

Погрешность расчёта выбросов угарного газа от крупных лесных пожаров по балансовой методике на основе данных спутникового мониторинга

Д. М. Ермаков^{1,2}, Е. В. Пашинов¹, Д. В. Лозин¹, Е. А. Лупян¹, С. А. Втюрин¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: d.m.ermakov@cosmos.ru

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

Проведено исследование погрешности предложенной ранее балансовой методики при вычислении выбросов угарного газа от крупных лесных пожаров. Показано, что при используемых на практике параметрах вычислений (размеров границ исследуемых территорий) относительная погрешность ожидается на уровне 30 %. Проведено сопоставление результатов расчёта выбросов от 21 крупного лесного пожара с независимыми модельными оценками по базе данных GFED (*англ.* Global Fire Emissions Database). Сопоставление показало хорошее согласие двух видов расчётов. Развитый подход к анализу погрешности балансовой методики имеет перспективы обобщения на случай произвольных источников/стоков малых газовых составляющих атмосферы. Следует ожидать, что эта точность будет зависеть от выбора газовой компоненты, поэтому представляет интерес проведение дополнительных исследований погрешности для разных газовых компонент, в том числе водяного пара. И теоретический анализ, и практические расчёты показывают, что относительная погрешность расчёта балансов в балансовой методике уменьшается с ростом размеров исследуемых территорий. Поэтому наиболее надёжные в среднем оценки баланса следует ожидать для крупных территорий (на уровне субъектов РФ или целых стран), а также при накоплении на длительных интервалах времени.

Ключевые слова: выбросы угарного газа, крупные лесные пожары, балансовая методика, спутниковый мониторинг, оценка погрешности

Одобрена к печати: 02.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-143-155

Введение

В исследованиях углеродного цикла Земли критически важным представляется знание параметров вертикального обмена углеродосодержащими веществами между атмосферой и подстилающей поверхностью. Многие из таких веществ являются климатически активными. Увеличение их содержания в атмосфере прямо или косвенно усиливает парниковый эффект, что является нежелательным в современных климатических условиях. Поэтому значимой составляющей мероприятий по контролю параметров климатической системы становится оценка баланса углеродосодержащих веществ над различными территориями — разности между выбросом (эмиссией) вещества в атмосферу с поверхности и поглощением этого вещества поверхностью из атмосферы (сток) за некоторый промежуток времени.

В работе (Пашинов и др., 2023) обсуждены известные подходы к вычислению балансов газовых составляющих над территориями со свойственными им ограничениями и недостатками, а также предложена новая методика балансовых оценок, основанная исключительно на использовании данных спутникового дистанционного мониторинга химического состава атмосферы. Показано, что рассчитанный по этой методике выброс угарного газа (CO) от крупного лесного пожара находится в хорошем согласии с независимой модельной оценкой по данным глобальной базы выбросов газов при лесных пожарах GFED (*англ.* Global Fire Emissions Database) (<https://www.globalfiredata.org/>). Несмотря на установленное хорошее согласие оценок выбросов CO от лесных пожаров в этом и некоторых других частных случаях был оставлен открытым вопрос о среднем уровне погрешности, характерном для новой балансовой методики (БМ).

Представленная работа нацелена на получение ответа на этот вопрос. Предложен методический подход к анализу погрешностей БМ. Подход позволил теоретически описать зависимость погрешности вычисления баланса от размера территории анализа, а затем подтвердить теоретическую зависимость и установить её конкретные количественные характеристики на основе статистики расчёта баланса СО для 21 случая крупных лесных пожаров в России и Канаде 2018–2023 гг. Сравнение рассчитанной по БМ общей массы выброшенного СО с независимыми модельными оценками по GFED продемонстрировало, с учётом характерной для обеих методик относительной погрешности, хорошее соответствие результатов, близкое к полному совпадению. При этом оценка относительной погрешности по БМ оказалась лучше (примерно на уровне 30 %), чем по данным GFED (от 50 %).

В соответствии со сказанным выше работа структурирована следующим образом. В первом разделе дан теоретический анализ погрешностей, характерных для предложенной БМ в общем виде и в частном случае интенсивных локализованных лесных пожаров («эталонных свечей»). Далее описаны использованные для практических расчётов данные и методика их обработки. Представлены и обсуждены результаты исследования погрешности балансовых оценок для выбросов СО от 21 крупного лесного пожара в России и Канаде 2018–2023 гг. Анализ завершается сопоставлением полученных величин выбросов СО от этих пожаров с независимыми оценками по данным GFED. В заключении сформулированы основные выводы и перспективы дальнейшей работы по развитию БМ.

Теоретический анализ погрешностей БМ

В БМ полный вертикальный обмен газовой компонентой между атмосферой и подстилающей поверхностью, ограниченной контуром L , за некоторый отрезок времени $[t_s, t_e]$ рассчитывается по формуле (Ермаков и др., 2023):

$$B_L(t_s, t_e) = I_L(t_s) - I_L(t_e) + C_L(t_s, t_e), \quad (1)$$

где $I_L(t_s)$, $I_L(t_e)$ — общее содержание газовой компоненты (в кг) внутри контура L в начальный, t_s , и конечный, t_e , моменты времени соответственно; $C_L(t_s, t_e)$ — горизонтальный перенос газовой компоненты (в кг) внутрь контура L за отрезок времени $[t_s, t_e]$.

Таким образом, ошибка вычисления баланса $\Delta B_L(t_s, t_e)$ определяется ошибками $\Delta I_L(t_s)$, $\Delta I_L(t_e)$, $\Delta C_L(t_s, t_e)$. Считая последние независимыми случайными величинами, с учётом аддитивного вклада ошибок в выражении (1), получим:

$$\left. \begin{aligned} \Delta B_L(t_s, t_e) &= \Delta I_L(t_s) + \Delta I_L(t_e) + \Delta C_L(t_s, t_e), \\ \sqrt{D(\Delta B_L(t_s, t_e))} &= \sqrt{D(\Delta I_L(t_s)) + D(\Delta I_L(t_e)) + D(\Delta C_L(t_s, t_e))}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $D(\cdot)$ — дисперсия (случайной величины).

Поскольку содержание газовой компоненты как продукта расчёта по данным ДЗЗ строится на основе соответствующей стандартной методики, можно считать погрешность его определения в отдельном узле расчётной сетки известной и хорошо изученной. Пусть эффективная дисперсия ошибки определения содержания газовой компоненты в узле сетки составляет D_I . Например, согласно (Rowe et al., 2022) измерения прибора TROPOMI (англ. TROPOspheric Monitoring Instrument) гарантированно удовлетворяют целевым требованиям по относительной погрешности восстановления содержания СО менее 15 % (со случайной ошибкой не более 10 %) при характерном содержании СО от 0 до 0,005 м/кг². В работе (Borsdorff et al., 2018) получены лучшие оценки погрешности восстановления СО при сравнении с данными реанализа — до 3,2±5,5 %. Тогда

$$D(\Delta I_L(t_s)) = D(\Delta I_L(t_e)) = N_A D_I, \quad (3)$$

где N_A — число узлов расчётной сетки, относящихся к области A , охваченной границей L .

Выражение (3) даёт возможность грубо оценить снизу дисперсию ошибки расчёта баланса как $2N_A D_f$. Вопрос, таким образом, сводится к оценке дисперсии ошибки $\Delta C_L(t_s, t_e)$.

Прежде всего, по аналогии с выражением (3) будем считать, что дисперсия $\Delta C_L(t_s, t_e)$ подчиняется той же линейной зависимости от числа узлов N_L , участвующих в расчёте, т. е. в данном случае формирующих границу L :

$$D(\Delta C_L(t_s, t_e)) = N_L D_C, \quad (4)$$

где D_C — параметр, имеющий смысл «удельной» дисперсии ошибки расчёта горизонтального переноса вещества через элемент границы, проходящий через отдельный узел расчётной сетки. Будем предполагать, что D_C — константа, характеризующая качество алгоритма расчёта поля скорости горизонтального переноса для некоторых «стандартных» условий (достаточного покрытия данными измерений области интереса и её окрестности, стандартное качество исходных данных по содержанию газовой компоненты).

Кроме того, будем считать, что $D(\Delta C_L(t_s, t_e)) \gg 2N_A D_f$, так как в противном случае оценка погрешности вычисления баланса тривиальна и по порядку величины равна оценке снизу (3). Отметим, что на практике именно погрешность расчёта горизонтального переноса даёт основной вклад в общую погрешность БМ. В ошибки расчёта горизонтального переноса помимо упрощений модельного описания и артефактов решения кинематических уравнений на основе анализа оптического потока (Ермаков, 2021) входят и ошибки восстановления содержания газовой компоненты как напрямую (в узлах, формирующих границу L), так и косвенно — во всей области расчёта атмосферной динамики.

Выражения (2)–(4) являются отправной точкой в логике построения практической методики оценки погрешности БМ. Соотношение (4) предполагает возможность построения «калибровочной шкалы» путём либо установления параметра D_C , либо прямого вычисления зависимости $D(\Delta C_L(t_s, t_e))$ от N_L . Эта шкала будет связывать дисперсию погрешности составляющей баланса, определяемой горизонтальным переносом, с длиной границы N_L . В случае, когда эта погрешность много больше погрешности расчёта содержания газовой компоненты (3), из выражения (2) следует, что она полностью определяет дисперсию погрешности (и, следовательно, среднеквадратичную ошибку) восстановления баланса.

Далее в работе рассмотрен сценарий эталонной свечи — долговременного выброса CO от установившегося интенсивного горения локализованного лесного пожара, для которого ниже обоснованы и конкретизированы сделанные выше предположения.

1. Интенсивное горение.

Условие интенсивного горения означает, что выброс CO от пожара является определяющим в общем балансе CO (выброса и стока) для рассматриваемой территории, т. е. вклад в баланс CO участков территорий, не охваченных пожаром, считается пренебрежимо малым (нулевым) по сравнению с выбросом от пожара. Такое предположение становится оправданным для крупных лесных пожаров.

2. Локализованный пожар.

Это условие означает, что пожар находится на достаточном удалении от других интенсивных источников выброса (других пожаров). Тогда в сочетании с первым условием для любой границы L баланс CO внутри охваченной ей территории A (включающей локализованный пожар) определяется только выбросом от этого пожара. Достаточное удаление следует понимать как диапазон характерных размеров границы N_L , для которых это условие выполняется.

3. Установившееся горение.

При анализе баланса CO на большой территории может сложиться ситуация (например, на ранних стадиях развития пожара), когда продукты выброса ещё не успели достигнуть границы L и пересечь её. Это не нарушает справедливости балансового выражения (1), однако резко снижает вклад в общую погрешность (2) компоненты, связанной с горизонтальным переносом. Поэтому будем считать, что в рассмотрение включены только случаи «устойчивого» долговременного горения, в частности, когда сформировавшийся шлейф от пожара пересекает все выбранные для анализа границы L .

В условиях представленного сценария эталонной свечи справедливы следующие утверждения.

Истинное значение суточного баланса CO, B , для территории A с рассматриваемым пожаром не зависит от выбора границы L территории A , поскольку равно фактическому суточному выбросу CO от этого пожара. При расчёте баланса по БМ для набора из M разных границ L_i одинаковой длины (числа узлов) N_L , охватывающих изучаемый пожар, будет получен ряд оценок B_i истинного значения B . В рамках данной работы будем считать эти оценки несмещёнными, т. е.

$$\overline{B_i} \equiv \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M B_i \approx B. \quad (5)$$

Поскольку в принятом сценарии $B \gg 0$, то с учётом выражения (5) $B_L(t_s, t_e) \gg 0$ для любой границы L . Тогда можно рассмотреть следующее нормированное соотношение для ошибок, следующее из уравнений (2):

$$\frac{\Delta B_L(t_s, t_e)}{B_L(t_s, t_e)} = \frac{\Delta I_L(t_s) + \Delta I_L(t_e)}{B_L(t_s, t_e)} + \frac{\Delta C_L(t_s, t_e)}{B_L(t_s, t_e)}. \quad (6)$$

Для дисперсии выражения, стоящего в левой части, справедливо:

$$D \left(\frac{\Delta B_L(t_s, t_e)}{B_L(t_s, t_e)} \right) = D \left(\frac{\Delta B_L(t_s, t_e)}{B + \Delta B_L(t_s, t_e)} \right) = D \left(\frac{\Delta B_L(t_s, t_e)}{B} \right) \equiv \varepsilon_B^2, \quad (7)$$

где ε_B — относительная погрешность восстановления B . Второе равенство в цепочке (7) обусловлено тем, что случайная ошибка $\Delta B_L(t_s, t_e)$ имеет нулевую корреляцию с константой B и единичную корреляцию с самой собой (см., например, (Сажина, 2024)).

В случае несмещённой оценки (5) имеется возможность асимптотически оценить ε_B на суточных интервалах по выборке значений B_i , рассчитанных для большого числа разных границ L_i из одинакового числа узлов N_L , поскольку в этом случае $\Delta B_L(t_s, t_e) \approx B_i - \overline{B_i}$. При этом чем больше длина границы N_L , тем большим числом различных границ этой длины можно охватить один и тот же локализованный пожар. Указанное обстоятельство открывает непосредственную возможность получения «калибровочной кривой» асимптотической оценки ε_B от длины границы N_L накоплением статистики расчётов B_i для всевозможных положений границ варьруемой длины N_L , охватывающих интенсивные локализованные лесные пожары.

Для того чтобы теоретически охарактеризовать ожидаемый вид зависимости ε_B от длины границы N_L , оценим дисперсии слагаемых в правой части равенства (6). Для этого примем во внимание условие установившегося горения. Для качественной оценки будем считать, что количество вещества, выделяемого пожаром, накапливающегося внутри заданной границы и пересекающего её, — величины одного порядка:

$$B_L(t_s, t_e) \sim C_L(t_s, t_e) \sim I_L(t_s) \sim I_L(t_e). \quad (8)$$

Подчеркнём, что условие (8) не требуется на практике для построения калибровочной кривой зависимости оценки ε_B от N_L . Оно полезно лишь для качественного анализа формы этой кривой и в дальнейшем может быть уточнено. Выполнение условия (8) с учётом выражений (3) и (4) даёт:

$$\left. \begin{aligned} D \left(\frac{\Delta C_L(t_s, t_e)}{B_L(t_s, t_e)} \right) &\cong D \left(\frac{\Delta C_L(t_s, t_e)}{C_L(t_s, t_e)} \right) \sim \frac{1}{N_L}, \\ D \left(\frac{\Delta I_L(t_s) + \Delta I_L(t_e)}{B_L(t_s, t_e)} \right) &\cong D \left(\frac{\Delta I_L(t_s) + \Delta I_L(t_e)}{I_L(t_s)} \right) \sim \frac{1}{N_A} \sim \frac{1}{N_L^2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Как видно, с ростом N_L вклад ошибки восстановления общего содержания вещества внутри границы A в относительную погрешность ε_B вычисления баланса убывает гораздо быстрее, чем вклад ошибки расчёта горизонтального переноса. Таким образом, согласно

соотношениям (7)–(9) при больших N_L зависимость ε_B от N_L должна асимптотически стремиться к виду

$$\varepsilon_B \sim \frac{1}{\sqrt{N_L}}. \quad (10)$$

Использованные данные

Дистанционные данные по содержанию CO в атмосфере Земли

В работе использованы массивы глобальных суточных карт содержания CO в атмосфере Земли, формируемые в Центре коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Бриль и др., 2023). Доступные для анализа данные охватывают интервал с 2018 по 2023 г. Эти данные были обработаны для построения суточных полей содержания CO без пропусков и векторных полей горизонтального переноса CO на регулярной сетке $0,20 \times 0,25^\circ$ (по долготе и широте соответственно) по методикам, описанным в публикации (Пашинов и др., 2023) со ссылками на предшествующие работы. Это обеспечило возможность расчёта баланса CO через произвольные прямоугольные границы с помощью ранее разработанных программных средств (Втюрин, 2023). Шаг расчётной сетки обусловлен пространственным шагом исходной сетки измерений (около $0,050 \times 0,063^\circ$) и минимальным пространственным сглаживанием (усреднение в квадрате 4×4 пикселя), обеспечившим построение глобальных карт CO без пропусков после применения указанных выше методик (Пашинов и др., 2023).

Отбор данных по лесным пожарам

Был проанализирован массив информации по лесным пожарам, накопленной в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и относящейся к 2018–2023 гг. Для анализа выбирали случаи длительного (практически в течение всего тёплого сезона) интенсивного локализованного горения бореальных лесов. Всего был выявлен 21 случай крупных лесных пожаров (на территории России и Канады), удовлетворяющих сценарию эталонной свечи. Координаты условных центров горения и интервалы дат анализа приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Найденные случаи лесных пожаров по сценарию эталонной свечи

№ пожара	Координаты центра горения, град		Временной интервал анализа	
	с. ш.	в. д.	начало	окончание
1	62,45	100,25	14.06.2018	22.08.2018
2	65,40	121,55	16.06.2018	30.08.2018
3	51,00	–117,50	07.08.2018	28.08.2018
4	62,60	135,30	01.07.2019	27.08.2019
5	68,05	135,60	10.06.2019	20.08.2019
6	67,60	152,85	13.06.2019	28.06.2019
7	67,15	111,05	23.06.2020	30.08.2020
8	64,00	128,45	30.06.2020	30.08.2020
9	67,30	151,80	09.06.2020	06.08.2020
10	66,95	162,45	19.06.2020	29.07.2020
11	61,40	124,00	01.06.2021	31.08.2021
12	62,30	162,65	28.06.2021	22.07.2021
13	66,90	160,40	09.07.2021	10.08.2021

№ пожара	Координаты центра горения, град		Временной интервал анализа	
	с. ш.	в. д.	начало	окончание
14	52,00	–100,00	06.07.2021	31.08.2021
15	49,00	–120,00	08.07.2021	31.08.2021
16	63,10	63,55	29.07.2022	25.08.2022
17	58,25	134,10	27.06.2022	08.08.2022
18	61,00	–155,00	01.07.2022	20.07.2022
19	56,35	133,10	30.06.2023	29.08.2023
20	63,40	151,65	24.06.2023	18.08.2023
21	57,50	–115,00	01.06.2023	31.08.2023

Независимые модельные оценки по данным GFED

В качестве независимой модельной оценки в работе использовалась база данных GFED (van der Werf et al., 2017). Метод построения данных основан на подходе, впервые описанном в публикации (Seiler, Crutzen, 1980), согласно которому сгоревшая в результате пожара биомасса определяется по отношению:

$$M_b = AB\alpha\beta,$$

где M_b — сгоревшая биомасса, кг; A — площадь пожара, м²; B — плотность органического вещества в отдельных биомассах, кг/м²; α — доля сгоревшей биомассы, %; β — коэффициент полноты сгорания биомассы. Наиболее важным из входных наборов данных является информация о площади, пройденной огнём, определяющая пространственную и временную структуру выбросов. В качестве источника таких данных используется информационный продукт MCD64A1 (англ. MODIS Terra/Aqua Global Burned Area Product) (Giglio et al., 2013). Данные MCD64A1 ежедневно отображают площадь выгоревших участков с пространственным разрешением 500 м; затем они объединяются в сетку 0,25° (как ежемесячно, так и ежедневно) для создания продукта GFED. Далее данные дополняются структурой биогеохимического моделирования, основанной на модели CASA (англ. Carnegie – Ames – Stanford Approach) (Potter et al., 1993), которая обеспечивает оценки биомассы в различных углеродных «пулах», включая листья, травы, стебли, грубые древесные остатки и подстилку. Эти пулы сгорают по-разному во время пожара в зависимости от специфических для пула параметров и условий окружающей среды, которые влияют на влажность топлива и моделируемую глубину горения в органических почвах бореальных лесов и торфяников. Таким образом, на выходе GFED отображает представленные в пространственной координатной сетке 0,25° ежегодно обновляемые данные о сгоревшей биомассе в каждой ячейке с временным разрешением в сутки. Для преобразования сгоревшей биомассы в массу выбросов конкретных газов (CO) используется соотношение:

$$E_{CO} = \sum_t E_{C,m} \cdot DF \cdot A \cdot Coef,$$

где $E_{C,m}$ — выброс углерода из области пожара за месяц; DF (англ. Daily emission Fraction) — дневная доля выброса; Coef — коэффициент пересчёта полной эмитированной массы углерода (C) в массу CO при горении, Coef = 0,127 для бореальных лесов (Andreae, Merlet, 2001).

Анализ неопределённости получаемого результата был проведён в работе (Randerson et al., 2012) на основе уровня согласия между оценками площади выгоревших участков и более точными региональными оценками, а также между смоделированными оценками среднего потребления топлива по биому и оценками, измеренными в полевых условиях, и в региональных масштабах соответствует величине порядка 50 %.

Методика построения зависимости относительной погрешности балансовой методики от длины границы

Методика построения зависимости относительной погрешности БМ от длины границы, предложенная в настоящей работе, заключается в накоплении и анализе статистики расчёта баланса СО в условиях его эмиссии пожарами, перечисленными в предыдущих разделах. Ниже описан алгоритм получения этой статистики.

1. Берётся первый из списка подлежащих анализу случаев пожаров.
2. Выбирается начальная дата временного интервала анализа для данного пожара.
3. Устанавливается начальное значение периметра границы N_L в узлах расчётной сетки (180 узлов, сторона квадрата — 10 географических градусов).
4. Выбирается любая прямоугольная граница заданного периметра N_L (с равным числом узлов по сторонам), охватывающая пожар, но не включающая другие интенсивные источники/стоки СО; ей присваивается начальный номер $i = 1$.
5. По БМ рассчитывается баланс СО B_i внутри заданной границы (индекс i соответствует номеру границы).
6. Проверяется возможность выбора другой границы того же периметра, удовлетворяющей требованию п. 4; если такой выбор возможен, текущий номер i увеличивается на 1 и осуществляется возврат к выполнению п. 5; иначе происходит переход к п. 7.
7. По уравнению (5), где M соответствует последнему (максимальному) значению индекса i , рассчитывается выборочное среднее всех полученных B_i , а также выборочное среднеквадратичное отклонение $\sigma = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (B_i - \bar{B})^2}$; осуществляется оценка относительной погрешности БМ при заданной длине границы N_L : $\varepsilon_B = \sigma/B_i$.
8. Периметр границы N_L увеличивается (см. ниже); если он не превысил максимальный (352 узла), осуществляется переход к п. 4; иначе происходит переход к п. 9.
9. Выбирается следующая дата анализа; если она не выходит за установленный временной диапазон, осуществляется переход к п. 3; иначе происходит переход к п. 10.
10. Берётся следующий из списка подлежащих анализу случаев пожара; если таковой имеется, осуществляется переход к п. 2; иначе выполнение алгоритма завершается.

Дадим некоторые пояснения к п. 4, 6 и 8 выбора положений и размеров границы заданного периметра N_L (рис. 1, см. с. 150). Фиксированной длине стороны квадратной границы, например 10 географических градусов, соответствует $W = 50$ узлов по горизонтали и $H = 40$ узлов по вертикали на расчётной сетке с шагом $0,20 \times 0,25^\circ$ соответственно, $N_L = 2(W + H) = 180$. Для анализа конкретного пожара фиксировали узел расчётной сетки (x_0, y_0) , совпадающий с координатами центра горения (см. табл. 1). Положение границы фиксированной ширины W и высоты H узлов однозначно задаёт узел (x_s, y_s) , где расположен верхний левый угол границы. Так, для границы, центрированной относительно узла (x_0, y_0) , $x_s = x_0 - W/2$; $y_s = y_0 - H/2$. При расчёте баланса по совокупности границ одного периметра N_L рассматривали семейство, составленное из центрированной относительно пожара границы, а также границ, полученных параллельным переносом этой границы не более чем на пять узлов по любому направлению. Иными словами, анализировали границы шириной W и высотой H узлов, имевшие верхний угол в узлах $x'_s = x_s + i$; $y'_s = y_s + j$, где индексы i и j пробегали независимо целочисленные значения от -5 до $+5$. Всего таким образом получали набор из 121 границы фиксированного размера, по которому проводили расчёты баланса и далее ε_B . Для перехода к новому размеру границы N_L текущую высоту границы H увеличивали на один узел, а W — на один или два узла так, чтобы новая граница была максимально близка к квадратной в градусной мере, т. е. $0,25H \cong 0,20W$. Для новых значений W и H снова строили семейство из 121 границы, по которым проводили расчёт баланса и ε_B . Процедуру начинали от размера границы $10 \times 10^\circ$ и продолжали до достижения размера $20 \times 20^\circ$.

Выполнение описанного алгоритма обеспечивает построение зависимостей оценки ε_B от N_L для индивидуальных пожаров по каждому суткам горения. Такая статистика, как пока-

зывает изучение результатов, может оказаться недостаточно представительной. Поэтому далее осуществляется объединение статистик по отдельным пожарам и отдельным суткам горения, так что в итоге строится общая (усреднённая) зависимость оценки ε_B от N_L , а также среднеквадратичное отклонение (корень из дисперсии) этой оценки как функция от N_L по всему ансамблю зависимостей.

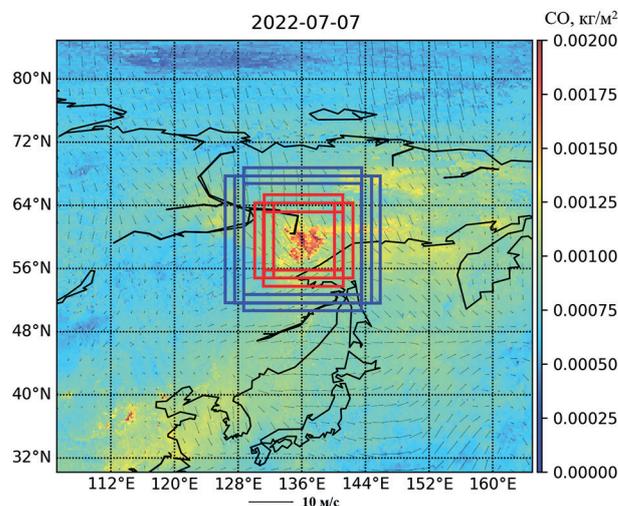


Рис. 1. Схематичная иллюстрация к алгоритму выбора границ вокруг источника СО: стрелки — векторы скорости адвекции водяного пара, масштаб указан внизу; цветные квадраты — некоторые варианты выбора границ, разные цвета отвечают разным размерам

Таблица 2. Соответствие периметра границы в узлах N_L с площадью охваченной территории S_{60}, S_{50}, S_{40} (в млн км²) при геометрических центрах границ на 60, 50, 40° с. ш.*

N_L	180	196	212	228	244	260	276	292	308	324	340	356
S_{60}	0,63	0,69	0,75	0,82	0,90	0,97	1,04	1,13	1,22	1,30	1,39	1,51
S_{50}	0,79	0,86	0,94	1,03	1,13	1,22	1,31	1,43	1,54	1,65	1,75	1,90
S_{40}	0,96	1,05	1,14	1,26	1,38	1,48	1,59	1,73	1,84	1,96	2,09	2,27

* Для сравнения: площадь Республики Саха (Якутии) — 3,08 млн км²; Архангельской области, включая Ненецкий автономный округ, — 0,59 млн км²; Московской области и Москвы — 0,047 млн км².

Для практических приложений полезно знать, как соотносится число узлов N_L квадратной границы, построенной на регулярной координатной сетке с шагом $0,20 \times 0,25$ географического градуса, с абсолютной площадью S охваченной этой границей территории (в млн км²). С этой целью приведём табл. 2 перехода от N_L к S для случаев расположения геометрического центра границы на 60, 50, 40° с. ш.: S_{60}, S_{50}, S_{40} (для учёта проективных искажений).

Обсуждение результатов

На рис. 2 (см. с. 151) приведены некоторые примеры «индивидуальных» зависимостей ε_B от N_L , построенных для отдельных пожаров по одним из суток горения. Рисунок показывает, что при общем сравнительно низком уровне ε_B встречаются значительные выбросы (до 100 %), а вид её зависимости от N_L часто далёк от теоретически ожидаемого. По всей видимости, это следствие нескольких обстоятельств, в том числе недостаточности суточной статистики по отдельному пожару для границ некоторых периметров, а также отклонения сценария горения от модели эталонной свечи.

При объединении статистики по всем пожарам и всем суткам горения итоговая средняя по ансамблю случаев зависимость ε_B от N_L имеет более гладкий вид, качественно соответствующий теоретическим ожиданиям (рис. 3а). Она плавно и нелинейно убывает с ростом N_L , причём её значение (синяя линия) не превосходит 30 %, начиная с $N_L = 220$ узлов (длина стороны около 14 географических градусов). При этом большинство индивидуальных зависимостей расположено достаточно близко к средней, что видно по сравнительно низкой дисперсии по ансамблю. На рис. 3а приведён коридор значений в одно среднее квадратичное отклонение (СКО) от средней зависимости ε_B от N_L (красная линия — среднее плюс СКО; жёлтая линия — среднее минус СКО). Таким образом, среднее значение ε_B для границы с периметром N_L можно считать априорной оценкой относительной погрешности вычисления выброса CO от сильного пожара при различных возможных сценариях горения. Сценарии, приближающиеся к случаю эталонной свечи, вероятно, обеспечивают меньшую погрешность вычисления баланса (до 10 %), в то время как более сложные сценарии увеличивают эту погрешность до 50 % и более в зависимости от размера границы и других факторов.

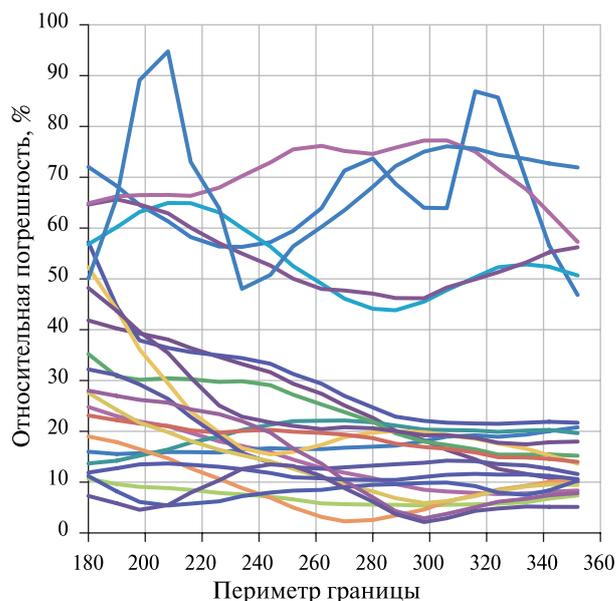


Рис. 2. Примеры зависимостей ε_B от N_L для отдельных пожаров и суток горения

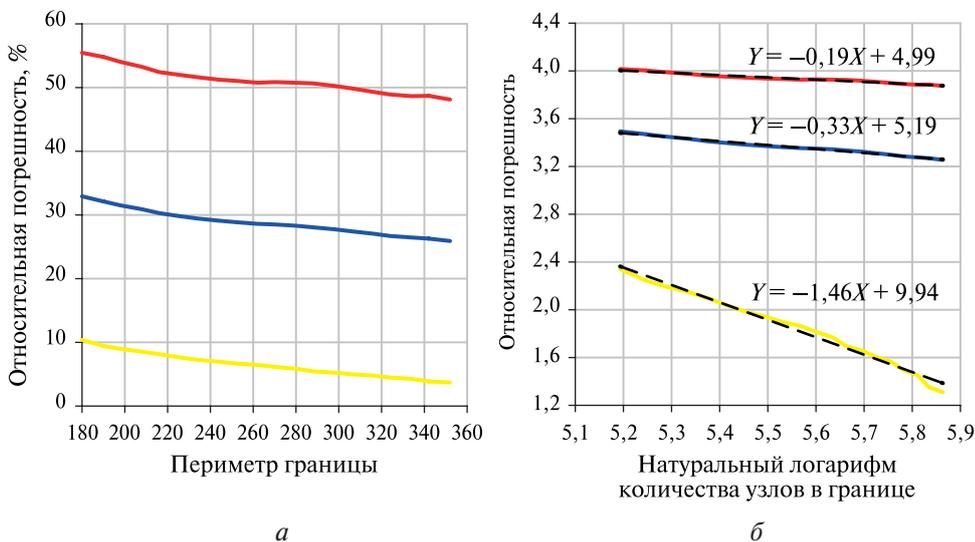


Рис. 3. Средняя по ансамблю случаев крупных пожаров зависимость ε_B от N_L (синий цвет) и коридор в одно среднее квадратичное отклонение по ансамблю (красный и жёлтый) в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабе

На рис. 3б построены графики тех же кривых, что и на рис. 3а, в логарифмическом масштабе. Это даёт возможность уточнить вид зависимости ε_B от N_L . Как видно, регрессионная прямая логарифмированной зависимости обладает наклоном $-0,33$, т.е. сама зависимость имеет следующий характер: $\varepsilon_B \sim 1/\sqrt[3]{N_L}$.

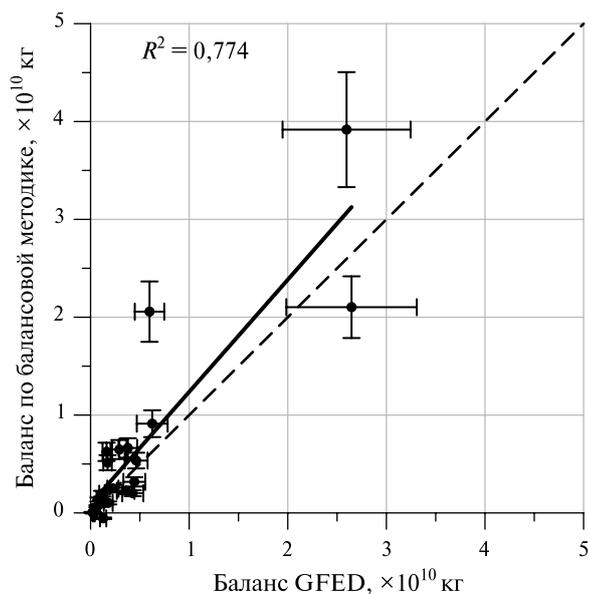


Рис. 4. Сопоставление интегральных выбросов CO от 21 крупного лесного пожара в России и Канаде за 2018–2023 гг. Каждой точке соответствует выброс от одного пожара. Отрезками обозначены диапазоны ошибок на уровне 1 СКО, посчитанные по заданным относительным погрешностям методик: 30 % для БМ и 50 % для GFED

Отличие от модельной зависимости (10), вероятно, обусловлено рядом факторов: отклонением сценария горения от идеального; дополнительными артефактами обработки, в том числе связанными с неоднородным качеством данных по атмосферному содержанию CO (модель не учитывает наличие пропусков и искажений в исходных данных, однако на практике в настоящее время обрабатывается весь поток входной информации без дополнительной фильтрации).

Следует отметить, что коридору в 1 СКО соответствуют наклоны регрессионных прямых от $-0,19$ (среднее плюс СКО) до $-1,46$ (среднее минус СКО). В этом смысле теоретическое значение $-0,5$ можно считать достаточно близким к $-0,33$ и удалённым от обеих границ коридора СКО. Авторы не проводили анализ статистической значимости отличия степенных показателей $-0,5$ и $-0,33$ в данном случае, так как теоретический вид зависимости получен при некоторых необязательных упрощающих предположениях, которые могут не оправдываться на практике. Более важным обстоятельством является тот факт, что, по сути, построена калибровочная кривая погрешности вычисления баланса CO (синий график на рис. 3) для случая сильных лесных пожаров. Она даёт оценку априорной погрешности около 30 % для используемых на практике размеров границ анализа.

С использованием этой оценки построен график сравнения интегральных выбросов CO от 21 крупного лесного пожара за 2018–2023 гг., вычисленных по БМ и полученных независимо по данным GFED (рис. 4). Для модельных оценок по GFED взята относительная погрешность 50 % (Randerson et al., 2012).

Как видно из рис. 4, оценки по БМ и GFED находятся в хорошем согласии друг с другом. Большинство оценок с учётом погрешностей ложится как на прямую 1:1, так и на регрессионную прямую, имеющую чуть больший наклон. Этот наклон обусловлен влиянием на статистику нескольких особенно крупных пожаров, для которых оценка погрешности в 30 % для БМ и/или 50 % для GFED может быть занижена в связи с действием дополнительных неучтённых факторов: неоднородного качества исходных спутниковых данных, неточностей подбора модельных параметров в GFED и др.

Заключение

Проведено исследование характерной погрешности предложенной ранее балансовой методики (БМ) при вычислении выбросов CO от крупных лесных пожаров. Показано, что при используемых на практике параметрах вычислений (размеров границ исследуемых территорий) относительная погрешность ожидается на уровне 30 %. Проведено сопоставление результатов расчёта выбросов от 21 крупного лесного пожара с независимыми модельными оценками базы данных GFED, показавшее их хорошее согласие. Развитый подход к анализу погрешностей БМ имеет перспективы обобщения на случай произвольных источников/стоков малых газовых составляющих атмосферы, поскольку теоретические зависимости содержат параметры, характеризующие эффективную точность восстановления переноса веще-

ства в отдельном узле расчётной сетки. Следует ожидать, что эта точность будет зависеть от выбора газовой компоненты (через точность алгоритмов восстановления её содержания по дистанционным данным, относительную площадь покрытия поверхности Земли суточными измерениями и другие факторы). Поэтому представляет интерес проведение дополнительных исследований погрешности для разных газовых компонент, в том числе водяного пара.

Важно, что и теоретический анализ, и практические расчёты показывают, что относительная погрешность вычисления баланса в БМ уменьшается с ростом размеров исследуемых территорий. Поэтому наиболее надёжные в среднем оценки баланса следует ожидать для крупных территорий (на уровне крупных субъектов РФ или целых стран), а также при накоплении на длительных интервалах времени. Полученные графики (см. *рис. 3*) определяют, фактически, шкалу погрешности в зависимости от размеров анализируемой территории. Соотносясь с этой шкалой и *табл. 2*, можно дать в первом приближении ответ на вопрос, каковы должны быть минимальные размеры охваченной анализом по БМ области для того, чтобы получить оценку выброса от находящегося в её пределах крупного источника с относительной погрешностью, не превышающей заданную. Ясно, что в общем случае увеличение размеров охваченной территории улучшает точность расчёта при условии, что в область анализа не начинают попадать другие крупные источники/стоки вещества.

С другой стороны, полученную калибровочную шкалу погрешностей можно использовать также для прогноза уменьшения ошибок вычисления балансов для заданной территории при повышении пространственного разрешения и точности определения содержания газовой компоненты в атмосфере по спутниковым данным (в том числе, в контексте формулировки требований к спутниковым приборам и методам дистанционного определения газового состава атмосферы). Важным аспектом является и повышение точности расчёта горизонтального переноса в БМ. Здесь авторы связывают основные перспективы с совершенствованием методов реконструкции глобальных полей газового содержания в местах пропуска данных и с уменьшением погрешностей восстановления векторов скорости горизонтального переноса при введении дополнительной физически обоснованной регуляризации.

Работа выполнена в рамках темы «Эмиссия» государственного задания Института космических исследований РАН (гос. регистрация № 122101700045-7). Исходные данные для анализа получены и частично обработаны с помощью инфраструктурных средств Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (развивается при поддержке темы «Мониторинг» государственного задания Института космических исследований РАН, гос. регистрация № 122042500031-8).

Литература

1. *Бриль 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. 9 октября 2023 г.
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. *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.
5. *Сажина О. С.* Основы математической обработки наблюдательных и экспериментальных данных для астрономов. М.: Изд. дом МГУ, 2024. 286 с.
6. *Andreae M. O., Merlet P.* Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. V. 15. Iss. 4. P. 955–966. <https://doi.org/10.1029/2000GB001382>.

7. Borsdorff T., Aan de Brugh J., Hu H. et al. Measuring carbon monoxide with TROPOMI: First results and a comparison with ECMWF-IFS analysis data // *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. No. 6. P. 2826–2832. <https://doi.org/10.1002/2018GL077045>.
8. Ermakov D. Satellite radiothermvision of atmospheric processes: Method and applications. Cham: Springer, 2021. 199 + XXVII p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.
9. Giglio L., Randerson J. T., van der Werf G. R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4) // *J. Geophysical Research: Biogeosciences*. 2013. V. 118. Iss. 1. P. 317–328. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20042>.
10. Potter C. S., Randerson J. T., Field C. B. et al. Terrestrial ecosystem production: A process model-based on global satellite and surface data // *Global Biogeochemical Cycles*. 1993. V. 7. Iss. 4. P. 811–841. <https://doi.org/10.1029/93GB02725>.
11. 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>.
12. Rowe J. P., Zarzana K. J., Kille N. et al. Carbon monoxide in optically thick wildfire smoke: Evaluating TROPOMI using CU airborne SOF column observations // *ACS Earth and Space Chemistry*. 2022. V. 6. Iss. 7. P. 1799–1812. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.2c00048>.
13. 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>.
14. 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>.

Accuracy of calculating carbon monoxide emissions from large forest fires using the balance technique based on satellite monitoring data

D. M. Ermakov^{1,2}, E. V. Pashinov¹, D. V. Lozin¹, E. A. Loupian¹, S. A. Vturin¹

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: d.m.ermakov@cosmos.ru

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

The accuracy of the previously proposed balance technique (BT) in calculating carbon monoxide emissions from large forest fires was studied. It was shown that with the calculation parameters used in practice (the sizes of the boundaries of the studied territories), the relative error is expected to be at the level of 30 %. The results of calculating emissions from 21 large forest fires were compared with independent model estimates based on the GFED (Global Fire Emissions Database) database. The comparison showed good agreement between the two types of calculations. The developed approach to analyzing BT accuracy has prospects for generalization to the case of arbitrary sources/sinks of minor gas components of the atmosphere. It should be expected that this accuracy will depend on the choice of the gas component, so it is of interest to conduct additional studies of the accuracy for different gas components, including water vapor. Both theoretical analysis and practical calculations show that the relative error in calculating balances in the BT decreases with the growth of the size of the territories under study. Therefore, the most reliable, on average, balance estimates should be expected for large territories (at the level of subjects of the Russian Federation or entire countries), as well as when accumulated over long time intervals.

Keywords: carbon monoxide emissions, large forest fires, balance technique, satellite monitoring, accuracy assessment

Accepted: 02.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-143-155

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 issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 85–95 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
2. Vturin S. A., *Viewflow: Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EHVM № 2023680977* (Viewflow: Certificate of state registration of computer program No. 2023680977). Reg. 9 October 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 radiothermovision, *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2023, No. 72, pp. 470–493 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
4. 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 issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 313–325 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-313-325.
5. Sazhina O. S., *Osnovy matematicheskoi obrabotki nablyudatel'nykh i eksperimental'nykh dannykh dlya astronomov* (Fundamentals of mathematical processing of observational and experimental data for astronomers), M.: Izd. MGU, 2024, 286 p. (in Russian).
6. Andreae M. O., Merlet P., Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, Vol. 15, Iss. 4, pp. 955–966, <https://doi.org/10.1029/2000GB001382>.
7. Borsdorff T., Aan de Brugh J., Hu H. et al., Measuring carbon monoxide with TROPOMI: First results and a comparison with ECMWF-IFS analysis data, *Geophysical Research Letters*, 2018, Vol. 45, No. 6, pp. 2826–2832, <https://doi.org/10.1002/2018GL077045>.
8. Ermakov D., *Satellite radiothermovision of atmospheric processes: Method and applications*, Cham: Springer, 2021, 199 + XXVII p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.
9. Giglio L., Randerson J. T., van der Werf G. R., Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4), *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, Vol. 118, Iss. 1, pp. 317–328, <https://doi.org/10.1002/jgrg.20042>.
10. Potter C. S., Randerson J. T., Field C. B. et al., Terrestrial ecosystem production: A process model-based on global satellite and surface data, *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, Vol. 7, pp. 811–841, <https://doi.org/10.1029/93GB02725>.
11. 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, Vol. 117, Iss. G4, Article G04012, <https://doi.org/10.1029/2012JG002128>.
12. Rowe J. P., Zarzana K. J., Kille N. et al., Carbon monoxide in optically thick wildfire smoke: Evaluating TROPOMI using CU airborne SOF column observations, *ACS Earth and Space Chemistry*, 2022, Vol. 6, Iss. 7, pp. 1799–1812, <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.2c00048>.
13. 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, Vol. 2(3), pp. 207–247, <https://doi.org/10.1007/BF00137988>.
14. van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L. et al., Global fire emissions estimates during 1997–2016, *Earth System Science Data*, 2017, Vol. 9, pp. 697–720, <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>.