(5):78–102. (In Russ.)
18. **Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V., Revyakin A.I.** Restoration of the allweather mode of the AIRS/AMSU hyperspectral system of the AQUA satellite using the ATMS microwave radiometer of the SUOMI-NPP and NOAA-20 satellites. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2022; 58(2):180–187. DOI:10.3103/S8756699022020066. Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S8756699022020066>.
19. **Weng F., Zou X., Sun N., Yang H., Tian M., Blackwell W.J., Wang X., Lin L., Anderson K.** Calibration of Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013; 118(19):11187–11200. DOI:10.1002/jgrd.50840. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgrd.50840>.
20. **Goldberg M.D., Kilcoyne H., Cikanek H., Mehta A.** Joint polar satellite system: the United States next generation civilian polar-orbiting environmental satellite system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013; 118(24):13463–13475. DOI:10.1002/2013JD020389. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013JD020389>.
21. **Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V., Tuchina N.V.** Estimation of natural gas flaring volume at the Western Siberia flares using satellite night-time data in the visible and near-infrared range. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019; (2534). Available at: https://ceur-ws.org/Vol-2534/03_keynote.pdf.
22. **Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V.** Methane emission by petroleum industry in Western Siberia according to satellite observations. *Proceedings SPIE*. 2021; (11916):119166N. DOI:10.1117/12.2603438. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11916/119166N/Methane-emission-by-petroleum-industry-in-Western-Siberia-according-to/10.1117/12.2603438.full>.
23. **Rausch K., Houchin S., Cardema J., Moy G., Haas E., De Luccia F.J.** Automated calibration of the Suomi national polar-orbiting partnership (S-NPP) visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) reflective solarbands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013; 118(13):13434–13442. DOI:10.1002/2013JD020479. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013JD020479>.
24. **De Laat A.T.J., Gloudemans A.M.S., Aben I., Krol M., Meirink J.F., van der Werf G.R., Schrijver H.** Scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric cartography carbon mono-

- xide total columns: statistical evaluation and comparison with chemistry transport model results. *Journal of Geophysical Research*. 2007; (112):D12310. DOI:10.1029/2006JD008256. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JD008256>.
25. Cressot C., Chevallier F., Bousquet P., Crevoisier C., Dlugokencky E.J., Fortems-Cheiney A., Frankenberg C., Parker R., Pison I., Scheepmaker R.A., Montzka S.A., Krummel P.B., Steele L.P., Langenfelds R.L. On the consistency between global and regional methane emissions inferred from SCIAMACHY, TANSO-FTS, IASI and surface measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014; (14):577–592. DOI:10.5194/acp-14-577-2014. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/14/577/2014/acp-14-577-2014.html>.
 26. Feng L., Palmer P.I., Bösch H., Parker R.J., Webb A.J., Correia C.S.C., Deutscher N.M., Domingues L.G., Feist D.G., Gatti L.V., Gloor E., Hase F., Kivi R., Liu Y., Miller J.B., Morino I., Susmann R., Strong K., Uchino O., Wang J., Zahn A. Consistent regional fluxes of CH₄ and CO₂ inferred from GOSAT proxy XCH₄: XCO₂ retrievals, 2010–2014. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017; (17):4781–4797. DOI:10.1098/rsta.2010.0240. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/17/4781/2017>.
 27. Veefkind J.P., Aben I., McMullan K., Förster H., de Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H.J., de Haan J.F., Kleipool Q., van Weele M., Hasekamp O., Hoogeveen R., Landgraf J., Snel R., Tol P., Ingmann P., Voors R., Kruizinga B., Vink R., Visser H., Levelt P.F. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*. 2012; (120):70–83. DOI:10.1016/j.rse.2011.09.027. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425712000661>.
 28. Frankenberg C., Pollock R., Lee R.A.M., Rosenberg R., Blavier J.-F., Crisp D., O'Dell C.W., Osterman G.B., Roehl C., Wennberg P.O., Wunch D. The orbiting carbon observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using prelaunch direct sun measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2015; (8):301–313. DOI:10.5194/amt-8-301-2015. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/8/301/2015>.
 29. Reuter M., Buchwitz M., Schneising O., Krautwurst S., O'Dell C.W., Richter A., Bovensmann H., Burrows J.P. Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: co-located regional CO₂ and NO₂ enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019; (19):9371–9383. DOI:10.5194/acp-19-9371-2019. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/19/9371/2019>.
 30. Eldering A., Taylor T.E., O'Dell C.W., Pavlick R. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2019; (12):2341–2370. DOI:10.5194/amt-12-2341-2019. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/12/2341/2019>.
 31. Fisher J.B., Lee B., Purdy A.J., Halverson G.H., Dohlen M.B., Cawse-Nicholson K., Wang A., Anderson R.G., Aragon B., Arain M.A., Baldocchi D.D., Baker J.M., Barral H., Bernacchi C.J., Bernhofer C., Biraud S.C., Bohrer G., Brunsell N., Cappelaere B., Castro-Contreras S., Chun J., Conrad B.J., Cremonese E., Demarty J., Desai A.R., De Ligne A., Foltýnová L., Goulden M.L., Griffis T.J., Grünwald T., Johnson M.S., Kang M., Kelbe D., Kowalska N., Lim J.-H., Maïnassara I., McCabe M.F., Missik J.E.C., Mohanty B.P., Moore C.E., Morillas L., Morrison R., Munger J.W., Posse G., Richardson A.D., Russell E.S., Ryu Y., Sanchez-Azofeifa A., Schmidt M., Schwartz E., Sharp I., Šigut L., Tang Y., Hulley G., Anderson M., Hain C., French A., Wood E., Hook S. ECOSTRESS: NASA's next generation mission to measure evapotranspiration from the international space station. *Water Resources Research*. 2020; 56(4):e2019WR026058. DOI:10.1029/2019WR026058. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019WR026058>.
 32. Li X., Xiao J., He B. Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests. *Remote Sensing of Environment*. 2018; (204):659–671. DOI:10.1016/j.rse.2017.09.034. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425717304467>.
 33. Li X., Xiao J. TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production. *Remote Sensing of Environment*. 2022; (268):112748. DOI:10.1016/j.rse.2021.112748. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425721004685>.

34. **Guanter L., Bacour C., Schneider A., Aben I., van Kempen T.A., Maignan F., Retscher C., Köhler P., Frankenberg C., Joiner J., Zhang Y.** The TROPIS global sun-induced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission. *Earth System Science Data*. 2021; (13):5423–5440. DOI:10.5194/essd-13-5423-2021. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/13/5423/2021>.
35. **Poppe Terán C., Naz B.S., Graf A., Qu Y., Hendricks Franssen H.-J., Baatz R., Ciais P., Vereecken H.** Rising water-use efficiency in European grasslands is driven by increased primary production. *Communications Earth & Environment*. 2023; (4):95. DOI:10.1038/s43247-023-00757-x. Available at: <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00757-x>.
36. **Emmons L.K., Walters S., Hess P.G., Lamarque J.-F., Pfister G.G., Fillmore D., Granier C., Guenther A., Kinnison D., Laepple T., Orlando J., Tie X., Tyndall G., Wiedinmyer C., Baughcum S.L., Kloster S.** Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4). *Geoscientific Model Development*. 2010; (3):43–67. DOI:10.5194/gmd-3-43-2010. Available at: <https://gmd.copernicus.org/articles/3/43/2010>.
37. **Susskind J., Blaisdell J.M., Iredell L.** Improved methodology for surface and atmospheric soundings, error estimates, and quality control procedures: the atmospheric infrared sounder science team version-6 retrieval algorithm. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2014; (8):084994. DOI:10.1117/1.JRS.8.084994. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/journal-of-applied-remote-sensing/volume-8/issue-01/084994/Improved-methodology-for-surface-and-atmospheric-soundings-error-estimates-and/10.1117/1.JRS.8.084994>.
38. **Susskind J., Barnett C.D., Blaisdell J.M.** Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003; (41):390–409. DOI:10.1109/TGRS.2002.808236. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1196056>.
39. **Mordvin E.Yu., Lagutin A.A.** Metan v atmosfere Zapadnoy Sibiri: monografiya [Methane in the Atmosphere of the Western Siberia: Monograph]. Barnaul: Azbuka; 2016: 148. (In Russ.)
40. **Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., 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 SPIE*. 2023; (12780):1278062. DOI:10.1117/12.2690784. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12780/1278062/Regression-model-for-reconstruction-of-the-total-methane-content-according/10.1117/12.2690784.full>.
41. **Wunch D., Toon G.C., Blavier J.-F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., Wennberg P.O.** The total carbon column observing network. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2011; (369):2087–2112. DOI:10.1098/rsta.2010.0240. Available at: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2010.0240>.
42. **Van Geffen J., Boersma K.F., Eskes H., Sneep M., ter Linden M., Zara M., Veefkind J.P.** S5P TROPOMI NO₂ slant column retrieval: method, stability, uncertainties and comparisons with OMI. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020; (13):1315–1335. DOI:10.5194/amt-13-1315-2020. Available at: <https://amt.copernicus.org/articles/13/1315/2020>.
43. **Eskes H., van Geffen J., Boersma F., Eichmann K.-U., Apituley A., Pederngnana M., Sneep M., Veefkind J.P., Loyola D.** Sentinel-5 precursor/TROPOMI level 2 product user manual nitrogendioxide. S5P-KNMI-L2-0021-MA. Royal Netherlands Meteorological Institute; 2022. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/4682535/Sentinel-5P-Level-2-Product-User-Manual-Nitrogen-Dioxide/ad25ea4c-3a9a-3067-0d1c-aaa56eb1746b> (accessed December 01, 2023).
44. **Jacobs N., Simpson W.R., Graham K.A., Holmes C., Hase F., Blumenstock T., Tu Q., Frey M., Dubey M.K., Parker H.A., Wunch D., Kivi R., Heikkinen P., Notholt J., Petri C., Warneke T.** Spatial distributions of XCO₂ seasonal cycle amplitude and phase over northern high-latitude regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021; (21):16661–16687. DOI:10.5194/acp-21-16661-2021. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/21/16661/2021>.
45. **OCO-2 Science Team, Gunson M., Eldering A.** OCO-2 level 2 bias-corrected XCO₂ and other select fields from the full-physics retrieval aggregated as daily files, retrospective processing V10r, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC).

2020. DOI:10.5067/E4E140XDMPO2. Available at: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC02_L2_Lite_FP_10r/summary (accessed December 01, 2023).
46. **OCO-2/OCO-3 Science Team, Chatterjee A., Payne V.** OCO-3 level 2 bias-corrected XCO₂ and other select fields from the full-physics retrieval aggregated as daily files, retrospective processing v10.4r, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2022. DOI:10.5067/8QR1N7IV81RD. Available at: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OC03_L2_Lite_FP_10.4r/summary (accessed December 01, 2023).
47. **Mordvin E.Yu., Lagutin A.A., Volkov N.V.** Interannual variability of CO₂ content in the atmosphere of the south of Western Siberia according to satellite observations in 2014–2021. *Proceedings SPIE*. 2022; (12341):123413R. DOI:10.1117/12.2645052. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12341/2645052/Interannual-variability-of-CO-2-content-in-the-atmosphere-of/10.1117/12.2645052>.
48. **Shokin Yu.I., Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V.** Technology for estimating gross primary production based on satellite observation data. *Computational Technologies*. 2023; 28(2):103–114. DOI:10.25743/ICT.2023.28.2.009. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53926693>. (In Russ.)
49. **Liu Z., Ciais P., Deng Z., Lei R., Davis S.J., Feng S., Zheng B., Cui D., Dou X., Zhu B., Guo R., Ke P., Sun T., Lu C., He P., Wang Y., Yue X., Wang Y., Lei Y., Zhou H., Cai Z., Wu Y., Guo R., Han T., Xue J., Boucher O., Boucher E., Chevallier F., Tanaka K., Wei Y., Zhong H., Kang C., Zhang N., Chen B., Xi F., Liu M., Bréon F.-M., Lu Y., Zhang Q., Guan D., Gong P., Kammen D.M., He K., Schellnhuber H.J.** Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nature Communications*. 2020; (11):5172. DOI:10.1038/s41467-020-18922-7. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-18922-7>.
50. **Reuter M., Buchwitz M., Schneising O., Krautwurst S., O'Dell C.W., Richter A., Bovensmann H., Burrows J.P.** Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: colocated regional CO₂ and NO₂ enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019; 19(14):9371–9383. DOI:10.5194/acp-19-9371-2019. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/19/9371/2019>.
51. **MacDonald C.G., Mastrogiacomo J.-P., Laughner J.L., Hedelius J.K., Nassar R., Wunch D.** Estimating enhancement ratios of nitrogen dioxide, carbon monoxide and carbon dioxide using satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2023; (23):3493–3516. DOI:10.5194/acp-23-3493-2023. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/23/3493/2023>.
52. **Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.** The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020; (146):1999–2049. DOI:10.1002/qj.3803. Available at: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3803>.
53. **Hakkarainen J., Ialongo I., Maksyutov S., Crisp D.** Analysis of four years of global XCO₂ anomalies as seen by orbiting carbon observatory-2. *Remote Sensing*. 2019; (11):850. DOI:10.3390/rs11070850. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/7/850>.
54. **Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V.** Estimates of the terrestrial gross primary production for the south of Western Siberia in 2014–2021 according to OCO-2 and OCO-3 data. *Proceedings SPIE*. 2022; (12341):123413S. DOI:10.1117/12.2645053. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12341/2645053/Estimates-of-the-terrestrial-gross-primary-production-for-the-south/10.1117/12.2645053>.
55. **Volkov N.V., Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Sinitin V.V.** Net primary production for the south of Altai Krai according to ECOSTRESS radiometer data. *Proceedings SPIE*. 2023; (12780):127803C. DOI:10.1117/12.2690789. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12780/127803C/Net-primary-production-for-the-south-of-Altai-Krai-according/10.1117/12.2690789>.