Анализ возможности расчёта элементов баланса атмосферных парниковых газов по современным данным спутникового мониторинга

И. Н. Садовский, Е. В. Пашинов, Д. С. Сазонов

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: Ilya_Nik_Sad@mail.ru

Работа посвящена вопросу возможности использования данных спутникового мониторинга по концентрации парниковых газов в атмосфере Земли при оценке их баланса для выделенных территорий. В самом общем случае уравнение баланса содержит несколько ключевых составляющих: внешний приток вещества в выделенную область и отток из неё, изменение интегральной массы внутри выделенного района (объёма), эмиссия вещества внутри области и его поглощение. Разница последних двух компонент представляет наибольший интерес в задачах анализа выбросов парниковых газов внутри интересующих регионов. Её нахождение невозможно без оценки величин горизонтального переноса, определяющих соотношение первых двух компонент уравнения баланса. Эта задача может быть решена при наличии данных спутникового зондирования, которые должны удовлетворять ряду требований. Среди них — максимальная площадь покрытия, высокая периодичность наблюдений, высокое пространственное разрешение, однородность, а также оценка качества предоставляемых данных. Рассмотрению указанных параметров, а также исследованию возможности использования данных современных спутниковых систем оценки газового состава атмосферы для решения описанной задачи и посвящена содержательная часть публикации. Для анализа использовались данные, поступающие в настоящее время с приборов: ACE-FTS (*англ.* Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer), OCO-2 (*англ.* Orbiting Carbon Observatory), TANSO-FTS (*англ.* Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations — Fourier Transform Spectrometer), MOPITT (*англ.* Measurement Of Pollution In The Troposphere), TROPOMI (*англ.* Tropospheric Ozone-Monitoring Instrument), MLS (*англ.* Microwave Limb Sounder) и OMPS (*англ.* Ozone Mapping and Profiler Suite). Анализ проводился в отношении малых газовых составляющих, которые, во-первых, являются парниковыми газами, а во-вторых, могут иметь природные источники возникновения либо оказаться результатом производственной деятельности человека. В это число вошли: CO_2, CH_4, SO_2 и N_2O. Исследования показали, что по выдвинутым критериям наибольший потенциал для решения основной задачи проводимых исследований имеют данные, поступающие с прибора TROPOMI. При этом отсутствие заявленных данных по малым газовым составляющим CO_2 и N_2O, малое покрытие для CH_4 и неоднородность данных по SO_2 не позволяют в настоящее время использовать данные этого инструмента для решения задачи восстановления разницы между выбросом и поглощением парниковых газов. По указанным причинам авторами предложено апробировать технологию балансовой оценки на результатах измерений прибором TROPOMI, усреднённой по вертикальному столбу атмосферы концентрации оксида углерода.

Ключевые слова: парниковые газы, уравнение баланса, оксид углерода, TROPOMI, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 21.11.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-117-128

Введение

Способность атмосферы задерживать часть теплового излучения поверхности планеты, приводящая к аккумуляции тепла её климатической системой, называется парниковым эффектом. Парниковый эффект атмосферы Земли обеспечил возможность возникновения и существования на ней сложных форм жизни. Однако наблюдаемое в последнее время усиление парникового эффекта может нарушить тепловое равновесие или сместить его в область некомфортных для современной жизни условий. Проявлением этого процесса, по мнению специалистов в области климатологии, становится не только рост средней температуры тропосферы, но и увеличение частоты и интенсивности различных природных катаклизмов,

возникающих на нашей планете. Тепловое излучение в атмосфере Земли поглощается молекулами так называемых парниковых газов. К последним относятся в основном многоатомные газы, в меньшей степени — двухатомные, состоящие из атомов разных химических элементов. Поглощение молекулами этих газов части квантов теплового излучения приводит к их возбуждению с последующим переизлучением. При этом часть переизлучённой радиации направлена обратно к поверхности, что приводит к уменьшению потери энергии планетой за счёт уходящего теплового излучения.

Начиная с XIX в. антропогенное воздействие на атмосферу Земли приводит к заметному повышению содержания в ней парниковых газов. В результате этого величина парникового эффекта возрастает, что считается наиболее значимой причиной глобального потепления климата Земли, наблюдавшегося на протяжении XX в.

В подтверждение необходимости постоянного контроля за складывающейся ситуацией в 1988 г. по инициативе Всемирной метеорологической организации (ВМО, *англ.* World Meteorological Organization — WMO) и при поддержке Организации объединённых наций (ООН) была создана Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК, *англ.* Intergovernmental Panel on Climate Change — IPCC). Одной из функций МГЭИК является сбор и обнародование результатов оценок баланса парниковых газов для территорий стран-участниц. При этом оценки выполняются в большинстве своём на основе теоретических расчётов, подробные методики проведения которых разрабатываются МГЭИК. Очевидно, что их точность зависит от множества факторов, начиная от сложности применяемых моделей и заканчивая методами сбора входных данных, в них используемых.

Использование данных спутникового мониторинга даёт в этом плане неоспоримые преимущества, поскольку предоставляет фактическую информацию об интересующем параметре с определённой периодичностью и по всей поверхности Земли. Применительно к задаче оценки баланса парниковых газов для выделенного района средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют отказаться от проведения локальных измерений их выброса, сложных цепочек самостоятельных или вспомогательных вычислений (например, позволяющих связать тип растительности и её биомассу с количеством выделенных/поглощённых газовых компонент (Karminov et al., 2021)) в пользу реальной мгновенной оценки концентрации газов в атмосфере для интересующих областей.

Осознание этого факта стало причиной активного развития приборов и методов спутникового мониторинга малых газовых составляющих (МГС) в атмосфере, основанных на анализе прямого или отражённого солнечного излучения. К сожалению, до сих пор, несмотря на постоянно растущие точности измерительных приборов, возможности машинных вычислений и всё более совершенные методы решения обратных задач, нельзя сказать, что спутниковые технологии могут определить полный химический состав атмосферы с высокой точностью. Облачный покров, зависимость от освещённости, меняющееся альбедо подстилающей поверхности и т. д. — все эти факторы оказывают существенное влияние на качество спутниковых данных, приводя к невозможности проведения измерений в некоторых областях и при определённых метеорологических условиях.

Несмотря на указанные сложности, привлечение данных спутникового мониторинга МГС для проведения их балансовых оценок — актуальная задача. Содержательная часть публикации направлена на анализ доступных в настоящее время данных спутниковых измерений концентраций МГС (и некоторых парниковых газов в их числе) на предмет возможности их использования в уравнениях баланса на заданных территориях.

Действующие спутниковые системы мониторинга малых газовых составляющих

В рамках описываемой работы был проведён анализ данных функционирующих в настоящее время спутниковых систем мониторинга МГС. В их число вошли: ACE-FTS (*англ.* Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer), OCO-2 (*англ.* Orbiting Carbon

Observatory), TANSO-FTS (*англ.* Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations — Fourier Transform Spectrometer), MOPITT (*англ.* Measurement Of Pollution In The Troposphere), TROPOMI (*англ.* Tropospheric Ozone-Monitoring Instrument), MLS (*англ.* Microwave Limb Sounder) и OMPS (*англ.* Ozone Mapping and Profiler Suite).

Прибор ACE-FTS (см., например, работу (Walker et al., 2016)) выступает основной полезной нагрузкой спутника SCISAT (*англ.* Scientific Satellite), запущенного Канадским космическим агентством (*англ.* Canadian Space Agency — CSA) в 2003 г. Это фурье-спектрометр с высоким спектральным разрешением (0,02 $см^{-1}$), работающий в диапазоне от 2,2 до 13,3 мкм (750–4400 $см^{-1}$). Прибор ориентирован на проведение радиозатменных наблюдений. При этом большое наклонение орбиты и её небольшая высота позволяют охватить тропические, средние широты и полярные регионы. Однако измерения относятся только к верхней тропосфере и стратосфере. Прибор имеет разрешение по высоте от 2 до 6 км и от 5 до 500 км — в горизонтальной плоскости (в зависимости от геометрии наблюдений в момент проведения измерений). Заявленный перечень восстанавливаемых параметров включает концентрацию 40 МГС, а также вертикальную структуру тонких облаков, аэрозолей и профилей температуры и влажности. При этом основная цель миссии ACE состоит в измерении и анализе химических и динамических процессов, которые влияют на распределение озона в верхней тропосфере и стратосфере.

Спутник OCO-2 (с одноимённым прибором на борту) (см., например, работу (Crisp, 2015)) — первый специализированный спутник, запущенный NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — НАСА) для изучения углекислого газа в атмосфере Земли. Декларируется, что проводимые этим инструментом исследования обеспечивают точность, разрешение и полосу обзора, необходимые для определения характеристик источников и поглотителей этого ключевого парникового газа в региональных масштабах (1000 км и более). Программа стартовала в 2014 г. и в настоящее время продолжает функционировать. OCO-2 представляет собой трёхдиапазонный (758–772, 1594–1619 и 2042–2082 нм) дифракционный спектрометр, работающий в трёх режимах: надирном, в области солнечного блика, а также наблюдения выделенной цели. При этом полоса обзора составляет 10 км и состоит из элементов с размерами 1,29×2,25 км.

Инструмент TANSO-FTS (см., например, работу (Suto et al., 2021)) представляет собой четырёхдиапазонный фурье-спектрометр, работающий в областях 14,28–5,55; 2,08–1,92; 1,72–1,56 и 0,775–0,757 мкм. Потенциально это позволяет решать более 50 задач дистанционного зондирования атмосферы, из которых приоритетными представляются измерения концентрации метана, углекислого газа, водяного пара, кислорода, озона, а также аэрозольных частиц. Прибор относится к полезной нагрузке спутника GOSAT (*англ.* Green-house gas Observing Satellite), запущенного в 2009 г. Японским космическим агентством (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA). В приборе реализовано сканирование в направлении, перпендикулярном направлению полёта, с шириной полосы обзора 790 км при размере элемента разрешения в 10,5 км.

Инструмент MOPITT (см., например, публикацию (Tang et al., 2020)) — корреляционный спектрометр, работающий на восьми частотных каналах в трёх различных диапазонах спектра: четыре канала — в области 4,62 мкм, два канала — в районе 2,33 мкм и два канала — в окрестности 2,26 мкм. Прибор является полезной нагрузкой спутника Terra, запущенного NASA в 1999 г. по программе EOS (*англ.* Earth Observation System). К основным измерениям относят восстановление вертикального профиля оксида углерода (CO_2) и интегральной концентрации метана (CH_4). В приборе реализован режим поперечного сканирования с шириной полосы в 640 км и пространственным разрешением порядка 22 км.

Прибор TROPOMI (см., например, работу (Vries et al., 2009)) представляет собой космический дифракционный спектрометр, работающий в диапазоне длин волн между ультрафиолетовым и коротковолновым инфракрасным излучением (три частотных окна с длинами волн 270–495, 710–775 и 2305–2385 нм). Данный инструмент, являющийся единственной полезной нагрузкой спутника Sentinel-5P, был запущен в 2017 г. Европейским космическим

агентством (*англ.* European Space Agency — ESA). В приборе реализована функция веерного сканирования с шириной полосы обзора порядка 2600 км на поверхности Земли. Типичный размер пикселя (в районе надира) составляет около 7 км (7,0×3,5; 7×7 и 7×28 км в зависимости от диапазона). Среди заявленных продуктов присутствуют 32 параметра атмосферы, включая концентрацию 11 газовых компонент.

Спутник Aura был запущен NASA в 2004 г. на солнечно-синхронную орбиту. На его борту находится прибор MLS (см., например, публикацию (Waters et al., 2006)), который проводит лимбовые измерения яркостной температуры атмосферы в спектральном диапазоне от 118 2500 ГГц (36 частотных диапазонов в окрестности частот 118, 190, 240, 640 и 2500 ГГц). Целью проводимых измерений становится получение вертикальных профилей температуры, влажности, а также концентрации 12 газовых компонент. Прибор имеет горизонтальное разрешение 300 км, его измерения относятся к высоте от 10 км и более, вертикальное разрешение лежит в пределах 2,6–4 км.

Приборы OMPS (см., например, работу (Flynn et al., 2006)) в настоящее время установлены на трёх различных спутниках в разной компоновке. На спутнике SNPP (*англ.* Suomi National Polar-orbiting Partnership), запущенном в 2011 г. при участии NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США) и NASA, функционируют два прибора OMPS: OMPS-limb и OMPS-nadir, проводящие лимбовые и надирные измерения соответственно. На спутнике NOAA-20, начавшем функционирование в 2017 г. (NOAA и NASA), функционирует прибор OMPS-limb. За счёт спутника NOAA-21 (NOAA и NASA) начиная с конца 2022 г. перечень приборов серии OMPS в космосе был расширен введением в эксплуатацию ещё одной пары OMPS-limb и OMPS-nadir. Приборы OMPS-limb представляют собой призменные спектрометры, проводящие измерения в диапазоне 290–1200 нм, имеют разрешение по высоте 2,2 км и 399 км по горизонтали. Три перекрывающихся сектора обзора обеспечивают ширину полосы наблюдения в 500 км. Характеристики OMPS-limb позволяют измерять 12 параметров атмосферы, включая содержание восьми газовых компонент. OMPS-nadir — это спектрометры на дифракционной решётке, проводящие измерения в диапазоне 35–400 нм. Они обеспечивают покрытие полосами шириной 2800 км и протяжённостью 50 км (1 раз в 7,6 с) с пространственным разрешением 50 км (SNPP) и 10 км (NOAA-21). Прибор позволяет решать 19 задач дистанционного зондирования атмосферы, в том числе восстанавливать концентрации пяти газовых компонент.

Анализ данных дистанционного мониторинга малых газовых составляющих

13–19 марта 2023 г. в Интерлакене (*нем.* Interlaken, Швейцария) прошла 58-я сессия МГЭИК, завершающая цикл Шестого оценочного доклада, над которым эксперты трудились с 2015 г. Одним из выводов, сделанных МГЭИК, было заключение, что если человечество сохранит объём глобального антропогенного годового выброса на уровне 2019 г., то оставшийся «бюджет непревышения» (определённый одним из сценариев в Пятом докладе МГЭИК) порога в 1,5 °C составит 500 Гт парниковых газов и будет израсходован уже в начале 30-х гг. XXI в. Чтобы достичь глобальных температурных целей, зафиксированных в Парижском соглашении 2016 г., — непревышения глобальной температурой 1,5 и 2 °C по отношению к доиндустриальному уровню, необходимо добиться нулевой антропогенной нетто-эмиссии CO_2 соответственно к 2050 или к 2070 г. Компенсировать же воздействие на климат можно лишь путём достижения отрицательной антропогенной нетто-эмиссии CO_2. Таким образом, в очередной раз была подчёркнута необходимость проведения соответствующих измерений последней величины.

Определить количество выделяемых/поглощаемых парниковых газов для какой-либо территории можно на основании анализа уравнения баланса, которое представляется в виде (см., например, работу (Ермаков и др., 2023)):

$$\int_{t_1}^{t_2} (P - E)\,\mathrm{d}t = -\iint_A Q(x, y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\Big|_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2} \mathrm{d}t \oint_l \vec{F}_A(x, y)\,\mathrm{d}\vec{n},$$

где: E — скорость эмиссии газа с интересующего элемента поверхности A (ограниченного контуром l); P — его скорость поглощения; $Q(x, y)$ — интегральная по высоте атмосферы масса газа на единицу площади; $\vec{F}_A(x, y)$ — интегрированный по высоте горизонтальный поток парникового газа. Как видно из представленного выражения, имеются три основных компоненты уравнения: искомая величина нетто-эмиссии газа для выделенного региона и периода $[t_1, t_2]$, которая может быть и отрицательной; изменение суммарного содержания газа в атмосфере над интересующей областью A за период $[t_1, t_2]$ и интегральный перенос газа через вертикальные границы столба атмосферы с основанием A. Помимо этого, справедливость представленной формы уравнения баланса будет в значительной степени определяться химическими процессами, происходящими в столбе атмосферы. Однако в качестве начального приближения можно ограничиться случаем их отсутствия. Знак левой части представленного выражения определяет характер анализируемого участка поверхности A — источник/поглотитель интересующего газа.

В настоящий момент не существует прямых методов спутниковых измерений переменных, стоящих в левой части приведённого выше выражения. При этом построение глобальных карт распределения физико-химических параметров атмосферы, включая концентрацию газовых компонент, является непосредственной задачей методов дистанционного зондирования. Соответственно, в рамках каждого такого изображения имеется информация о количестве интересующего газа в пределах столба атмосферы с основанием A, а значит, первый член в правой части уравнения баланса может быть рассчитан. Кроме этого, на основе методов анализа динамических изображений, при наличии последовательности сменяющих друг друга глобальных карт концентрации, имеется возможность оценки и второго члена в правой части уравнения. При этом расчёты производятся на основе данных реальных измерений, что выгодно отличает получаемые результаты от модельных расчётов, обычно используемых для оценки параметров E и P. Возможность применения подобного подхода при анализе спутниковых данных была продемонстрирована на примере водяного пара в работе (Ермаков и др., 2023).

Рассмотрение методов оценки потока вещества через границы выделенного контура по спутниковым изображениям, а также подходов к расчёту интегрального содержания газа внутри замкнутых контуров не было целью настоящей работы. Её цель — определить наиболее подходящие спутниковые данные для решения поставленной задачи.

Основные требования к спутниковым данным в рамках сформулированной задачи логично вытекают из анализа уравнения баланса, приведённого ранее.

Первым требованием, имеющим принципиальное значение, выступает обеспечение максимальной площади покрытия в пределах фиксированных временных интервалов. Очевидно, что при любых размерах выделенного элемента поверхности A расчёт интегрального содержания газа в атмосфере над ней возможен лишь при наличии результатов измерений внутри всей области. Присутствие пробелов в результатах измерений, вызванных особенностями реализации измерений (в ограниченном секторе обзора) или принципиальной невозможностью решения обратной задачи (значительное альбедо поверхности, сильная облачность и т. п.), неизменно приведёт к ошибкам вычислений и может стать причиной кардинально противоположных результатов балансовых оценок. Следует отметить, что среди функционирующих на орбите систем мониторинга большинство имеет очень узкие полосы обзора, объясняемые лимбовой геометрией наблюдений, отсутствием механических систем сканирования (в отличие от микроволновых средств ДЗЗ) или, например, методической ориентацией на восстановление исключительно вертикальной структуры параметров атмосферы. В свою очередь, это приводит к тому, что получаемые суточные композиты состоят из узких и редких полос, покрытых измерениями, и существенно больших по площади лакун (*рис. 1*, см. с. 122). Для всего набора инструментов, вошедших в анализ, был проведён расчёт их относительной

(к общей площади поверхности Земли) площади покрытия. Было показано, что наибольшее значение соответствует прибору TROPOMI (вплоть до 83 %), далее следует инструмент OMPS (порядка 17 %). Соответствующие значения для других приборов не превышают порога в 1 % (*табл. 1*). Существенная площадь покрытия важна не только при оценке баланса МГС на значительных площадях, но и при решении задачи обнаружения локальных зон увеличения выбросов, расположение которых заранее неизвестно и они могут просто не попасть в поле зрения прибора.

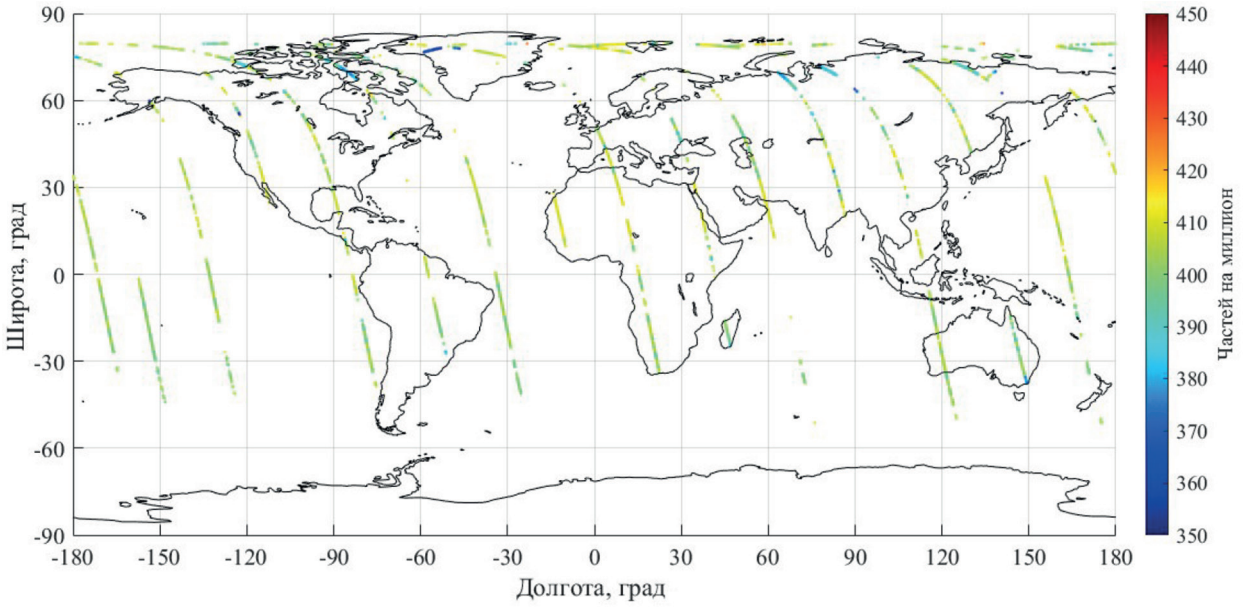

Рис. 1. Пример суточного покрытия результатами измерений прибором OCO-2

Таблица 1. Характеристики пространственного покрытия анализируемых приборов

Параметр	Прибор						
	ACE-FTS	OCO-2	TANSO-FTS	MOPITT	TROPOMI	MLS	OMPS
Покрытие, %	0,03	0,5	0,1	н/д	до 82,5	0,35	17
Период, сут	–	30	3	5	1	3	4 (limb), 12 (nadir)

Следует сделать оговорку, что малое пространственное покрытие не всегда становится безвыходной ситуацией. Так, например, при оценках баланса на месячных или годовых интервалах возможно накопление данных и формирование композитов, соответствующих этим временным диапазонам.

Здесь логично перейти к следующему требованию к спутниковым данным, касающемуся периодичности наблюдений для выделенного элемента поверхности. Как правило, расположение источников наиболее сильных антропогенных выбросов (крупные промышленные центры, химические предприятия и т. п.) заранее известно, а проведение сеансов наблюдения за этими районами может быть спланировано заранее. При этом, однако, если периодичность спутниковых наблюдений окажется существенно ниже частоты выбросов в этих районах, то оценки их величины, в соответствии с представленным уравнением, могут оказаться существенно заниженными в результате недооценки параметров $Q(x, y)$ и $\vec{F}_A(x, y)$. Аналогичные ошибки возможны и при низкой периодичности наблюдений в областях потенциального возникновения локальных выбросов природного (например, лесные пожары) и антропогенного характера (чрезвычайные ситуации на производствах). В соответствии с предложенной идеологией оценки баланса газовых составляющих к источникам этих выбросов могут быть оши-

бочно отнесены территории, являющиеся «транзитными» для газовых шлейфов, но характеризующиеся резкими скачками функций $Q(x, y)$ и $\vec{F}_A(x, y)$.

Обсуждённые параметры анализируемых систем мониторинга газового состава атмосферы сведены в *табл. 1*. Следует оговорить наблюдаемое несоответствие между приведёнными в ней значениями. Например, очевидно соотношение «покрытие/период» для инструментов TROPOMI и OMPS. Не вызывает вопросов эта величина и у прибора OCO-2. При этом для приборов TANSO-FTS и MLS, имеющих очень узкие полосы обзора, заявленный период полного покрытия составляет всего трое суток. Здесь стоит указать две возможные причины. Во-первых — использование неоднозначных терминов в описании технических характеристик аппаратуры (полное покрытие/повторяемость наблюдений), представленных на ресурсе https://space.oscar.wmo.int/instruments. Вторая причина заключается в том, что для некоторых приборов указаны значения, которые потенциально могут быть достижимы в специфических режимах их работы. При этом относительную площадь покрытия авторы настоящей публикации оценивали на реальных данных, полученных в штатных режимах и доступных для скачивания с официальных ресурсов.

Последний аспект также имеет большое значение при отборе данных спутниковых измерений. Очевидно, что наиболее востребованной становится задача оценки баланса для CO_2. При этом в свободном доступе актуальная информация по этому продукту имеется лишь для приборов ACE-FTS, OCO-2 и TANSO-FTS, использование которых для построения суточных карт распределения оказывается невозможным. В связи с этим перечень МГС, планируемых для отработки технологии расчёта баланса на выделенных территориях, был расширен. В него были включены CO_2, CH_4, SO_2 (диоксид серы) и N_2O (оксид азота), а список анализируемых приборов был составлен по критерию наличия измерений хотя бы одного из них. Несмотря на то, что в заявленных характеристиках перечисленных инструментов имеется почти полный перечень необходимых газовых компонент, реальное их количество оказалось существенно меньше (*табл. 2*). Символ «–» при заполнении таблицы ставился в случае отсутствия либо самого продукта по выделенному газу (данных, актуальных на момент написания настоящей работы), либо и продукта, и любой технической документации, описывающей процесс восстановления по данным конкретного инструмента; звёздочка («*») соответствует ситуации, когда рекламации и документация присутствуют, но доступ к самим продуктам ограничен.

Таблица 2. Сводная информация по наличию данных мониторинга МГС, выполняемого действующими спутниковыми миссиями

МГС	Название прибора						
	ACE-FTS	OCO-2	TANSO-FTS	MOPITT	TROPOMI	MLS	OMPS
CO_2	+	+	+	–	–	–	–
CH_4	+	–	*	*	+	–	–
SO_2	–	–	–	–	+	+	+
N_2O	+	–	–	–	–	+	–

Влияние пространственного разрешения используемой системы мониторинга можно сравнить по значимости с периодичностью измерений, где интегрирование по времени заменяется интегрированием измерений по площади в пределах элемента разрешения (возникновение риска невозможности регистрации локализованных источников повышения концентрации интересующей газовой компоненты). Следует отметить, что все современные спутниковые системы, ориентированные на исследования газового состава атмосферы, потенциально имеют высокое пространственное разрешение за счёт работы в инфракрасном и видимом диапазонах спектра, где (в отличие от микроволнового) достаточно просто обеспечить узкую диаграмму направленности приёмника при фиксированном размере его вход-

ной апертуры. При этом, однако, лимбовые и радиозатменные схемы измерений (помимо узкой полосы обзора) приводят к существенному ухудшению пространственного разрешения в горизонтальной плоскости (разрешающая способность анализируемых инструментов была приведена при их описании).

Анализ данных спутникового мониторинга газовых компонент по уже перечисленным параметрам показал, что наиболее подходящим для дальнейшего решения задачи восстановления баланса МГС представляется лишь один прибор — TROPOMI, имеющий широкую полосу обзора (2600 км), высокую повторяемость измерений (1 сут), малые значения элемента пространственного разрешения (порядка 7 км). Несмотря на потенциальную возможность измерения концентрации всех четырёх выделенных газовых компонент, декларируемую в техническом описании, в настоящее время на соответствующих сервисах размещены данные лишь по двум из них: CH_4 и SO_2. При этом требуемое пространственное покрытие обеспечивается лишь по диоксиду серы. Оно составляет 82,5 % для всех измерений и 67,54 % для тех из них, где качество восстановления (оцениваемое разработчиками) превышает значение 50 (величина 100 гарантирует высокое качество решения обратной задачи, 0 — найденное решение соответствует неблагоприятным метеорологическим условиям и может существенно отличаться от истинного). Пример суточного композита, сформированного по данным TROPOMI для SO_2, приведён на *рис. 2*.

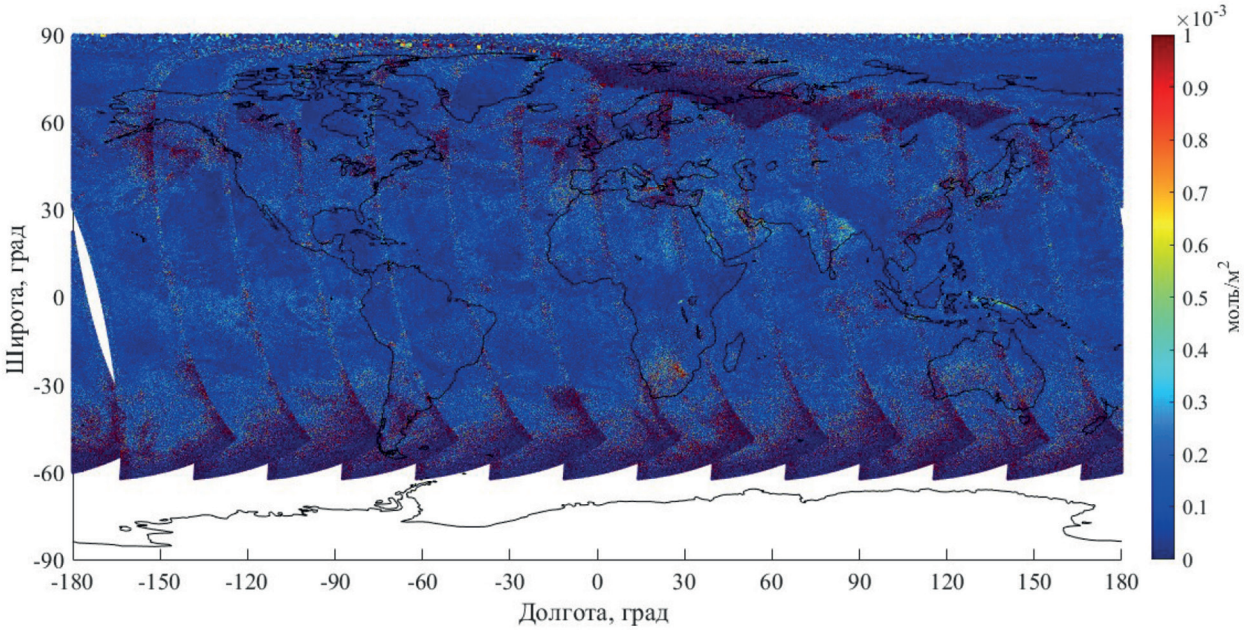

Рис. 2. Пример суточного композита, сформированного по данным TROPOMI, по распределению интегрального количества SO_2 в атмосфере

Оставляя вне рассмотрения причины сильных флуктуаций концентрации SO_2 на получаемых изображениях, можно констатировать, что, несмотря на хорошее пространственное покрытие, данные прибора TROPOMI по указанному газу не позволяют использовать их для отработки технологии расчёта баланса МГС. Дело в том, что предполагаемые методы оценки величины $\vec{F}_A(x, y)$ базируются на поиске характерных (идентифицируемых) областей на последовательностях изображений. В случае работы с изображениями, подобными *рис. 2*, где наблюдаются резкие скачки значений (достигающие двукратных изменений) в соседних пикселях и/или в одном элементе разрешения на соседних кадрах, подобные алгоритмы встречают существенные затруднения.

Обобщая всё вышесказанное, можно сделать вывод, что по выдвинутым критериям наибольший потенциал для решения основной задачи проводимых исследований имеют данные,

поступающие с прибора TROPOMI. При этом отсутствие заявленной информации по малым газовым составляющим CO_2 и N_2O, малое покрытие для CH_4 и неоднородность данных по диоксиду серы не позволяют в настоящее время использовать данные этого инструмента для решения задачи оценки баланса парниковых газов. Дальнейший прогресс здесь может быть обеспечен появлением в ближайшее время новых алгоритмов обработки данных этого инструмента и, соответственно, возможности доступа к интересующей информации достаточного качества.

Возможность использования данных пространственного распределения угарного газа для оценки баланса малых газовых составляющих

Угарный газ (CO), согласно строгой классификации, не относится к парниковым газам. При этом за счёт разноатомной структуры он активен в инфракрасном диапазоне и может быть классифицирован как слабый парниковый газ. Оксид углерода относится к классу углеродосодержащих, вступает в химические реакции, приводящие к изменению содержания в атмосфере диоксида углерода и метана (сильных парниковых газов), поэтому становится ожидаемой возможность в будущем проводить предварительную оценку концентрации других газов этой группы (CO_2 и CH_4) по наблюдениям за CO.

Измерениями концентрации CO в атмосфере с TROPOMI за сутки покрывается от 35 до 50 % (*рис. 3*) поверхности Земли, а поскольку большая часть этих областей приходятся на поверхность суши, появляется возможность выделения значительных участков земной поверхности со сплошным покрытием для проведения балансовых оценок.

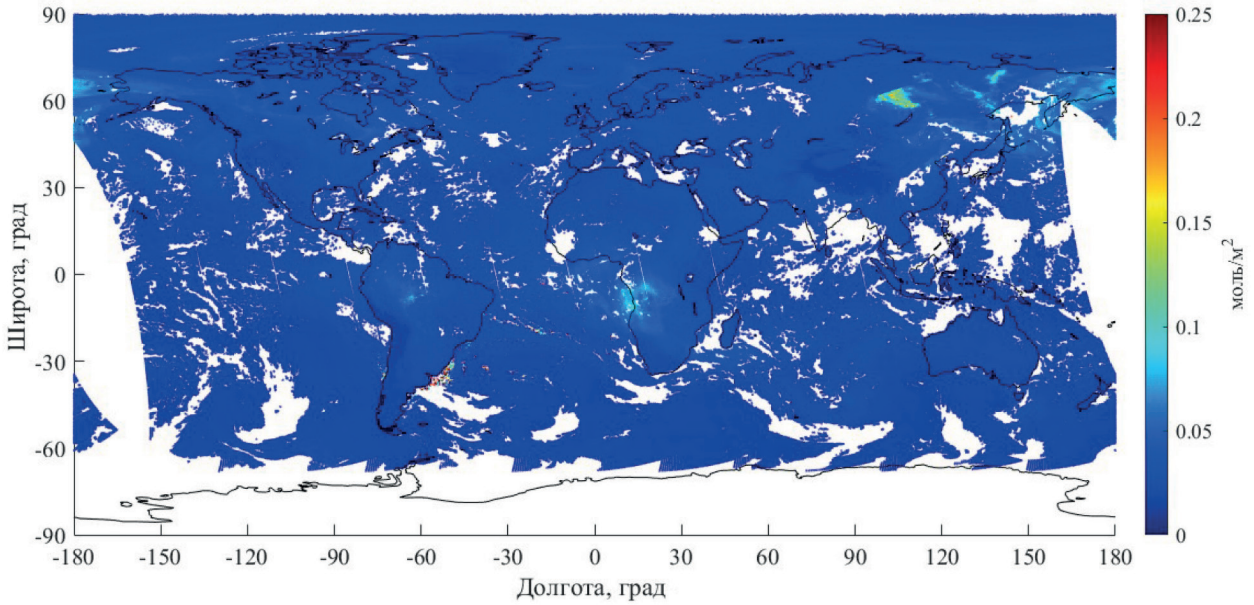

Рис. 3. Суточный композит результатов измерений концентрации CO, полученных прибором TROPOMI. Белые области соответствуют отсутствующим данным. Локальное повышение концентрации в области, расположенной севернее оз. Байкал, соответствует участку активного лесного пожара, регистрируемого в данной области на момент проведения измерений

С точки зрения последующей валидации результатов оценок баланса CO данный газ имеет две интересные особенности. Во-первых, представляя собой продукт неполного сгорания углерода, угарный газ интенсивно выделяется природными пожарами — хорошо локализуемыми в пространстве и времени источниками выбросов. В свою очередь, сопоставление

результатов балансовых оценок CO с данными по расположению очагов пожаров и их интенсивностью даёт возможность наглядной демонстрации правильности предложенного подхода. Во-вторых, по данным теоретических оценок (Kaiser et al., 2012), при прочих равных условиях в результате горения соотношение масс образуемых диоксида углерода и угарного газа находится в диапазоне от 0,037 до 0,123. Учитывая тот факт, что отношение средних значений концентрации в атмосфере Земли этих газов составляет 0,004, выбросы CO в результате лесных пожаров должны проявляться гораздо заметнее на суточных композитах, что также будет способствовать упрощению процедуры валидации результатов балансовых оценок.

Заключение

В настоящее время оценка количества парниковых газов в атмосфере Земли, а также контроль над интенсивностью их выбросов в результате хозяйственной деятельности человека и разнообразных природных явлений представляется актуальной научно-практической задачей. Для Российской Федерации её важность подтверждается соответствующими указами Президента (от 04.11.2020 № 666) и постановлениями Правительства РФ.

Современные спутниковые методы и аппаратура измерения концентрации малых газовых составляющих (и парниковых газов) позволяют с высокой периодичностью, точностью и детализацией восстанавливать глобальные поля их распределения. Анализ последних может стать хорошей альтернативой используемым в настоящее время модельным функциям оценки выброса/поглощения парниковых газов для различных областей/регионов/стран, заменив теоретические расчёты фактически наблюдаемыми значениями. Одним из подходов оценки выброса/поглощения парниковых газов становится проведение расчётов в рамках уравнения баланса на основе анализа последовательности композитных изображений, формируемых спутниковыми приборами. При этом анализируемые данные должны удовлетворять ряду требований: максимальная площадь покрытия, высокая периодичность наблюдений, высокое пространственное разрешение, однородность, а также наличие оценки качества.

Проведённые исследования показали, что, несмотря на высокий потенциал и декларируемые возможности, среди спутниковых приборов, функционирующих в настоящее время на орбите, только инструмент TROPOMI обеспечивает поступление данных в виде, соответствующем перечисленным параметрам. К сожалению, по интересующим газовым составляющим (CO_2, CH_4, SO_2 и N_2O) даже данные этого, наиболее перспективного прибора не могут быть использованы для оценки баланса МГС. Авторы надеются на появление новых версий программ обработки данных TROPOMI в ближайшем будущем и, соответственно, возможности доступа к продуктам необходимого качества. В настоящее время для отработки общей технологии определения баланса парниковых газов можно использовать результаты измерений интегрального содержания оксида углерода, проводимых этим прибором.

Работа выполнена при поддержке темы «Эмиссия» (госрегистрация № 122101700045-7).

Литература

1. *Ермаков Д. М.*, *Пашинов Е. В.*, *Кузьмин А. В. и др.* Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 470–493. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
2. *Crisp D.* Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) // Proc. SPIE Optical Engineering + Applications. 2015. V. 9607. Article 960702. DOI: 10.1117/12.2187291.
3. *Flynn L.*, *Seftor C.*, *Larsen J.*, *Xu P.* The Ozone Mapping and Profiler Suite // Earth Science Satellite Remote Sensing: Science and Instruments. 2006. V. 1. P. 279–296. DOI: 10.1007/978-3-540-37293-6_15.
4. *Kaiser J. W.*, *Heil A.*, *Andreae M. O. et al.* Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power // Biogeosciences. 2012. No. 9. P. 527–554. DOI: 10.5194/bg-9-527-2012.

5. *Karminov V.*, *Ontikov P.*, *Santoro M. et al.* Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // Scientific Reports. 2021. V. 11(1). Article 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9.
6. *Suto H.*, *Kataoka F.*, *Kikuchi N. et al.* Thermal and near-infrared sensor for carbon observation Fourier transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2) during its first year in orbit // Atmospheric Measurement Techniques. 2021. V. 14. P. 2013–2039. DOI: 10.5194/amt-14-2013-2021.
7. *Tang W.*, *Worden H.*, *Deeter M. et al.* Assessing Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT) carbon monoxide retrievals over urban versus non-urban regions // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. V. 13. P. 1337–1356. DOI: 10.5194/amt-13-1337-2020.
8. *Vries J.*, *Voors R.*, *Mika A. et al.* TROPOMI, the solar backscatter satellite instrument for air quality and climate, heads towards detailed design // Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIII: Proc. SPIE. 2009. V. 7474. 747409-4. DOI: 10.1117/12.830087.
9. *Walker K.*, *Sheese P.*, *Zou J. et al.* The Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer (ACE-FTS): Mission and Validation Status // Fourier Transform Spectroscopy: Proc. Conf. 2016. DOI: 10.1364/FTS.2016.FTh4B.5.
10. *Waters J.*, *Froidevaux L.*, *Harwood R. et al.* The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the aura satellite // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44. P. 1075–1092. DOI: 10.1109/TGRS.2006.873771.

Analysis of the possibility to calculate atmospheric greenhouse gas balance elements using modern satellite remote sensing data

I. N. Sadovsky, E. V. Pashinov, D. S. Sazonov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: Ilya_Nik_Sad@mail.ru

The work is devoted to the possibility of using satellite monitoring data on concentration of greenhouse gases in the Earth's atmosphere to assess their balance for selected areas. In the most general case, the balance equation contains several key components: the external influx of matter into the selected area and the outflow from it, the change in the integral mass within the selected area (volume), the emission of matter within the area and its absorption. The difference between the last two components is of greatest interest in the problems of estimating greenhouse gas emissions within the regions of interest. It is impossible to find without assessing the horizontal transfer values that determine the relationship between the first two components of the balance equation. This problem can be solved with the availability of satellite sensing data, which must satisfy a number of requirements. These include maximum coverage area, high frequency of observations, high spatial resolution, homogeneity, and assessment of the provided data quality. The paper is devoted to consideration of these parameters, as well as the study of the possibility of using data from modern satellite systems for assessing gas composition of the atmosphere to solve the described problem. We used data currently available from the following instruments: ACE-FTS ACE-FTS (Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer), OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory), TANSO-FTS (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations — Fourier Transform Spectrometer), MOPITT (Measurement Of Pollution In The Troposphere), TROPOMI (Tropospheric Ozone-Monitoring Instrument), MLS (Microwave Limb Sounder) and OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite). The analysis was carried out in relation to trace gas components that are, firstly, greenhouse gases, and secondly, have both natural sources and those resulting from human production activities. These include CO_2, CH_4, SO_2 and N_2O. The research has shown that, according to the set criteria, the greatest potential for solving the main problem has TROPOMI data. At the same time, the lack of declared data on CO_2 and N_2O, trace gas components, low coverage for CH_4 and heterogeneity of SO_2 data currently do not allow using the data from this instrument to solve the problem of restoring the difference between the emission and absorption of greenhouse gases. For these reasons, the authors propose testing the balance assessment technology on the results of TROPOMI measurements of carbon monoxide concentration averaged over the vertical column of the atmosphere.

Keywords: greenhouse gases, balance equation, carbon monoxide, TROPOMI, remote sensing

Accepted: 21.11.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-117-128

References

1. Ermakov D. M., Pashinov E. V., Kuz'min A. V. et al., The concept of calculating the elements of the regional hydrological balance with the use of satellite radiothermovision, *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2023, No. 72, pp. 470–493 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
2. Crisp D., Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2), *Proc. SPIE Optical Engineering + Applications*, 2015, Vol. 9607, Article 960702, DOI: 10.1117/12.2187291.
3. Flynn L., Seftor C., Larsen J., Xu P., The Ozone Mapping and Profiler Suite, *Earth Science Satellite Remote Sensing: Science and Instruments*, 2006, Vol. 1, pp. 279–296, DOI: 10.1007/978-3-540-37293-6_15.
4. Kaiser J. W., Heil A., Andreae M. O. et al., Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power, *Biogeosciences*, 2012, No. 9, pp. 527–554, DOI: 10.5194/bg-9-527-2012.
5. Karminov V., Ontikov P., Santoro M. et al., Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported, *Scientific Reports*, 2021, Vol. 11(1), Article 12825, DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9.
6. Suto H., Kataoka F., Kikuchi N. et al., Thermal and near-infrared sensor for carbon observation Fourier transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2) during its first year in orbit, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, Vol. 14, pp. 2013–2039, DOI: 10.5194/amt-14-2013-2021.
7. Tang W., Worden H., Deeter M. et al., Assessing Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT) carbon monoxide retrievals over urban versus non-urban regions, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, Vol. 13, pp. 1337–1356, DOI: 10.5194/amt-13-1337-2020.
8. Vries J., Voors R., Mika A. et al., TROPOMI, the solar backscatter satellite instrument for air quality and climate, heads towards detailed design, *Sensors*, *Systems*, *and Next-Generation Satellites XIII: Proc. SPIE*, 2009, Vol. 7474, 747409-4, DOI: 10.1117/12.830087.
9. Walker K., Sheese P., Zou J. et al., The Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer (ACE-FTS): Mission and Validation Status, *Fourier Transform Spectroscopy: Proc. Conf.*, 2016, DOI: 10.1364/FTS.2016.FTh4B.5.
10. Waters J., Froidevaux L., Harwood R. et al., The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the aura satellite, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44, pp. 1075–1092, DOI: 10.1109/TGRS.2006.873771.