

Измерения распределения содержания парниковых газов в атмосфере со спутников

А.Б. Успенский

Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета",
Россия, 123242, Москва, Большой Предтеченский пер., 7

Адрес для переписки: *uspensky@planet.iitp.ru*

Реферат. Выполнен обзор работ последнего двадцатилетия, посвященных развитию в нашей стране и за рубежом методов и средств измерения со спутников полей концентрации долгоживущих углеродсодержащих парниковых газов в атмосфере – диоксида углерода CO_2 и метана CH_4 . Кратко рассмотрены физико-математические основы интерпретации измерений современных спутниковых спектрометров ближнего инфракрасного и инфракрасного диапазонов спектра. Приведены сведения о программах развития отечественных и зарубежных спутниковых систем мониторинга содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере, а также о наземных наблюдательных сетях, данные которых можно использовать для калибровки и валидации спутниковых информационных продуктов.

Ключевые слова. Парниковый газ, диоксид углерода, метан, атмосферные концентрации, выбросы, наземные сети наблюдений, ИК-зондировщик, Фурье-спектрометр.

Satellite-based measurements of the greenhouse gases concentration in the atmosphere

A.B. Uspensky

State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta",
3, Bolshoy Predtechensky st., 123242, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: *uspensky@planet.iitp.ru*

Abstract. The paper provides an overview of the twenty-year development of methods and measuring techniques for the satellite-based detection of the concentration of long-lived carbon-containing greenhouse gases in the atmosphere – carbon dioxide CO_2 and methane CH_4 , both in Russia and abroad. The physical and mathematical foundations for data “inversion” of near-IR and IR spectrometers are given. The information on Russian and foreign satellite system for atmospheric CO_2 and CH_4 monitoring is presented together with ground-based network used for calibration and validation purposes.

Keywords. Greenhouse gas, carbon dioxide, methane, atmospheric concentration, ground-based network, IR-sounder, Fourier-transform spectrometer.

Введение

Климат нашей планеты в значительной степени определяется содержанием радиационно-активных газовых составляющих атмосферы, к которым относятся, прежде всего, водяной пар H_2O , диоксид углерода CO_2 , метан CH_4 , закись азота N_2O , озон O_3 и хлорфторуглероды (CFCs). Перечисленные газовые составляющие, а также облака и аэрозоли влияют на термический режим атмосферы за счет парникового эффекта – поглощения инфракрасного излучения земной поверхности и атмосферы. Повышение концентрации долгоживущих парниковых газов (ДПГ), в том числе углеродсодержащих – CO_2 и CH_4 приводит к усилению радиационного воздействия (форсинга) и к повышению температуры в приповерхностном слое атмосферы, см., напр., (Семенов, 2015; IPCC, 2014).

Диоксид углерода является самым важным антропогенным ДПГ с наибольшим радиационным воздействием (1.4 Вт/м^2 или ~66% общего радиационного воздействия). Его атмосферные концентрации выросли более чем на 40% с доиндустриальных времен, причем около 87% этого прироста приходится на сжигание ископаемого топлива и производство цемента. Выбросы CO_2 происходят преимущественно из локализованных источников, а на города приходится более 70% глобальных выбросов CO_2 (Dlugokencky, Tans, 2021).

Метан – второй по значимости антропогенный парниковый газ. Радиационное воздействие выбросов CH_4 характеризуется потенциалом глобального потепления (GWP), который на временном горизонте 100 лет в расчете на единицу выброса почти в 30 раз больше GWP для CO_2 , см., например, (Кузовкин, Семенов, 2020). Рост концентрации атмосферного метана возобновился с 2007 года после периода стабилизации 2000-2006 гг. Предложено несколько гипотез, объясняющих повышение содержания CH_4 в атмосфере либо увеличением антропогенных выбросов, связанных с добычей ископаемого топлива и сельским хозяйством, либо за счет возрастания потоков природного происхождения (Киселев, Кароль, 2019; Кузовкин, Семенов, 2020). Ряд современных оценок показывают, что возобновление роста CH_4 , скорее всего, связано с увеличением антропогенных выбросов.

Согласно (Семенов, Кузовкин, 2019; Voesch et al., 2021) глобальные средние концентрации диоксида углерода и метана увеличивались почти линейно с 2007 г., причем глобальное среднее содержание CO_2 по состоянию на 2020 год составляло более чем 410 млн^{-1} (по сравнению с доиндустриальными уровнем около 280 млн^{-1}), а CH_4 – около 1860 млрд^{-1} (по сравнению с доиндустриальным уровнем около 720 млрд^{-1}).

Современная наземная сеть станций наблюдений за концентрациями парниковых газов, функционирование которых координируется Программой Глобальной службы атмосферы (ГСА или GAW – Global Atmospheric Watch) под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО), включает около 150 станций (WMO GHG Bulletin, 2020; World Data Centre, 2020).

Сеть станций ГСА, а также измерения на различных высотах (Аршинов и др., 2012) над конкретными регионами, производимые контактным или дистанционным методом с самолетов, аэростатов, либо с помощью наземных спектрометров, не могут, к сожалению, обеспечить глобальный мониторинг распределения атмосферных CO_2 , CH_4 с требуемым пространственным и временным разрешением (особенно, над океанами, зонами бореальных лесов и экосистем). Несмотря на высокую точность сетевых измерений концентрации CO_2 (порядка 0.1 млн^{-1} в терминах отношения смеси), по-прежнему сохраняется большая неопределенность при оценивании величины, местоположения и продолжительности приземных естественных и антропогенных потоков (выбросов/стоков).

Добиться радикального улучшения пространственного и временного разрешения глобальных данных о концентрациях атмосферных CO_2 , CH_4 можно только путем развития спутниковых методов измерений, ср. (Rayner, O'Brien, 2001). При этом величины среднего отношения смеси (усредненной в атмосферном столбе сухого воздуха мольной доли) диоксида углерода XCO_2 и метана XCH_4 должны измеряться со спутников с погрешностями, меньшими их естественной изменчивости и сравнимыми со скоростью ежегодного изменения.

Согласно обязательствам, принятым Россией в исполнение подписанного в апреле 2016 года Парижского соглашения (Paris agreement, 2015), необходимо добиться к 2030 г. выбросов парниковых газов, не превосходящих 70% от уровня 1990 г. Существующие методики инвентаризации выбросов парниковых газов за счет сжигания ископаемого топлива основаны на приближенных вычислениях и могут быть неточными и не объективными. За рубежом для верификации и уточнения результатов расчетной инвентаризации (количественной оценки) выбросов ДПП планируется использовать спутниковые системы мониторинга. В России также необходимо создать собственную спутниковую систему мониторинга для получения объективных данных о выбросах парниковых газов.

Настоящая статья содержит обзор работ последнего десятилетия, посвященных развитию методов и средств измерения со спутников полей концентрации (средней в атмосферном столбе) диоксида углерода и метана. Кратко рассмотрены физико-математические основы интерпретации измерений спутниковых спектрометров ближнего инфракрасного (БИК) и инфракрасного (ИК) диапазонов спектра, предназначенных для дистанционного определения XCO_2 и XCH_4 . Приведены сведения о программах развития зарубежных и отечественных спутниковых систем мониторинга упомянутых ДПП, а также о существующих наземных наблюдательных сетях, данные которых можно использовать для калибровки и валидации спутниковых информационных продуктов. Приведенная библиография содержит преимущественно работы обобщающего и/или обзорного характера, а также публикации, значимые, по мнению автора, для исследований по данной тематике.

Методы и средства измерений со спутников содержания диоксида углерода и метана в атмосфере

Спутниковый мониторинг атмосферных парниковых газов предполагает организацию наблюдений за содержанием (концентрациями) и за приповерхностными потоками (выбросами/стоками) природного и антропогенного происхождения. Причём спутниковые оценки концентрации являются «первичными», а методы локализации и количественной оценки приповерхностных потоков ДПП, по данным наблюдений космического и наземного базирования, выходят за рамки настоящей статьи и упоминаются только в контексте обсуждения требований к спутниковым системам и продуктам мониторинга.

Дадим краткий обзор спутниковых методов и средств измерения атмосферных концентраций CO_2 и CH_4 . В основе дистанционных измерений лежат (Guide to Instruments and Methods, 2018):

- а) методы эмиссионной спектроскопии (анализ спектров уходящего теплового излучения);
- б) методы дифференциального поглощения (анализ спектров отраженного и рассеянного солнечного излучения);
- в) методы лазерной абсорбционной спектроскопии LAS (в стадии экспериментальной обработки).

Перечисленные методы подразделяют на пассивные (методы групп а), б)) и активные (методы группы в)) в зависимости от использования естественного или искусственного источника излучения (Тимофеев, Васильев, 2003). В данном обзоре обсуждаются, в основном, пассивные методы.

Методы эмиссионной спектроскопии (Тимофеев, Васильев, 2003) базируются на анализе измерений спутниковых гиперспектральных (т.е. высокого спектрального разрешения) ИК-зондировщиков (Фурье-спектрометры IASI, CrIS, TES, HIRAS, ИКФС-2, дифракционный спектрометр AIRS), установленных на полярно-орбитальных (п/о) космических аппаратах (КА), см. базу данных OSCAR (интернет-ресурс <https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments>).

Спутниковый мониторинг атмосферной концентрации CO_2 , CH_4 (в терминах XCO_2 , XCH_4 или вертикальных профилей концентрации $Q(p)$, где p – давление) методами эмиссионной спектроскопии затруднен тем, что измерения ИК-зондировщиков, чувствительные к вариациям CO_2 , CH_4 , чувствительны также к вариациям вертикального профиля температуры $T(p)$ и наличию облачности в поле зрения прибора – главным мешающим факторам. Кроме того, измерения ИК-зондировщиков мало информативны по отношению к вертикальному распределению CO_2 и CH_4 (особенно в нижней тропосфере), что позволяет дистанционно оценивать с приемлемой точностью только интегральные характеристики типа XCO_2 , XCH_4 (Chedin et al., 2003; Turquety et al., 2004; Успенский и др., 2006). Перечисленные мешающие факторы и ограничения учитываются в алгоритмах интерпретации спутниковых данных («обращения» или численного решения обратных задач), а именно, для определения XCO_2 или XCH_4 привлекается априорная информация о $T(p)$ и филь-

труется облачность в поле зрения прибора, см., напр., (Кухарский, Успенский, 2009; Успенский и др., 2011; Masiello et al., 2018).

Данные ИК-зондировщиков типа AIRS, IASI, CrIS не были специально предназначены для дистанционного определения XCO_2 , XCH_4 ; однако, из-за достаточно высокого спектрального разрешения (когда можно выделить максимально чувствительные каналы по отношению к вариациям CO_2 и CH_4 и минимизировать влияние вариаций водяного пара и температуры) удастся, согласно ряду современных оценок, обеспечить глобальный мониторинг XCO_2 , XCH_4 в средней и верхней тропосфере с достаточно высоким пространственным разрешением и точностью порядка 2 млн^{-1} и 5 млрд^{-1} соответственно на пространственно-временном масштабе 100 км/1 неделя при отсутствии облачности в поле зрения прибора.

Более эффективными для дистанционного определения XCO_2 и XCH_4 в нижней тропосфере оказались методы группы б), поскольку измерения отраженного и рассеянного солнечного излучения с высоким спектральным разрешением в БИК области спектра более чувствительны к изменениям концентрации ДПП вблизи поверхности, где расположено большинство источников и поглотителей (Buchwitz et al., 2000; Schneising et al., 2008; Kuze et al., 2009).

Методы группы б) первоначально были реализованы с помощью спектрометра SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric CHartography, КА Envisat, Европа, 2002-2012гг.), см. (Bovensmann et al., 1999). Подобно методам группы а) получение спутниковых оценок XCO_2 и XCH_4 затруднено влиянием мешающих факторов – рассеянием излучения облачными частицами и аэрозолями, попадающими в поле зрения прибора. Причем искажающее влияние облачности и аэрозолей более сильное, нежели для измерений ИК-зондировщиков. Поэтому алгоритмы «обращения» спутниковых данных (Buchwitz et al., 2000; Buchwitz et al., 2017), обязательно должны включать процедуры фильтрации сцен с облачностью и коррекции систематических смещений, вызванных влиянием аэрозолей.

В отличие от «обращения» данных ИК-зондировщиков точное задание профилей $T(p)$ не требуется, но нужно правильно идентифицировать тип подстилающей поверхности. Например, наличие снежного покрова в пунктах зондирования в весенние и осенние месяцы затрудняет детектирование и фильтрацию сцен с разорванной и полупрозрачной облачностью в поле зрения прибора и может увеличить погрешность спутниковых оценок (Рублев, Успенский, 2006).

После демонстрации возможности дистанционного определения XCO_2 и XCH_4 в атмосфере, по данным SCIAMACHY/Envisat, были организованы специальные спутниковые миссии для мониторинга концентрации CO_2 (GOSAT, OCO-2, OCO-3, TANSAT, GOSAT-2) и CH_4 (ACE-FTS, S-5P и GOSAT-2).

Японский спутник GOSAT (The Greenhouse Gases Observing Satellite) – первый специализированный КА глобального мониторинга ДПП – находится на орбите с января 2009 г. и до сих пор обеспечивает получение каждые 3 дня глобальных оценок XCO_2 и XCH_4 . Как продолжение миссии GOSAT, в октя-

бре 2018 г. был запущен КА GOSAT-2. GOSAT и GOSAT-2 оснащены Фурье-спектрометрами TANSO-FTS и TANSO-FTS-2 для измерений с высоким спектральным разрешением отраженного солнечного и теплового излучения. Кроме того, в состав полезной нагрузки этих КА входит многоканальный имаджер CAI (Cloud and Aerosol Imager) высокого пространственного разрешения, предназначенный для детектирования и характеристики оптических свойств и вертикального распределения облаков и аэрозолей в пределах поля зрения (пикселей) спектрометра TANSO-FTS. Алгоритмы «обращения» данных TANSO-FTS рассмотрены в (Kuze et al., 2009; Yoshida et al., 2013; Noël et al., 2021). По данным японского Центра NIES (National Institute for Environmental Studies), планируется достигнуть точности оценивания XCO_2 и XCH_4 порядка 0.5 млн^{-1} и 5 млрд^{-1} соответственно на пространственно-временном масштабе $500 \text{ км}/1 \text{ месяц}$, см. <https://www.eorc.jaxa.jp/GOSAT/product.html>.

Космическое агентство NASA (США) запустило в 2014 г. специализированный п/о спутник OCO-2 (Orbital Carbon Observatory-2 или "Орбитальная углеродная обсерватория-2") с одноименной аппаратурой, представляющей модернизированный вариант спектрометра SCIAMACHY: 3 спектрометра высокого разрешения регистрируют отраженное солнечное излучение в слабой (на длине волны 1.61 мкм) и сильной (на длине волны 2.06 мкм) полосах поглощения CO_2 и полосе поглощения кислорода (на длине волны 0.76 мкм) с достаточно высоким горизонтальным разрешением ($\sim 1.5 \times 2.5 \text{ км}^2$). Усовершенствованные методики интерпретации спутниковых данных (Reuter et al., 2019) и калибровка спутниковых оценок XCO_2 с помощью данных наземной спектроскопической сети TCCON и самолетных измерений позволили приблизиться к теоретически возможной точности ($\sim 1 \text{ млн}^{-1}$), см. (Wunch et al., 2017; Liang et al., 2017; Никитенко и др., 2020).

Научная цель установки в 2019 г. на борту Международной космической станции аппаратуры OCO-3 (аналогичной OCO-2) заключается в получении оценок XCO_2 высокого пространственного разрешения, необходимых для локализации и количественных оценок приповерхностных потоков CO_2 регионального масштаба ($\geq 1000 \text{ км}$), а также понимания процессов, контролирующих их сезонную изменчивость, см. интернет-ресурс <https://ocov3.jpl.nasa.gov/science/>.

Существенный прогресс в развитии спутникового мониторинга XCH_4 был достигнут после запуска в 2017 г. КА Sentinel-5P (S-5P) Европейского космического агентства. Единственной полезной нагрузкой Sentinel-5P является гиперспектральный дифракционный спектрометр TROPOMI (TROPO spheric Monitoring Instrument), регистрирующий отраженное солнечное излучение в диапазонах длин волн $270\text{--}495$, $675\text{--}775$, $2305\text{--}2385 \text{ нм}$ и предназначенный для мониторинга газового состава тропосферы. Современный алгоритм «обращения» данных измерений TROPOMI обеспечивает дистанционное определение XCH_4 с высокими точностью, временным и пространственным разрешением. Согласно сопоставлению с референсными данными – наблюдениями наземной сети TCCON – среднее смещение и стандартное отклонение спутниковых оценок XCH_4 составляют – 3.4 и 5.6 млрд^{-1} соответственно (Lorente et al., 2021). Как и в случае анализа данных SCIAMACHY и CO-2, рассеяние

измеренного излучения аэрозолями и перистыми облаками является основным мешающим фактором при построении спутниковых оценок XCH_4 . Кроме того, точность может ухудшиться при зондировании над заснеженными поверхностями или поверхностями с низким и высоким альбедо.

В КНР разработаны и эксплуатировались 3 прибора для измерения парниковых газов из космоса: дифракционный спектрорадиометр AGS на КА TanSat, спектрометры GAS на КА FengYun-3D (FY - 3D) и GMI на КА Gaofen-5 (GF-5) для дистанционных измерений содержания парниковых газов.

Следует отметить в заключение данного раздела, что большинство перечисленных спутниковых миссий имели статус экспериментальных, но после периода опытной эксплуатации стали оперативными. К данным КА GOSAT, GOSAT-2, OCO-2 и результатам мониторинга XCO_2 , XCH_4 имеется свободный доступ, см. интернет-ресурсы <https://www.eorc.jaxa.jp/GOSAT/product.html> https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OCO2_L2_Lite_FP_10r/summary?keywords=OCO-2.

Также в свободном доступе оценки XCH_4 , получаемые по данным TROPOMI/S-5P.

Программы развития спутниковых систем мониторинга парниковых газов

Программы дальнейшего развития спутниковых систем мониторинга ДПГ формируются международными организациями и ведущими космическими агентствами, исходя из требований пользователей к «первичным» продуктам мониторинга – полям XCO_2 и XCH_4 (Munro, 2020). Указанные требования, вообще говоря, трансформируются при решении задачи детектирования и количественной оценки приземных выбросов CO_2 и CH_4 из локализованных источников естественного и антропогенного происхождения. Дело в том, что с математической точки зрения оценка приповерхностных потоков, по данным спутниковых и наземных измерений, представляет собой некорректно поставленную обратную задачу – недоопределённую, с неединственным решением. Общепринятая методология построения устойчивого численного решения этой задачи с использованием априорной информации об искомых потоках, а также химико-транспортных моделей и систем атмосферной инверсии (atmospheric inversion systems) ужесточает требования к «первичным» продуктам спутникового мониторинга, см., например, (CEOS, 2018).

В 1992 г. была подготовлена Программа развития Глобальной Климатической Наблюдательной Системы (The Global Climate Observing System, GCOS). При мониторинге глобальных климатических изменений в качестве объектов долговременных наблюдений наземного и космического базирования выступают т.н. существенные климатические переменные, в том числе средние (глобальные и региональные) концентрации CO_2 , CH_4 в атмосфере (GCOS, 2011; GCOS, 2016).

Виртуальная группа по составу атмосферы (AC-VC), созданная по инициативе Комитета по Спутникам Наблюдения Земли (The Committee on Earth Observation Satellites, CEOS), подготовила предложения по составу и ключе-

вым характеристикам глобальной спутниковой системы мониторинга концентраций CO_2 и CH_4 в атмосфере и их естественных и антропогенных приземных потоков (CEOS, 2018).

Координационная группа по метеорологическим спутникам (Coordination Group on Meteorological Satellites, CGMS) создала совместную с CEOS рабочую группу по климату и парниковым газам, на которой обсуждаются планы космических агентств по развитию спутниковых систем мониторинга парниковых газов (<https://www.cgms-info.org/documents/CGMS-45-FullReport.pdf>).

Для оказания помощи странам в выполнении их обязательств по сокращению выбросов парниковых газов в соответствии с Парижским соглашением ВМО при поддержке GCOS, CEOS и CGMS приступила к созданию Интегрированной Глобальной информационной системы по парниковым газам (Integrated Global Greenhouse Gas Information System – IG³IS). IG³IS задумана как информационная система, основанная на наблюдениях существующих сетей, и имеет целью повышение детализации наблюдений и анализа полей содержания атмосферных ДПГ в глобальном масштабе для поддержки мероприятий по сокращению выбросов парниковых газов, см. <https://community.wmo.int/activity-areas/gaw/science-for-services/ig3is>.

С учетом опыта эксплуатации экспериментальных и оперативных спутниковых систем GCOS, CEOS и CGMS при координации ВМО регулярно обновляют требования к продуктам космического мониторинга ДПГ в части точности, покрытия (глобальное или региональное), пространственного (по горизонтали и вертикали) и временного разрешения. В соответствии с (GCOS, 2016) и (CEOS, 2018) случайная погрешность оценивания XCO_2 , XCH_4 (без временного усреднения) не должна превосходить 0.5 млн^{-1} и 5 млрд^{-1} , а систематическое смещение – меньше 0.3 млн^{-1} и 2 млрд^{-1} соответственно при горизонтальном разрешении порядка 4 км^2 и выше. К указанным точностным характеристикам можно приблизиться (в условиях отсутствия или учета мешающих факторов), используя аппаратуру типа спектрометров БИК и ИК диапазонов высокого спектрального разрешения.

Необходимое временное разрешение (не менее 4 раз в сутки) и глобальность покрытия можно обеспечить путем создания соответствующей группировки КА. В (CEOS, 2018) предлагается для этих целей создание международной группировки из 3-х или более КА на приполярных солнечно-синхронных орбитах, 3-х геостационарных КА (с точками стояния вблизи 85°з.д. , 20°в.д. , 105°в.д. – над Сев. и Южной Америкой, Европой и Африкой, Юго-Восточной Азией) и 1-2 КА на высокоэллиптических орбитах.

Основная полезная нагрузка п/о спутников – изображающие спектрометры БИК диапазона типа OCO-2 с полосой захвата $> 200 \text{ км}$ и Фурье-спектрометры ИК диапазона типа TANSO-FTS или IASI. При этом основная цель спутниковых миссий типа IASI – температурно-влажностное зондирование атмосферы, а попутная – мониторинг ДПГ и других малых газов. В качестве дополнительной нагрузки предлагается аппаратура оптического диапазона спектра (имаджеры, многоугловые поляриметры). При этом пространственное разрешение измерений дополнительной аппаратуры должно быть выше раз-

решения измерений основной аппаратуры, чтобы можно было детектировать облачные образования и аэрозоли, занимающие более 5% отдельного пиксела.

Полезная нагрузка геостационарных КА должна включать спектрометры БИК диапазона, подобные устанавливаемым на п/о КА, но более грубого пространственного разрешения (порядка 10 км^2). Обсуждается также установка гиперспектральных ИК-зондировщиков для зондирования в любое время суток. Крайне желательна, кроме того, установка дополнительной аппаратуры (подобно п/о КА) более высокого пространственного разрешения для «борьбы» с искажающим влиянием облачности и аэрозолей.

На высокоэллиптические КА (Asmus et al., 2007) в более отдаленной перспективе предлагается устанавливать спектрометры видимого и БИК диапазонов. В частности, в Канаде обсуждается проект AIM-North создания группировки из двух спутников на высокоэллиптической орбите с указанной полезной нагрузкой для обеспечения мониторинга ДПП и качества воздуха в зоне $40\text{--}80^\circ \text{с. ш.}$ над сушей несколько раз в день, см. интернет-ресурс <http://aim-north.ca/>.

Полезным для повышения точности детектирования и количественных оценок антропогенных выбросов CO_2 является установка на п/о КА спектрометров типа TROPOMI для регистрации отраженного солнечного излучения в полосах поглощения диоксида азота (NO_2) на длине волны 0.43 мкм и оксида углерода (CO) на длине волны 2.33 мкм . Диоксид азота выделяется совместно с CO_2 при сжигании ископаемого топлива, причем вследствие гораздо более короткого срока жизни концентрация NO_2 в шлейфах выбросов может на порядки превышать фоновые значения и измерительный «шум», вызванный процедурой «обращения» спутниковых данных. Тем самым, NO_2 является индикатором недавно выделившегося CO_2 (Reuter et al., 2019). В меньшей степени таким же индикатором может быть CO .

Ведущие космические агентства уже приступили к практической реализации предложений по созданию группировки КА оперативного мониторинга ДПП.

В рамках программы «The Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)» Европейское космическое агентство в сотрудничестве с Европейской комиссией и EUMETSAT прорабатывают создание группировки из 3-х п/о КА со сроком функционирования не менее 5 лет каждый для реализации будущей миссии по мониторингу антропогенных выбросов CO_2 (CO_2M). Подготовлен график будущих запусков КА, обработки и предоставления данных и продуктов для проведения глобальной инвентаризации CO_2 в 2028 году. Запуск первых двух КА планируется в 1 квартале 2026 г., а третий спутник группировки будет запущен позже. По данным измерений каждого КА, будут строиться оценки XCO_2 вдоль спутниковой трассы на освещенной солнцем части орбиты с полосой обзора $>250 \text{ км}$, пространственным разрешением $2 \text{ км} \times 2 \text{ км}$ и достаточно высокой точностью (случайная погрешность $<0.7 \text{ млн}^{-1}$ и систематическое смещение $<0.5 \text{ млн}^{-1}$), см. (Durand et al., 2021). Полезная нагрузка каждого КА будет включать гиперспектрометр типа OCO-2 видимого и БИК диапазонов с дополнительными каналами в спектральной обла-

сти 405-490 нм, данные которого предназначены для оценивания XCO_2 и XNO_2 (диоксид азота служит индикатором высокотемпературного сгорания ископаемого топлива и связанных с ним выбросов). Высокое качество оценок XCO_2 будет обеспечено даже в загрязненных промышленных регионах с большим количеством аэрозолей благодаря одновременным измерениям характеристик аэрозоля с помощью многоуглового поляриметра MAP. Поляриметрические измерения будут выполняться в шести спектральных каналах диапазона 410-865 нм для 40 углов. Кроме того, предусмотрена установка трехдиапазонного имаджера CLIM с пространственным разрешением лучше 400 м для детектирования небольших тропосферных облаков и перистой облачности (Durand et al., 2021).

В NOAA представлена архитектура создаваемой глобальной интегрированной системы наблюдений (наземного и космического базирования) за атмосферным углеродом и парниковыми газами (включая измерения содержания CO_2 , CH_4 и потоков CO_2). Планируется создание Глобальной справочной сети NOAA по парниковым газам наземного и самолетного базирования, предназначенной для определения потоков углерода между атмосферой, сушей и океаном (т.н. углеродный цикл), а также для контроля и калибровки спутниковых оценок XCO_2 (De Mazière et al., 2018). Важным компонентом будущей системы должна стать к началу 30-х годов группировка геостационарных КА GeoXO (Geostationary Extended Observations), причем на одном из космических аппаратов будет размещен гиперспектральный ИК-зондировщик, см. (<https://earth.gsfc.nasa.gov/bio/highlights/introduction-geostationary-extended-observations-geoxo-mission>).

Геостационарная углеродная обсерватория (Geocarb – Geostationary Carbon Cycle Observatory), разрабатываемая NASA и планируемая к запуску в 2024 г., будет продолжением п/о миссии OCO-2. Спектрометр, аналогичный OCO-2, будет размещен на геостационарном коммерческом спутнике связи. Состав наблюдений и точка стояния Geocarb позволят ежедневно получать около 10 млн оценок средних концентраций диоксида углерода, метана и монооксида углерода с пространственным разрешением от 5 до 10 км над Северной и Южной Америкой (<https://www.nasa.gov/feature/jpl/geocarb-a-new-view-of-carbon-over-the-americas>).

В связи с описанной миссией NASA следует упомянуть совместный франко-британский проект MicroCarb (Carbon Dioxide Monitoring Mission), который находится в стадии завершения – запуск на приполярную солнечно-синхронную орбиту малого КА MicroCarb (масса меньше 200 кг) со спектрометром типа OCO-2 запланирован на начало 2023 г., см. (<https://microcarb.cnes.fr/en/MICROCARB/index.htm>).

Космическое агентство Японии JAXA в качестве дальнейшего продолжения миссий GOSAT, GOSAT-2 и GCOM-W (Global Change Observation Mission-Water) планирует запустить в 2023 г. КА GOSAT-GW (Greenhouse Gases Observing Satellite – Greenhouse gases and Water cycle) с усовершенствованной бортовой измерительной аппаратурой TANSO-3 (Total Anthropogenic and Natural emissions mapping Spectrometer-3) более высокого спектрального и простран-

ственного разрешения для глобального мониторинга CO_2 и CH_4 и AMSR-3 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 3) для мониторинга водного цикла.

В нашей стране спутниковый мониторинг парниковых газов стал возможен после запуска на борту КА Метеор-М № 2 ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения (Фурье-спектрометр ИКФС-2), измерения которого позволяют оценивать общее содержание CO_2 , CH_4 в атмосфере. Дополнительные возможности получения спутниковых оценок атмосферных ДПГ (в смысле расширения состава и повышения точности) связаны с созданием будущих космических комплексов гидрометеорологического назначения (перспективных КА серий «Метеор-МП», «Электро-М»). В состав целевой аппаратуры п/о КА серии «Метеор-МП» должны быть включены усовершенствованный ИК-зондировщик ИКФС-3 и спектрометр атмосферных газов СА-МП высокого спектрального разрешения. Повышенная информативность измерений ИКФС-3 (в сравнении с аппаратурой ИКФС-2 расширен спектральный диапазон, улучшены спектральное и пространственное разрешение) позволит получать более точные оценки вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы, а также оценивать XCO_2 , XCH_4 , XCO . По данным СА-МП, регистрирующего отраженное солнечное излучение в диапазоне длин волн 0.24-2.4 мкм, предполагается получать более достоверные оценки XCO_2 и XCH_4 .

Запланирована также разработка гиперспектрального ИК-зондировщика ИКФС-ГС для установки на борту перспективного геостационарного КА "Электро-М". Кроме того, с учетом специфики организации мониторинга парниковых газов и климатических изменений в нашей «северной» стране (особенно для бореальных лесов и экосистем Сибири) представляется целесообразным проработка вопросов создания и размещения гиперспектральных ИК-зондировщиков на высокоэллиптических КА "Арктика-М" с орбитой типа «Молния» (Asmus et al., 2007).

Для удобства читателей в табл. 1, 2 суммированы сведения о существующих и/или планируемых спутниковых миссиях мониторинга ДПГ с использованием пассивных методов (название спутника/миссии, аппаратура, агентство, измеряемые ДПГ, полоса обзора и покрытие, пространственное разрешение, период функционирования, статус).

Остановимся коротко на активных методах спутникового мониторинга ДПГ. В NASA разработан импульсный многоволновой лидар с интегрированным по трассе дифференциальным поглощением (IPDA) для оценивания XCO_2 (Sun et al., 2021). Метод LAS обеспечивает высокоточное определение XCO_2 , по данным измерений отраженных лазерных импульсов на нескольких длинах волн в линии поглощения CO_2 (1572.33 нм) и вне её. Совместный франко-германский проект MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission) предусматривает разработку и запуск импульсного лидара IPDA на борту малого КА не позднее 2024 г. Измерения на нескольких длинах волн в линии поглощения CH_4 (1.645 мкм) обеспечат высокоточное определение XCH_4 (<https://merlin.cnes.fr/en/MERLIN/index.htm>).

Таблица 1. Перечень спутниковых миссий по мониторингу парниковых газов с использованием спектрометров видимого и БИК диапазонов

Table 1. List of satellite greenhouse gas monitoring missions using NIR and SWIR spectrometers

Спутник/Аппаратура/ Агентство	CO ₂	CH ₄	Полоса обзора, кмпокрытие	Разрешение	Период функц.	Статус
Envisat/ Sciamachy/ESA	+	+	960	30х60км ²	2002-2012	эксперимент.
GOSAT (Ibuki-2) / TANSO-FTS/JAXA	+	+	глобальное покрытие – 3 дня	10.5 км	2009-н. в.	оперативный
OCO-2/ OCO-2/NASA	+		10.6	1.3х2.3 км ²	2014-н. в.	оперативный
TanSAT/CarbonSpec/ CMA	+		20	1х2 км ²	2016-2019	оперативный
Sentinel-5P/ Tropomi/ESA		+	2600	7х7 км ²	2017-2023	оперативный
Feng Yun 3D/GAS/ CMA	+	+	глобальное покрытие – 1 месяц	10 км	2017-н. в.	оперативный
ISS / OCO-3/ NASA	+		11	4 км ²	2018-н. в.	эксперимент.
GOSAT-2/ TANSO-FTS-2/JAXA	+	+	160 глобальное покрытие – 3 дня	10.5 км	2018-2024	оперативный
MicroCarb/ Infrared Passive Spectrometer/ CNES	+		13.5	40 км ²	2021-2026	планируется
Metop-SG-A1 (Copernicus Sentinel5)/ UVNS/ESA	+	+	2713	7х7 км ²	2024-2031	планируется
GeoCarb (EVM-2)/ GeoCarb Instrument / NASA	+	+	Северная и Южная Америка	4х4 км ²	2024-2025	планируется геостационар, 85°W
GOSAT-GW /TANSO- 3/JAXA	+	+	глобальное покрытие – 3 дня	10.5 км	2024- ≥2030	планируется
CO ₂ monitoring mission (CO2M)/ NIRand SWIR spectrometer/ ESA	+	+	250	2х2 км ²	2026- ≥2030	планируется
Метеор – МП/ СА-МП/Роскосмос	+	+	1000	~ 10 км	После 2025	планируется

Примечание. Таблица составлена по уточненным данным NASA (2018) и данным Роскосмоса

Таблица 2. Перечень спутниковых миссий по мониторингу парниковых газов с использованием гиперспектральных ИК-зондировщиков

Table 2. List of satellite greenhouse gas monitoring missions using hyperspectral IR sounders

Спутник/ Аппаратура/ Агентство	Спектр. диа- пазон, см ⁻¹	CO ₂	CH ₄	Полоса обзора, км покрытие	Простр. разреш., км	Период функц.	Статус
Aqua/AIRS/ NASA	650-1136, 1216-1613, 2170-2674	+	+	1800	13.5х13.5	2002- н. в.	оперативный.
Metop A, B, C / IASI/Eumetsat	645-2760	+	+	2130	12	2007- н. в.	оперативный/ до 2027 г.
JPSS (SNPP, NOAA20)/CrIS/ NOAA	650-1095, 1210-1750, 2155-2550	+	+	2200	14	2012- н. в.	оперативный/ до 2040 г.
FY-3D/HIRAS/ CMA	650-1136, 1210-1750, 2155-2550	+		2250	16	2018- 2022	оперативный
FY-3E/ HIRAS-2/ CMA	650-1136, 1210-1750, 2155-2550	+		2700	16	2021≥ 2026	оперативный
Метеор-M№2, 2-3,2-4,2-5/ ИКФС-2 / Роскосмос	667-2000	+		1000-2500	30	2014- н. в.	оперативный/ до 2025 г.
Metop/IASI-NG/ Eumetsat	645-2760	+	+	2000	12	2024 и после	планируется
Метеор-МП / ИКФС-3 / Роскосмос	645-1200, 1200-2000, 2000-2760	+	+	1000-2000	15х15	после 2025	планируется
MTG-S/IRS/ Eumetsat	700-1210, 1600-2175	+		640х640	4х4	2024 и после	геостационар планируется
FY-4A, FY-4B / GIIRS/CMA	680-1130, 1650-2250	+	+	Китай, 5000 х 5000	16 (12)	2017 - 2028	геостационар оперативный
Электро-М / ИКФС-ГС / Роскосмос ¹⁾	680-1210 1600-2250	+	-	640х640	4х4 (8х8)	после 2025	геостационар, рассматри- вается

Примечание. ¹⁾ характеристики ИКФС-ГС могут уточняться.

Описанные миссии носят экспериментальный характер, но в более далекой перспективе предполагается запускать один или несколько п/о КА с лидами на борту для оперативного получения оценок XCO₂ и XCH₄ в целях калибровки и валидации аналогичных спутниковых оценок, полученных по данным пассивной аппаратуры.

Ключевая задача описанных спутниковых миссий – обнаружение увеличения концентрации CO₂ и CH₄ в результате антропогенных выбросов – не может решаться без достижения высокой точности продуктов мониторинга. В свою очередь, для этого необходимы оперативная калибровка и валидация оценок

XCO_2 и XCH_4 на основе достоверных (эталонных) измерений наземных наблюдательных сетей. Ввиду ограниченного объема статьи ограничимся краткой сводкой сведений о существующих наблюдательных сетях наземного базирования.

Сеть станций ГСА, упомянутая во Введении, дополняется в последние годы новыми наземными сетями. В состав новых наземных сетей, проводящих наблюдения XCO_2 и XCH_4 при координации Программы ГСА, входят Сеть наблюдений за общим содержанием атмосферного углерода (TCCON, the Total Carbon Column Observing Network, <https://tcccon-wiki.caltech.edu/and> www.tcccon.caltech.edu) и Совместная сеть наблюдений за общим содержанием атмосферного углерода (COCCON, the Collaborative Carbon Column Observing Network, <https://www.imk-asf.kit.edu/english/COCCON.php>), дополняющая сеть TCCON. Сеть TCCON функционирует с 2005 года и к 2011 г. состояла из 27 станций по всему миру (Wunch et al., 2011). Хорошее качество дистанционных измерений XCO_2 и XCH_4 на сети TCCON с помощью инфракрасных Фурье-спектрометров высокого спектрального разрешения позволило использовать их как эталонные в процедурах калибровки / валидации для спутниковых миссий OCO-2, OCO-3, GOSAT и S5P (Yoshida et al., 2013; Liang et al., 2017). Сеть COCCON создана в 2014 году и состоит из нескольких постоянных и мобильных станций с измерительной аппаратурой – спектроме-тром Брукера EM27/SUN, но данных в открытом доступе пока нет.

Кроме того, в настоящее время функционирует Глобальная справочная сеть NOAA по парниковым газам (GGGRN или Global Greenhouse Gas Reference Network, <https://gml.noaa.gov/ccgg/about.html>), которая обеспечивает контактные наблюдения за CO_2 и CH_4 на уровне поверхности, с высоких башен и с самолетов.

Данные наблюдений сети ГСА и других перечисленных выше сетей доступны в Мировом центре данных по парниковым газам ГСА/ВМО (World Data Centre for Greenhouse Gases GAW/ВМО или WDCGG), см. интернет-ресурс <https://gaw.kishou.go.jp/>. Свободный доступ к этим данным обеспечивает эффективную калибровку и валидацию результатов спутникового мониторинга и, тем самым, способствует дальнейшему развитию глобальной интегрированной системы наблюдений (наземного и космического базирования) за атмосферными парниковыми газами.

Заключение

Выполнен аналитический обзор работ последнего двадцатилетия, посвященных развитию методов и средств измерения со спутников концентрации углеродсодержащих парниковых газов – диоксида углерода CO_2 и метана CH_4 . Рассмотрены физико-математические основы дистанционного определения средних в атмосферном столбе концентраций CO_2 и CH_4 , по данным измерений спутниковых спектрометров ближнего инфракрасного и инфракрасного диапазонов спектра. Приведены сведения о существующих и перспективных спутниковых системах (зарубежных и отечественных) мони-

торинга упомянутых парниковых газов, включая достигнутые или планируемые точностные характеристики спутниковых информационных продуктов. Дано краткое описание существующих наземных наблюдательных сетей, данные которых можно использовать для калибровки (коррекции) и валидации результатов спутникового мониторинга.

Список литературы

Аршинов, М.Ю., Белан, Б.Д., Давыдов, Д.К., Креков, Г.М., Фофонов, А.В., Бабченко, С.В., Inoue, G., Machida, T., Maksutov, Sh., Sasakawa, M., Shimoyama, K. (2012) Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере, *Оптика атмосф. и океана*, т. 25, № 12. с. 1051-1061.

Киселев, А.А., Кароль, И.Л. (2019) *С метаном по жизни*, Санкт-Петербург, Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 73 с., ISBN 978-5-9500883-7-7 I.

Кузовкин, В.В., Семенов, С.М. (2020) Метан в приповерхностном слое атмосферы: современное содержание, многолетние тренды и внутригодовая изменчивость, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 3, с. 5-21. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-3-05-21.

Кухарский, А.В., Успенский, А.Б. (2009). Определение средней концентрации диоксида углерода в тропосфере по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения, *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 15-28.

Никитенко, А.А., Тимофеев, Ю.М., Березин, И.А., Виролайнен, Я.А., Поляков, А.В. (2020) Анализ содержания CO₂ вблизи российских городов по спутниковым измерениям OCO-2, *Оптика атмосферы и океана*, т. 33, № 7, с. 538-543. DOI: 10.15372/AOO20200706.

Рублев, А.Н., Успенский, А.Б. (2006) Оценка концентрации углекислого газа в тропосфере по данным измерений спектрометра SCIAMACHY в условиях облачности, *Исследование Земли из космоса*, № 6, с. 31-41.

Семенов, С.М. (2015) Парниковый эффект: открытие, развитие концепции, роль в формировании глобального климата и его антропогенных изменений, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 2, с. 103-126.

Семенов, С.М., Кузовкин, В.В. (2019) Современное содержание диоксида углерода в приповерхностном слое атмосферы Земли: многолетние тренды и внутригодовая изменчивость, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 4, с. 101-119. DOI: 10.21513/0207-2564-2019-4-101-119.

Тимофеев, Ю.М., Васильев, А.В. (2003) *Теоретические основы атмосферной оптики*, Санкт-Петербург, «Наука», 475 с. ISBN 5-02024976-9.

Успенский, А.Б., Кухарский, А.В., Рублев, А.Н. (2006) Детектирование тропосферных вариаций CO₂ по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения, *Исследование Земли из космоса*, № 4, с. 42-51.

Успенский, А.Б., Кухарский, А.В., Романов, С.В., Рублев, А.Н. (2011) Мониторинг концентрации диоксида углерода и общего содержания метана в тропосфере над Сибирью по данным спутниковых ИК-зондировщиков AIRS, IASI, *Исследование Земли из космоса*, № 1, с. 14-21.

Asmus, V.V., Dyaduchenko, V.N., Nosenko, Y.I., Polishchuk, G.M., Selin, V.A. (2007) A highly elliptical orbit space system for hydrometeorological monitoring of the Arctic region, *WMO Bulletin*, October 2007, vol. 56(4).

Boesch, H., Liu, Y., Tamminen, J., Yang, D., Palmer, P.I., Lindqvist, H., Cai, Z., Che, K., DiNoia, A., Feng, L., Hakkarainen, J., Ialongo, I., Kalaitzi, N., Karppinen, T., Kivi, R., Kivimäki, E., Parker, R.J., Preval, S., Wang, J., Webb, A.J., Yao, L., Chen, H. (2021) Monitoring Greenhouse Gases from Space, *Remote Sens.*, 13, 2700, <https://doi.org/10.3390/rs13142700>.

Bovensmann, H., Burrows, J.P., Buchwitz, M., Frerick, J., Noël, S., Rozanov, V.V., Chance, K.V., Goede, A.P.H. (1999) SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes, *J. Atmos. Sci.*, vol. 56, pp. 127-150.

Buchwitz, M., Rozanov, V.V., Burrows, J.P. (2000) A near infrared optimized DOAS method for the fast global retrieval of atmospheric CH₄, CO, CO₂, H₂O, and N₂O total column amounts from SCIAMACHY / ENVISAT-1 nadir radiances, *J. Geophys. Res.*, vol. 105, pp. 15231-15246.

Buchwitz, M., Reuter, M., Schneising, O., Hewson, W., Detmers, R., Boesch, H., Hasekamp, O., Aben, I., Bovensmann, H., Burrows, J.P., Butz, A., Chevallier, F., Dils, B., Frankenberg, C., Heymann, J., Lichtenberg, G., De Maziere, M., Notholt, J., Parker, R., Warneke, T., Zehner, C., Griffith, D.W.T., Deutscher, N.M., Kuze, A., Suto, H., Wunch, D. (2017) Global satellite observations of column-averaged carbon dioxide and methane: The GHG-CCI XCO₂ and XCH₄ CRDP3 data set, *Remote Sens. Environ.*, vol. 203, pp. 276-295.

CEOS_AC-VC_GHG_White_Paper_Version_1_20181009.pdf *A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space*. Prepared by the CEOS Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team Draft Version Sept.9, (2018) URL: https://ceos.org/document_management/Meet-ings/SIT-Technical-Workshop/2018-SIT-Tech-Workshop/Documents/CEOS_AC-VC_White_Paper_pre-TW_draft_20180910.

Chédin, A., Saunders, R., Hollingsworth, A., Scott, N.A., Saunders, R., Matricardi, M., Etcheto, J., Clerbaux, C., Armante, R. (2003) The feasibility studies of monitoring CO₂ from high resolution infrared sounders, *Journ. Geophys. Res.*, vol. 108, N D2, 4064, doi: 10.1029/2001JD 001443.

Dlugokencky, E., Tans, P. (2021) *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*, National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL), <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>.

Durand, Y., Courrèges-Lacoste, G.B., Pachot, C., Boucher, L., Pasquet, A., Sierk, B., Bézy, J.-L., Meijer, Y., Fernandez, V., Lesschaeve, S., Spilling, D., Dussaux, A., Serre, D.; Hennepe, F. (2021) Copernicus CO2M mission: *Status of the*

instrument suite for monitoring anthropogenic carbon dioxide emissions from space, Proc. SPIE 11858, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXV, 118580B (13 September 2021).

GCOS (2011) *Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate: Supplemental details to the satellite-based component of the Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC (2011 Update)*. GCOS-154, WMO, Geneva, 126 p.

GCOS (2016) *The Global Observing System for Climate: Implementation Needs*. GCOS-200, WMO, Geneva, 325 p., https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3417.

Guide to Instruments and Methods of Observation (2018) Volume IV –Space-based Observations, WMO, no. 8, 223 p.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team*, in R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., Hamazaki, T. (2009) Thermal and near infra-red sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Green-house Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring, *Appl. Opt.*, vol. 48, pp. 6716-6733, <https://doi.org/10.1364/AO.48.006716>.

Liang, A., Gong, W., Han, G., Xian, C. (2017) Comparison of satellite-observed XCO₂ from GOSAT, OCO-2, and ground-based TCCON, *Remote Sensing*, vol. 9, p. 1033. DOI: 10.3390/rs9101033.

Lorente, A., Borsdorff, T., Butz, A., Hasekamp, O., van de Brugh, J., Schneider, A., Wu, L., Hase, F., Kivi, R., Wunch, D., Pollard, D.F., Shiomi, K., Deutscher, N.M., Velasco, V.A., Roehl, C.M., Wennberg, P.O., Warneke, T., Landgraf, J. (2021) Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, pp. 665-684, <https://doi.org/10.5194/amt-14-665-2021>.

Masiello, G., Serio, C., Venafrà, S., Liuzzi, G., Camy-Peyret, C. (2018) Four years of IASI CO₂, CH₄, N₂O retrievals: validation with in situ observations from the Mauna Loa station, *Proc. SPIE 10786, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIII*, 107860G (9 October 2018); doi: 10.1117/12.2325569.

De Mazière, M., Thompson, A.M., Kurylo, M.J., Wild, J.D., Bernhard, G., Blumenstock, T., Braathen, G.O., Hannigan, J.W., Lambert, J.-C., Leblanc, T., McGee, T.J., Nedoluha, G., Petropavlovskikh, I., Seckmeyer, G., Simon, P.C., Steinbrecht, W., Strahan, S. E. (2018) The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC): history, status and perspectives, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 18, pp. 4935-4964, <https://doi.org/10.5194/acp-18-4935-2018>.

Munro, R. (2020) *CO₂ Human Emissions 2020*. D1.4 Stakeholder Report on the Requirements for Future Space-based Instruments to Deliver Products Suitable for

CO₂ Emissions Monitoring. 2020, 32 p. <https://www.che-project.eu/sites/default/files/2020-12/CHE-D1-4-V1-0.pdf>.

Noël, S., Reuter, M., Buchwitz, M., Borchardt, J., Hilker, M., Bovensmann, H., Burrows, J.P., Di Noia, A., Suto, H., Yoshida, Y., Buschmann, M., Deutscher, N.M., Feist, D.G., Griffith, D.W.T., Hase, F., Kivi, R., Morino, I., Notholt, J., Ohyama, H., Petri, C., Podolske, J.R., Pollard, D.F., Sha, M.K., Shiomi, K., Susmann, R., Té Y., Velazco, V.A., Warneke, T. (2021) XCO₂ retrieval for GOSAT and GOSAT-2 based on the FOCAL algorithm, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, pp. 3837-3869, <https://doi.org/10.5194/amt-14-3837-2021>.

Paris agreement. United Nations (2015), 32 p. (in Russian) https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.

Rayner, P.J., O'Brien, D.M. (2001) The utility of remotely sensed CO₂ concentration data in surface source inversions, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, pp. 175-178, doi:10.1029/2001GL013115.

Reuter, M., Buchwitz, M., Schneising, O., O'Dell, S., Richter, C.W., Bovensmann, H., Burrows, J.P. (2019) Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: co-located regional CO₂ and NO₂ enhancements observed by the OCO-2 and S-5P satellites, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 19, pp. 9371-9383. URL: <https://www.atmos-chem-phys.net/19/9371/2019/>.

Schneising, O., Buchwitz, M., Burrows, J.P., Bovensmann, H., Reuter, M., Notholt, J., Macatangay, R., Warneke, T. (2008) Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite – Part 1: Carbon dioxide, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 8, pp. 3827-3853.

Sun, X., Abshire, J., Ramanathan, A., Kawa, S.R., Mao, J. (2021) Retrieval Algorithm for Column CO₂ Mixing Ratio Measurements from a Multi-wavelength IPDA Lidar, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, pp. 3909-3922, <https://doi.org/10.5194/amt-14-3909-2021>.

Turquety, S., Hadji-Lazaro, J., Clerbaux, C., Hauglustaine, D.A., Clough, S.A., Casse, V., Schlusser, P., Megie, G. (2004) Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, *J. Geophys. Res.*, vol. 109, no. D21301, doi: 10.1029/2004JD004821.

WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) no.16: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2019 (2020), Available at: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10460.

World Data Centre for Greenhouse Gases GAW/WMO, Available at: <https://gaw.kishou.go.jp/> (accessed 08.03.2020).

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. (2011) The total carbon column observing network *Philos. Trans. R. Soc. A-Math, Phys. Eng. Sci.*, vol. 369, pp. 2087-2112.

Wunch, D., Wennberg, P.O., Osterman, G., Fisher, B. (2017) Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) XCO₂ measurements with TCCON, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 10, pp. 2209-2238.

Yoshida, Y., Kikuchi, N., Morino, I., Uchino, O., Oshchepkov, S., Bril, A., Saeki, T., Schutgens, N., Toon, G.C., Wunch, D., et al. (2013) Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data, *Atmos. Meas. Tech.*, pp. 1533-1547.

References

Arshinov, M.Yu., Belan, B.D., Davydov, D.K., Krekov, G.M., Fofonov, A.V., Babchenko, S.V., Inoue, G., Machida, T., Maksutov, Sh., Sasakawa, M., Shimoyama, K. (2012) Dinamika vertikal'nogo raspredeleniya parnikovyh gazov v atmosfere [Dynamics of vertical distribution of greenhouse gases in the atmosphere], *Optika atmosfery i okeana*, vol. 25, no. 12, pp. 1051-1061.

Kiselev, A.A., Karol', I.L. (2019) *S metanom po zhizni* [With methane for life], Sankt-Peterburg, Glavnaya geofizicheskaya observatoriya im. A.I. Voejkova, Russia, 73 p. ISBN 978-5- 9500883-7-7 I.

Kuzovkin, V.V., Semenov, S.M. (2020) Metan v pripoverhnostnom sloe atmosfery: sovremennoe sodержание, mnogoletnie trendy i vnutrigodovaya izmenchivost' [Methane in the near-surface layer of the atmosphere: current content, long-term trends and intra-annual variability], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol.3, pp. 5-21. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-3-05-21.

Kuharskij, A.V., Uspenskij, A.B. (2009). Opredelenie srednej koncentracii dioksida ugleroda v troposphere po dannym sputnikovogo IK-zondirovshchika vysokogo spektral'nogo razresheniya [Determination of the carbon dioxide average concentration in the troposphere from high spectral resolution satellite IR sounder], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 4, pp. 15-28.

Nikitenko, A.A., Timofeev, Yu.M., Berezin, I.A., Virolajnen, Ya.A., Polyakov, A. (2020) Analiz sodержaniya CO₂ v blizi rossijskih gorodov po sputnikovym izmereniyam OCO-2 [Analysis of CO₂ content near Russian cities using OCO-2 satellite measurements], *Optika atmosfery i okeana*, vol. 33, no. 7, pp. 538-543. DOI: 10.15372/AOO20200706.

Rublev, A.N., Uspenskij, A.B. (2006) Ocenka koncentracii uglekislogo gaza v troposphere po dannym izmerenij spektrometra SCIAMACHY v usloviyah oblachnosti [Estimation of carbon dioxide concentration in the troposphere from the SCIAMACHY spectrometer measurements in cloudy conditions], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, no. 6, pp. 31-41.

Semenov, S.M. (2015) Parnikovyj effekt: otkrytie, razvitie koncepcii, rol' v formirovanii global'nogo klimata i ego antropogennyh izmenenij [Greenhouse effect: discovery, development of the concept, role in the formation of the global climate and its anthropogenic changes], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 2, pp. 103-126.

Semenov, S.M., Kuzovkin, V.V. (2019) Sovremennoe sodержanie dioksida ugleroda v pripoveryhnostnom sloe atmosfery Zemli: mnogoletnie trendy i vnutrigodovaya izmenchivost' [Current carbon dioxide content in the near-surface layer of the Earth's atmosphere: long-term trends and intra-annual variability], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 4, pp. 101-119. DOI: 10.21513/0207-2564-2019-4-101-119.

Timofeev, Yu.M., Vasil'ev, A.V. (2003) *Teoreticheskie osnovy atmosfernoj optiki* [Theoretical Foundations of Atmospheric Optics], Sankt-Peterburg, «Nauka», Russia, 475 p. ISBN 5-02024976-9.

Uspenskij, A.B., Kuharskij, A.V., Rublev, A.N. (2006) Detektirovanie troposfernyh variacij SO₂ po dannym sputnikovogo IK-zondirovshchika v vysokospektral'nogo razresheniya [Detection of tropospheric variations of CO₂ according to high spectral resolution satellite IR probe], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, no. 4, pp. 42-51.

Uspenskij, A.B., Kuharskij, A.V., Romanov, S.V., Rublev, (2011) Monitoring koncentracii dioksida ugleroda i obshchego sodержaniya metana v troposphere nad Sibir'yu po dannym sputnikovyh IK-zondirovshchikov AIRS, IASI [Monitoring of carbon dioxide concentration and total methane content in the troposphere over Siberia according to AIRS and IASI satellite IR probes], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, no. 1, pp. 14-21.

Asmus, V.V., Dyaduchenko, V.N., Nosenko, Y.I., Polishchuk, G.M., Selin, V.A. (2007) A highly elliptical orbit space system for hydrometeorological monitoring of the Arctic region, *WMO Bulletin*, October 2007, vol. 56(4).

Boesch, H., Liu, Y., Tamminen, J., Yang, D., Palmer, P.I., Lindqvist, H., Cai, Z., Che, K., DiNoia, A., Feng, L., Hakkarainen, J., Jalongo, I., Kalaitzi, N., Karppinen, T., Kivi, R., Kivimäki, E., Parker, R.J., Preval, S., Wang, J., Webb, A.J., Yao, L., Chen, H. (2021) Monitoring Greenhouse Gases from Space, *Remote Sens.*, 13, 2700, <https://doi.org/10.3390/rs13142700>.

Bovensmann, H., Burrows, J.P., Buchwitz, M., Frerick, J., Noël, S., Rozanov, V.V., Chance, K.V., Goede, A.P.H. (1999) SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes, *J. Atmos. Sci.*, vol. 56, pp. 127-150.

Buchwitz, M., Rozanov, V.V., Burrows, J.P. (2000) A near infrared optimized DOAS method for the fast global retrieval of atmospheric CH₄, CO, CO₂, H₂O, and N₂O total column amounts from SCIAMACHY / ENVISAT-1 nadir radiances, *J. Geophys. Res.*, vol. 105, pp. 15231-15246.

Buchwitz, M., Reuter, M., Schneising, O., Hewson, W., Detmers, R., Boesch, H., Hasekamp, O., Aben, I., Bovensmann, H., Burrows, J.P., Butz, A., Chevallier, F., Dils, B., Frankenberg, C., Heymann, J., Lichtenberg, G., De Maziere, M., Notholt, J., Parker, R., Warneke, T., Zehner, C., Griffith, D.W.T., Deutscher, N.M., Kuze, A., Suto, H., Wunch, D. (2017) Global satellite observations of column-averaged carbon dioxide and methane: The GHG-CCI XCO₂ and XCH₄ CRDP3 data set, *Remote Sens. Environ.*, vol. 203, pp. 276-295.

CEOS_AC-VC_GHG_White_Paper_Version_1_20181009.pdf *A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space*. Prepared by the CEOS Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team Draft Version Sept.9, (2018) URL: https://ceos.org/document_management/Meet-ings/SIT-Technical-Workshop/2018-SIT-Tech-Workshop/Documents/CEOS_AC-VC_White_Paper_pre-TW_draft_20180910.

Chédin, A., Sounders, R., Hollingsworth, A., Scott, N.A., Saunders, R., Matricardi, M., Etcheto, J., Clerbaux, C., Armante, R. (2003) The feasibility studies of monitoring CO₂ from high resolution infrared sounders, *Journ. Geophys. Res.*, vol. 108, N D2, 4064, doi: 10.1029/2001JD 001443.

Dlugokencky, E., Tans, P. (2021) *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*, National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL), <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>.

Durand, Y., Courrèges-Lacoste, G.B., Pachot, C., Boucher, L., Pasquet, A., Sierk, B., Bézy, J.-L., Meijer, Y., Fernandez, V., Lesschaeve, S., Spilling, D., Dus-saux, A., Serre, D.; Hennepe, F. (2021) Copernicus CO2M mission: *Status of the instrument suite for monitoring anthropogenic carbon dioxide emissions from space*, Proc. SPIE 11858, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXV, 118580B (13 September 2021).

GCOS (2011) *Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate: Supplemental details to the satellite-based component of the Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC (2011 Update)*. GCOS-154, WMO, Geneva, 126 p.

GCOS (2016) *The Global Observing System for Climate: Implementation Needs*. GCOS-200, WMO, Geneva, 325 p., https://library.wmo.int/doc_um.php?explnum_id=3417.

Guide to Instruments and Methods of Observation (2018) Volume IV – Space-based Observations, WMO, no. 8, 223 p.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team*, in R.K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., Hamazaki, T. (2009) Thermal and near infra-red sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Green-house Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring, *Appl. Opt.*, vol. 48, pp. 6716-6733, <https://doi.org/10.1364/AO.48.006716>.

Liang, A., Gong, W., Han, G., Xian, C. (2017) Comparison of satellite-observed XCO₂ from GOSAT, OCO-2, and ground-based TCCON, *Remote Sensing*, vol. 9, p. 1033. DOI: 10.3390/rs9101033.

Lorente, A., Borsdorff, T., Butz, A., Hasekamp, O., Van de Brugh, J., Schneider, A., Wu, L., Hase, F., Kivi, R., Wunch, D., Pollard, D.F., Shiomi, K., Deutsch, R.

N.M., Velazco, V.A., Roehl, C.M., Wennberg, P.O., Warneke, T., Landgraf, J. (2021) Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, pp. 665-684, <https://doi.org/10.5194/amt-14-665-2021>.

Masiello, G., Serio, C., Venafrà, S., Liuzzi, G., Camy-Peyret, C. (2018) Four years of IASI CO₂, CH₄, N₂O retrievals: validation with in situ observations from the Mauna Loa station, *Proc. SPIE 10786*, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIII, 107860G (9 October 2018); doi: 10.1117/12.2325569.

De Mazière, M., Thompson, A.M., Kurylo, M.J., Wild, J.D., Bernhard, G., Blumenstock, T., Braathen, G.O., Hannigan, J.W., Lambert, J.-C., Leblanc, T., McGee, T.J., Nedoluha, G., Petropavlovskikh, I., Seckmeyer, G., Simon, P.C., Steinbrecht, W., Strahan, S.E. (2018) The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC): history, status and perspectives, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 18, pp. 4935-4964, <https://doi.org/10.5194/acp-18-4935-2018>.

Munro, R. (2020) *CO₂ Human Emissions 2020*. D1.4 Stakeholder Report on the Requirements for Future Space-based Instruments to Deliver Products Suitable for CO₂ Emissions Monitoring, 32 p. <https://www.che-project.eu/sites/default/files/2020-12/CHE-D1-4-V1-0.pdf>.

Noël, S., Reuter, M., Buchwitz, M., Borchardt, J., Hilker, M., Bovensmann, H., Burrows, J.P., Di Noia, A., Suto, H., Yoshida, Y., Buschmann, M., Deutscher, N.M., Feist D.G., Griffith, D.W.T., Hase, F., Kivi, R., Morino, I., Notholt, J., Ohyama, H., Petri, C., Podolske, J.R., Pollard, D.F., Sha, M.K., Shiomi, K., Sussmann, R., Té Y., Velazco, V.A., Warneke, T. (2021) XCO₂ retrieval for GOSAT and GOSAT-2 based on the FOCAL algorithm, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, pp. 3837-3869, <https://doi.org/10.5194/amt-14-3837-2021>.

Paris agreement. United Nations (2015), 32 p. (in Russian), https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.

Rayner, P.J., O'Brien, D.M. (2001) The utility of remotely sensed CO₂ concentration data in surface source inversions, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, pp. 175-178, doi:10.1029/2001GL013115.

Reuter, M., Buchwitz, M., Schneising, O., O'Dell, S., Richter, C.W., Bovensmann, H., Burrows, J.P. (2019) Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: co-located regional CO₂ and NO₂ enhancements observed by the OCO-2 and S-5P satellites, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 19, pp. 9371-9383. URL: <https://www.atmos-chem-phys.net/19/9371/2019/>.

Schneising, O., Buchwitz, M., Burrows, J.P., Bovensmann, H., Reuter, M., Notholt, J., Macatangay, R., Warneke, T. (2008) Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite – Part 1: Carbon dioxide, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 8, pp. 3827-3853.

Sun, X., Abshire, J., Ramanathan, A., Kawa, S.R., Mao, J. (2021) Retrieval Algorithm for Column CO₂ Mixing Ratio Measurements from a Multi-wavelength IPDA Lidar, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, pp. 3909-3922, <https://doi.org/10.5194/amt-14-3909-2021>.

Turquety, S., Hadji-Lazaro, J., Clerbaux, C. Hauglustaine, D.A., Clough, S.A., Casse, V., Schlüssel, P., Megie, G. (2004) Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, *J. Geophys. Res.*, vol. 109, no. D21301, doi: 10.1029/ 2004JD004821.

WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) no. 16: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2019 (2020) https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10460.

World Data Centre for Greenhouse Gases GAW/WMO, Available at: <https://gaw.kishou.go.jp/> (accessed 08.03.2020).

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. (2011) The total carbon column observing network *Philos. Trans. R. Soc. A-Math, Phys. Eng. Sci.*, vol. 369, pp. 2087-2112.

Wunch, D., Wennberg, P.O., Osterman, G., Fisher, B. (2017) Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) XCO₂ measurements with TCCON, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 10, pp. 2209-2238.

Yoshida, Y., Kikuchi, N., Morino, I., Uchino, O., Oshchepkov, S., Bril, A., Saeki, T., Schutgens, N., Toon, G.C., Wunch, D., et al. (2013) Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data, *Atmos. Meas. Tech.*, vol., pp. 1533-1547.

Статья поступила в редакцию (Received): 10.10.2021

Статья доработана после рецензирования (Revised): 23.12.2021

Принята к публикации (Accepted): 14.02.2022

Для цитирования / For citation:

Успенский, А.Б. (2022) Измерения распределения содержания парниковых газов в атмосфере со спутников, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 1, с. 122-144, doi:10.21513/2410-8758-2022-1-122-144.

Uspensky, A.B. (2022) Satellite – based measurements of the Greenhouse Gases concentration in the atmosphere, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 1, pp. 122-144, doi:10.21513/2410-8758-2022-1-122-144.