

Повышение точности расчёта эмиссии угарного газа в балансовой методике, основанной на данных спутниковых наблюдений

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

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, Московская обл., 141190, Россия*

Описаны алгоритмические усовершенствования, внесённые в развиваемую балансовую методику расчёта эмиссии малых газовых составляющих по данным спутникового мониторинга химического состава атмосферы. Повышена точность интегральных оценок вертикального обмена веществом между атмосферой и подстилающей поверхностью, что продемонстрировано на примере расчётов выбросов угарного газа от крупных лесных пожаров и сопоставлением с независимыми модельными оценками. При этом применена методика сопоставления, уже описанная авторами в предыдущих исследованиях, и продемонстрированы улучшения, достигнутые в новой версии алгоритмов на рассмотренной ранее выборке данных. Так, возросла корреляция рядов расчётных и модельных значений интегральных выбросов угарного газа от 21 крупного лесного пожара (коэффициент детерминации увеличился от 0,77 до 0,82). При этом резко снизились частота и амплитуда отрицательных величин во временных рядах суточного баланса, которые не имеют физического смысла и должны быть объяснены ошибками (артефактами) балансовой методики. Последнее обстоятельство имеет самостоятельное значение в более широком контексте практических приложений, поскольку в перспективе развиваемую балансовую методику планируется применять, в частности, для расчёта интегрального выброса/поглощения различных газовых компонент на территории России и сопредельных государств, отдельных регионов и административно-территориальных единиц.

Ключевые слова: балансовая методика, эмиссии угарного газа, спутниковый мониторинг, лесные пожары

Одобрена к печати: 06.11.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-353-364

Введение

В работе (Ермаков и др., 2024) построена теоретическая модель расчёта погрешности балансовой методики вычисления вертикальных потоков малых газовых составляющих атмосферы по спутниковым данным, ранее предложенной в исследованиях (Ермаков и др., 2023; Пашинов и др., 2023). В частности показано, что основной вклад в погрешность дают ошибки вычисления горизонтального атмосферного переноса, получаемые применением к последовательности полей содержания исследуемого газа адаптированных алгоритмов оптического потока (Ермаков, 2021). Балансовая методика была проверена на частном случае расчёта выбросов угарного газа (CO) крупными лесными пожарами, критерием качества служила степень соответствия имеющимся независимым модельным оценкам по базе данных GFED (*англ.* Global Fire Emissions Database). Было установлено, что оценки по балансовой методике и по GFED для 21 случая наблюдавшихся интенсивных локализованных горений бореальных лесов в период с 2018 по 2023 г. высоко коррелированы, коэффициент детерминации R^2 оказался равен 0,77 (Ермаков и др., 2024). При этом относительная погрешность балансовой методики составила для рассмотренных случаев около 30 %, что лучше априорной погрешности оценок по GFED — около 50 %, согласно работе (Randerson et al., 2012), но оставляет потенциал для дальнейшего улучшения. Кроме того, на графиках временного хода, рассчитанных по балансовой методике выбросов, нередко встречались существенные отрицательные значения (Пашинов и др., 2023).

В рамках развиваемой методики отрицательные значения баланса соответствуют стоку — поглощению газа подстилающей поверхностью. Однако получающиеся величины стока были невозможны с физической точки зрения, их следует считать ошибками (артефактами) методики. Несмотря на адекватность интегральных оценок выброса от пожаров, наличие сильных отрицательных мгновенных оценок баланса потребовало дальнейшего совершенствования балансовой методики расчётов.

Как было указано выше, ключевое влияние на качество балансовой оценки оказывает правильность расчёта поля скорости горизонтального переноса атмосферного газа. Методическим вопросам выполнения расчётов полей скорости атмосферных движений, применительно к описанию различных по пространственным масштабам, высотной локализации и т.д. динамическим атмосферным процессам, уделяется значительное внимание, например, в публикациях (Nerushev, Kramchaninova, 2011; Velden et al., 1997). В настоящей работе на основе анализа наиболее частых случаев возникновения ошибок в развиваемой авторами балансовой методике предложены и реализованы специальные приёмы повышения точности и устойчивости решений, возникающих при применении алгоритмов оптического потока к спутниковым данным атмосферного содержания малых газовых составляющих. Для проверки эффективности предложенных доработок балансовой методики были проведены повторные расчёты выброса CO от лесных пожаров, ранее рассмотренных в работе (Пашинов и др., 2023). По предложенной в этой работе методике проведено их повторное сопоставление с имеющимися оценками по GFED и показано, что взаимное соответствие двух типов оценок возросло. При этом существенно уменьшились по частоте возникновения и абсолютной величине отрицательные значения баланса, даваемые балансовой методикой.

Ниже описаны использованные данные и внесённые в балансовую методику усовершенствования, а также приведены и обсуждены результаты применения усовершенствованной методики к расчёту выброса CO крупными лесными пожарами.

Использованные данные

Как указано выше, в работе использованы принципиально те же данные, что и в предшествующей (Ермаков и др., 2024). Это дало возможность объективной оценки улучшения балансовой методики в результате дополнительного применения ряда новых алгоритмов обработки спутниковых данных. В качестве источника информации о содержании CO в атмосфере использованы глобальные ежесуточные массивы, формируемые в Центре коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Бриль и др., 2023; Лупян и др., 2019), за интервал с 2018 по 2023 г. Эти данные подвергнуты обработке по общей схеме подхода спутникового радиотепловидения (Ермаков, 2021) с целью построения суточных полей содержания CO без пропусков и далее — векторных полей горизонтального переноса CO на регулярной сетке $0,25 \times 0,25^\circ$. При этом в ранее описанную методику построения (Ермаков и др., 2024; Пашинов и др., 2023) внесён ряд изменений, рассмотренных в следующем разделе.

Затем к полученным полям применён алгоритм расчёта выброса CO с помощью ранее разработанных и оставленных без изменений программных средств (Втюрин, 2023). Расчёты выполнены для границ, охватывающих интенсивные лесные пожары, перечисленные в работе (Ермаков и др., 2024), в которой также кратко описана методика получения модельных оценок выброса CO по GFED (Seiler, Crutzen, 1980; van der Werf et al., 2017) и подход к сопоставлению оценок выброса по балансовой методике и по GFED. В этой части работы изменений в алгоритмах обработки и совместного анализа данных по сравнению с предыдущим исследованием (Ермаков и др., 2024) не было.

Усовершенствованная методика расчёта горизонтального переноса

Внесённые в методику расчёта горизонтального переноса изменения по отношению к предыдущей версии алгоритмов касаются следующих основных аспектов: перехода к расчётам на

регулярной сетке $0,25 \times 0,25^\circ$ (по аналогии с расчётами для полей водяного пара) вместо сетки $0,20 \times 0,25^\circ$, применённой в предыдущей версии обработки; нового алгоритма заполнения пропусков в полях содержания CO; нового алгоритма усиления контрастов в полях CO; сглаживания итоговых векторных полей переноса по времени. Ниже все четыре модификации рассмотрены подробнее.

Переход к новой расчётной сетке

В исследованиях переноса водяного пара (Ермаков, 2021) применялась расчётная сетка $0,25 \times 0,25^\circ$, что было обусловлено как форматом представления исходных данных, так и удобством сравнения с оценками реанализа (Ермаков et al., 2021). В предшествовавших исследованиях по выбросам угарного газа была использована сетка $0,20 \times 0,25^\circ$ (Ермаков и др., 2024; Пашинов и др., 2023), выбранная в связи с простотой перехода от сетки исходных данных содержания CO ($0,040 \times 0,063^\circ$) посредством усреднения в квадрате 4×4 узла. В настоящей работе установлена расчётная сетка $0,25 \times 0,25^\circ$. В основном этот переход продиктован соображениями методического единообразия, однако он мог оказать некоторое положительное влияние на устойчивость расчётов, поскольку каждому узлу сетки $0,25 \times 0,25^\circ$ соответствует примерно на 20 % больше исходных значений содержания CO, чем узлу сетки $0,20 \times 0,25^\circ$. (Следует отметить, что этот эффект сам по себе, без применения описанных ниже дополнительных процедур, не сказывается заметным образом на качестве балансовых оценок.)

Новый алгоритм заполнения пропусков

Исходные данные об интегральном содержании угарного газа содержат пропуски (лакуны), которые возникают из-за наличия облачности, технических сбоев или отбраковки недоведенных значений. Однако для расчёта атмосферного переноса методом оптического потока требуется пара последовательно наблюдаемых полей содержания CO без пропусков. Алгоритму закрытия лакун (оптимального заполнения пропусков данных) уделяется существенное внимание в рамках развития балансовой методики.

Предыдущая реализация (Втюрин, 2023; Пашинов и др., 2023) использовала функцию `inpaint` из открытой библиотеки `opencv`. Анализ результатов её работы показал, что для данных по CO её непосредственное применение может приводить к образованию ряда существенных артефактов, вызванных тиражированием ошибочных значений или резких неоднородностей, оказавшихся на краях заполняемой области.

Для уменьшения этих артефактов был предложен алгоритм, реализующий разновидность пирамидального многомасштабного подхода (Anandan, 1989). Перед применением функции `inpaint` выполняется переход к грубой координатной сетке (в текущей реализации — $1 \times 1^\circ$) усреднением соседних значений. Это одновременно сглаживает резкие выбросы в данных и уменьшает размеры лакун в пикселях. После экстраполяции данных в область лакун с помощью `inpaint` осуществляется возврат к сетке $0,25 \times 0,25^\circ$. При этом в узлах, где имеются исходные значения содержания CO, эти величины сохраняются без изменений. В области лакун происходит интерполяция на сетку $0,25 \times 0,25^\circ$ крупномасштабного приближения, полученного с помощью `inpaint` (рис. 1).

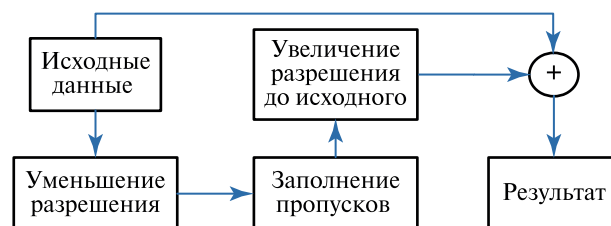


Рис. 1. Новая схема заполнения лакун в полях содержания CO

Кроме того, введено ограничение на максимальное расстояние экстраполяции исходных данных вглубь лакуны. В текущей реализации оно, в пересчёте на географические градусы, составляет около 10° . Для внутренних областей крупных лакун (удалённых более чем на 10°

от ближайших актуальных данных) не применяется алгоритм inpaint, они заполняются медианным значением содержания СО по исходным данным.

Работу нового алгоритма заполнения лакун в сопоставлении с предыдущим вариантом иллюстрирует *рис. 2*. На нём в левом столбце приведены фрагменты исходного поля содержания СО за 1 августа 2021 г., в столбце посередине — вариант заполнения старым, а справа — новым алгоритмом. Две строки изображений соответствуют двум разным фрагментам. Для изображений сверху наиболее сильные отличия заполнения видны для лакуны посередине, непосредственно под областью повышенного содержания СО в исходных данных. Для изображений снизу наиболее контрастные отличия сосредоточены в правом квадранте.

Следует ещё раз подчеркнуть, что построение и параметризация развиваемых алгоритмов заполнения лакун носят в значительной мере эмпирический характер и не призваны восстанавливать фактические значения исследуемых полей содержания СО в областях пропуска данных с некоторой априорной точностью (это представляется не реалистичным). Основная цель процедуры — получение таких гладких дополнений исходных полей, которые вносят наименьшие возмущения в расчёт векторов скорости атмосферного переноса. В связи с этим непосредственная сравнительная оценка качества подобных алгоритмов затруднена. Ниже, как и в предыдущих исследованиях (Ермаков и др., 2024; Пашинов и др., 2023), использованы косвенные критерии интегральной оценки качества алгоритмов на основе сопоставления собственных и независимых модельных расчётов выбросов СО от интенсивных лесных пожаров. Это обосновано тем, что в рамках практических приложений развиваемой балансовой методики центральный интерес представляет адекватное описание вертикального обмена газовыми компонентами между атмосферой и подстилающей поверхностью.

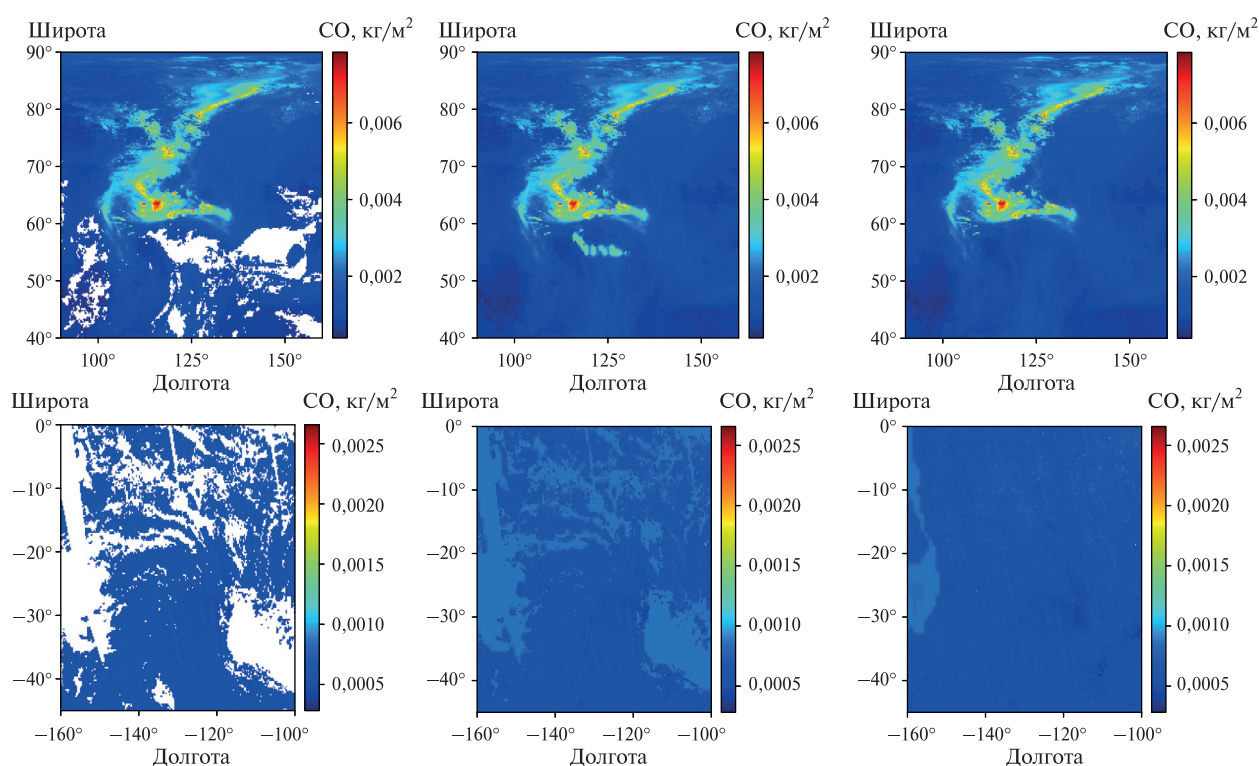


Рис. 2. Примеры заполнения лакун (показаны белыми областями на изображениях *слева*) старым алгоритмом (*посередине*) и новым алгоритмом (*справа*)

Новый алгоритм контрастирования

Метрики подобия фрагментов полей, используемые в алгоритмах оптического потока для расчёта векторов движений, требуют нормализации данных. На практике это означает, что необходимо перейти от исходных физических значений содержания газовой компоненты

к условным целочисленным значениям, принадлежащим некоторому отрезку, например, $[0, 255]$. Таким образом, подлежащие обработке данные имеют фиксированный динамический диапазон, поэтому необходимо использовать такую нормализацию исходных данных, которая будет применять этот диапазон максимально эффективно. При этом подход с фиксированной шкалой пересчёта (достаточный для водяного пара) не всегда работает для других газовых составляющих. Например, диапазон «невозмущённых» значений содержания СО в атмосфере достаточно узок, однако расширяется в несколько раз при интенсивном лесном пожаре, так что максимальные регистрируемые значения могут быть приняты за выбросы вследствие ошибок восстановления (рис. 3, слева).

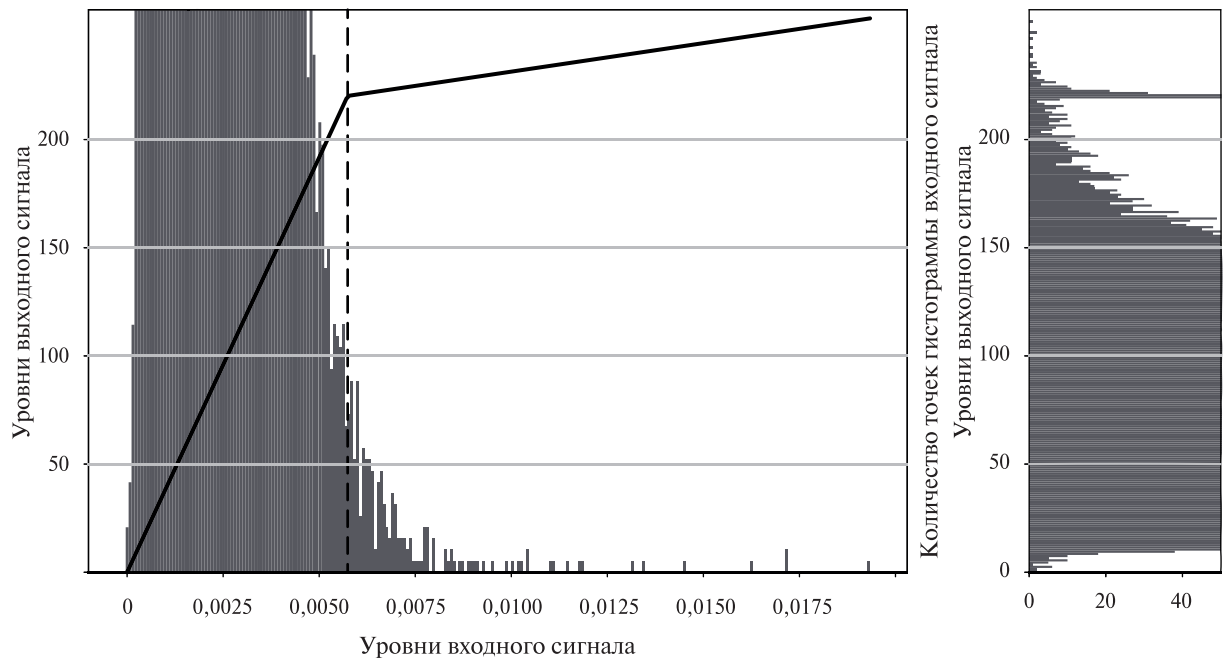


Рис. 3. Преобразование значений содержания СО в атмосфере за 1 и 2 августа 2021 г.: гистограмма исходных значений (вертикальный пунктир — положение процентиля по уровню 99,99 %, сплошная чёрная ломаная — переходная характеристика) (слева); гистограмма итоговых целочисленных значений (справа)

Ранние варианты нормализации использовали линейную модель с насыщением. Вычислялся коридор фактического содержания СО с центром в среднем значении и полушириной $\pm 3\text{СКО}$ (среднеквадратическое отклонение) (вычисляемый по гистограмме). Величинам за пределами этого коридора приписывались соответствующие значения концов динамического диапазона (0 или 255). Дальнейшее исследование показало, что исходные данные даже за пределами 99,99-процентиля (см. рис. 3) могут отвечать корректным физическим значениям содержания СО в случае интенсивных пожаров. Высокие значения часто образуют на изображениях компактные группы, соответствующие очагу горения и шлейфу (рис. 4, см. с. 358). Поэтому, в частности, их выбраковка с дальнейшей процедурой заполнения лакун может приводить к нежелательным потерям информации о пространственной структуре полей и её динамике именно там, где концентрация исследуемой газовой компоненты максимальна.

Для лучшего сохранения информации о пространственной структуре исследуемых полей предложено перейти от линейного преобразования с насыщением к кусочно-линейному, которое учитывает тот факт, что экстремально высокие значения представлены на гистограмме достаточно разреженно в силу их небольшого количества. Вычисляются два коэффициента k_1 и k_2 наклона нормировочной ломаной (см. рис. 3):

$$k_1 = \frac{T}{p}; \quad k_2 = \frac{1-T}{C_{\max} - p},$$

где C_{\max} — абсолютный максимум исходных значений C содержания CO; $p = Q_{\alpha}(C)$ — величина процентиля (Q) значений C по заданному уровню α ; T — константа, регулирующая положение точки смены угла наклона. Правило пересчёта C в целочисленные условные единицы N в этом случае формулируется следующим образом:

$$N = \text{int} \left\{ 255 \begin{cases} k_1 C, & C \leq p, \\ T + k_2 (C - p), & C > p, \end{cases} \right\}$$

где int — операция округления до целого.

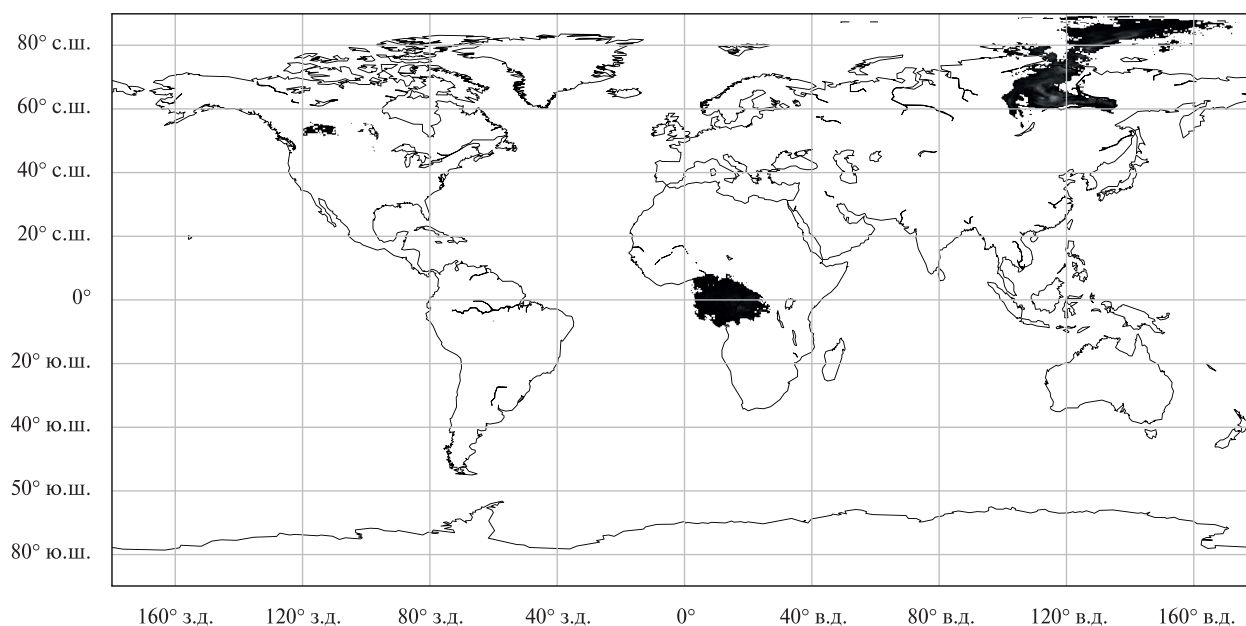


Рис. 4. Фактическое содержание CO. Области за 1 августа 2021 г., превышающие среднее значение за эту дату более чем на 33КО, выделены тёмно-серыми тонами

В текущей реализации эмпирически подобраны следующие значения параметров: уровень процентиля α равен 99,99 %; $T = 0,86$. Это означает, что в 86 % итогового динамического диапазона (значения от 0 до 219) пересчитываются с калибровочным коэффициентом k_1 значения содержания CO и не превышают процентиль по уровню 99,99 %. Более высокие значения пересчитываются с коэффициентом k_2 в оставшиеся градации от 220 до 255 включительно.

Сглаживание полей горизонтального переноса

Несмотря на описанные выше дополнительные меры по улучшению устойчивости расчётов атмосферной динамики в ряде случаев в вычисляемых полях горизонтального переноса отмечаются существенные артефакты. Они проявляются в аномальных изменениях абсолютной величины и/или направления скорости переноса, имеющих характер резких единичных выбросов. Чаще всего они связаны с возникновением крупных пропусков в данных, которые не удаётся удовлетворительно заполнить с помощью описанных выше алгоритмов.

Разработка универсального критерия для автоматического выявления дефектов данных, способных вызвать аномалии в расчёте векторов переноса, представляется методически сложной. В то же время ясно, что на рассматриваемых пространственно-временных масштабах поле горизонтального атмосферного переноса должно быть достаточно гладким и медленно меняющимся, без резких изменений направления и величины скорости.

По этой причине для получения интегральных балансовых оценок на длинных временных интервалах (от месяца и более) в качестве первого приближения к фильтрации однократных выбросов в полях скорости переноса принято решение использовать сглаживание по времени. С этой целью независимо в каждом узле расчётной сетки проводится осреднение зональной и меридиональной компонент скорости горизонтального переноса в скользящем временном окне шириной 10 сут. Ожидается, что такое сглаживание не должно приводить к существенным изменениям гладких, медленно меняющихся полей, но при этом заметно уменьшит амплитуду однократных выбросов, вызванных пропуском данных.

Иллюстрирующий пример представлен на *рис. 5*.

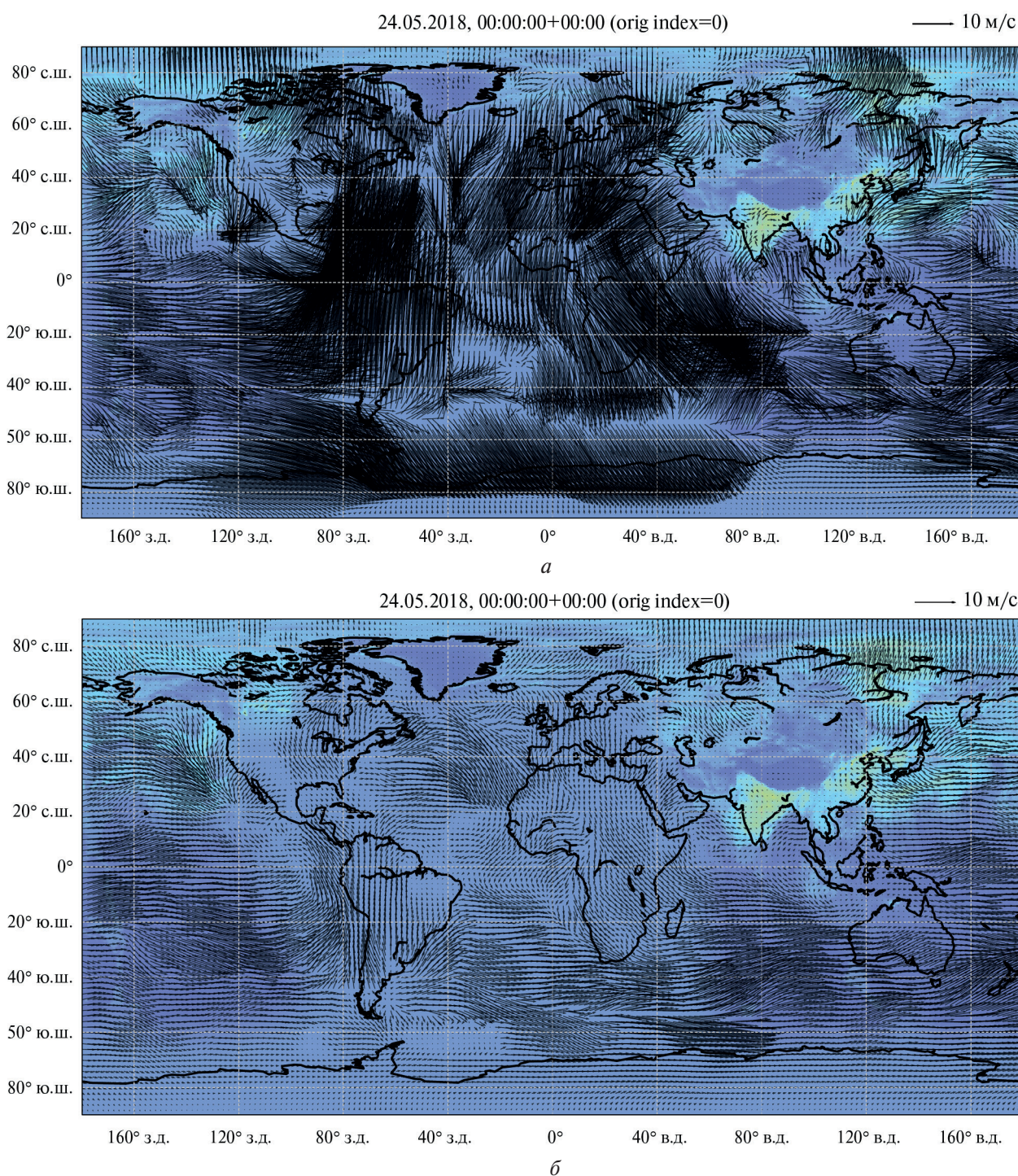


Рис. 5. Поле векторов скорости атмосферного переноса угарного газа за 24 мая 2018 г. до (*сверху*) и после (*снизу*) сглаживания в скользящем окне размером 10 сут

В верхней части рисунка показано поле векторов скорости атмосферного переноса угарного газа за 24 мая 2018 г. до сглаживания в скользящем временном окне. Хорошо видны аномальные значения скорости в тропиках и в Южном полушарии, вызванные отсутствием надёжной информации о содержании CO за рассматриваемые сутки. В нижней части рисунка показан результат сглаживания в 10-суточном скользящем окне. Аномалии в полях скорости отсутствуют, хорошо просматриваются характерные крупномасштабные особенности атмосферной циркуляции.

Сравнительный анализ качества балансовых расчётов по усовершенствованной методике

Как и в предыдущих работах (Ермаков и др., 2024; Пашинов и др., 2023) в качестве основного критерия качества балансовой методики было принято согласие в анализе интегральных оценок выбросов угарного газа крупными пожарами. Для корректности сравнения был выбран и проанализирован тот же набор пожаров, что и в работе (Ермаков и др., 2024). Диаграмма рассеяния полученных по усовершенствованной балансовой методике интегральных оценок выбросов в сопоставлении с соответствующими оценками по GFED приведена на *рис. 6*. Подробности методики, её построения описаны в работе (Ермаков и др., 2024).

Согласие двух рядов данных возросло (коэффициент детерминации 0,82 против 0,77 в предыдущей работе). Существенным аспектом стало также резкое снижение числа и амплитуды отрицательных значений баланса — артефактов балансовой методики. В предшествующих исследованиях это могло приводить к физически невозможным значениям интегрального отрицательного баланса для наиболее слабых пожаров, а также к возникновению отдельных резких выбросов во временных рядах баланса для крупных пожаров. В усовершенствованной балансовой методике этот недостаток в значительной степени устранён.

В качестве примера на *рис. 7* (см. с. 361) приведён временной ход ежесуточных оценок выбросов CO по GFED, а также старой и новой балансовой методике.

Видно, что новая методика даёт существенно более гладкий график эмиссии, практически лишённый отрицательных значений, за исключением крайних правых точек, которые соответствуют концу горения. Для этих последних точек не гарантирована относительная погрешность расчёта в 30 %, поскольку они не соответствуют сценарию интенсивного пожара. По порядку величины в этом случае можно оценить абсолютную погрешность расчёта горизонтального потока CO, ориентируясь на пространственную неоднородность его

содержания в шлейфе от пожара (с максимумом содержания $C_{\max} \approx 0,005 \text{ кг/м}^2$ и минимумом $C_{\min} \approx 0,001 \text{ кг/м}^2$), а также характерную скорость пересечения шлейфом границы интегрирования $v \approx 1,5 \text{ м/с}$ и длину пересекаемого участка границы $l \approx 2000 \text{ км}$. Эта оценка погрешности даёт неопределённость вычисления потока: $\Delta F = (C_{\max} - C_{\min})vl = 12000 \text{ кг/с}$, что в пересчёте на одни сутки составляет $1,04 \cdot 10^9 \text{ кг}$.

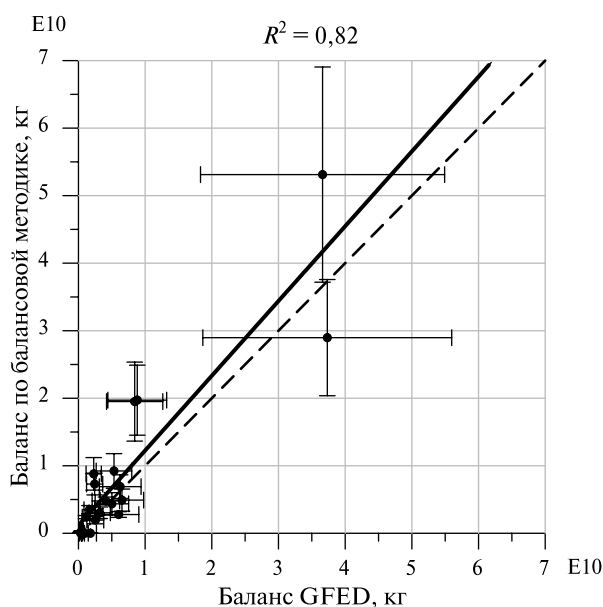


Рис. 6. Сопоставление интегральных выбросов CO от 21 крупного лесного пожара в России и Канаде за 2018–2023 гг. Каждой точке соответствует выброс от одного пожара. Отрезками обозначены диапазоны ошибок на уровне 1СКО (см. работу (Ермаков и др., 2024))

Такая величина погрешности объясняет возможность получения сравнительно больших отрицательных значений суточного баланса в условиях, когда интенсивное горение уже прекратилось, но воздушные массы с сильной неоднородностью содержания CO , вызванной остаточным шлейфом от пожара, продолжают пересекать границу области расчётов.

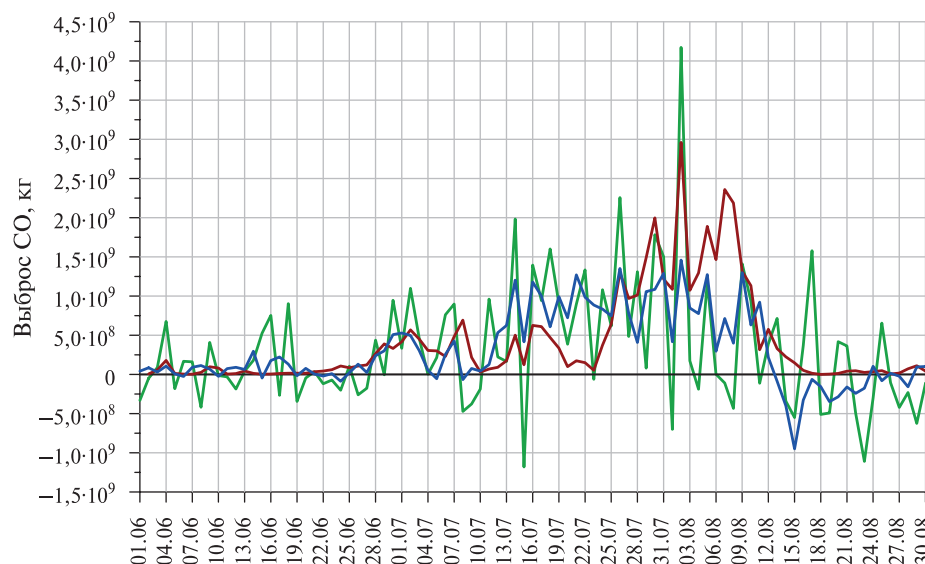


Рис. 7. Временной ход суточных выбросов CO от крупного лесного пожара: по GFED (красная кривая), старой (зелёная) и новой (синяя) балансовой методике. 2021 г.

Заключение

В работе описан ряд алгоритмических усовершенствований, внесённых в развиваемую балансовую методику. Усовершенствования направлены в первую очередь на повышение точности интегральных оценок вертикального обмена климатически значимыми газами между атмосферой и подстилающей поверхностью. Одной из методических сложностей введения и отработки подобных усовершенствований является отсутствие достаточно представительной статистики независимых измерений вертикальных потоков различных газовых составляющих атмосферы. В связи с этим в продолжающихся исследованиях авторов принят и обоснован подход, заключающийся в сопоставлении результатов расчётов выброса угарного газа крупными лесными пожарами с независимыми модельными оценками. Улучшения, достигнутые в представленной работе, заключаются, во-первых, в некотором увеличении корреляции двух рядов оценок (коэффициент детерминации вырос от 0,77 в предшествующем исследовании до 0,82 в настоящем), а во-вторых, в резком снижении частоты и амплитуды отрицательных выбросов во временных рядах суточного баланса, которые не имеют физического смысла и должны быть объяснены ошибками (артефактами) методики. Последнее обстоятельство имеет самостоятельное значение в более широком контексте практических приложений, поскольку ту же балансовую методику в перспективе планируется применять, в частности, для расчёта интегрального выброса/поглощения различных газовых компонент на территории России и сопредельных государств, отдельных регионов и административно-территориальных единиц (Пашинов и др., 2024).

Принимая во внимание относительную погрешность, которой характеризуются сами модельные оценки по GFED (Матвеев, Барталев, 2024; Randerson et al., 2012), следует отметить, что возможности подхода к проверке качества балансовой методики, рассмотренные в этом и предшествующих исследованиях авторов, практически исчерпаны. Для дальнейшего уточнения балансовых расчётов по развиваемой методике необходим анализ и выбор других и/или дополнительных инструментов и результатов моделирования динамических процессов

выброса и стока газовых компонент, в том числе на новых природных и антропогенных объектах исследования.

Работа выполнена в рамках темы «Эмиссия» государственного задания ИКИ РАН (госрегистрация № 125111112878-8). В работе использованы данные и средства инфраструктурного обеспечения Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>).

Литература

1. Брилль А. А., Константинова А. М., Лупян Е. А., Бурцев М. А. Возможности работы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с информацией о малых газовых составляющих, получаемой на основе данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 85–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
2. Втюрин С. А. Viewflow. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023680977. Рег. 09.10.2023.
3. 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. 470–492. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
4. Ермаков Д. М., Пашинов Е. В., Лозин Д. В. и др. Погрешность расчёта выбросов угарного газа от крупных лесных пожаров по балансовой методике на основе данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 143–155. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-143-155.
5. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
6. Матвеев А. М., Барталев С. А. Сравнительный анализ оценок эмиссии углерода от природных пожаров на территории России на основании глобальных продуктов ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 141–161. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-141-161.
7. Пашинов Е. В., Втюрин С. А., Ермаков Д. М., Садовский И. Н. Отработка методики балансовых расчётов выбросов парниковых газов по данным спутникового мониторинга на примере крупных лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 313–325. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-313-325.
8. Пашинов Е. В., Лозин Д. В., Втюрин С. А., Кобец Д. А. Первые результаты расчёта баланса парниковых газов для регионов РФ по балансовой методике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 398–403. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-398-403.
9. Anandan P. A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion // Intern. J. Computer Vision. 1989. V. 2. No. 3. P. 283–310.
10. Ermakov D. Satellite radiothermvision of atmospheric processes: Method and applications. Cham: Springer, 2021. 199 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.
11. 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. Iss. 9. Article 1639. <https://doi.org/10.3390/rs13091639>.
12. Nerushev A. F., Kramchaninova E. K. Method for determining atmospheric motion characteristics using measurements on geostationary meteorological satellites // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2011. V. 47. No. 9. P. 1104–1113.
13. Randerson J. T., Chen Y., van der Werf G. R. et al. Global burned area and biomass burning emissions from small fires // J. Geophysical Research: Biogeosciences. 2012. V. 117. Iss. G4. Article G04012. <https://doi.org/10.1029/2012JG002128>.
14. Seiler W., Crutzen P. J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning // Climatic Change. 1980. V. 2(3). P. 207–247. <https://doi.org/10.1007/BF00137988>.
15. van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L. et al. Global fire emissions estimates during 1997–2016 // Earth System Science Data. 2017. V. 9. Iss. 2. P. 697–720. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>.
16. Velden C. S., Hayden C. M., Nieman S. J., Menzel W. P., Wanzong S., Goerss J. S. Upper-tropospheric winds derived from geostationary satellite water vapor observations // Bull. American Meteorological Soc. 1997. V. 78. No. 2. P. 173–195.

Improving the accuracy of carbon monoxide emission calculation in the balance method based on satellite observation data

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

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

² Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino, Moscow Region 141190, Russia

Algorithmic improvements to a balance methodology under development for calculating trace gas emission based on satellite monitoring of atmospheric chemical composition are described. The accuracy of integrated estimates of vertical substance exchange between the atmosphere and the underlying surface has been improved, as demonstrated by calculating carbon monoxide emissions from large forest fires and comparing them with independent model estimates. A comparison methodology previously described by the authors has been applied, and the improvements achieved in the new version of the algorithms have been demonstrated using the data sample considered earlier. The correlation between calculated and modeled values of integrated carbon monoxide emissions from 21 large forest fires has increased from 0.88 to 0.91. At the same time, the frequencies and amplitudes of negative values in the daily balance time series, which have no physical meaning and should be explained by errors (artifacts) in the balance methodology, have sharply decreased. The latter circumstance has independent significance in the broader context of practical applications, since in the future the balance method being developed is planned to be used, in particular, for calculating the integrated emission/absorption of various gas components in the territory of Russia and neighboring states, individual regions and administrative-territorial units.

Keywords: balance method, carbon monoxide emission, satellite monitoring, forest fires

Accepted: 06.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-353-364

References

1. Bril A. A., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Burtsev M. A., Capabilities of IKI-Monitoring Shared Use Center operation with satellite monitoring-based trace gas component data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 85–95 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
2. Vturin S. A., *Viewflow*, Certificate of state registration of computer program No. 2023680977 (RU), Reg. 09.10.2023.
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 radiothermography, *Hydrometeorology and Ecology*, 2023, No. 72, pp. 470–493 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
4. Ermakov D. M., Pashinov E. V., Lozin D. V. et al., Accuracy of calculating carbon monoxide emissions from large forest fires using the balance technique based on satellite monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 143–155 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-143-155.
5. Loupyan E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
6. Matveev A. V., Bartalev S. A., A comparative analysis of wildfire carbon emissions estimates in Russia according to global inventories, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 4, pp. 141–161 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-141-161.
7. Pashinov E. V., Vturin S. A., Ermakov D. M., Sadovskiy I. N., Development of a methodology for balance calculations of greenhouse gas emissions based on satellite monitoring data using the example of large forest fires, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 6, pp. 313–325 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-313-325.

8. Pashinov E. V., Lozin D. V., Vturin S. A., Kobets D. A., First results of greenhouse gas balance calculation for the regions of Russia based on the balance technique, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 398–403 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-398-403.
9. Anandan P., A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion, *Intern. J. Computer Vision*, 1989, V. 2, No. 3, pp. 283–310.
10. Ermakov D., *Satellite radiothermovision of atmospheric processes: Method and applications*, Cham: Springer, 2021, 199 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.
11. Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E. et al., Comparison of vertically integrated fluxes of atmospheric water vapor according to satellite radiothermovision, radiosondes, and reanalysis, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Iss. 9, Article 1639, <https://doi.org/10.3390/rs13091639>.
12. Nerushev A. F., Kramchaninova E. K., Method for determining atmospheric motion characteristics using measurements on geostationary meteorological satellites, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, V. 47, No. 9, pp. 1104–1113.
13. Randerson J. T., Chen Y., van der Werf G. R. et al., Global burned area and biomass burning emissions from small fires, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, V. 117, Iss. G4, Article G04012, <https://doi.org/10.1029/2012JG002128>.
14. Seiler W., Crutzen P. J., Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning, *Climatic Change*, 1980, V. 2(3), pp. 207–247, <https://doi.org/10.1007/BF00137988>.
15. van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L. et al., Global fire emissions estimates during 1997–2016, *Earth System Science Data*, 2017, V. 9, Iss. 2, pp. 697–720, <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>.
16. Velden C. S., Hayden C. M., Nieman S. J., Menzel W. P., Wanzong S., Goerss J. S., Upper-tropospheric winds derived from geostationary satellite water vapor observations, *Bull. American Meteorological Soc.*, 1997, V. 78, No. 2, pp. 173–195.