

Первые результаты расчёта баланса парниковых газов для регионов РФ по балансовой методике

Е. В. Пашинов, Д. В. Лозин, С. А. Втюрин, Д. А. Кобец

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

Произведён расчёт баланса угарного газа (CO) для 89 регионов Российской Федерации с использованием балансовой методики, замкнутой относительно данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В качестве исходных данных использовались продукты обработки спутниковых измерений TROPOMI (*англ.* TROPOspheric Monitoring Instrument), которые содержат информацию о концентрации CO за период с 2018 по 2023 г. Выполненные расчёты позволили оценить выбросы угарного газа в различных регионах страны и выявить тенденции их изменения. Полученные результаты были размещены на сайте Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Ключевые слова: выбросы угарного газа, регионы РФ, балансовая методика, спутниковый мониторинг, центр коллективного пользования

Одобрена к печати: 12.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-398-403

Введение

Проблема изменения климата и загрязнения атмосферы — одна из наиболее острых и актуальных на глобальном уровне в наши дни. Увеличение концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере, вызванное антропогенной деятельностью, привело к значительным экологическим и экономическим последствиям. В свете международных обязательств, таких как Парижское соглашение, страны мира, включая Россию, стремятся активно сократить выбросы парниковых газов и достичь целей устойчивого развития (Ситников, 2022). Многие углеродсодержащие газы являются климатически активными, включаясь в процессы, которые играют ключевую роль в парниковом эффекте, что делает их мониторинг и контроль важнейшей задачей для организаций всех уровней.

Россия, как одна из крупнейших стран мира, отличается разнообразием экосистем и климатических условий своих территорий. Уровень выбросов углеродсодержащих газов варьируется не только между регионами, но и внутри них, и определяется множеством факторов естественного и антропогенного характера. Эти выбросы оказывают влияние не только на климат, но и на здоровье населения, а также состояние экосистем, что делает вопрос контроля и сокращения выбросов углеродсодержащих газов крайне актуальным (Краснова, 2022).

На фоне глобальных проблем изменения климата в России наблюдается рост интереса к разработке эффективной системы контроля над выбросами углеродсодержащих газов. Такой контроль предполагает не только мониторинг текущего уровня загрязнения, но и создание систем оценки рисков, прогнозирования выбросов и разработки стратегий их снижения. В разных регионах Российской Федерации внедряются различные инициативы и программы, направленные на улучшение состояния окружающей среды, сокращение углеродного следа и переход к более чистым технологиям (План..., 2022; Стратегия..., 2021).

Существенный вклад в решение задачи оценки выбросов углеродсодержащих газов может дать ДЗЗ из космоса. Данное краткое сообщение посвящено описанию первых результатов применения оригинальной методики расчёта баланса парниковых газов (Пашинов и др., 2023) для всех регионов РФ.

Методика и результаты расчётов

Применённая в работе методика основана на решении уравнения баланса газа в замкнутом объёме атмосферы:

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

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

Для наиболее точного решения (1) необходимо выполнение ряда требований относительно спутниковых данных ДЗЗ: они должны содержать информацию об интегральном содержании газа в атмосферном столбе (в $\text{кг}/\text{м}^2$), обеспечивать наиболее полное покрытие исследуемой области (в данном случае — Российской Федерации) и иметь высокое разрешение по времени. Более подробно эта проблематика рассмотрена в исследовании (Садовский и др., 2023). В настоящий момент этим требованиям соответствуют измерения угарного газа (CO), поступающие с прибора TROPOMI (англ. TROPospheric Monitoring Instrument). Несмотря на то, что угарный газ не входит в список парниковых газов антропогенного происхождения, выбросы которых подвергаются контролю, угарный газ содержит в себе углерод, и во многих процессах активного выделения его выброс линейно связан с выбросом углекислого газа и метана (Andreae, Merlet, 2001).

Оригинальная методика (Пашинов и др., 2023) была доработана для выполнения расчётов по контурам произвольной формы. Из открытого источника Open Street Map (Curran et al., 2012) были взяты координаты точек границ 89 регионов РФ и нанесены на регулярную сетку. Такая граница далее рассматривается как контур, по которому нужно рассчитать интеграл горизонтального потока газа (1). Для этого выбирается направление обхода контура (против часовой стрелки) и для каждого элемента контура на регулярной сетке задаётся вектор, показывающий направление внутрь контура (пример положения для одной из таких точек показан красным цветом) (рис. 1). Далее расчёт баланса по выражению (1) не представляет трудностей, поскольку все его элементы представлены на общей координатной сетке.

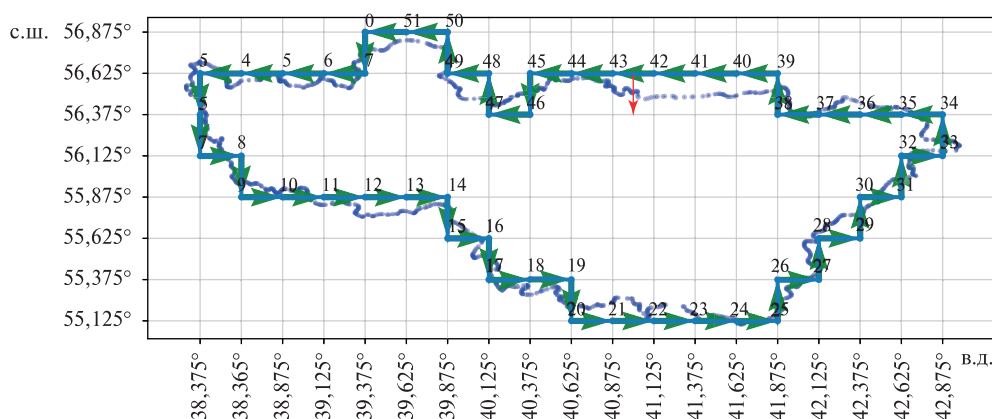


Рис. 1. Границы региона (синие точки) и подготовленный контур расчёта баланса (зелёные векторы) на примере Владимирской области

Подобным образом были обработаны данные TROPOMI за период с 2018 по 2023 г. и получен ежесуточный баланс угарного газа для 89 регионов РФ. Случайная погрешность

оценки получаемых выбросов CO оценивалась путём анализа баланса для крупных лесных пожаров. Вычисляя баланс для множества (для накопления статистики) смещённых относительно центра пожара прямоугольных областей разного периметра, можно построить «калибровочную кривую» асимптотической оценки относительной погрешности решения данной задачи. Такая процедура, выполненная на статистических данных о 21 крупном лесном пожаре за 2018–2023 гг., показала, что относительная погрешность методики составляет менее 30 %.

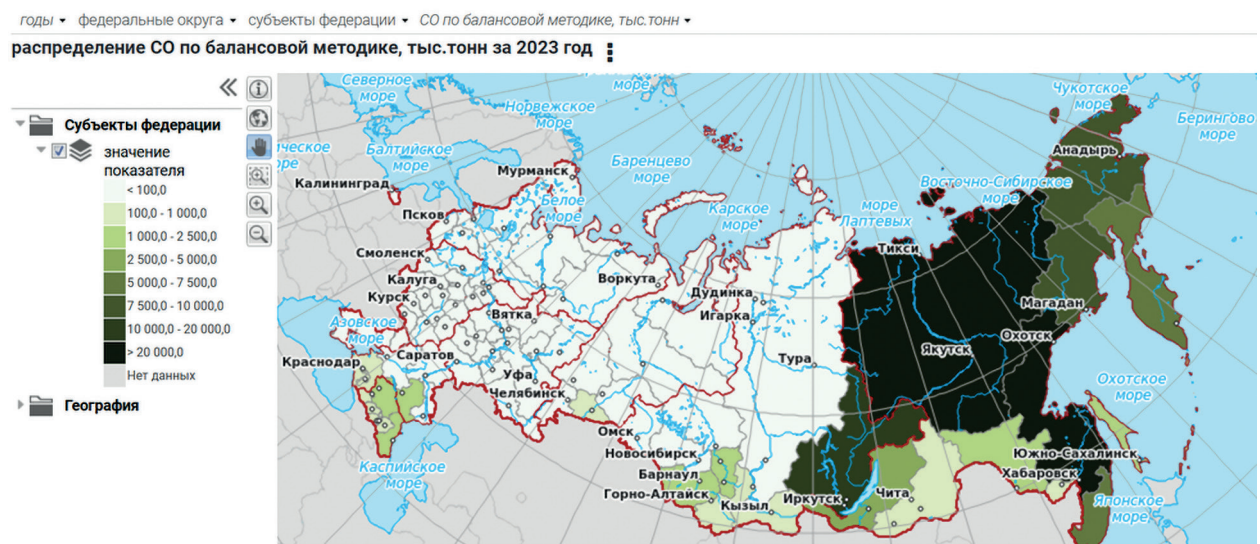


Рис. 2. Суммарные показатели выбросов CO для разных субъектов РФ за 2023 г.

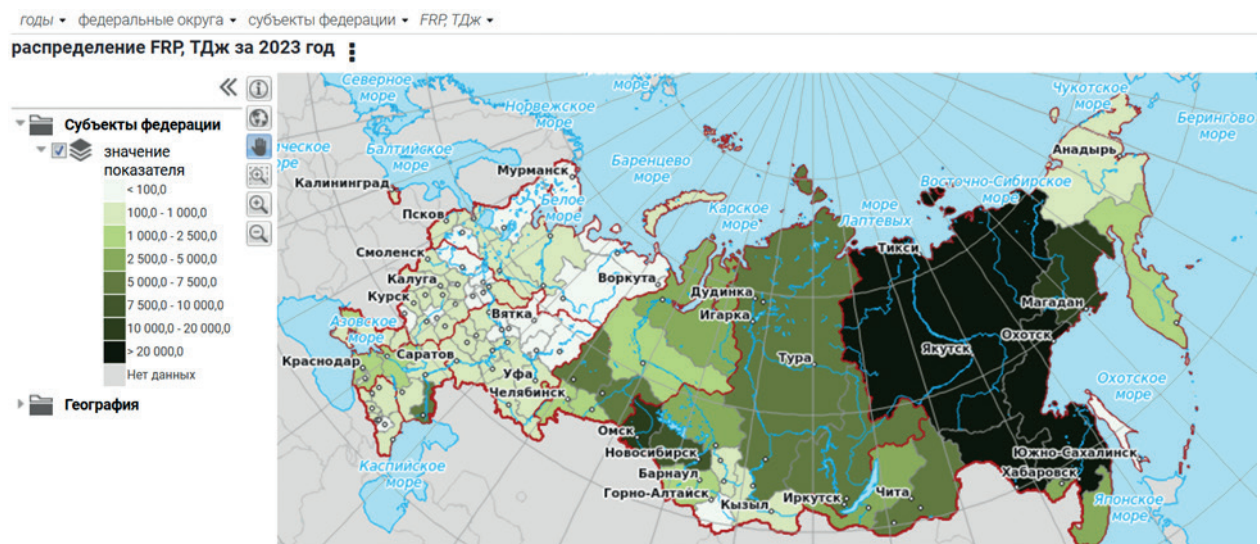


Рис. 3. Суммарные показатели FRP для разных субъектов РФ за 2023 г.

Сформированный ряд данных был включён в базу данных Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>) (Лупян и др., 2019). Также для их просмотра и анализа разработан ряд инструментов, которые доступны для специалистов, ведущих разработку в области дистанционных измерений концентрации и потоков малых газовых составляющих и участвующих в их отладке, по ссылке http://193.232.9.65:8080/biportal/contourbi.jsp?solution=carbon&allsol=1&project=%2Fcarbon%2FBI_analytics. Инструменты ЦКП позволяют визуализировать данные в виде таблиц, графиков и карты выбросов CO

по регионам (рис. 2, см. с. 400). Для сравнения на рис. 3 (см. с. 400) приведена аналогичная карта, но не для выбросов CO, а для суммарной за 2023 г. радиационной мощности лесных пожаров FRP (англ. Fire Radiative Power). Видно, что для Республики Саха, Магаданской области, Хабаровского края и Республики Бурятия, где происходили наиболее мощные лесные пожары, балансовые оценки коррелируют с FRP, что свидетельствует об адекватности этих оценок.

Заключение

Результаты представленной работы, в совокупности с работами (Ермаков и др., 2023; Пашинов и др., 2023) и рядом других, очерчивают важный этап разработки балансовой методики расчёта потоков и выбросов различных газовых компонент атмосферы по данным спутникового мониторинга: теоретическое обоснование и программно-алгоритмическую реализацию балансовой методики, анализ погрешностей расчёта по ней и, наконец, апробацию первых подходов к её внедрению в инфраструктуру ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с возможностью дальнейшего обеспечения доступа к результатам расчётов широкого научного сообщества. В настоящее время выполняется всестороннее тестирование и анализ предварительных результатов расчётов баланса по регионам, в том числе путём сопоставления с разными видами независимой информации. В перспективе планируется обобщение методики и расширение номенклатуры продуктов, в частности с возможностью выполнения расчётов для произвольных, интерактивно или автоматически задаваемых территорий, интервалов времени и различных газовых компонент атмосферы.

Работа выполнена в рамках темы «Эмиссия» государственного задания ИКИ РАН (гос. регистрация № 122101700045-7). Инфраструктурные средства ЦКП «ИКИ-Мониторинг» развиваются при поддержке темы «Мониторинг» государственного задания ИКИ РАН, гос. регистрация № 122042500031-8.

Литература

1. Ермаков Д. М., Пашинов Е. В., Кузьмин А. В. и др. Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 470–492. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
2. Краснова И. О. Экономические меры ограничения выбросов парниковых газов: сравнительно-правовой контекст // Вестн. ун-та О. Е. Кутафина. 2022. № 5. С. 104–113.
3. Лулян 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.
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. План адаптации к изменениям климата в сфере топливно-энергетического комплекса РФ, утвержденный приказом Министерства энергетики России № 280 от 31.03.2022. М., 2022. 17 с.
6. Садовский И. Н., Пашинов Е. В., Сазонов Д. С. Анализ возможности расчёта элементов баланса атмосферных парниковых газов по современным данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 117–128. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-117-128.
7. Ситников С. Л. Углеродное регулирование в России: истоки и особенности // Вестн. евразийской науки. 2022. Т. 14. № 6. С. 1–19.
8. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, утверждённая распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р. М., 2021. 36 с.

9. *Andreae M. O., Merlet P.* Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. V. 15. P. 955–966. DOI: 10.1029/2000GB001382.
10. *Curran K., Fisher G., Crumlish J.* Open Street Map // *Intern. J. Interactive Communication Systems and Technologies*. 2012. V. 2. P. 69–78. DOI: 10.4018/ijicst.2012010105.

First results of greenhouse gas balance calculation for the regions of Russia based on the balance technique

E. V. Pashinov, D. V. Lozin, S. A. Vturin, D. A. Kobets

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

The carbon monoxide (CO) balance has been calculated for 89 regions of the Russian Federation using a balance method that is closed relative to Earth remote sensing data. The initial data were the products of TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) satellite measurement processing which contain information on CO concentration for the period from 2018 to 2023. The calculations made it possible to estimate CO emissions in various regions of the country and identify trends in their change. The results were included in the database of IKI-Monitoring Collective Use Center.

Keywords: carbon monoxide emissions, regions of Russia, balance methodology, satellite monitoring, center for collective use

Accepted: 12.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-398-403

References

1. Ermakov D. M., Pashinov E. V., Kuzmin A. V. et al., Concept of calculating elements of regional hydrological balance using satellite radiothermography, *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2023, No. 72, pp. 470–492 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
2. Krasnova I. O. Economic measures to limit greenhouse gas emissions: comparative legal context, *Vestnik universiteta O. E. Kutafina*, 2022, No. 5, pp. 104–113 (in Russian).
3. 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, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
4. Pashinov E. V., Vtyurin 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, Vol. 20, No. 6, pp. 313–325 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-313-325.
5. *Plan adaptatsii k izmeneniyam klimata v sfere toplivno-ehnergeticheskogo kompleksa RF, utverzhdenyi prikazom Ministerstva ehnergetiki Rossii No. 280 ot 31.03.2022* (Ministry of Energy of the Russian Federation. Climate change adaptation plan in the fuel and energy sector of the Russian Federation, approved by Order No. 280 dated March 31, 2022), Moscow, 2022, 17 p. (in Russian).
6. Sadovsky I. N., Pashinov E. V., Sazonov D. S., Analysis of the possibility to calculate atmospheric greenhouse gas balance elements using modern satellite remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 117–128 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-117-128.
7. Sitnikov S. L., Carbon regulation in Russia: origins and features, *Vestnik evraziyskoy nauki*, 2022, Vol. 14, No. 6, pp. 1–19 (in Russian).
8. *Strategiya sotsial'no-ehkonomicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyykh gazov do 2050 goda, utverzhennaya rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 29.10.2021 No. 3052-r* (Government of the Russian Federation. Strategy for socio-economic development of the Russian Federation with low

- greenhouse gas emissions until 2050, approved by Government Order No. 3052-r dated October 29, 2021), Moscow, 2021, 36 p. (in Russian).
9. Andreae M.O., Merlet P., Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, Vol. 15, pp. 955–966, DOI: 10.1029/2000GB001382.
 10. Curran K., Fisher G., Crumlish J., Open Street Map, *Intern. J. Interactive Communication Systems and Technologies*, 2012, Vol. 2, pp. 69–78, DOI: 10.4018/ijicst.2012010105.