

Погрешности расчёта баланса угарного газа в атмосфере над территориями крупных пустынь по данным спутникового мониторинга

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*

Предложен новый подход к оценке погрешности балансовой методики для вычисления вертикального потока вещества между атмосферой и подстилающей поверхностью. Продемонстрировано, что он может служить важным дополнением к ранее предложенному подходу «эталонных свечей», реализованному на примере анализа эмиссии угарного газа сильными лесными пожарами. В качестве калибровочных полигонов для отработки алгоритмов балансовой методики предложено рассмотреть крупные участки суши с близким к нулю вертикальным обменом исследуемой газовой составляющей. Показано, что в настоящее время оценки погрешности для случаев выбросов сильных пожаров и случаев территорий с нулевыми балансами согласуются между собой, при этом новый подход обеспечивает потенциал для дальнейшего совершенствования балансовой методики, так как не требует привлечения независимых модельных оценок, также имеющих значительные погрешности. Отмечено, что необходим тщательный анализ и отбор калибровочных полигонов, так как в отсутствие вертикального обмена возрастает роль факторов следующих порядков малости, в частности химических превращений, нарушающих условие балансовой методики о сохранении общей массы вещества.

Ключевые слова: угарный газ, вертикальные потоки, балансовая методика, погрешности

Одобрена к печати: 30.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-419-425

Введение

Для расчёта вертикального обмена газовыми составляющими между атмосферой и подстилающей поверхностью по данным спутникового мониторинга химического состава атмосферы предложена и развивается балансовая методика (Ермаков и др., 2023; Пашинов и др., 2023, 2024). Ключевым элементом методики является вычисление горизонтальных потоков вещества, которое возможно осуществить с помощью вариантов метода анализа оптического потока (Ермаков, 2021; Nerushev, Gramchaninova, 2011). Вопросы точности балансовой методики были исследованы в серии работ на основе подхода «эталонных свечей», в качестве которых выступали крупные лесные пожары (Ермаков и др., 2024). Идея подхода заключалась в том, что при наличии сильного локализованного источника выброса газовой компоненты (в рассмотренных случаях — угарного газа, CO) можно пренебречь вкладом в атмосферный баланс других процессов (химических превращений, стока и эмиссии с окружающих территорий). Это дало возможность построить статистическую процедуру оценки погрешности отдельных компонент балансового уравнения (Ермаков и др., 2023) и, в итоге, вертикальных потоков, проинтегрированных по территории исследования и интервалу наблюдений. Важное достоинство подхода заключается в том, что для расчёта погрешности не требуется априорное знание объёма выброса CO. Этим обеспечивается возможность совершенствования балансовой методики (улучшения точности расчёта отдельных компонент баланса) по критерию согласия итоговых значений накопленного выброса CO с независимыми модельными оценками (Ермаков и др., 2024). Однако неопределённость самих этих модельных оценок, согласно работам (Матвеев, Барталев, 2024; Randerson et al., 2012), такова, что дальнейшее статистически значимое улучшение балансовой методики становится практиче-

ски невозможным. В связи с этим актуален подбор других «эталонных» объектов исследования, позволяющих изучать вопросы точности балансовой методики.

В настоящей работе в качестве таковых рассмотрены участки суши в Африке и Австралии, занятые пустынями. Предполагается, что балансы CO над этими территориями близки к нулевым, поскольку, вследствие свойств подстилающей поверхности, на них не могут располагаться интенсивные источники и поглотители CO. Это даёт возможность для альтернативной оценки погрешности балансовой методики (по отношению к рассмотренному ранее методу «эталонных свечей»).

Территория исследований и исходные данные

В работе рассмотрены два района исследований. Первый район располагается в Северном полушарии на территории пустыни Сахара (Африка) между 20 и 30° с. ш. и 0 и 10° в. д. Второй район находится в Южном полушарии на внутриконтинентальной территории Австралии между 19 и 29° ю. ш. и 127 и 137° в. д., захватывая несколько крупных пустынь (Большую Песчаную, Гибсона, Большую Пустыню Виктория), *рис. 1*.

В качестве входной информации для анализа были использованы продукты восстановления содержания CO в атмосфере Земли по измерениям прибором TROPOMI (*англ.* TROPospheric Monitoring Instrument) из Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Бриль и др., 2023; Лупян и др., 2019). Эти ряды данных постоянно пополняются и проходят предварительную обработку в рамках усвоения в ЦКП «ИКИ-Мониторинг». В настоящей работе проанализированы ежесуточные поля содержания CO, охватывающие временной интервал с 01.05.2018 по 30.12.2023 (более пяти лет наблюдений).

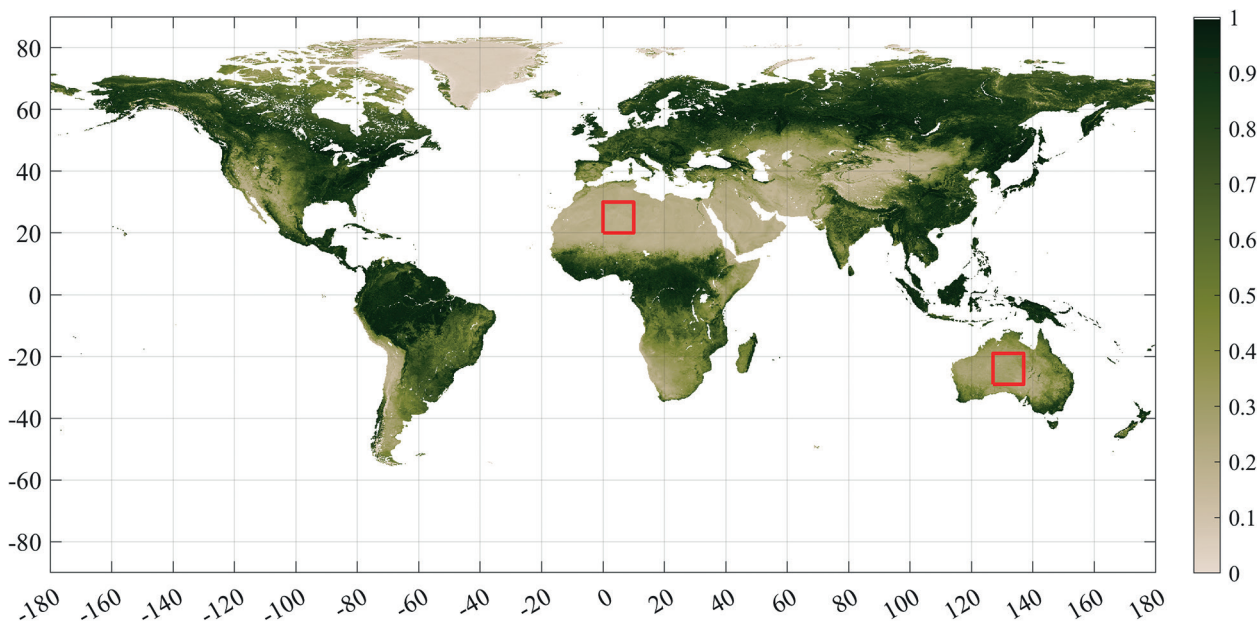


Рис. 1. Регионы исследования (красные квадраты); картографическая подложка — нормализованный разностный индекс растительности NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), шкала значений — справа

Методика анализа

Процедура расчёта ежесуточного баланса газовой компоненты атмосферы — массы вещества, характеризующей вертикальный обмен между атмосферой и заданной областью подстилающей поверхности (учитываемой со знаком «плюс» при эмиссии в атмосферу и со знаком

«минус» при поглощении поверхностью), — подробно рассмотрена в предыдущих публикациях (Ермаков и др., 2023, 2024; Пашинов и др., 2023, 2024). Суть этой процедуры в возможности на основе спутниковых данных вычислить над выделенной областью изменение полного содержания газовой компоненты за сутки и её составляющую, связанную с горизонтальным атмосферным переносом. Эта последняя величина в общем случае даёт основную погрешность в расчёт баланса.

В работе вычислены и проанализированы временные ряды суточного баланса СО в атмосфере над описанными в предыдущем разделе районами крупных пустынь за более чем пятилетний интервал. Поскольку в первом приближении вертикальный обмен СО между атмосферой и пустыней можно считать близким к нулю, полученные ряды следует интерпретировать как случайную величину, характеризующую типичные ошибки вычислений. Достоинством такого подхода можно считать возможность оценки абсолютных величин случайной и систематической погрешности. Но поскольку они, как показано ранее (Ермаков и др., 2024), зависят от параметров задачи и, в частности, от размеров области исследования, важно охарактеризовать их относительный масштаб. Поэтому в работе далее рассчитаны ряды ежесуточного отношения вычисленного баланса СО (в первом приближении — абсолютной ошибки) к среднесуточному общему содержанию СО в атмосфере над заданной территорией. Будем далее называть эти величины «относительными суточными балансами». Был проведён анализ их временных рядов и, в частности, рассчитаны их средние значения (систематическая ошибка) и среднеквадратичное отклонение (СКО, случайная ошибка).

Обсуждение результатов

На *рис. 2* (см. с. 422) приведены временные ряды относительного суточного баланса СО для районов 1 (в Африке) и 2 (в Австралии).

Расчёты показывают, что для района 1 (Африка) среднее значение относительного суточного баланса (систематическая ошибка) составило около 1 % (в абсолютном выражении $1,1 \cdot 10^7$ кг/сут). Среднеквадратичное отклонение оказалось равно 5 % (в абсолютном выражении $4,4 \cdot 10^7$ кг/сут). Тренд не наблюдается. Для района 2 (Австралия) среднее значение относительного суточного баланса (систематическая ошибка) составило около минус 12 % (в абсолютном выражении минус $8,6 \cdot 10^7$ кг/сут). Среднеквадратичное отклонение оказалось равно 10 % (в абсолютном выражении минус $7,7 \cdot 10^7$ кг/сут). Тренд не наблюдается. Для сравнения: характерный суточный выброс от крупного лесного пожара при интенсивном горении достигает порядка $1 \cdot 10^9$ кг СО. Оценка погрешности по балансовой методике для этих величин, опубликованная в работе (Ермаков и др., 2024) до внесения ряда улучшающих модификаций, составила около 30 % или порядка $3 \cdot 10^8$ кг/сут. Видно, что полученные двумя способами оценки погрешностей сопоставимы по порядку величины и несколько меньше для улучшенной версии балансовой методики, применённой в настоящей работе.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос отличия средних значений баланса от нуля. Стандартные статистические тесты показывают, что эти отличия значимы в обоих случаях, но, очевидно, более выражены для Австралии. Следует отметить, что пустыни Австралии имеют существенные отличия от африканской пустыни Сахара. Первые — менее однородны и, в частности, не полностью лишены растительности, о чём свидетельствуют различия во временном ходе нормализованного разностного индекса растительности NDVI для двух районов, *рис. 3* (см. с. 422). Содержание водяного пара и капельной влаги в атмосфере над районом 2 стабильно выше, чем над районом 1, что подтверждается данными радиотеплового спутникового мониторинга и результатами реанализа (в работе не приведены).

Как указано в публикациях (Khalil, Rasmussen, 1990; McCabe et al., 2001), одним из основных механизмов вывода СО из атмосферы являются его химические превращения при участии гидроксильных радикалов (ОН), образующихся, в частности, на поверхности водяных капель при реакции с атомарным кислородом (продуктом фотолиза озона), в результате фотолиза перекиси водорода в водной среде и других процессов.

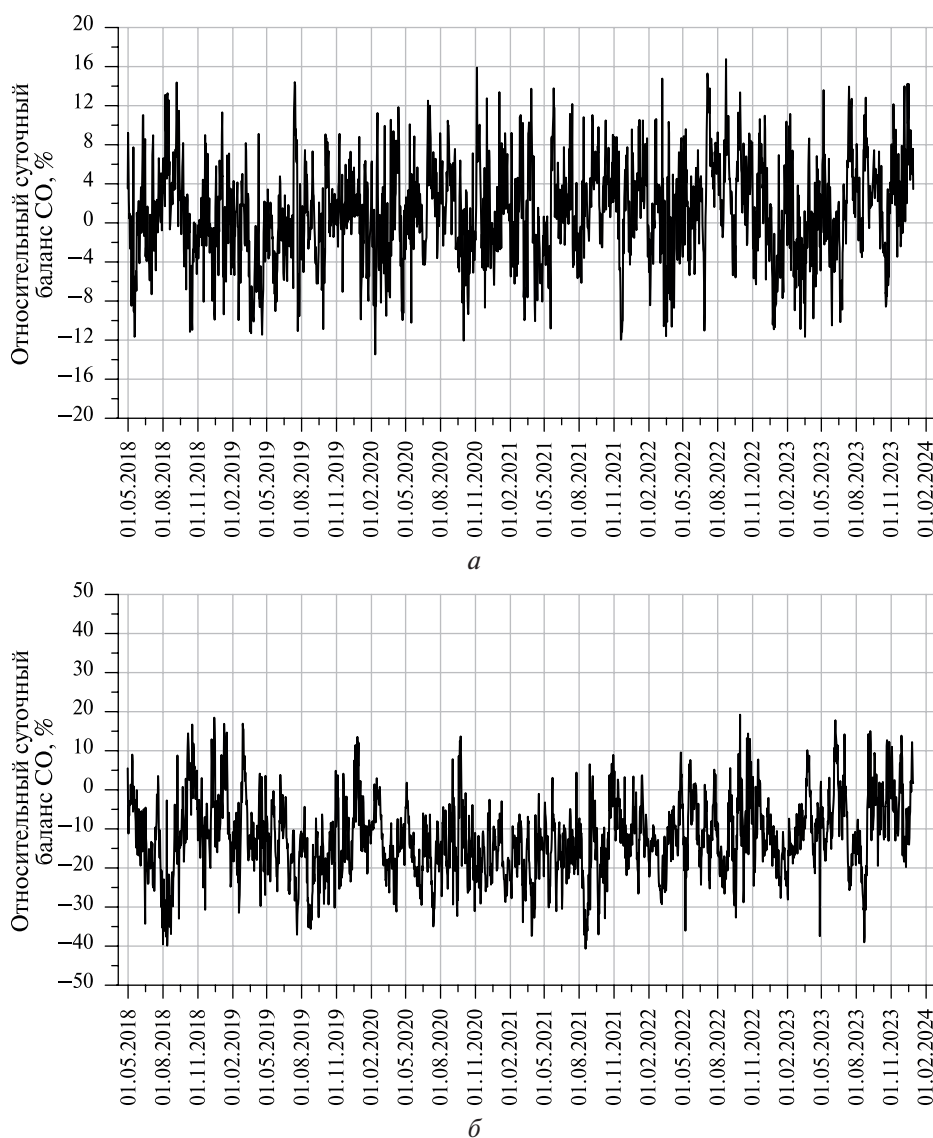


Рис. 2. Временной ход относительного суточного баланса CO: а — район 1; б — район 2

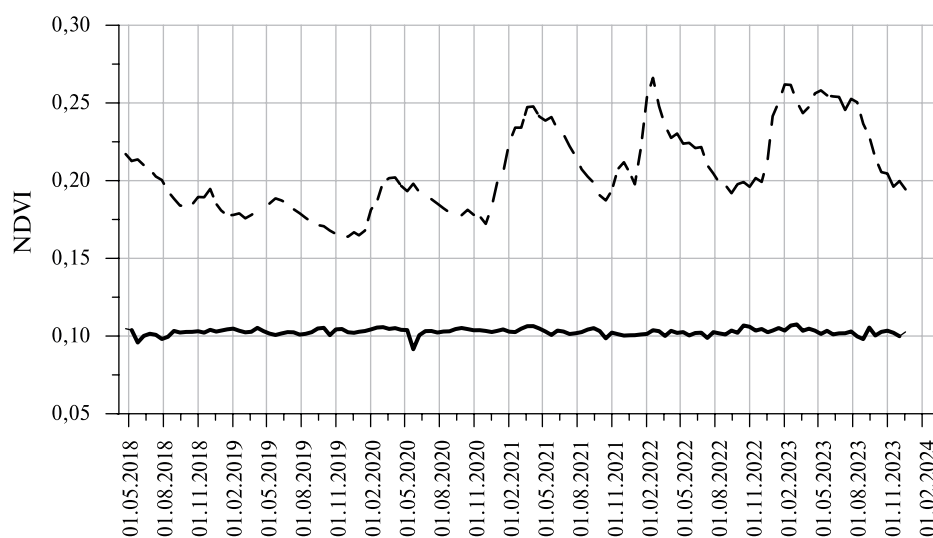


Рис. 3. Временной ход NDVI по шестнадцатидневным безоблачным композитам MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) над районом 1 (Африка) (сплошная линия) и районом 2 (Австралия) (штриховая)

Авторы предполагают, что при накоплении длительной статистики наблюдений отрицательные балансы, связанные с химическим выводом СО из атмосферы, должны быть заметны над крупными районами в отсутствие сильных выбросов. В дальнейшем это предположение планируется проверить расчётом баланса СО над акваториями Мирового океана. Тем не менее часть систематической погрешности (в том числе над Африкой) остаётся необъяснённой и может являться артефактом методики, что требует более детального изучения.

Заключение

В работе предложен новый подход к оценке погрешности балансовой методики для вычисления вертикального потока вещества между атмосферой и подстилающей поверхностью. Этот подход может служить важным дополнением к ранее предложенному подходу «эталонных свечей», реализованному на примере анализа эмиссий угарного газа сильными лесными пожарами. В новом подходе в качестве калибровочных полигонов для методики предложено рассмотреть крупные участки суши, где следует ожидать близкого к нулю вертикального обмена исследуемой газовой составляющей. Показано, что в настоящее время оценки погрешности балансовой методики в двух подходах согласуются между собой, при этом новый подход обеспечивает потенциал для её дальнейшего совершенствования, так как не требует привлечения независимых модельных оценок, также имеющих значительные погрешности. Однако необходим тщательный анализ и отбор калибровочных полигонов, поскольку в отсутствие вертикального обмена возрастает роль факторов следующих порядков малости, в частности химических превращений, нарушающих условие балансовой методики о сохранении общей массы вещества.

Работа выполнена в рамках темы «Эмиссия» государственного задания ИКИ РАН (гос. регистрация № 12511112878-8). В работе использованы данные и средства инфраструктурного обеспечения Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geos-mis.ru/>).

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. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. 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.
8. Ermakov D. Satellite radiothermvision of atmospheric processes: Method and applications. Cham: Springer, 2021. 199 p. DOI: 10.1007/978-3-030-57085-9.
9. Khalil M.A.K., Rasmussen R.A. The global cycle of carbon monoxide: Trends and mass balance // Chemosphere. 1990. V. 20. Iss. 1–2. P. 227–242. DOI: 10.1016/0045-6535(90)90098-E.
10. McCabe D. C., Gierczak T., Talukdar R. K., Ravishankara A. R. Kinetics of the reaction OH + CO under atmospheric conditions // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28. No. 16. P. 3135–3138. DOI: 10.1029/2000GL012719.
11. 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.
12. 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. DOI: 10.1029/2012JG002128.

Uncertainties in calculating carbon monoxide balance in the atmosphere over large desert areas based on satellite monitoring 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

A new approach to estimating uncertainties in the balance method for calculating vertical fluxes of matter between the atmosphere and the underlying surface is proposed. It is demonstrated to be an important complement to the previously proposed “reference candle” approach implemented using the example of analyzing carbon monoxide emissions from severe forest fires. Large land areas with near-zero vertical exchange of the studied gas component are proposed as calibration sites for testing the balance method algorithms. It is shown that the error estimates for cases of emissions from severe fires and areas with zero balances are currently consistent. Moreover, the new approach offers potential for further improvement of the balance method, as it does not require the use of independent model estimates, which also have significant uncertainties. It is noted that careful analysis and selection of calibration sites is necessary, since the absence of vertical exchange increases the role of factors of subsequent orders of smallness, in particular, chemical transformations that violate the balance method’s condition of conserving the total mass of matter.

Keywords: carbon monoxide, vertical fluxes, balance method, uncertainties

Accepted: 30.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-419-425

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. 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, *J. Hydrometeorology and Ecology*, 2023, No. 72, pp. 470–492 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
3. Ermakov D. M., Pashinov E. V., Lozin D. V., 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.
4. 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.
5. Matveev A. M., 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.
6. Pashinov E. V., Vturin S. A., Ermakov D. M., Sadovsky 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.
7. 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.
8. Ermakov D., *Satellite radiothermovision of atmospheric processes: Method and applications*, Cham: Springer, 2021, 199 p., DOI: 10.1007/978-3-030-57085-9.
9. Khalil M. A. K., Rasmussen R. A., The global cycle of carbon monoxide: Trends and mass balance, *Chemosphere*, 1990, V. 20, Iss. 1–2, pp. 227–242, DOI: 10.1016/0045-6535(90)90098-E.
10. McCabe D. C., Gierczak T., Talukdar R. K., Ravishankara A. R., Kinetics of the reaction OH + CO under atmospheric conditions, *Geophysical Research Letters*, 2001, V. 28, No. 16, pp. 3135–3138, DOI: 10.1029/2000GL012719.
11. 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.
12. 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, DOI: 10.1029/2012JG002128.