

Обзор действующих и планируемых спутниковых систем мониторинга парниковых газов и возможности их применения для решения прикладных климатических задач

М.С. Зеленова^{1)}, В.А. Гинзбург^{1),2)}, О.В. Максимова^{1),3)},
А.М. Трифонова-Яковлева^{1),2)}*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля,
Россия, 107058, Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾ Институт географии РАН,
Россия, 109017, Москва, Старомонетный пер., 29

³⁾ НИТУ «МИСиС»,
Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, 4

*Адрес для переписки: mszelenova@igce.ru

Реферат. Спутниковая система мониторинга служит независимым инструментом для получения объективной количественной информации о распределении парниковых газов. Спутниковые наблюдения в настоящее время являются единственным средством, способным обеспечить непрерывность и глобальность наблюдений. В работе приводятся результаты анализа доступных российских и зарубежных материалов по существующим и запланированным на ближайшие годы программам спутникового мониторинга парниковых газов. Собрана и структурирована информация по актуальным задачам, которые ставятся для систем спутникового наблюдения. Выявлено, что большинство спутниковых систем, измеряющих содержание углекислого газа и метана, направлены на получение более точной количественной информации о парниковых газах и проводят измерения содержания газов в столбе атмосферы.

Показано, что в последнее время решение научных и прикладных задач климатической повестки ставит на первый план потребность в оперативном выявлении источников эмиссий парниковых газов с высокой степенью пространственной и временной детализации данных, что, в свою очередь, приводит к необходимости получения данных высокоточного мониторинга современного состояния и изменения основных парниковых газов. Такие задачи ставятся перед планируемыми к запуску спутниковыми системами, обзор которых также приведен в статье. Показано, что несмотря на то, что за последние 15 лет в космических технологиях и методах измерений парниковых газов был достигнут значительный прогресс, необходимы новые достижения для удовлетворения растущих требований и решения новых задач.

Ключевые слова. Парниковые газы, спутниковые наблюдения, спутниковые системы наблюдений, мониторинг, метан, углекислый газ, концентрации, выбросы.

Review of the operating and planned remote greenhouse gas observation systems and possibility of their application for applied climatic researches

M.S. Zelenova^{1)}, V.A. Ginzburg^{1),2)}, O.V. Maksimova^{1),3)},
A.M. Trifonova-Yakovleva^{1),2)}*

¹⁾Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russia

²⁾Institute of Geography RAS,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russia

³⁾Moscow Institute of Steel and Alloys,
4, Leninsky pr., 119049, Moscow, Russia

*Correspondence address: mszelenova@igce.ru

Abstract. Remote greenhouse gas observations often serve as an independent tool for obtaining objective quantitative information on the distribution of greenhouse gases. Remote observations are currently the only possibility to ensure continuous and globally covered data. In this review we present the results of the analysis of available information about existing and planned remote greenhouse gas observation systems. Information on the current tasks that are being set for satellite observation systems has been collected and structured. It has been shown that most remote observation systems measuring the content of carbon dioxide and methane are aimed at obtaining improved quantitative information about greenhouse gases and measure the content of gases in the column of the atmosphere.

It is shown that during the last years there is a great need in for prompt identification of sources of greenhouse gas emissions with a high degree of spatial and temporal resolution, due to solution of scientific and applied problems of the climate agenda. This leads to the need of obtaining high-precision monitoring data of the current state and changes in major greenhouse gases. Such tasks are set for the remote observation systems planned for launch, a review of which is also given in the article. Thus, although significant progress has been made in space technologies and methods for measuring greenhouse gases over the past 15 years, new advances are needed to meet the growing requirements and solve new problems.

Keywords. Greenhouse gases, remote sensing, GHG observation, remote observation systems, monitoring, methane, carbon dioxide, concentrations, emissions.

Введение

Факторы меняющегося климата оказывают существенное воздействие на природную среду, условия жизни людей, на эффективность деятельности

таких важных секторов экономики как сельскохозяйственное производство, лесное хозяйство, энергетика, водопользование и водопотребление, транспорт, строительство, жилищно-коммунальное хозяйство и другие сферы деятельности человека. Выявление и оценка связанных с изменением климата рисков для реализации целей устойчивого развития, своевременное принятие мер по адаптации к наблюдаемым изменениям относится сегодня к числу приоритетов государственной политики в области климата многих стран мира.

Парижское соглашение¹⁾ определило цели по удержанию темпов роста средней глобальной температуры на уровне не более +2°C по сравнению с доиндустриальным уровнем. Это в свою очередь повлекло необходимость в ограничении роста выбросов парниковых газов (ПГ) и увеличении их поглощения, которые в совокупности должны привести к постепенному (отложенному) снижению их концентраций в атмосфере Земли. По данным Глобальной Системы Наблюдений за Климатом (англ. *Global Climate Observing System – GCOS*²⁾) содержание в атмосфере углекислого газа увеличилось примерно на 50% с доиндустриальных времен из-за распространения сжигания ископаемого топлива, достигнув в июле 2021 г. 416.96 ppm по данным станции Мауна-Лоа³⁾. Содержание метана в атмосфере за это же время увеличилось более чем вдвое, наблюдаемое станцией Мауна-Лоа его значение составило в августе 2021 г. 1890.9 ppb⁴⁾.

Данные мониторинга пространственного распределения антропогенных источников и стоков парниковых газов, областей эмиссии и поглощения востребованы как с целью контроля за состоянием атмосферы или деятельностью промышленных, добывающих, транспортирующих предприятий и компаний, так и при формировании научно обоснованных национальных целей по сокращению выбросов. В России данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) о концентрациях ПГ могут быть востребованы не только научными организациями, но и государственными органами и частными организациями при формировании внутренней российской системы ограничения выбросов парниковых газов (ФЗ, 2021), отчетности предприятий (Приказ, 2015), верификации углеродной отчетности и валидации проектов по ПГ, составлению региональных и корпоративных кадастров выбросов, а также национальной отчетности Российской Федерации в рамках Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН) по инвентаризации выбросов парниковых газов (НДК, 2021). В связи с этим применение методов спутникового мониторинга ПГ для оценки суммарного результата принятых в России мер, а также распределения вклада отдельных стран является эффективным и актуальным.

¹⁾ https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (дата обращения 24.12.2021 г.)

²⁾ <https://gcos.wmo.int/> (дата обращения 24.12.2021 г.)

³⁾ <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/weekly.html> (дата обращения 24.12.2021 г.)

⁴⁾ https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/ (дата обращения 24.12.2021 г.)

Вводимая на международном уровне система квотирования выбросов парниковых газов с возможностью продажи нереализованных частей квот, предполагает определение качественных и количественных оценок объемов выбросов парниковых газов в атмосферу. Вместе с тем, на международном уровне отсутствуют специальные унифицированные акты по созданию системы независимого контроля содержания парниковых газов. Таким образом, в настоящее время на первый план выходит потребность в оперативном выявлении источников эмиссий парниковых газов с высоким пространственным и временным разрешением.

Важным инструментом получения информации о современном состоянии климатической системы и содержании в атмосфере парниковых газов является ДЗЗ. В настоящее время в разных странах уже существуют и планируются к запуску спутниковые системы, ориентированные на наблюдение за основными климатообразующими факторами Земли, в том числе концентрациями парниковых газов, аэрозолей, озона и др. Идея создания спутниковой системы мониторинга парниковых газов активно обсуждается в России как на государственном уровне, так и в новой для страны сфере – частной космонавтике⁵⁾.

Данные о содержании парниковых газов, полученные по спутниковым измерениям, в настоящее время уже широко используются международным сообществом. Так, Европейское космическое агентство (англ. *European Space Agency* – ESA) в 2019 г. запустило проект GHG-CCI⁶⁾, основой которому послужил проект GHG-CCI (Greenhouse Gas Climate Change Initiative), функционировавший с 2010 по 2018 годы. В рамках этого проекта осуществляются исследования и разработки, необходимые для создания новых высококачественных продуктов и усовершенствования алгоритмов восстановления содержания в атмосфере диоксида углерода и метана на основе спутниковых наблюдений. Еще одним примером будет компания Kayrros⁷⁾. Ее проект Methane Watch, на основе спутниковых наблюдений и специализированных алгоритмов, в том числе оценивающих объем выбросов с использованием стандартной методологии для всех секторов, обеспечивает измерение метанового следа компаний, регионов и стран в глобальном масштабе.

Спутниковые оценки концентраций углекислого газа и метана в атмосфере в ближайшем будущем будут играть важную роль в системе мониторинга и должны обеспечивать пространственное разрешение и охват, необходимые для выявления точек выбросов и улучшения количественной оценки как естественных, так и антропогенных, потоков в национальном масштабе. Задача идентификации источников и стоков ставит гораздо более высокие требования к определению содержания ПГ (в сравнении с задачей глобального мониторинга парниковых газов в целом) и, соответственно, требует значительного усовершенствования технических характеристик приборов несмотря на то,

⁵⁾ <https://successrockets.ru/> (дата обращения 24.12.2021 г.)

⁶⁾ <https://climate.esa.int/en/projects/ghgs/about/> (дата обращения 24.12.2021 г.)

⁷⁾ <https://www.kayrros.com/methane-watch/> (дата обращения 24.12.2021 г.)

что за последнее десятилетие научные организации, международные и национальные агентства продвинулись в этом вопросе.

Ниже представлен краткий обзор современных и планируемых к запуску спутниковых миссий, направленных на измерение концентраций основных парниковых газов.

Современные действующие спутниковые системы наблюдения

MetOp-A, B⁸⁾

Спутники MetOp-A и B, разработанные по заказу ESA⁹⁾ и Европейской организации спутниковой метеорологии (англ. *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites – EUMETSAT*¹⁰⁾), функционируют начиная с 2006 г. Они имеют солнечно-синхронную орбиту на высоте 827 км. Данные со спутников используются для наблюдения за океанами, льдами, климатическими изменениями, атмосферной химией и космической погодой. На спутниках установлены приборы IASI и GOME2, работающие, соответственно, в инфракрасном (ИК) и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах. Данные с этих приборов имеют широкий спектр применения и активно используются в международном научном сообществе. По данным измерений прибора IASI¹¹⁾ восстанавливают общее содержание в столбе парниковых газов (CO₂, CH₄, фтор-газы), озона, диоксида серы, оксидов азота и ряда других веществ, а также температуру, влажность и пр. (Clerbaux et al., 2009). Данные прибора GOME2¹²⁾ используют для восстановления общего содержания озона, оксидов азота, аэрозолей, диоксида серы и др., а также их вертикального профиля.

GOSAT/GOSAT-2 – Greenhouse Gases Observing Satellite

Спутники GOSAT (запущен в 2009 г.) и GOSAT-2 (запущен в 2018 г.) (Kasuya, Hamazaki, 2005; Nakajima et al., 2013) имеют солнечно-синхронную орбиту на высотах 666 км и 613 км соответственно. Японский спутник GOSAT был первым в мире специализированным космическим аппаратом, предназначенным для мониторинга парниковых газов (GOSAT-2 запущен как преемник). На спутниках серии GOSAT установлены приборы TANSO-FTS¹³⁾ и TANSO-FTS-2¹⁴⁾, работающие в ИК диапазоне. Параллельно с этими приборами работают приборы TANSO-CAI и TANSO-CAI-2 соответственно, которые используются для определения свойств аэрозоля и облачности. Приборы

⁸⁾ <https://www.eumetsat.int/our-satellites/metop-series> (дата обращения 24.12.2021 г.)

⁹⁾ <https://www.esa.int> (дата обращения 24.12.2021 г.)

¹⁰⁾ <https://www.eumetsat.int> (дата обращения 24.12.2021 г.)

¹¹⁾ <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/iasi> (дата обращения 24.12.2021 г.)

¹²⁾ https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/gome_2 (дата обращения 24.12.2021 г.)

¹³⁾ https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/tanso_fts (дата обращения 24.12.2021 г.)

¹⁴⁾ https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/tanso_fts_2 (дата обращения 24.12.2021 г.)

серии TANSO-FTS используются для восстановления содержания CH_4 , CO_2 , а также H_2O , общего содержания озона. Основная цель проекта GOSAT состояла в получении более точных оценок выбросов и абсорбции парниковых газов в субконтинентальном масштабе (несколько тысяч квадратных километров), в задачи также входило оказание помощи природоохранным органам в оценке углеродного баланса наземных экосистем, проведение оценок региональных выбросов и поглощений парниковых газов. GOSAT-2, помимо продолжения целей своего предшественника, должен улучшить точность измерения концентрации содержания углекислого газа до 0.5 ppm и метана до 5 ppb для периода наблюдений 1 месяц и сетки 500 км на суше/2000 км в океане, изучить возможность расчета антропогенных выбросов с наблюдением коррелированного материала, такого как CO и NO_2 , улучшив оценки при идентификации источников и стоков парниковых газов, а также исследовать связь между распределением парниковых газов и вегетационной активностью.

Sentinel-5 Precursor (S5P)

Миссия Sentinel-5P программы наблюдения Земли Европейского Союза Copernicus¹⁵⁾ является результатом сотрудничества в рамках европейской программы Глобального мониторинга окружающей среды и безопасности (англ. *Global Monitoring for Environment and Security – GMES*¹⁶⁾) между ESA и Нидерландским космическим управлением (англ. *Netherlands Space Office – NSO*), а также представителями промышленного сектора, пользователями данных и учеными. Миссия заключается в запуске одного спутника с прибором TROPOMI¹⁷⁾ (Levelt, Veefkind, 2010), выполняющим атмосферные измерения в тропосфере с высоким пространственно-временным разрешением с целью получения измерений воздуха, озона и ультрафиолетового излучения, а также мониторинга климата и прогнозирования. Спутник S5P функционирует с 2017 г. и имеет солнечно-синхронную орбиту высотой 824 км. Прибор TROPOMI проводит наблюдения за атмосферной химией, работает в УФ, видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах, имеет достаточно высокое пространственное разрешение ($7 \times 7 \text{ км}^2$) и используется для восстановления содержания таких веществ как CH_4 , CO, CO_2 , NO_2 , SO_2 , аэрозолей и др.

OCO-2¹⁸⁾/OCO-3¹⁹⁾ – Orbiting Carbon Observatory

OCO-2 – космический аппарат, запущенный Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (англ. *National*

¹⁵⁾ <https://www.copernicus.eu/>, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p> (дата обращения 24.12.2021 г.)

¹⁶⁾ https://www.esa.int/About_Us/Ministerial_Council_2012/Global_Monitoring_for_Environment_and_Security_GMES (дата обращения 24.12.2021 г.)

¹⁷⁾ <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/tropomi> (дата обращения 24.12.2021 г.)

¹⁸⁾ <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/o/oco-2> (дата обращения 24.12.2021 г.)

¹⁹⁾ <https://ocov3.jpl.nasa.gov/> (дата обращения 24.12.2021 г.)

Aeronautics and Space Administration – NASA), ориентирован на мониторинг углекислого газа в атмосфере (Eldering et al., 2012). Цель миссии ОСО состоит в том, чтобы составить карту глобального географического распределения источников и поглотителей углекислого газа и изучить их изменение с течением времени. Обсерватория ОСО-2 (функционирует с 2014 г.) имеет солнечно-синхронную орбиту высотой 705 км. Прибор ОСО-2 позволяет получить данные о содержании CO_2 с высоким пространственным разрешением ($1.29 \times 2.25 \text{ км}^2$). Прибор ОСО-3 (Kiel et al., 2021; Eldering et al., 2018), аналогичный ОСО-2, был установлен на Международной космической станции (МКС) в мае 2019 г. Пространственное разрешение ОСО-3 составляет $4 \times 4 \text{ км}^2$.

***TanSat*²⁰⁾**

Космический аппарат TanSat – это первый миниспутник Китая, предназначенный для обнаружения и мониторинга углекислого газа, также известный как CarbonSat (Chen et al., 2012). Проект был предложен в рамках китайской национальной программы еще в 2010 г. при финансовой поддержке Министерства науки и технологий Китая (англ. *Ministry of Science and Technology (China)* – MOST). Научная цель проекта заключается в улучшении понимания глобального распределения CO_2 и его вклада в изменение климата, а также в мониторинге вариаций CO_2 в сезонных временных масштабах. Спутник имеет солнечно-синхронную орбиту высотой 713 км, запущен в 2016 году. Прибор ACGS²¹⁾ осуществляет измерения содержания CO_2 с высоким пространственным разрешением ($1 \times 2 \text{ км}^2$). Параллельные измерения с целью определения свойств аэрозоля и облачности осуществляет прибор CAP²²⁾.

GHGsat²³⁾ (Коммерческая система)

GHGsat – это коммерческая система малых спутниковых приборов, состоящая из 3 действующих спутников, с перспективой запуска еще 9 спутников. Высота орбиты спутников около 500 км. Данная спутниковая система способна отслеживать выбросы CO_2 , CH_4 , а также, как заявлено, даже маленькие утечки метана и выявлять источники эмиссий в любой точке земного шара. Цель GHGsat состоит в том, чтобы измерять выбросы парниковых газов (прибор GHG) и качество воздуха (прибор AQG) с использованием спутниковых технологий с большой точностью, ориентируясь на заказчиков из коммерческих структур, предоставляя им возможность контролировать и, в конечном итоге, сокращать выбросы ПГ. GHGsat также предлагает продукты (коммерческие спутниковые изображения) и дополнительные услуги по мониторингу выбросов на основе своих спутниковых данных.

²⁰⁾ <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tansat> (дата обращения 24.12.2021 г.)

²¹⁾ <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/acgs> (дата обращения 24.12.2021 г.)

²²⁾ <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/capi> (дата обращения 24.12.2021 г.)

²³⁾ <https://www.ghgsat.com/en/> (дата обращения 24.12.2021 г.)

Прибор Claire, запущенный в 2016 году, ориентирован на мониторинг эмиссий точечных источников метана, оценку концентраций у поверхности с точностью (включая систематическую ошибку) для номинального наблюдения $< \sim 2\%$. Граница обнаруживаемых источников эмиссий составляет 100 кг/ч; заявленное пространственное разрешение по спутниковым данным – порядка $50 \times 50 \text{ м}^2$, точность определения $\sim 50 \text{ ppb}$. Спектральный интервал прибора – 1630-1675 нм, спектральное разрешение 0.1 нм. В 2020 году запущен прибор Iris. Третий спутник компании, Hugo, запущен 24 января 2021 года.

Сравнение основных характеристик современных спутниковых миссий приведено ниже в табл. 1.

Планируемые спутниковые системы наблюдения

CO2M²⁴⁾ – CO₂ Monitoring

Миссия CO2M Европейского космического агентства (Sierk et al., 2018) планируется к запуску в 2025 году. Разрабатываемая система предназначена для обнаружения и количественной оценки антропогенных выбросов CO₂ с возможной визуализацией концентраций CO₂ в атмосфере, с детальным пространственным разрешением и точностью, а также глобальным охватом. Среди поставленных задач можно отметить обнаружение источников выбросов, таких как мегаполисы и электростанции, мониторинг выбросов для оценки сокращения/увеличения выбросов ПГ, оценку изменения выбросов в сравнении с местными целевыми показателями по сокращению выбросов, оценку национальных выбросов и отслеживание тенденций в течение 5-летнего временного периода для оценки глобального баланса. Целевые переменные – концентрации CO₂ и NO₂ для отслеживания антропогенных выбросов углерода. Аппаратура состоит из набора спектрометров, работающих в видимом (ВИД), ближнем и коротковолновом ИК диапазонах для измерения общего содержания CO₂ в столбе атмосферы с высокой точностью ($< 0.7 \text{ ppm}$) и малой систематической ошибкой ($< 0.5 \text{ ppm}$). Также планируются к проведению сопутствующие измерения общего содержания NO₂ в области ВИД (для определения формы шлейфа антропогенных выбросов)²⁵⁾. Космический сегмент миссии по мониторингу CO₂ будет реализован в виде группировки спутников на околополярных солнечно-синхронных орбитах.

²⁴⁾https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/CO2M_MRD_v3.0_20201001_Issued.pdf (дата обращения 24.12.2021 г.)

²⁵⁾ <https://doi.org/10.1117/12.2535941> (дата обращения 24.12.2021 г.)

Таблица 1. Основные результирующие характеристики современных спутниковых миссий
 Table 1. Key characteristics of the operating remote GHG observing systems

Спутниковая платформа / измерительная аппаратура	Измеряемые парниковые газы и сопутствующие газовые компоненты	Геометрия наблюдения	Спектральное разрешение	Спектральный диапазон	Количество спутников	Площадь обзор, км	Пространственное разрешение	Точность	Высота орбиты, км
MetOp-A, B ^a / IASI ^b	CO ₂ , CH ₄ , фторгазы, N ₂ O, SF ₆ , CO ₂ , NO ₂ , H ₂ O, O ₂ , O ₃ , SO ₂	надир	0.25 см ⁻¹	645-2760 см ⁻¹ (3.62-15.5 мкм)	по 1	2112	12 км на точку в надире	случайная ошибка единичного наблюдения оптимальная < 17 ppb/ предельная < 34 ppb; 2) систематическая ошибка оптимальная < 5 ppb/ предельная < 10 в средних/ верхних слоях атмосферы	833/827
GOSAT ^c , GOSAT-2 ^d / TANSO-FTS, TANSO-FTS-2	GOSAT: CO ₂ , CH ₄ , O ₃ , H ₂ O / GOSAT-2: CO ₂ , CH ₄ , O ₃ , H ₂ O, CO, NO ₂	надир	0.2 см ⁻¹ / 0.2 см ⁻¹	GOSAT: 1) 0.75-0.77 мкм, 12900-13200 см ⁻¹ (O ₂); 2) 1.59-1.67 мкм, 5800-6400 см ⁻¹ (CO ₂ , CH ₄); 3) 2.04-2.08 мкм, 4800-5200 см ⁻¹ (CO ₂); 4) 2.33-2.38 мкм, 700-1800 см ⁻¹ (CO ₂ , CH ₄ , O ₃); GOSAT-2: 1) 0.75-0.77 мкм, 12900-13200 см ⁻¹ (O ₂); 2) 1.59-1.67 мкм, 6000-6300 см ⁻¹ (CO ₂ , CH ₄); 3) 2.04-2.08 мкм, 4800-4900 см ⁻¹ (CO ₂); 4) 2.33-2.38 мкм, 4200-4300 см ⁻¹ (CO); 5) 5.5-14.3 мкм, 700-1800 см ⁻¹ (CO ₂ , CH ₄ , O ₃)	по 1	750 / 160	10.5 х 10.5 км ²	GOSAT: 4 ppb (XCO ₂), 34 ppb (XCH ₄) на 1000 км сетки над поверхностью земли (для 3 мес); GOSAT-2: 0.5 ppb (CO ₂), 5 ppb (CH ₄) на 500 км сетки над поверхностью земли и 2000 км сетки для океана (для 1 мес)	666/613

a. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/metop> (дата обращения 24.12.2021 г.)

b. <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/m/metop> (дата обращения 24.12.2021 г.)

c. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/gosat> (дата обращения 24.12.2021 г.)

d. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/gosat-2> (дата обращения 24.12.2021 г.)

Продолжение таблицы 1

OCO-2 / OCO-2	CO ₂	надир	0.04-0.1 нм	760÷2080 нм	1	10.6	1.29x2.25 км ²	0.3% (1 ppт) ожидаемая точность для XCO ₂ для набора из 100 полностью безоблачных измерений	705
OCO-3 / OCO-3	CO ₂	надир	0.04-0.1 нм	760÷2080 нм	1	11	4x4 км ²	0.3% (1 ppт) ожидаемая точность для XCO ₂ для набора из 100 полностью	МКС
TanSat / ACGS	CO ₂ , O ₂	надир	0.125-0.165 нм	758-776 нм; 1594-1624 нм; 2041-2081 нм	1	20	1x2 км ² / 2x2 км ²	ожидаемая точность до 1% (4 ppт) в национальном и глобальном масштабах	713
SSP / TROPOMI	CH ₄ , N ₂ O, CO, CO ₂ , NO ₂ , H ₂ O, O ₂ , O ₃ , SO ₂ , аэрозоли	надир	0.25-0.55 нм	270-495 нм; 710-775 нм; 2305-2385 нм	1	2600	7 x 7 км ²	систематическая погрешность / точность (случайная погрешность): 15% / < 10% для XCO ₂ , 1.5% / 1% для XCH ₄	824
GHGsat / CLAIRE, IRIS, HUGO	CO ₂ , CH ₄	надир	~0.1 нм	1630-1675 нм	3 (в перспективе более 10)	12	< 50 м	ориентировочно 4 ppт CO ₂ , 18 ppт CH ₄	около 500

MethaneSAT²⁶⁾

MethaneSAT разрабатывается дочерней компанией, находящейся в полной собственности некоммерческого Фонда защиты окружающей среды (англ. Environmental Defense Fund – EDF²⁷⁾). Планируется, что MethaneSAT будет определять местонахождение и измерять выбросы метана от нефтегазовых операций практически в любой точке Земли с высокой точностью, при этом стоимость будет намного ниже стоимости большинства космических миссий. Миссия специально разработана для сбора данных, которые позволят как компаниям, так и странам выявлять, контролировать и сокращать свои выбросы метана, замедляя темпы глобального потепления.

Сейчас спутники могут либо определять выбросы метана с достаточно большим пространственным разрешением, либо измерять их в заранее заданных местах. Предполагается, что данная миссия заполнит этот пробел в возможностях других современных и планируемых спутниковых систем, поскольку сможет делать и то, и другое. MethaneSAT планирует выявлять источники эмиссий метана в пределах широкой полосы (200 км) и, в дальнейшем, детально отслеживать концентрации в обнаруженных источниках (каждые несколько дней). Заявленное пространственное разрешение – 400x100 м², способность определения концентрации метана – 2 ppb (для 1x1 км²). Миссия курируется фондом EDF, который известен своей работой над такими проблемами, как глобальное потепление, восстановление экосистем, океаны и здоровье человека и т.д. В рамках работы над миссией MethaneSAT была проведена масштабная работа с академическими и отраслевыми экспертами для оценки выбросов метана, выполнено 16 независимых исследований, подготовлены рецензируемые научные работы²⁸⁾.

Сравнение выборочных характеристик MethaneSAT, Sentinel-5P и GHGSat приведено в табл. 2.

Таблица 2. Выборочные характеристики спутниковых миссий MethaneSAT, Sentinel-5P и GHGSat

Table 2. Selected characteristics of the MethaneSAT, Sentinel-5P and GHGSat missions

Характеристика системы	MethaneSAT	Sentinel-5P	GHGSat
Вес, кг	350	900	35
Ширина полосы, км	200	2600	12
Порог обнаружения CH ₄ (для пикселя 1x1 км), ppb	2	12	~50
Размер пикселя, м	400 x 100	7000 x 7000	<50 x 50
Планируемое количество спутников	1	1	>10

²⁶⁾ <https://www.methanesat.org/> (дата обращения 24.12.2021 г.)

²⁷⁾ <https://www.edf.org/> (дата обращения 24.12.2021 г.)

²⁸⁾ <https://www.edf.org/climate/methane-research-series-16-studies> (дата обращения 24.12.2021 г.)

SCARBO²⁹⁾ – Space CARBOn Observatory

Проект Horizon 2020 SCARBO, реализуемый консорциумом из 8 европейских организаций во главе с Airbus Defence and Space, был запущен в январе 2018 года. Проект, в частности, направлен на решение одной из проблем мониторинга антропогенных парниковых газов из космоса – увеличение временной частоты наблюдения различных представляющих интерес объектов при соблюдении требований к точности и пространственному разрешению (в соответствии с руководящими принципами Европейского Союза по мониторингу антропогенных парниковых газов). В задачи проекта входит устранение неопределенности измерений из-за влияния аэрозолей, обеспечение высокоточных пространственных и высокочастотных измерений ПГ, оценка их потоков. Предусмотрено внедрение новой концепции миниатюрного статического спектрометра на созвездии малых спутников в сочетании с датчиком аэрозолей. Целевыми объектами являются углекислый газ и метан. Сенсор NanoCarb (Ferrec et al., 2019; Gousset et al., 2019) будет совмещен с аэрозольным прибором SPEXone, чьи измерения позволят уменьшить систематическую и случайную ошибки восстановления XCO_2 и XCH_4 (Dogniaux et al., 2021). Оба прибора NanoCarb и SPEXone могут быть размещены на малых спутниковых платформах (<100 кг). Планируемая точность обнаружения составляет до 1 ppm для CO_2 и до 6 ppb для CH_4 . Заявленная ширина полосы составит около 200 км с пространственным разрешением 2.3x2.3 км². В целом, аппаратура будет также способна проводить измерения давления, аэрозолей, CO , H_2O , CH_4 , CO_2 . Планируемая система позволит обнаруживать шлейфы от больших городов и производств (например, электростанций мощностью более 10 мегатонн CO_2 в год).

MetOp-SG³⁰⁾/IASI-NG

MetOp-SG – следующее поколение спутников MetOp. Текущая концепция MetOp-SG, также известная как «Post-EPS», включает два разных спутника, вращающихся в паре. Цель миссии состоит в получении последовательного, долгосрочного набора данных дистанционного зондирования одинакового качества для оперативного обслуживания метеорологии, мониторинга климата, анализа состояния, прогнозирования и предоставления оперативного обслуживания в контексте системы EPS-SG EUMETSAT. Спутники планируется запустить на солнечно-синхронную орбиту высотой 830 км ориентировочно в 2023 и 2025 годах. Целевые переменные: температура/влажность, профиль озона и общее содержание в столбе атмосферы или вертикальный профиль парниковых газов (заявлены как возможные к восстановлению: C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CFC-11, CFC-12, CH_3OH , CH_4 , CO , H_2CO_2 , HCN, HNO_2 , HNO_3 , N_2O , NH_3 , PAN, SO_2). Пространственное разрешение будет составлять 12 км.

²⁹⁾ <https://scarbo-h2020.eu/> (дата обращения 24.12.2021 г.)

³⁰⁾ <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/metop-sg> (дата обращения 24.12.2021 г.)

Таблица 3. Результаты характеристики планируемых к запуску спутниковых миссий
 Table 3. Key characteristics of the planned remote GHG observing systems

Спутниковая платформа / измерительная аппаратура	Измеряемые парниковые газы	Геометрия наблюдения	Спектральное разрешение	Спектральный диапазон	Количество спутников	Полоса обзора, км	Пространственное разрешение	Точность	Высота орбиты, км
MethaneSAT/ MethaneSAT, MethaneAIR	CH ₄ (CO ₂ , O ₂)	надир	0.05 нм	1.6-1.7 мкм	1	200	400x100 м	CH ₄ : 2 ppb (для пикселя 1x1 км ²)	уточняется
CO2M	CO ₂ , NO ₂ , CO	надир	0.12-0.35 нм	405-490 нм; 747-773 нм; 1590-1675 нм; 1990-2095 нм	группировка спутников	256	2x2 км ²	заявленная точность < 0.7 ppb, систематическая ошибка < 0.5 ppb	уточняется
SCARBO/ NanoCarb,SPEXone	CH ₄ , CO ₂ , аэрозоли, O ₂ , H ₂ O	надир	уточняется	760 нм (O ₂), 1.6 мкм (CO ₂), 1.66 мкм (CH ₄), 2.06 мкм (strong CO ₂ , аэрозоль)	~20, серия	от 128 до 192	2x2 км ²	до 1 ppb для CO ₂ и до 6 ppb для CH ₄	уточняется
MERLIN	CH ₄	надир	уточняется	около 1.64 мкм	1	0.1	100 м	случайная ошибка < 22 ppb (для коэффициента отражения поверхности 0,1 см ⁻¹ , цель 8 ppb), систематическая ошибка < 3 ppb (цель 1 ppb)	503
MetOp-SG / IASI-NG	CH ₄ , CO, N ₂ O, фтор-газы, SO ₂	надир	0.125 см ⁻¹	645-2760 см ⁻¹ (3.62-15.50 мкм)	2	2700	12 км в надире	уточняется	830

MERLIN/Methane remote sensing mission³¹⁾

MERLIN – совместный франко-германский климатический мини-спутник на спутниковой платформе Muirade Evolutions (Bode et al., 2017; Ehret et al., 2017). Основная цель состоит в том, чтобы получить пространственное и временное содержание в столбе атмосферного метана с высокой точностью в региональном и континентальном масштабе. Запуск планируется на солнечно-синхронную орбиту высотой 503 км. В отличие от перечисленных выше миссий, в данной планируются активные измерения с помощью лидара.

Основные характеристики планируемых к запуску спутниковых миссий приведены в табл. 3.

Цели, задачи и требования современных/планируемых спутниковых систем наблюдения

За последние два десятилетия различными научными международными национальными агентствами были запущены поколения спутниковых аппаратов с усовершенствованной аппаратурой для определения содержания ПГ. Все эти текущие и планируемые к запуску спутники, выполняющие измерения CO_2 и CH_4 предназначены для получения значений ПГ в среднем по столбу (XCO_2 и XCH_4 соответственно).

Большинство современных спутниковых систем имеют солнечно-синхронную орбиту, что дает возможность приблизиться к глобальному охвату и определять содержание парникового газа в «точке» с интервалом в несколько дней. Некоторые планируемые миссии имеют цель одновременного использования нескольких спутников для уменьшения интервала измерений.

У функционирующих на орбите спутниковых систем пространственное разрешение в настоящее время доходит до нескольких квадратных километров (TROPOMI/S5P: $7 \times 7 \text{ км}^2$, TANSO-FTS-2: 10.5 км в диаметре, OCO-2/3: $1-2 \text{ км}^2$). Как можно заметить из результирующей табл. 3, технические требования к определению содержания ПГ всех планируемых спутниковых миссий очень высоки. Так пространственное разрешение планируется таким же, как у действующих, или лучше, доходящим до менее $1 \times 1 \text{ км}^2$ (MethaneSat). Для прицельных измерений, предназначенных для обнаружения и анализа точечных эмиссий и утечек ПГ, пространственное разрешение может быть еще выше (GHGSat: порядка 30-50 м). В целом, все текущие и планируемые к запуску спутники, ставящие целью измерение содержания CO_2 и/или CH_4 , направлены на улучшение знаний о потоках этих веществ.

Следует отметить, что планируемые спутниковые миссии нацелены на предоставление такого уровня пространственной и временной детализации данных, которая будет обеспечивать решение задачи выявления источников и стоков ПГ. Необходимым условием для решения задачи мониторинга источ-

³¹⁾ <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/merlin> (дата обращения 24.12.2021 г.)

ников и стоков ПГ служит чувствительность спутникового прибора к изменениям приповерхностных концентраций ПГ.

Спутники, выполняющие наблюдения в соответствующих чувствительных к CO_2 и/или CH_4 частях теплового ИК диапазона электромагнитного спектра, обычно имеют низкую чувствительность вблизи поверхности Земли. Для решения задачи выявления источников выбросов ПГ для измерений XCO_2 и XCH_4 очень важны высокоточные оценки, потому что даже самые большие поверхностные источники и поглотители вызывают небольшие изменения XCO_2 и XCH_4 . Например, пространственно локализованные источники, такие как города или большие электростанции, могут производить атмосферные колебания соотношения CO_2 и CH_4 , превышающие 10% в пределах планетарного пограничного слоя (40 ppb для CO_2 ; 180 ppb для CH_4). Эти вариации быстро затухают с высотой и расстоянием по горизонтали от источника, поэтому только самые большие источники дают вариации XCO_2 и XCH_4 , превышающие 0.25% (1 ppb для CO_2 или 4.5 ppb для CH_4) в масштабе зоны покрытия спутника. Поэтому первостепенным в будущих спутниковых миссиях становится обеспечение для величин XCO_2 и XCH_4 таких погрешностей, которые будут меньше их естественной изменчивости (Rayner, O'Brien, 2001; Miller et al., 2007; Andrews et al., 2014; Bergamaschi et al., 2018).

Отметим, что еще одним препятствием для решения задачи об идентификации источников выбросов ПГ, служат крупномасштабные источники и поглотители, такие как выбросы CH_4 из тропических водно-болотных угодий или поглощение CO_2 лесами, которые вызывают сравнимые или меньшие изменения в соотношении газов в пограничном слое планеты. Перенос и рассеивание атмосферными течениями потоков ПГ от таких систем могут приводить к большим (~ 2%) вариациям в распределении XCO_2 и XCH_4 . Эти вариации «углеродной погоды» в синоптическом масштабе могут скрывать компактные источники выбросов (крупные электростанции/города) и могут вносить небольшие градиенты в фоновые поля XCO_2 и XCH_4 , которые нужно учитывать, чтобы избежать искажений в оценках потоков этих газов между поверхностью и атмосферой. Ошибки в измерениях XCO_2 или XCH_4 , которые коррелированы по пространству или времени, создают одни из самых больших проблем в решении поставленной задачи (CEOS, 2018).

В целом, задачи, связанные с мониторингом ПГ, поставленные перед современными и планируемыми спутниковыми миссиями, можно обобщить следующим образом:

- отслеживание изменения общего содержания ПГ в атмосфере,
- выявление источников и стоков выбросов ПГ,
- использование данных наблюдений за содержанием ПГ в глобальных климатических моделях и наборах данных,
- прицельные измерения содержания ПГ с целью решения различных климатических задач, например, выявление и оценка утечек ПГ.

Согласно видению Всемирной Метеорологической Организации (ВМО-№ 1243, 2019), потребности пользователей в наблюдениях к 2040 году будут

меняться, согласно ожидаемому эволюционированию технологий. По сравнению с текущими потребностями к 2040 году пользователям потребуются:

- 1) наблюдения с более высоким разрешением и улучшенные временные и пространственные выборки/охват;
- 2) более высокое качество данных и последовательная характеристика неопределенности;
- 3) новые типы данных, позволяющие понять плохо изученные до сих пор процессы земной системы, включая космическую погоду;
- 4) эффективная и совместимая методология представления и распространения данных с учетом ожидаемого дальнейшего роста объемов данных.

Доступ к данным, восстановленным по спутниковым измерениям

Данные содержания парниковых газов в столбе атмосферы, восстановленные по спутниковым измерениям, можно найти в открытом доступе и использовать для научно-исследовательских целей. Информация доступна в различном виде («уровне») в зависимости от степени обработки исходных измерений.

Уровень 1 – это исходные спектрограммы, полученные со спутников. Уровень 2 предполагает, что восстановлено содержание газа непосредственно над «следом» прибора (пикселем) на поверхности земли. Форма и размер пикселя зависят от прибора, а также от того, проводились ли измерения в надири или в лимбе. Такие данные имеют самое высокое пространственное разрешение, но работа с ними требует дальнейшей обработки. Данные уровня 3 представляют собой содержание газов, полученное из уровня 2 осреднением по пространственной сетке. Пространственное разрешение и точность таких данных несколько хуже, но с такими данными удобнее работать и проще их интерпретировать.

Среди ресурсов, где в открытом доступе находятся данные по ПГ, полученные по спутниковым измерениям, можно отметить:

- 1) <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>: содержание метана, углекислого газа по данным прибора AIRS и др. (данные уровня 3);
- 2) <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>: содержание ПГ, восстановленное по измерениям прибора TROPOMI (данные уровня 2);
- 3) <https://earth.esa.int/eogateway/catalog/gosat-tanso-fts-and-cai-full-archive-and-new-products?category=Data>: доступ к данным о парниковых газах, восстановленным по измерениям приборов спутника GOSAT;
- 4) <https://climate.esa.int/en/projects/ghgs/about/>: доступ к данным и описание проекта GHG-CCI (GHG-CCI, 2020)

В целом, данные со спутниковых аппаратов по отдельности доступны в каталогах управляющих спутниками организаций и на сайтах проектов, предоставляющих доступ к сгенерированным наборам данных основных климатических переменных, полученных по данным ДЗЗ. Подобная доступность помогает не только разностороннему научному анализу и исследованиям на

международном уровне, валидации измерений различных спутников посредством сравнения их между собой, но и делает прозрачным мониторинг изменения климата и содействие разных стран усилиям по смягчению последствий в поддержку Парижского соглашения.

Заключение

Результаты анализа доступных российских и зарубежных материалов по существующим и запланированным на ближайшие годы программам спутникового мониторинга парниковых газов показывают, что система мониторинга служит независимым инструментом для получения объективной количественной информации о распределении парниковых газов. Востребованность этих данных в последние годы растет, но возникают вопросы точности полученных со спутников данных, сравнимости с наземными наблюдениями и сопоставимости с данными отчетности стран и компаний.

В настоящее время решение научных и прикладных задач климатической повестки ставит на первый план потребность в оперативном выявлении источников эмиссий парниковых газов с высокой степенью пространственной и временной детализации данных. Поэтому большинство современных или запланированных к запуску спутниковых систем, измеряющих содержание углекислого газа и метана, направлены на получение более точной количественной информации о содержании парниковых газов в атмосфере, необходимой для выявления источников выбросов или стоков ПГ.

Несмотря на то, что за последние 15 лет в космических технологиях и методах измерений парниковых газов был достигнут значительный прогресс, необходимы новые достижения для удовлетворения растущих требований и решения актуальных задач.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках научных тем Росгидромета (ФГБУ «ИГКЭ») АААА-А20-120020590066-5 «Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга» и АААА-А20-120021090098-8 «Развитие методов и технологий расчетного мониторинга антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов и короткоживущих климатически-активных веществ» и темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009).

Список литературы

ВМО-№ 1243 (2019) *Перспективное видение в отношении Интегрированной глобальной системы наблюдений ВМО в 2040 году*, 56 с. URL: <http://legacy-ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/wmo/1243.pdf> (дата обращения 24.12.2021 г.).

НДК (2021) *Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2019 гг. Часть I*, Москва, 459 с. URL: <http://downloads.igce.ru/kadastr/rus-2021-nir-15apr21.zip> (дата обращения 24.12.2021 г.).

Приказ (2015) *Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 30.06.2015 № 300 «Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации»*, Москва, URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201512170023> (дата обращения 24.12.2021 г.).

ФЗ (2021) *Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»*, Москва, URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (дата обращения 24.12.2021 г.).

Andrews, A.E., Kofler, J.D., Trudeau, M.E., Williams, J.C., Neff, D.H., Masarie, K.A., Chao, D.Y., Kitzis, D.R., Novelli, P.C., Zhao, C.L., Dlugokencky, E.J., Lang, P.M., Crotwell, M.J., Fischer, M.L., Parker, M.J., Lee, J.T., Baumann, D.D., Desai, A.R., Stanier, C.O., De Wekker, S.F.J., Wolfe, D.E., Munger, J.W., and Tans P.P. (2014) CO₂, CO, and CH₄ measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 7, pp. 647-687, doi: 10.5194/amt-7-647-2014.

Bergamaschi, P., Danila, A., Weiss, R.F., Ciais, P., Thompson, R.,L., Brunner, D., Levin, I., Meijer, Y., Chevallier, F., Janssens-Maenhout, G., Bovensmann, H., Crisp, D., Basu, S., Dlugokencky, E., Engelen, R., Gerbig, C., Günther, D., Hammer, S., Henne, S., Houweling, S., Karstens, U., Kort, E., Maione, M., Manning, A. J., Miller, J., Montzka, S., Pandey, S., Peters, W., Peylin, P., Pinty, B., Ramonet, S. Reimann, S., Röckmann, T., Schmidt, M., Strogies, M., Sussams, L., Tarasova, O., van Aardenne, J., Vermeulen, F.T., Vogel, F. (2018) *Atmospheric monitoring and inverse modelling for verification of greenhouse gas inventories*, EUR 29276 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-88938-7, doi:10.2760/759928, JRC111789, 2018.

Bode, M., Wührer, C., Alpers, M., Millet, B., Ehret, G., and Bousquet P. (2017) *Merlin: an integrated path differential absorption (IPDA) lidar for global methane remote sensing*, Proc. SPIE 10562, International Conference on Space Optics, ICSO 2016, 105621S (25 September 2017), doi: 10.1117/12.2296115.

CEOS (2018) *A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space*, Prepared by the CEOS Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team Version 1.0 - 8 October 2018.

Chen Wen, Zhang Yonghe, Yin Zengshan, Zheng Yuquan, Yan Changxiang, Yang Zhongdong, Liu Yi. (2012) *The TanSat Mission: Global CO₂ Observation and Monitoring. Proceedings of the 63rd IAC (International Astronautical Congress)*, Naples, Italy, October 1-5, 2012, pp. IAC-12-B4.4.12.

Clerbaux, C., Boynard, A., Clarisse, L., Maya, G., Hadji-Lazaro, J., et al. (2009) Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder, *Atmospheric Chemistry and Physics, European Geosciences Union*, vol. 9(16), pp.6041-6054, doi: 10.5194/acp-9-6041-2009.

Dogniaux, M., Crevoisier, C., Gousset, S., Le Coarer, É., Ferrec, Y., Croizé, L., Wu, L., Hasekamp, O., Sic, B., and Brooker, L. (2021) *The Space CARBON Observatory (SCARBO) concept: Assessment of XCO₂ and XCH₄ retrieval performance*. Atmos. Meas. Tech. Discuss. [preprint], doi: 10.5194/amt-2021-224, in review, 2021.

Ehret, G., Bousquet, P., Pierangelo, C., Alpers, M., Millet, B., Abshire, J.B., Bovensmann, H., Burrows, J.P., Chevallier, F., Ciais, P., Crevoisier, C., Fix, A., Flamant, P., Frankenberg, C., Gibert, F., Heim, B., Heimann, M., Houweling, S., Hubberten, H.W., Jöckel, P., Law, K., Löw, A., Marshall, J., Agusti-Panareda, A., Payan, S., Prigent, C., Rairoux, P., Sachs, T., Scholze, M., Wirth, M. (2017) MERLIN. A French-German Space Lidar Mission Dedicated to Atmospheric Methane, *Remote Sens.*, vol. 9, pp. 1052, doi: 10.3390/rs9101052.

Eldering, A., O'Dell, C., Taylor, T., Pavlick, R., Kurosu, T., Osterman, G., Fisher, B., Rosenberg, R., Lee, R., Lawson, P., Chapsky, L., Yu S., Bennett, M., Jengenathan, M., Spiers, G., Basilio, R. (2018) *The OCO-3 Mission: Science Objectives and Instrument Performance*. – NASA/JPL, Caltech, 9 May 2018, URL: https://iwggms14.physics.utoronto.ca/documents/98/1.9_Anmarie_Eldering_mac_for_distribution_zEvu7mh.pdf (дата обращения 24.12.2021 г.).

Eldering, A., Solish, B., Kahn, P., Boland, S., Crisp, D., Gunson, M. (2012) *High Precision Atmospheric CO₂ Measurements from Space: The Design and Implementation of OCO-2*, Proceedings of the 2012 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, March 3-10.

Ferrec, Y., Bonnery, G., Brooker, L., Croizé, L., Gousset, S., Le Coarer, E. (2019) *NanoCarb part 1: compact snapshot imaging interferometer for CO₂ monitoring from space*, Proc. SPIE 11180, International Conference on Space Optics — ICSO 2018, 1118021 (12 July 2019), doi: 10.1117/12.2535992.

GHG-CCI, (2020) *User Requirements Document for the GHG-CCI+ project of ESA's Climate Change Initiative*, pp. 42, version 3.0, 17 February, 2020. <http://cci.esa.int/ghg/> (дата обращения 24.12.2021 г.).

Gousset, S., Croizé, L., Le Coarer, E., Ferrec, Y., Brooker, L. (2019) *NanoCarb part 2: performance assessment for total column CO₂ monitoring from a nanosatellite*, Proc. SPIE 11180, International Conference on Space Optics — ICSO 2018, 111803Q (12 July 2019), doi: 10.1117/12.2536053.

Kasuya, M., Hamazaki, T. (2005) Overview of the Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT), *Proceedings of WSANE 2005 (Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics)*, KARI, Daejeon, Korea, March 3-5, 2005, pp. 145-149.

Kiel, M., Eldering, A., Roten, D., Lin, J., Feng, S., et al. (2021) *Urban-focused satellite CO₂ observations from the Orbiting Carbon Observatory-3: A first look at the Los Angeles megacity*. Remote Sensing of Environment, Elsevier, 258, pp.112314, doi: 10.1016/j.rse.2021.112314.

Levelt, P., Veefkind, P. (2010) *TROPOMI: Sensing the Troposphere from Space*, Triennial Scientific Report, 2007-2009, URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.435.5489&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения 24.12.2021 г.).

Miller, C.E., Crisp, D., DeCola, P.L., Olsen, S.C., Randerson, J.T., Michalak, A.M., Alkhaled, A., Rayner, P., Jacob, D.J., Suntharalingam, P., Jones, D.B.A., Denning, A.S., Nicholls, M.E., Doney, S.C., Pawson, S., Boesch, H., Connor, B.J., Fung, I.Y., O'Brien, D., Salawitch, R.J., Sander, S.P., Sen, B., Tans, P.P., Toon, G.C., Wennberg, P.O., Wofsy, S.C., Yung, Y.L., Law, R.M. (2007) Precision requirements for space-based XCO₂ data, *J. Geophys. Res.*, vol. 112, pp. D10314, doi:10.1029/2006JD007659.

Nakajima, M., Suto, H., Yotsumoto, K., Abe, M., Kuze, A., Shiomi, K., Tanaka, T., Ohya, H., Tateshita, Y. (2013) *Overview of the GOSAT-2 Mission*, Proceedings of the 29th ISTS (International Symposium on Space Technology and Science), Nagoya-Aichi, Japan, June 2-8, 2013, p. 2013-n-60.

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.

Sierk, B., Bézy, J.-L., Löscher, A., Meijer, Y. (2018) *The European CO₂ Monitoring Mission: observing anthropogenic greenhouse gas emissions from space*, Proc. SPIE 11180, International Conference on Space Optics. ICSO 2018, 111800M (12 July 2019), doi: 10.1117/12.2535941.

References

VMO-№ 1243 (2019) *Perspektivnoye videniye v otnoshenii Integrirovannoy global'noy sistemy nabyudeniya VMO v 2040 godu* [Vision for the WMO Integrated Global Observing System in 2040], URL: <http://legacy-ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/wmo/1243.pdf> (дата обращения 24.12.2021 г.).

NDK (2021) *Natsional'nyy doklad o kadastrе antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtсии poglotitelyami parnikovyykh gazov ne reguliruyemykh Monreal'skim protokolom za 1990-2019 gg.*, Chast' 1 [National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990–2019. Part 1], Moskva, Russia, 459 s., URL: <http://downloads.igce.ru/kadastr/rus-2021-nir-15apr21.zip> (дата обращения 24.12.2021 г.).

Prikaz (2015) *Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 30.06.2015 № 300 «Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazaniy i rukovodstva po kolichestvennomu opredeleniyu ob"yema vybrosov parnikovyykh gazov organizatsiyami, osushchestvlyayushchimi khozyaystvennyuyu i inuyu deyatel'nost' v Rossiyskoy Federatsii»* [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated June 30, 2015 No. 300 “On approval of guidelines and guidelines for quantifying greenhouse gas emissions by organizations engaged in economic and other activities in the Russian Federation”], Moskva, Russia, URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201512170023> (data obrashcheniya 24.12.2021 g.).

FZ (2021) *Federal'nyy zakon ot 02.07.2021 № 296-FZ «Ob ogranichenii vybrosov parnikovyykh gazov»* [Federal Law No. 296-FZ dated July 2, 2021 “On Limiting Greenhouse Gas Emissions”], Moskva, Russia, URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (data obrashcheniya 24.12.2021 g.).

Andrews, A.E., Kofler, J.D., Trudeau, M.E., Williams, J.C., Neff, D.H., Masarie, K.A., Chao, D.Y., Kitzis, D.R., Novelli, P.C., Zhao, C.L., Dlugokencky, E.J., Lang, P.M., Crotwell, M.J., Fischer, M.L., Parker, M.J., Lee, J.T., Baumann, D.D., Desai, A.R., Stanier, C.O., De Wekker, S.F.J., Wolfe, D.E., Munger, J.W., and Tans P.P. (2014) CO₂, CO, and CH₄ measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 7, pp. 647-687, doi: 10.5194/amt-7-647-2014.

Bergamaschi, P., Danila, A., Weiss, R.F., Ciais, P., Thompson, R.,L., Brunner, D., Levin, I., Meijer, Y., Chevallier, F., Janssens-Maenhout, G., Bovensmann, H., Crisp, D., Basu, S., Dlugokencky, E., Engelen, R., Gerbig, C., Günther, D., Hammer, S., Henne, S., Houweling, S., Karstens, U., Kort, E., Maione, M., Manning, A. J., Miller, J., Montzka, S., Pandey, S., Peters, W., Peylin, P., Pinty, B., Ramonet, S. Reimann, S., Röckmann, T., Schmidt, M., Strogies, M., Sussams, L., Tarasova, O., van Aardenne, J., Vermeulen, F.T., Vogel, F. (2018) *Atmospheric monitoring and inverse modelling for verification of greenhouse gas inventories*, EUR 29276 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-88938-7, doi:10.2760/759928, JRC111789, 2018.

Bode, M., Wührer, C., Alpers, M., Millet, B., Ehret, G., and Bousquet P. (2017) *Merlin: an integrated path differential absorption (IPDA) lidar for global methane remote sensing*, Proc. SPIE 10562, International Conference on Space Optics, ICSSO 2016, 105621S (25 September 2017), doi: 10.1117/12.2296115.

CEOS (2018) *A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space*. Prepared by the CEOS Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team Version 1.0 - 8 October 2018.

Chen Wen, Zhang Yonghe, Yin Zengshan, Zheng Yuquan, Yan Changxiang, Yang Zhongdong, Liu Yi. (2012) *The TanSat Mission: Global CO₂ Observation*

and Monitoring. – Proceedings of the 63rd IAC (International Astronautical Congress), Naples, Italy, October 1-5, 2012, pp. IAC-12-B4.4.12.

Clerbaux, C., Boynard, A., Clarisse, L., Maya, G., Hadji-Lazaro, J., et al. (2009) Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder, *Atmospheric Chemistry and Physics, European Geosciences Union*, vol. 9(16), pp.6041-6054, doi: 10.5194/acp-9-6041-2009.

Dogniaux, M., Crevoisier, C., Gousset, S., Le Coarer, É., Ferrec, Y., Croizé, L., Wu, L., Hasekamp, O., Sic, B., and Brooker, L. (2021) *The Space CARBOn Observatory (SCARBO) concept: Assessment of XCO₂ and XCH₄ retrieval performance*, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* [preprint], doi: 10.5194/amt-2021-224, in review, 2021.

Ehret, G., Bousquet, P., Pierangelo, C., Alpers, M., Millet, B., Abshire, J.B., Bovensmann, H., Burrows, J.P., Chevallier, F., Ciais, P., Crevoisier, C., Fix, A., Flamant, P., Frankenberg, C., Gibert, F., Heim, B., Heimann, M., Houweling, S., Hubberten, H.W., Jöckel, P., Law, K., Löw, A., Marshall, J., Agusti-Panareda, A., Payan, S., Prigent, C., Rairoux, P., Sachs, T., Scholze, M., Wirth, M. (2017) MERLIN: A French-German Space Lidar Mission Dedicated to Atmospheric Methane, *Remote Sens.*, vol. 9, pp. 1052, doi: 10.3390/rs9101052.

Eldering, A., O'Dell, C., Taylor, T., Pavlick, R., Kurosu, T., Osterman, G., Fisher, B., Rosenberg, R., Lee, R., Lawson, P., Chapsky, L., Yu S., Bennett, M., Jengenathan, M., Spiers, G., Basilio, R. (2018) *The OCO-3 Mission: Science Objectives and Instrument Performance. – NASA/JPL, Caltech, 9 May 2018*, URL: https://iwggms14.physics.utoronto.ca/documents/98/1.9_Annmarie_Eldering_mac_for_distribution_zEvu7mh.pdf (дата обращения 24.12.2021 г.).

Eldering, A., Solish, B., Kahn, P., Boland, S., Crisp, D., Gunson, M. (2012) *High Precision Atmospheric CO₂ Measurements from Space: The Design and Implementation of OCO-2*, *Proceedings of the 2012 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, Montana, USA, March 3-10.

Ferrec, Y., Bonnery, G., Brooker, L., Croizé, L., Gousset, S., Le Coarer, E. (2019) *NanoCarb part 1: compact snapshot imaging interferometer for CO₂ monitoring from space*, *Proc. SPIE 11180, International Conference on Space Optics — ICSO 2018*, 1118021 (12 July 2019), doi: 10.1117/12.2535992.

GHG-CCI, (2020) *User Requirements Document for the GHG-CCI+ project of ESA's Climate Change Initiative*, pp. 42, version 3.0, 17 February, 2020. <http://cci.esa.int/ghg/> (дата обращения 24.12.2021 г.)

Gousset, S., Croizé, L., Le Coarer, E., Ferrec, Y., Brooker, L. (2019) *NanoCarb part 2: performance assessment for total column CO₂ monitoring from a nano-satellite*, *Proc. SPIE 11180, International Conference on Space Optics — ICSO 2018*, 111803Q (12 July 2019), doi: 10.1117/12.2536053.

Kasuya, M., Hamazaki, T. (2005) Overview of the Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT), *Proceedings of WSANE 2005 (Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics), KARI, Daejeon, Korea, March 3-5, 2005*, pp. 145-149.

Kiel, M., Eldering, A., Roten, D., Lin, J., Feng, S., et al. (2021) *Urban-focused satellite CO₂ observations from the Orbiting Carbon Observatory-3: A first look at the Los Angeles megacity*. Remote Sensing of Environment, Elsevier, 258, pp.112314, doi: 10.1016/j.rse.2021.112314.

Levelt, P., Veefkind, P. (2010) *TROPOMI: Sensing the Troposphere from Space*, Triennial Scientific Report, 2007-2009, URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.435.5489&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения 24.12.2021 г.).

Miller, C.E., Crisp, D., DeCola, P.L., Olsen, S.C., Randerson, J.T., Michalak, A.M., Alkhaled, A., Rayner, P., Jacob, D.J., Suntharalingam, P., Jones, D.B.A., Denning, A.S., Nicholls, M.E., Doney, S.C., Pawson, S., Boesch, H., Connor, B.J., Fung, I.Y., O'Brien, D., Salawitch, R.J., Sander, S.P., Sen, B., Tans, P.P., Toon, G.C., Wennberg, P.O., Wofsy, S.C., Yung, Y.L., Law, R.M. (2007) Precision requirements for space-based XCO₂ data, *J. Geophys. Res.*, vol. 112, pp. D10314, doi:10.1029/2006JD007659.

Nakajima, M., Suto, H., Yotsumoto, K., Abe, M., Kuze, A., Shiomi, K., Tanaka, T., Ohyama, H., Tateshita, Y. (2013) *Overview of the GOSAT-2 Mission*, Proceedings of the 29th ISTS (International Symposium on Space Technology and Science), Nagoya-Aichi, Japan, June 2-8, 2013, p. 2013-n-60.

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.

Sierk, B., Bézy, J.-L., Löscher, A., Meijer, Y. (2018) *The European CO₂ Monitoring Mission: observing anthropogenic greenhouse gas emissions from space*, Proc. SPIE 11180, International Conference on Space Optics — ICSO 2018, 111800M (12 July 2019), doi: 10.1117/12.2535941.

Статья поступила в редакцию (Received): 6.02.22;

Статья доработана после рецензирования (Revised): 18.02.2022;

Принята к публикации (Accepted): 10.04.2022.

Для цитирования / For citation

Зеленова, М.С., Гинзбург, В.А., Максимова, О.В., Трифонова-Яковлева, А.М. (2022) Обзор действующих и планируемых спутниковых систем мониторинга парниковых газов и возможности их применения для решения прикладных климатических задач, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIII, № 1-2, с. 108-130, DOI: 10.21513/0207-2564-2022-1-2-108-130.

Zelenova, M.S., Ginzburg, V.A., Maksimova, O.V., Trifonova-Yakovleva, A.M. (2022) Review of the operating and planned remote greenhouse gas observation systems and possibility of their application for applied climatic researches, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXIII, no 1-2, pp. 108-130, DOI: 10.21513/0207-2564-2022-1-2-108-130.