

Обработка методики балансовых расчётов выбросов парниковых газов по данным спутникового мониторинга на примере крупных лесных пожаров

Е. В. Пашинов¹, С. А. Втюрин¹, Д. М. Ермаков^{1,2}, И. Н. Садовский¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: pashinove@mail.ru

² *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, 141190, Московская обл., Россия*

В настоящее время большой интерес представляют исследования баланса углеродосодержащих газов в атмосфере над различными территориями. Существующие подходы к оценке баланса газовых компонент атмосферы (кадастровый, прямых измерений на полигонах, инверсного моделирования) имеют известные недостатки и ограничения. Поэтому актуально развитие новых методик, основанных на прямом анализе данных дистанционного зондирования. В работе описана методика балансовых расчётов, замкнутая относительно дистанционных данных спутниковых инфракрасных спектрометров, обеспечивающих восстановление полей концентрации целевых газовых компонент. Исходный вариант методики был разработан применительно к данным об интегральном влагосодержании атмосферы для задачи анализа регионального гидрологического режима. В настоящей работе проанализированы особенности используемых дистанционных данных, требующие дополнительной адаптации расчётных алгоритмов методики. Обработка и тестирование методики проведены на примере наблюдения выбросов оксида углерода (CO) от крупных лесных пожаров в Сибири. Балансовые расчёты по предложенной методике дали общую величину выброса CO, равную $2,9 \cdot 10^9$ кг в интервале с 10.07.2022 по 10.08.2022. Независимые модельные оценки, согласно базе данных Global Fire Emissions Database, дают верхний предел в $3,9 \cdot 10^9$ кг. При этом нижний предел того же выброса может быть оценён величиной $1,4 \cdot 10^9$ кг.

Ключевые слова: парниковые газы, потоки, балансовые расчёты, дистанционное зондирование Земли

Одобрена к печати: 25.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-313-325

Введение

В настоящее время большой интерес представляют исследования углеродного цикла различных территорий и, как следствие, — баланса углеродосодержащих, в том числе парниковых, газов в атмосфере над этими территориями (под «балансом», в соответствии с терминологией предметной области, в работе понимается разность между суммарным выбросом газа в пределах данной территории и его суммарным стоком на той же территории). Задачей множества стран, входящих в международные договоры по ограничению выбросов, является обеспечение нулевого или отрицательного баланса парниковых газов (ПГ) над своими территориями.

Известно несколько подходов к оценке баланса ПГ. Общепринятым представляется кадастровый метод, заключающийся в расчётах на основе инвентарной информации о типах и параметрах источников и поглотителей ПГ на данной территории и утверждённых модельных соотношений, описывающих интенсивность эмиссии/стока для каждого из них (Ваганов и др., 2021; Романовская и др., 2018). Для уточнения этих модельных соотношений с учётом разнообразия источников и стоков ПГ и изменчивости их параметров (а также параметров окружающей среды) создаются «углеродные полигоны», где осуществляются прямые измерения вертикальных потоков ПГ со специально оборудованных вышек (Гессен, Воротников 2021; Курганова и др., 2022). В силу неизбежной разреженности прямых измерений развиваются

подходы так называемого «инверсного моделирования», усваивающие результаты наземных измерений и дополнительную спутниковую информацию в модельных описаниях динамики распространения ПГ в атмосфере Земли (Bergamaschi et al., 2018; Inness et al., 2019).

Все указанные подходы не лишены определённых недостатков. В рамках кадастрового метода проблему представляет полное параметрическое описание всех возможных типов источников ПГ с учётом их изменчивости. Во всяком случае, получение оперативных оценок по большим территориям невозможно без привлечения данных дистанционного зондирования и решения ряда сложных обратных задач интерпретации этих данных. Отдельную проблему представляет оценка стоков ПГ. Открытым, вообще говоря, представляется и вопрос научно обоснованной (независимой) верификации итоговых кадастровых оценок для произвольно выбранной территории.

Наземные углеродные полигоны дают непрерывные ряды локальных («точечных») измерений баланса ПГ. С точки зрения их репрезентативности в экосистемном, региональном, глобальном масштабах сложным вопросом остаётся влияние как естественной пространственно-временной изменчивости в пределах наблюдаемой экосистемы, так и нелокальных факторов окружающей среды, региональные различия которых могут быть достаточно велики. Таким образом, наземные измерения крайне важны для калибровки других методов балансовых оценок ПГ, однако непосредственное применение получаемых результатов за пределами функционирующих углеродных полигонов проблематично и требует дополнительных обоснований в каждом конкретном случае.

Инверсное моделирование формально позволяет преодолеть последний отмеченный недостаток за счёт усвоения результатов наземных измерений в динамической модели атмосферы. Однако в методику моделирования заложен учёт статистики эмиссионных и поглощающих свойств подстилающей поверхности по заданному ПГ для территории исследования. А уточнение и детализация этой статистики и становятся конечной целью всех перечисленных подходов.

Очевидно, что дальнейший прогресс в решении задачи балансовых расчётов ПГ возможен путём развития как указанных, так и новых, независимых подходов к анализу и интерпретации данных наземных и спутниковых измерений на основе их взаимной проверки и последовательного согласования. В настоящей работе представлен один из таких новых подходов к балансовым расчётам ПГ, замкнутый относительно данных спутникового мониторинга Земли. Дано общее описание предлагаемой методики расчёта, приведён пример расчёта для выбросов от крупных лесных пожаров, полученные результаты сопоставлены с результатами независимых модельных оценок, содержащихся в открытой глобальной базе данных Global Fire Emissions Database (van Wees et al., 2022).

Методика балансовых расчётов

В настоящей работе рассмотрен новый подход к расчёту баланса ПГ, основанный на вычислительной схеме, замкнутой относительно данных спутниковых измерений концентрации ПГ. Методически этот подход аналогичен предложенному ранее для исследования элементов гидрологического цикла (Ермаков и др., 2023), где фактически в качестве ПГ рассмотрен водяной пар. Методика опирается на предположение о том, что влияние химических реакций с участием рассматриваемого ПГ на его концентрацию в атмосфере пренебрежимо мало на выбранном интервале наблюдений. В этом случае из закона сохранения вещества следует, что изменение содержания ПГ в замкнутом объёме атмосферы возможно только за счёт его притока (оттока) через граничную поверхность этого объёма.

Интерес представляет частный случай объёмной фигуры, нижнее основание которой, A , соответствует рассматриваемой территории, а боковая поверхность образована «бесконечно высокими» вертикальными стенками, перекрытыми «бесконечно высокой» верхней гранью. Для этого случая, как показано в работе (Ермаков и др., 2023), справедливо равенство (с учётом новых обозначений, описанных ниже):

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} B(t) dt = \int_A \int M(x, y) dx dy \bigg|_{t_{\min}}^{t_{\max}} - \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} dt \oint F(x, y) dn, \quad (1)$$

где t_{\min} и t_{\max} — начало и конец интервала наблюдений соответственно; $B(t)$ — «мгновенный» баланс ПГ для заданной территории A , т. е. разность между интенсивностью эмиссии и стока ПГ (в $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$); $M(x, y)$ — массовое содержание ПГ в вертикальном атмосферном столбе единичной площади (в $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$); \mathbf{p} — ориентированная замкнутая граница области A (см. далее); \mathbf{n} — ориентированная нормаль к границе \mathbf{p} (положительное направление — внутрь контура); F — интегральный по высоте атмосферы горизонтальный поток ПГ (в $\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$).

Величина $M(x, y)$ может быть рассчитана через плотность ПГ $\rho(x, y, z)$:

$$M(x, y) = \int_0^{+\infty} \rho(x, y, z) dz.$$

Величина F , в свою очередь, определяется следующим образом:

$$F(x, y) = \int_0^{+\infty} \rho(x, y, z)v(x, y, z) dz = M(x, y)v^*(x, y), \quad (2)$$

где v — горизонтальная скорость ветра в точке (x, y, z) (в м/с); z — высота; v^* — эффективная (взвешенная по высоте атмосферы) скорость горизонтального переноса ПГ (в м/с) (см., например, работу (Ermakov et al., 2021)).

Следует отметить, что при наличии на территории A источников интенсивных выбросов (например, сильных пожаров) можно считать, что поглощение ПГ пренебрежимо мало по сравнению с эмиссией. В этом случае стоящая в левой части уравнения (1) величина характеризует суммарную эмиссию ПГ за интервал наблюдений $[t_{\min}, t_{\max}]$ со всей территории A . Это важно для сопоставления с независимыми оценками выбросов от пожаров. В общем случае интерес, как сказано ранее, представляет именно разность между выбросом и стоком, т. е. интеграл B . Как видно из выражения (1), для его вычисления достаточно знать общее содержание ПГ над заданной территорией — первое слагаемое в правой части уравнения (1) и горизонтальный поток ПГ через охватывающие территорию A вертикальные стенки — второе слагаемое в правой части уравнения (1). В свою очередь, из уравнения (2) видно, что для этого достаточно вычислить эффективную (взвешенную по высоте) горизонтальную скорость переноса ПГ.

Суть методики восстановления горизонтальных потоков ПГ в атмосфере, применённой в настоящей работе, состоит в вычислении такого поля скорости горизонтального переноса v^* , которое оптимальным образом описывает последовательную трансформацию наблюдаемых полей средней концентрации ПГ, выстроенных в хронологическом порядке, при дополнительных ограничительных требованиях (непрерывности, гладкости). Реализующие такой подход алгоритмы в системах технического зрения получили название «анализ оптического потока». Принципиальная возможность восстановления интегральных по высоте атмосферы горизонтальных потоков водяного пара — самого сильного парникового газа — по данным спутникового радиотеплового мониторинга с помощью алгоритмов анализа оптического потока продемонстрирована в рамках подхода спутникового радиотепловидения (Ermakov et al., 2021).

Алгоритмы анализа оптического потока решают задачу установления соответствия между каждой точкой исходного изображения и некоторой точкой последующего изображения, в которую переместилась первая точка за интервал времени между изображениями. В работе (Форсайт, Понж, 2004) оптический поток определяется как векторное поле, где каждый вектор показывает перемещение отдельной точки между двумя последующими изображениями, «кадрами».

Эти алгоритмы уже реализованы в программных пакетах. В работе использовалась библиотека алгоритмов компьютерного зрения и обработки изображений OpenCV (англ. Open

Source Computer Vision Library, библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом) (Кэлпер, Брэдски, 2017). Наиболее подходящим для поставленной задачи был выбран алгоритм DIS (*англ.* Dense Inverse Search), предложенный в работе (Kroeger et al., 2016). В этом алгоритме применяется пирамидальный подход, когда сначала оценивается перемещение наиболее крупных областей, а затем — более мелких. Кроме того, вместо независимого расчёта на каждой итерации алгоритма вычисления оптического потока рассчитывается промежуточное плотное поле перемещений, что повышает сглаженность и уменьшает количество фрагментов на более крупных масштабах, повышая производительность. Преимуществами алгоритма DIS для поставленной задачи представляются: вычисление плотного оптического потока (в каждой точке исходного изображения); вариационная корректировка с критерием гладкости, уменьшающая число и величину «выбросов», что обеспечивает более высокую итоговую точность; возможность анализа большого диапазона масштабов смещений за счёт субпиксельной интерполяции для малых масштабов и анализа пирамиды изображений (пространственного сглаживания) для больших масштабов.

Соответственно, представляя поля концентрации газа в виде изображений, к ним можно применить алгоритмы оценки оптического потока для вычисления горизонтальных перемещений газа. Но нужно отметить, что для корректной работы алгоритмов оптического потока необходимы достаточно часто обновляемые по времени поля данных на регулярной сетке без пропусков, иначе возможно возникновение значительных артефактов расчёта.

Выбор данных дистанционного зондирования Земли для обработки методики

Применительно к данным спутникового мониторинга парниковых газов эффективность решения задачи поиска горизонтальных потоков газа и решения балансового уравнения (1) определяются несколькими условиями. Среди них, как говорилось ранее, — площадь покрытия, периодичность покрытия, пространственное разрешение, а также оценка качества предоставляемых данных.

Площадь покрытия приобретает особое значение при необходимости выполнения анализа баланса газовых компонент на значительных территориях, например при оценке его знака для целого региона или страны либо при постановке задачи поиска локальных источников выброса, когда их расположение неизвестно априори. Как будет показано ниже, обеспечение этого условия — максимальной площади покрытия — становится далеко не тривиальной задачей с учётом функциональных особенностей спутниковых приборов и их схем сканирования. При этом (что следует из самого вида соотношения (1)) необходимо обеспечить неразрывное покрытие измерениями в пределах площади A . Конечно, выходом из данной ситуации, традиционно используемом при решении задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), видится временное накопление спутниковых данных, когда составление их полного композита для выделенного участка поверхности занимает от трёх суток до года. Однако применительно к анализу газовых компонент, имеющих малое время жизни, высокую скорость перемещения и диффузии, а также при необходимости анализа химического состава атмосферы в районах природных и техногенных катастроф (пожары, кратковременные выбросы вредных производств и т. п.) соответствующие пределы интегрирования $[t_{\min}, t_{\max}]$ в уравнении (1) должны быть максимально близки. В противном случае аномалия баланса газовой компоненты может оказаться незаметной на фоне естественных вариаций её концентрации. Таким образом, вторым значимым параметром при отборе спутниковых данных выступает её периодичность и/или повторяемость для выделенного региона A . Влияние пространственного разрешения используемой системы мониторинга можно сравнить по значимости с временной повторяемостью 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, ориен-

тированные на исследование газового состава атмосферы, имеют высокое пространственное разрешение за счёт работы в инфракрасном и видимом диапазонах спектра, где (в отличие от микроволнового) достаточно просто обеспечить нужное соотношение рабочей длины волны принимаемого излучения и размеров апертуры входной системы приёма. При этом, однако, данные системы редко обеспечивают широкую полосу обзора, что приводит к возникновению проблем с площадью покрытия или её периодичностью, описанных ранее.

Важный фактор также — точность спутниковых измерений и наличие метаданных, характеризующих их надёжность. Здесь стоит отметить, что часть ПГ и малых газовых составляющих (МГС) имеет в естественных условиях слишком низкие значения концентрации для уверенного количественного детектирования современными системами мониторинга. Получаемые при этом карты пространственного распределения концентрации имеют вид классических «шумовых» изображений, обработка последовательности которых с целью восстановления баланса не имеет смысла.

На соответствие описанным выше требованиям были проанализированы результаты измерений функционирующих систем спутникового мониторинга газового состава атмосферы Земли, а именно: 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 Monitoring Instrument), MLS (*англ.* Microwave Limb Sounder) и OMPS (*англ.* Ozone Mapping and Profiler Suite). Анализ проводился в отношении ПГ, как имеющих природные источники возникновения, так и являющихся результатом производственной деятельности человека. В это число вошли: диоксид углерода (CO₂), метан (CH₄), диоксид серы (SO₂) и оксид азота (N₂O). Также сюда был включен оксид углерода (CO) по причинам, которые будут объяснены ниже. Работа с данными по концентрации выделенных газовых компонент, поступающими с указанных инструментов, показала следующее: несмотря на заявленные технические возможности детектирования широкого спектра малых газовых составляющих (см., например, ресурс <https://space.oscar.wmo.int>), информация о концентрации большинства из них для ряда приборов отсутствует без указания причин. В таблице соответствующие ячейки обозначены символом «—»; символ «*» обозначает отсутствие свободного доступа к файловым хранилищам.

Сводная информация по наличию данных мониторинга малых газовых составляющих и суточному покрытию поверхности Земли, выполняемых действующими спутниковыми миссиями

МГС, %	Прибор						
	ACE-FTS	OCO-2	TANSO-FTS	MOPITT	TROPOMI	MLS	OMPS
CO ₂	0,0285	0,47	0,105	—	—	—	—
CH ₄	0,0285	—	*	*	0,60 (<i>q</i> > 50) 7,14 (<i>q</i> > 0)	—	—
SO ₂	—	—	—	—	67,54 (<i>q</i> > 50) 82,50 (<i>q</i> > 0)	0,334	17,07
N ₂ O	0,0285	—	—	—	—	0,334	—

Представленная таблица также содержит информацию по пространственному покрытию, обеспечиваемому каждым из приборов за сутки. Приведенные в таблице значения соответствуют отношению площади покрытия прибора (при наложении результатов измерений прибора на регулярную сетку с шагом 0,25°) к площади поверхности Земли. Данные фурье-спектрометров характеризуются ожидаемо малыми значениями по этому показателю. Лишь один прибор, TROPOMI, работающий по принципу регистрации переотражённого от поверхности Земли солнечного излучения, сочетает возможность восстановления концентрации ряда ПГ с широкой полосой обзора (порядка 2600 км).

Несмотря на потенциальную возможность измерения концентрации всех четырёх указанных выше ПГ прибором TROPOMI, декларированную в техническом описании, в настоящее время доступны данные лишь по двум из них. При этом, как видно из *таблицы*, описанным ранее требованиям удовлетворяет лишь диоксид серы, для которого суточное покрытие 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).

Удовлетворительное пространственное покрытие измерениями SO₂ недостаточно для использования информации по данному ПГ при отработке технологии расчёта баланса парниковых газов. Дело в том, что, как было отмечено ранее, результаты восстановления интегрального содержания этого газа, как показывает анализ суточных композитов, не удовлетворяет условиям однородности получаемых изображений ввиду сильно зашумлённых значений в соседних элементах разрешения.

Таким образом, по формальным показателям наибольшую перспективу использования в решении задач балансовых оценок ПГ по предлагаемой методике имеют данные, поступающие с прибора TROPOMI. Однако на практике приходится констатировать отсутствие (в настоящее время) заявленных данных по CO₂ и N₂O, недостаточное пространственное покрытие для CH₄ и сильную зашумлённость данных по SO₂.

В этой связи авторами было принято решение отработать предложенную технологию на результатах измерений интегрального содержания в атмосфере оксида углерода (CO), также выполняемых прибором TROPOMI. Данный газ относится к классу углеродосодержащих. Суточное покрытие для CO составляет от 35 до 50 % (*рис. 1*) и в основном охватывает поверхность суши, что предпочтительно для целей настоящей работы. Также важной особенностью именно этой газовой компоненты является резкое изменение её концентрации в атмосфере при локальных выбросах, возникающих, например, в результате сильных лесных пожаров, которые ежедневно наблюдаются в разных областях земного шара.

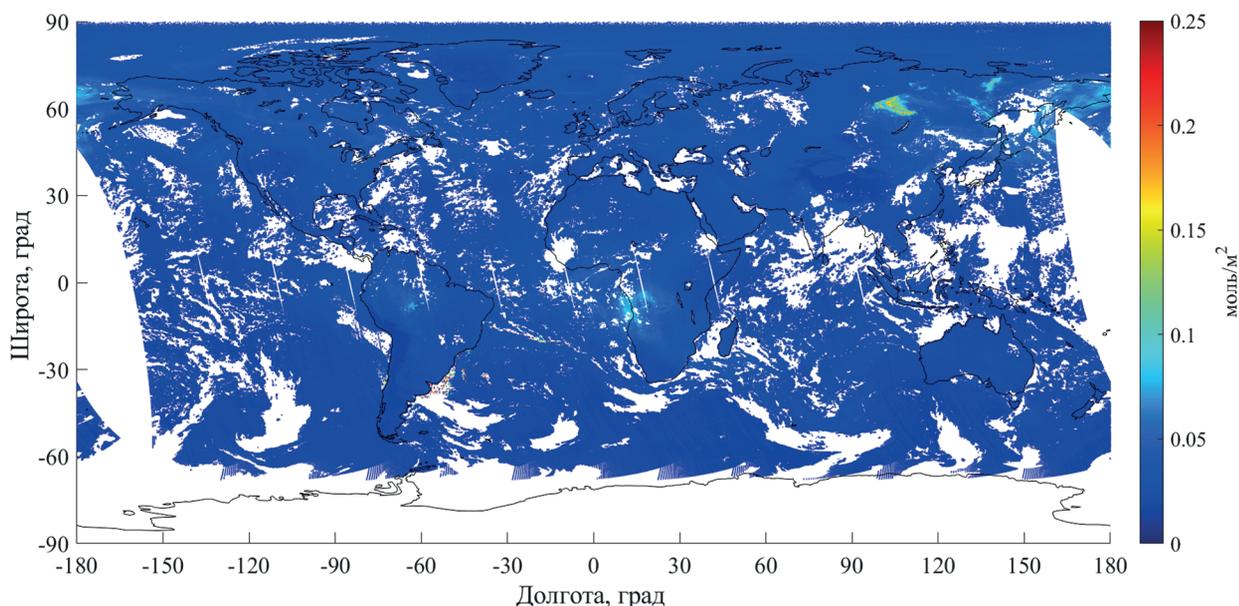


Рис. 1. Суточный композит концентрации CO, восстановленной прибором TROPOMI. Белые области соответствуют отсутствию данных

Предварительная обработка данных TROPOMI

Входными данными для всех последующих расчётов выступают суточные композиты интегрального содержания CO (моль·м⁻²), измеренного TROPOMI. Построение композитов обе-

спечивается программными средствами Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг», доступ к данным осуществляется через сервис «Вега-Science» (<http://sci-vega.ru/>).

Основной проблемой имеющихся данных стало большое количество пропусков, вызванных в основном наличием облачности. В суточных композитах при самых благоприятных условиях покрытие данными земного шара составляет 35–50 % (см. *рис. 1*). Непосредственное применение алгоритмов расчёта оптического потока к таким данным приведёт к тому, что эти области будут трактоваться как движущиеся объекты. Отслеживание кажущегося движения таких ложных объектов на фоне менее контрастных реальных данных будет приводить к значительным артефактам. Поэтому требуется сформировать изображение, в котором пропуски будут закрыты гладким образом для минимизации ошибок детектирования движения.

Заполнение таких пропусков данными с других спутников не представляется возможным ввиду их малого количества и особенностей формирования пространственного покрытия. Поэтому были применены методики контекстного заполнения. Эта процедура устанавливает значения в пропущенных участках по ближайшим соседним известным величинам. Конкретным алгоритмом реализации контекстного заполнения был выбран Fast Marching Method (Telea, 2004), основанный на взвешенной оценке градиента небольшого участка изображения вблизи границы отсутствующего фрагмента.

Работа алгоритмов контекстного заполнения осложняется некоторыми особенностями данных: при большом разрешении исходных данных и значительных размерах зон пропусков возникает несогласованность работы алгоритма для отдельных участков границы зоны пропуска. Контекстное заполнение приводит к некорректным результатам и появлению контрастных артефактов. Задача осложняется тем, что в данных присутствует шум, в том числе в областях, прилегающих к зонам пропуска данных.

Установлено, что вышеперечисленные проблемы можно решить, понизив разрешение исходных данных. Исходное разрешение данных TROPOMI по концентрации CO составляет 7×4 км, что менее $0,1 \times 0,1^\circ$. При огрублении разрешения до $0,25 \times 0,25^\circ$ обеспечивается естественная фильтрация точечных ошибочных значений, представлявших проблему при контекстном заполнении, если они оказывались на краях области. Также уменьшение абсолютных размеров областей повышает скорость и стабильность результатов такого заполнения. Пример результатов предварительной обработки данных TROPOMI по заполнению пропусков представлен на *рис. 2*.

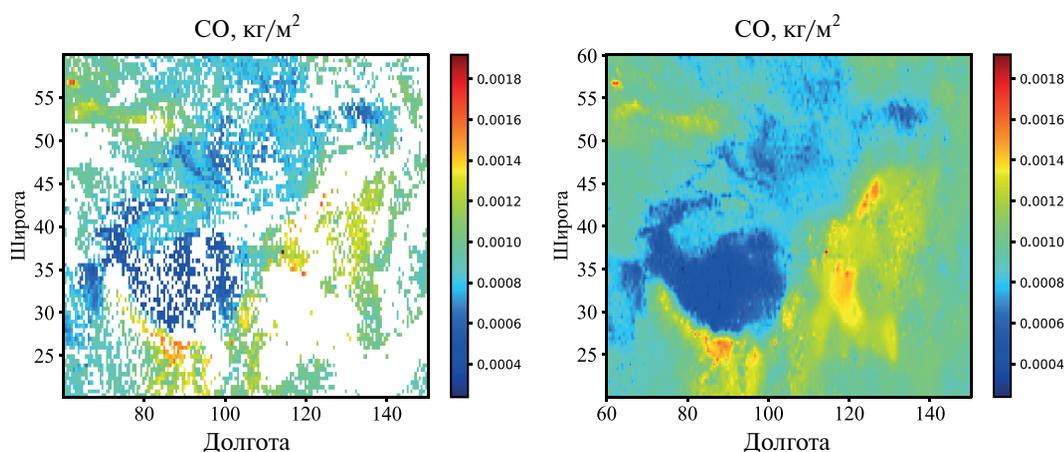


Рис. 2. Сравнение фрагмента исходных и подготовленных данных TROPOMI по интегральному содержанию CO

Видно, что отсутствующие фрагменты данных были полностью заполнены. При этом фрагменты большого размера, для которых контекстное заполнение не даёт эффективного решения, заполняются средним значением, вычисленным по всем точкам кадра, содержащим

данные. Такой подход позволяет минимизировать артефакты расчёта оптического потока, осуществляемого на следующем шаге. При этом заполненные таким образом области отмечаются маской «нет данных» для исключения из расчётов балансовых оценок.

Таким образом, были обработаны данные за лето 2022 и 2023 гг. Пример поля интегрального содержания CO показан на рис. 3. Пространственное разрешение таких полей составляет $0,25 \times 0,25^\circ$ и временное разрешение — 1 сут. Они были использованы для дальнейшей реализации и проверки методики балансовых оценок.

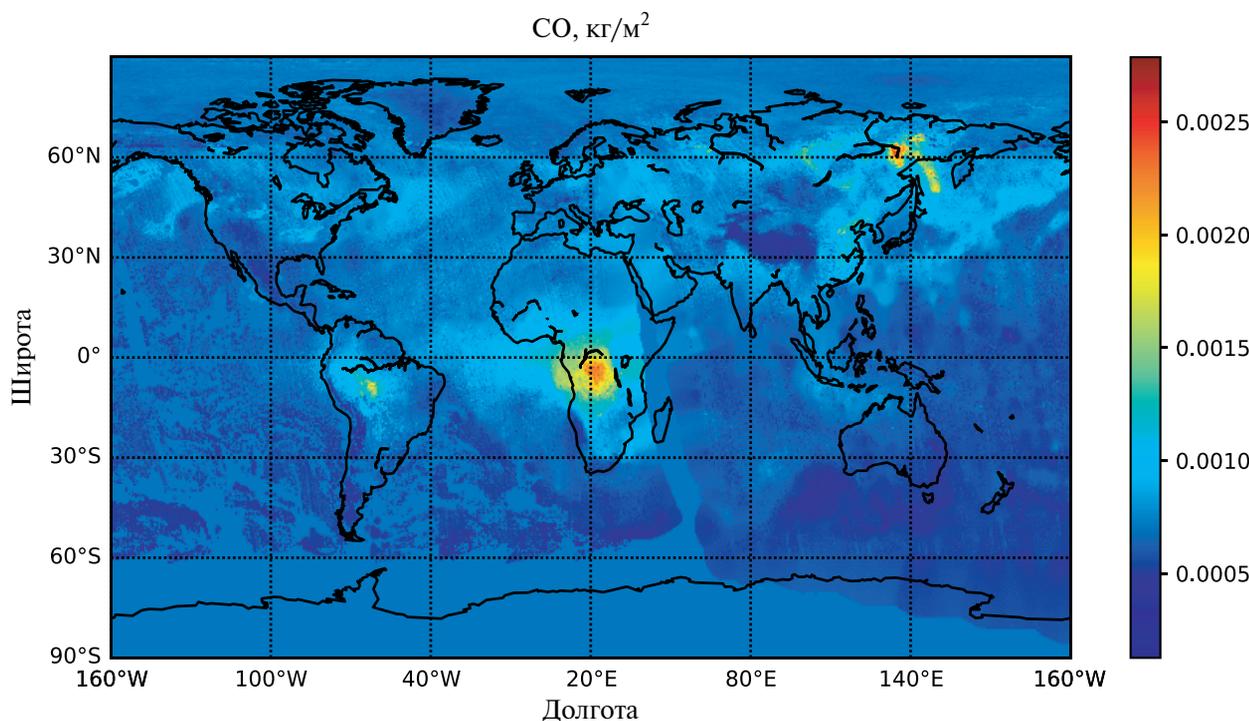


Рис. 3. Пример предварительно подготовленного поля интегрального содержания CO за 01.08.2022 с заполненными пропусками данных

Применение методики для оценки выбросов лесных пожаров

Подходящими тестовыми объектами для отработки предложенной методики выступают лесные пожары, в результате которых происходит сильное локальное изменение состава атмосферы и, в частности, резкий рост концентрации CO. В качестве первичного источника информации о крупных пожарах в работе был использован ресурс «Вега-Science» (Лупян и др., 2021).

Примечательным выглядит скопление очагов лесных пожаров в июле—августе 2022 г. на севере Хабаровского края и юго-востоке Республики Саха (рис. 4, см. с. 321). С 10 июля по 10 августа 2022 г. наблюдалось очень кучное скопление очагов в области примерно $10 \times 10^\circ$ (выделенной красным прямоугольником на рис. 4), при этом вокруг этой области пожары практически отсутствуют.

Хорошо соответствует этой области и повышение интегрального содержания CO, зафиксированное TROPOMI (рис. 5, см. с. 321).

За данный период времени (10.07.2022—10.08.2022) с помощью алгоритмов оценки оптического потока были построены поля векторов адвекции CO и для контура, показанного красным цветом на рис. 4 и 5 ($55\text{--}65^\circ$ с. ш., $130\text{--}140^\circ$ в. д.), были рассчитаны все составляющие правой части уравнения (1), а также посчитан баланс CO за весь указанный месячный период. Результаты расчёта показаны на рис. 6 (см. с. 321). График накопленной суточной конвергенции домножен на -1 , чтобы иметь знак второго слагаемого уравнения (1).

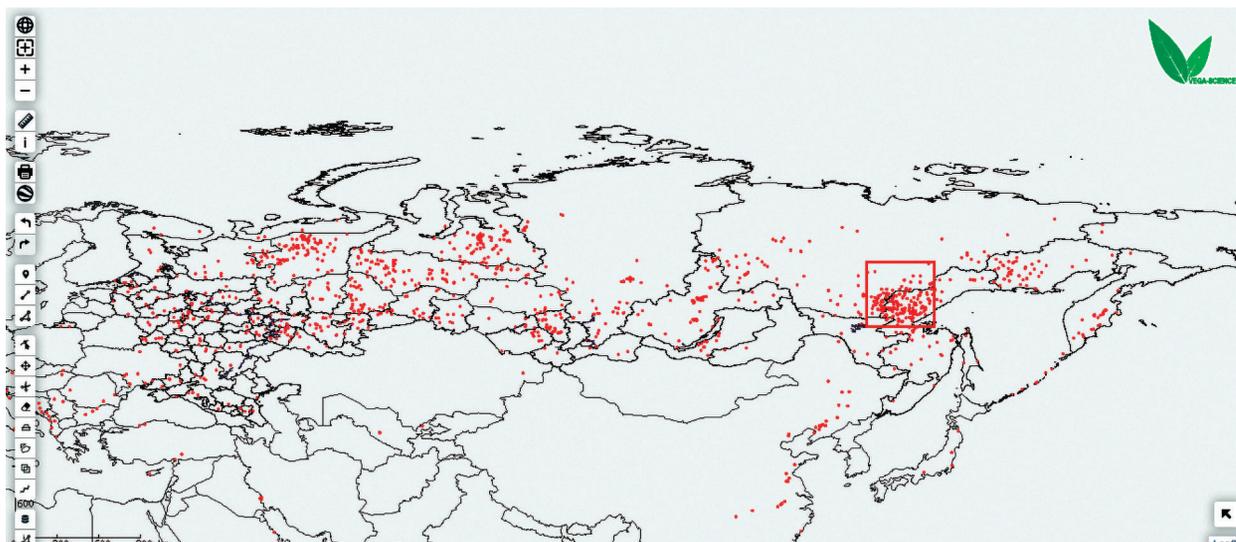


Рис. 4. Карта очагов лесных пожаров за 18.07.2022 с ресурса «Вега-Science»

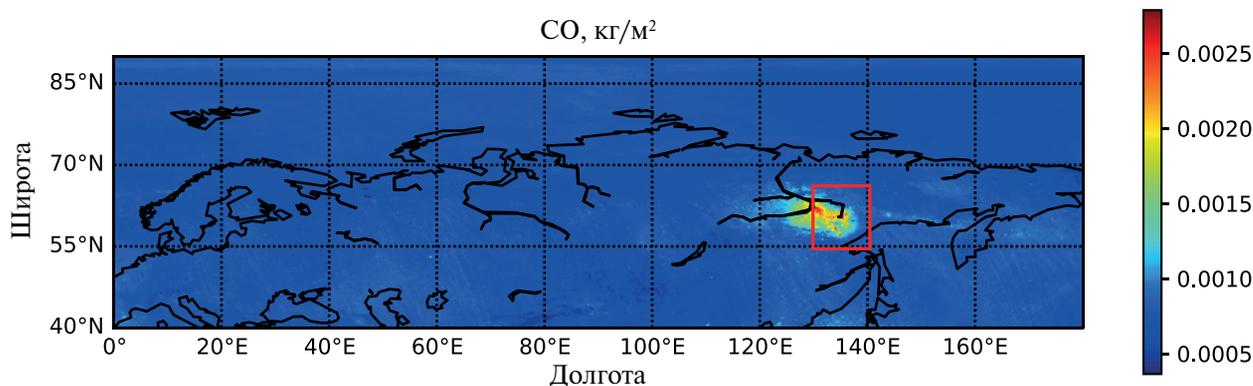


Рис. 5. Поле интегрального содержания CO по данным TROPOMI 18.07.2022

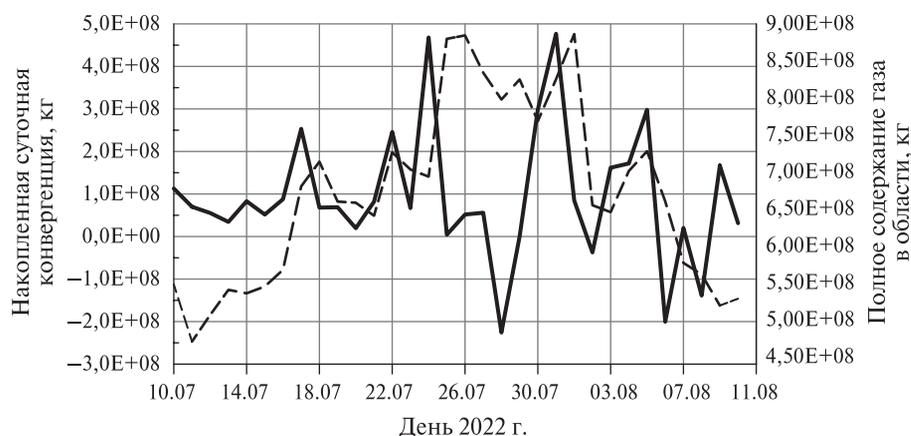


Рис. 6. Элементы уравнения (1), рассчитанные для указанной области за рассматриваемый период. Сплошная линия — накопленная суточная конвергенция, пунктирная — полное содержание газа в области

Из графиков видно, что полное содержание газа в области имеет временной ход, в целом отражающий фазы развития и затухания пожаров. Конвергенция же часто меняет знак, но имеет преимущественное направление на истечение газа из области. Смена знака (наряду

с возможными артефактами предобработки данных) может быть вызвана ситуацией, когда уже вышедший из области газ задувается обратно резко сменившимися направлением ветрами.

Подстановка рассчитанных величин в правую часть уравнения (1) даёт общий баланс CO на рассматриваемой территории за указанный интервал времени. Он составил $2,94 \cdot 10^9$ кг.

Полученные результаты требуют сравнения с независимыми оценками. В качестве таковой использована информация глобальной базы выбросов газов при лесных пожарах Global Fire Emissions Database (GFED) (<https://www.globalfiredata.org/>). В ней содержатся результаты модельных расчётов ежемесячных выбросов углерода в лесных пожарах и распределение ежедневной доли общего выброса на сетке координат с ячейкой $0,25 \times 0,25^\circ$. Для пересчёта выброса углерода в выброс CO был использован коэффициент пересчёта, рекомендованный для случая горения бореальных лесов в летнее время года и равный 0,127 (Kaiser et al., 2012).

Результат обработки данных базы GFED для той же области и периода времени в сравнении с рассчитанным по предлагаемой в работе методике суточным балансом показан на рис. 7.

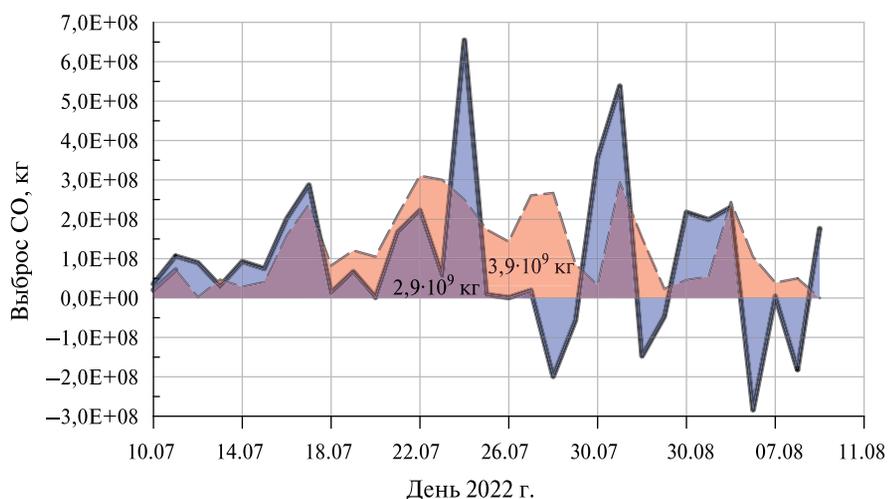


Рис. 7. Суточный баланс CO для области лесных пожаров, рассчитанный по предлагаемой методике (сплошная линия), и модельные расчеты выбросов CO по данным базы GFED (пунктирная линия).

Числа в закрашенных областях — интегральный выброс по соответствующим оценкам

Следует отметить, что временной ход в обоих графиках имеет общие черты, отражающие интенсификацию и ослабление горения. В то же время не следует ожидать их точного соответствия в силу различий в методиках расчёта: модельные оценки GFED закономерно оказываются более гладкими, не имеют резких (тем более отрицательных) выбросов. С другой стороны, важным достоинством методики, предложенной в настоящей работе, является её универсальный характер и отсутствие большого числа «свободных» параметров. Настройка таких параметров не свободна от произвола исследователя, в связи с чем надёжность и окончательность получаемых оценок, возможность использования их для калибровки альтернативных методик вызывает вопросы. В частности, надо отметить, что для пересчёта выброса углерода в CO в более общем случае горения лесов в летнее время в рамках той же модели GFED рекомендовано значение коэффициента 0,061, что вдвое ниже использованного 0,127. В совокупности эти два коэффициента дают разброс значений, в который укладывается величина интегрального баланса, полученная по представленной в работе методике. Нельзя исключить, что учёт региональных особенностей вызовет необходимость дальнейшего уточнения настроечных модельных коэффициентов, например для бореальных лесов Сибири или даже отдельных её районов. В этом отношении единообразие и простая логика предложенной методики приобретают большое значение. Изменение итоговых расчётов баланса газовой компоненты по этой методике возможно только в связи с улучшением качества исходных данных и вос-

становливаемых по ним полям адвекции. Прогресс в этих направлениях исследований должен привести к повышению устойчивости и надёжности балансовых расчётов по предложенной методике.

Заключение

В работе сформулирована методика оценки баланса парниковых газов на основе применения алгоритмов технического зрения к полям измерений концентраций ПГ из космоса и вычисления элементов уравнения баланса. Её важным преимуществом по отношению к подходам, использующим моделирование химического переноса, является опора на регулярные, однородные, плотные по пространству и достаточно частые по времени фактические (спутниковые) наблюдения. В этом смысле такой подход создаёт важную альтернативу подходам на базе численного моделирования.

Можно выделить следующие основные шаги алгоритмизации оценки баланса парниковых газов по формулам (1), (2):

1. Подсчёт общего количества газа, содержащегося над заданной областью в начальный и конечный моменты рассматриваемого интервала времени.
2. Подсчёт эффективной конвергенции/дивергенции потока газа, прошедшего через внешние контуры области за рассматриваемый интервал времени.
3. Решение уравнения баланса, в котором недостаток/избыток газа в конечный момент времени по сравнению с зарегистрированным ранее обусловлен разницей между поглощённым и выброшенным с данной территории газом.

Методика опробована на спутниковых измерениях концентрации CO инструментом TROPOMI в области сильного лесного пожара. Показано, что методика позволяет подсчитать выброс CO за счёт пожара. Сравнение с модельными данными GFED демонстрирует качественное согласие результатов оценки выбросов. Дальнейший прогресс в развитии методики связан в том числе с совершенствованием инструментов и систем спутникового мониторинга концентраций ПГ, а также алгоритмов предобработки дистанционных данных.

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

Литература

1. Ваганов Е. А., Порфирьев Б. Н., Широв А. А. и др. Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений // Экономика региона. 2021. Т. 17. Вып 4. С. 1096–1109. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-4>.
2. Гессен С. М., Воротников А. М. Карбоновые полигоны, новый инструмент управления климатическими изменениями в Российской Федерации // Журн. социологических исследований. 2021. Т. 6. № 2. С. 22–30. <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/45155/view>.
3. Ермаков Д. М., Пашинов Е. В., Кузьмин А. В. и др. Концепция расчёта 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.
4. Курганова И. Н., Лопес Д. Г. В. О., Инн С. Л. и др. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 2. 16 с. DOI: 10.31251/pos.v5i2.169.
5. Кэлер А., Брэдски Г. Изучаем OpenCV 3. Разработка программ компьютерного зрения на C++ с применением библиотеки OpenCV / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК-Пресс, 2017. 826 с.
6. Лупня Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Система «Beга-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
7. Романовская А. А., Трунов А. А., Коротков В. Н., Карабань Р. Т. Проблема учёта поглощающей способности лесов России в Парижском соглашении // Лесоведение. 2018. № 5. С. 323–334. DOI: 10.1134/S0024114818050066.

8. *Форсайт Д. А., Понс Ж.* Компьютерное зрение: Современный подход / пер. с англ. А. Назаренко, И. Дорошенко. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. 928 с.
9. *Bergamaschi P., Danila A., Weiss R. et al.* Atmospheric monitoring and inverse modelling for verification of greenhouse gas inventories. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018. 114 p. DOI: 10.2760/02681.
10. *Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E. et al.* Comparison of Vertically Integrated Fluxes of Atmospheric Water Vapor According to Satellite Radiothermvision, Radiosondes, and Reanalysis // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Article 1639. <https://doi.org/10.3390/rs13091639>.
11. *Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A. et al.* The CAMS reanalysis of atmospheric composition // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. V. 19. P. 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>.
12. *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. <https://doi.org/10.5194/bg-9-527-2012>.
13. *Kroeger T., Timofte R., Dai D., Van Gool L.* Fast optical flow using dense inverse search // *European conference on computer vision*. Cham: Springer, 2016. P. 471–488. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46493-0_29.
14. *Telea A.* An Image Inpainting Technique Based on the Fast Marching Method // *J. Graphics Tools*. 2004. V. 9. No. 1. P. 25–36. <https://doi.org/10.1080/10867651.2004.10487596>.
15. *van Wees D., van der Werf G. R., Randerson J. T. et al.* Global biomass burning fuel consumption and emissions at 500 m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED) // *Geoscientific Model Development*. 2022. No. 15. P. 8411–8437. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8411-2022>.

Development of a methodology for balance calculations of greenhouse gas emissions based on satellite monitoring data using the example of large forest fires

E. V. Pashinov¹, S. A. Vturin¹, D. M. Ermakov^{1,2}, I. N. Sadovskiy¹

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: pashinove@mail.ru

² *Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch*
Fryazino 141190, Moscow Region, Russia

Currently, studies of the balance of carbon-containing gases in the atmosphere over various territories are of great interest. Existing approaches to assessing the balance of gas components of the atmosphere (cadastral, direct measurements at test sites, inverse modeling) have known disadvantages and limitations. Therefore, it is important to develop new techniques based on direct analysis of remote sensing data. The work describes a method of balance calculations that is closed with respect to remote data from satellite IR spectrometers, which ensure the restoration of concentration fields of target gas components. The original version of the methodology was developed in relation to data on precipitable water vapor of the atmosphere for the task of analyzing the regional hydrological regime. This work analyzes the features of the remote sensing data used, which require additional adaptation of the calculation algorithms of the methodology. The methodology was developed and tested using the example of monitoring CO emissions from large forest fires in Siberia. Balance calculations using the proposed method gave a total CO emission of $2.9 \cdot 10^9$ kg in the time interval from July 10 to August 10, 2022. Independent model estimates, according to the Global Fire Emissions Database, give an upper limit of $3.9 \cdot 10^9$ kg. The lower limit of the same emission can be estimated at $1.4 \cdot 10^9$ kg.

Keywords: greenhouse gases, fluxes, balance calculations, remote sensing of the Earth

Accepted: 25.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-313-325

References

1. Vaganov E. A., Porfir'ev B. N., Shirov A. A. et al., Assessment of the Contribution of Russian Forests to Climate Change Mitigation, *Ekonomika regiona*, 2021, Vol. 17, No. 4, pp. 1096–1109 (in Russian), <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-4>.
2. Gessen S. M., Vorotnikov A. M., Carbon polygons, a new tool for climate change management in the Russian Federation, *Zhurnal sotsiologicheskikh issledovaniy*, 2021, Vol. 6, No. 2, pp. 22–30 (in Russian), <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/45155/view>.
3. 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 radiothermvision, *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2023, No. 72, pp. 470–493 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
4. Kurganova I. N., Lopes D. G. V. O., Ipp S. L. et al., Pilot carbon polygon in Russia: analysis of carbon stocks in soils and vegetation), *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*, 2022, Vol. 5, No. 2, 16 p. (in Russian), DOI: 10.31251/pos.v5i2.169.
5. Kaehler A., Bradski G., *Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library*, Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2016, 1022 p.
6. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 9–31 (in Russian), DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
7. Romanovskaya A. A., Trunov A. A., Korotkov V. N., Karaban' R. T., The Problem of Accounting for Carbon Sequestration Ability of Russian Forests in Paris Climatic Agreement, *Lesovedenie*, 2018, No. 5, pp. 323–334 (in Russian), DOI: 10.1134/S0024114818050066.
8. Forsyth D. A., Ponce J., *Computer vision: A modern approach*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall Publ., 2002, 693 p.
9. Bergamaschi P., Danila A., Weiss R. et al., *Atmospheric monitoring and inverse modelling for verification of greenhouse gas inventories*, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018, 114 p., DOI: 10.2760/02681.
10. Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E. et al., Comparison of Vertically Integrated Fluxes of Atmospheric Water Vapor According to Satellite Radiothermvision, Radiosondes, and Reanalysis, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Article 1639, <https://doi.org/10.3390/rs13091639>.
11. Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A. et al., The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19, pp. 3515–3556, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>.
12. 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, <https://doi.org/10.5194/bg-9-527-2012>.
13. Kroeger T., Timofte R., Dai D., Van Gool L., Fast optical flow using dense inverse search, *European conference on computer vision*, Cham: Springer, 2016, pp. 471–488, https://doi.org/10.1007/978-3-319-46493-0_29.
14. Telea A., An Image Inpainting Technique Based on the Fast Marching Method, *J. Graphics Tools*, 2004, Vol. 9, No. 1, pp. 25–36, <https://doi.org/10.1080/10867651.2004.10487596>.
15. van Wees D., van der Werf G. R., Randerson J. T. et al., Global biomass burning fuel consumption and emissions at 500 m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED), *Geoscientific Model Development*, 2022, No. 15, pp. 8411–8437, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8411-2022>.