

Перспективы использования баз спутниковых данных эмиссии парниковых газов при мониторинге объектов добывающей промышленности

В.В. Антошин¹, А.И. Маневич^{2,3}✉, А.А. Гаврилова³, А.А. Камаев^{2,3}

¹ ООО НГК «Горный», г. Москва, Российская Федерация

² Геофизический центр РАН, г. Москва, Российская Федерация

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

✉ ai.manevich@yandex.ru

Резюме: Выбросы парниковых газов, в частности метана и углекислого газа, горноперерабатывающими и энергетическими предприятиями могут существенно влиять на загрязнение атмосферы приземного слоя, аэрозолей и атмосферный парниковый эффект. Непрерывный мониторинг эмиссий является основой для разработки эффективных стратегий сокращения выбросов парниковых газов. Для этой цели активно используются спутниковые миссии. В статье представлены обзор и описание существующих баз данных выбросов парниковых газов, полученных на основе спутниковых измерений. Методология мониторинга заключается в спутниковой спектроскопии, нацеленной на анализ спектральных характеристик света, поглощаемого атмосферой. Результаты измерений спутниковых спектрометров показывают общую молярную массу вещества по высоте атмосферного столба. Глобальный спутниковый мониторинг позволяет выявлять зоны аномальной концентрации и идентифицировать новые источники парниковых газов, сопоставлять их с наземными измерениями загрязняющих веществ.

Ключевые слова: парниковые газы, метан, оксид углерода, спутниковый мониторинг

Для цитирования: Антошин В.В., Маневич А.И., Гаврилова А.А., Камаев А.А. Перспективы использования баз спутниковых данных эмиссии парниковых газов при мониторинге объектов добывающей промышленности. *Горная промышленность*. 2024;(3):118–121. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-118-121>

Perspectives of using satellite databases of greenhouse gas emissions in monitoring of mining facilities

V.V. Antoshin¹, A.I. Manevich^{2,3}✉, A.A. Gavrilova³, A.A. Kamaev^{2,3}

¹ NGK Gorny LLC, Moscow, Russian Federation

² Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³ National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

✉ ai.manevich@yandex.ru

Abstract: Emissions of the greenhouse gases, particularly methane and carbon dioxide, by the mining, processing, and energy industries can significantly affect pollution in the bottom layer of the atmosphere, aerosols, and the atmospheric greenhouse effect. Continuous monitoring of emissions is the basis for developing effective strategies to reduce greenhouse gas emissions. Satellite missions are actively used for this purpose. The article provides an overview and description of the existing databases of greenhouse gas emissions obtained based on satellite measurements. The monitoring methodology involves satellite spectroscopy aimed at analyzing the spectral characteristics of light absorbed by the atmosphere. The results of measurements by satellite spectrometers show the total molar mass of substances throughout the atmospheric column. Global satellite monitoring allows identifying zones of anomalous concentration and identifying new sources of greenhouse gases, comparing them with the ground-based measurements of pollutants.

Keywords: greenhouse gases, methane, carbon monoxide, satellite monitoring

For citation: Antoshin V.V., Manevich A.I., Gavrilova A.A., Kamaev A.A. Perspectives of using satellite databases of greenhouse gas emissions in monitoring of mining facilities. *Russian Mining Industry*. 2024;(3):118–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-118-121>

Введение

Метан CH₄ и углекислый газ CO₂ являются одними из основных парниковых газов [1, 2]. В глобальном охвате поверхности Земли существует множество как природных, так и антропогенных источников парниковых газов.

Причем по последним оценкам глобального мониторинга атмосферы вклад горноперерабатывающего и энергетического секторов может составлять до 30% всех выбросов метана [3] (рис. 1). Практический интерес к глобальному мониторингу парниковых газов и в частности выбросов ме-

тана обоснован его свойствами – он более эффективно поглощает тепловое излучение, чем углекислый газ (разница составляет около 30 раз) [4]. Поэтому именно сокращение выбросов метана может сравнительно быстро привести к снижению глобальной концентрации метана в атмосфере и, следовательно, снижению парникового эффекта. В этой связи так называемые «эмитенты» метана являются главными точками интереса для контроля и мониторинга объема их выбросов. Анализ данных по эмиссии парниковых газов позволяет оценить воздействие добычи полезных ископаемых на окружающую среду и климат. Это важно для разработки эффективных стратегий сокращения выбросов парниковых газов, снижения негативного воздействия на окружающую среду и управления рисками, адаптации и снижения углеродного следа промышленности в соответствии с отечественными («Об ограничении выбросов парниковых газов» ФЗ №296 от 2 июля 2021 г.) и международными протоколами (GHG protocol) и стандартами.

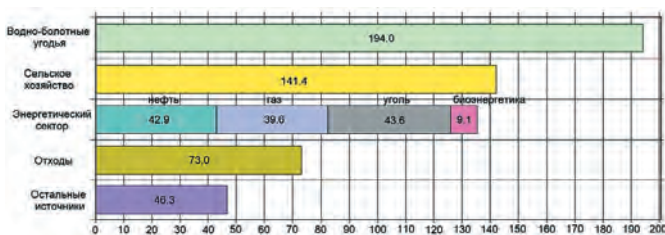


Рис. 1
Выбросы метана в 2021 г. по данным [3]

Fig. 1
Methane emissions in 2021 according to [3]

Для целей глобального мониторинга эмиссий парниковых газов, имеющих планетарный масштаб, на данный момент активно используются спутниковые миссии [5]. Спутниковые данные также могут использоваться для мониторинга изменений в лесных и водных ресурсах, что важно для оценки влияния добывающей промышленности на углеродный баланс и биологическое разнообразие регионов. В частности, спутниковые данные позволяют идентифицировать и анализировать источники эмиссий парниковых газов, связанные с деятельностью горно-, нефте- и газодобывающих предприятий, включая промышленные установки [6]. Актуальность и развитие таких задач подтверждается только постоянно растущим количеством новых спутниковых миссий, ориентированных на мониторинг парниковых газов¹. Это такие спутниковые миссии, как:

- MethaneSAT, предназначенный для измерения выбросов метана от нефтяных и газовых объектов;
- Метеор-М №2-4 с новым бортовым инфракрасным спектрометром, предназначенным для температурно-влажностного зондирования атмосферы и определения малых концентраций углекислого газа, метана, закиси азота, озона, водяного пара, фреонов;
- Спутниковая группировка TANGO, ориентированная на измерение содержания в атмосфере парниковых газов на уровне отдельных источников выбросов: электростанций, угольных шахт, мусорных свалок, заводов;
- Космические аппараты GHOS-4 и GHOS-5, ориентированные на гиперспектральные измерения выбросов метана с высокой разрешающей способностью (472 спектральных канала, полоса захвата составит 8 м);

– Спектрометр EMIT (Earth Surface Mineral Dust Source Investigation), установленный на борту МКС для точечного выделения шлейфов метана и мониторинга атмосферной пыли;

– Спутниковая миссия Sentinel-5P, предназначенная для непрерывного мониторинга различных газов в атмосфере, таких как углекислый газ CO₂, метан CH₄, диоксид азота NO₂ и озон O₃.

Довольно большой опыт и объем данных накопленных спутниковых данных о состоянии атмосферы в настоящее время позволяют активно развивать и создавать открытые базы выбросов парниковых газов. Использование баз данных выбросов парниковых газов на основе спутниковых измерений представляет собой мощный и перспективный инструмент для мониторинга и управления экологическими и климатическими рисками деятельности добывающей промышленности. Поэтому цель настоящей статьи – рассмотреть основные существующие базы данных выбросов парниковых газов на основе спутниковых измерений.

Методология

Спутниковые измерения концентрации парниковых газов в атмосфере основаны на принципах дистанционного зондирования Земли из космоса, при котором спутник наблюдает эмиссии и поглощения определенных электромагнитных излучений, проходящих через атмосферу. Спутниковые сенсоры выполняют измерения рассеянного и отраженного света от поверхности Земли, проходящего через атмосферу, что позволяет оценить состав и содержание парниковых газов в атмосфере Земли. По своей сути это спутниковая спектроскопия, нацеленная на анализ спектральных характеристик света, поглощаемого атмосферой. Парниковые газы имеют характерные абсорбционные линии в спектре, которые можно использовать для определения их концентрации (рис. 2) [7]. Кривая оптической толщины метана, углекислого газа и водяного

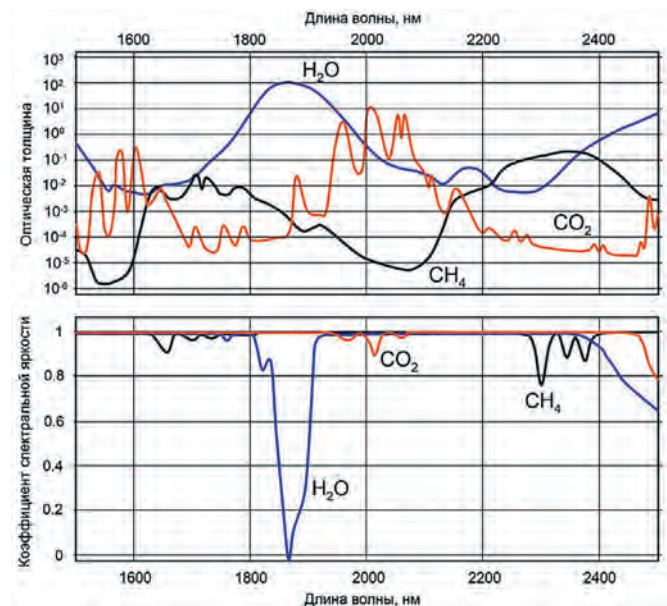


Рис. 2
Характеристическая кривая оптической толщины коэффициентов спектральной яркости метана, углекислого газа и водяного пара по данным [7]

Fig. 2
A characteristic curve of the optical depth of methane, carbon dioxide and water vapour spectral brightness coefficients according to [7]

¹ Greenhouse Gas Satellite Missions Portal. Available at: <https://database.eohandbook.com/ghg/index.aspx> (accessed: 12.04.2024).

Таблица 1
Базы спутниковых данных эмиссии парниковых газов

Table 1
Satellite databases of greenhouse gas emissions

Название	Доступ	Краткое описание
IMEO Methane Data	https://methanedata.azurewebsites.net/plumemap?mars=false	https://methanedata.azurewebsites.net/plumemap?mars=false
Climate TRACE	https://climatetrace.org/	Глобальный каталог выбросов парниковых газов с 2021 г.
GMET	https://globalenergymonitor.org/projects/global-methane-emitters-tracker/	Каталог данных выбросов и шлейфов метана угле-, нефте- и газодобывающих предприятий с 2021 г.
EMIT Methane Point Source Plume Complexes	https://earth.gov/ghgcenter/data-catalog/emit-ch4plume-v1	Каталог данных выбросов и шлейфов метана с 1 августа 2022 г.
Kayrros Methane Watch	https://methanewatch.kayrros.com/map	Каталог точечных выбросов метана, в основном связанных с добычей угля, нефти и газа, с января 2019 г.
SPON Methane plume maps	https://earth.sron.nl/methane-emissions/	Каталог точечных выбросов метана (еженедельный мониторинг) с ноября 2017 г.

пара показана на рис. 2. Приблизительно её можно считать аналогом кривой спектров поглощения этих веществ. Для обнаружения и оценки концентрации метана в столбе атмосферы используются спектральные каналы коротковолнового инфракрасного диапазона SWIR – ~1560–1660 нм и ~2090–2290 нм. Перепад кривой в пределах интервала измерения канала является основной характеристикой для выявления повышенного содержания парникового газа в атмосфере. Так, у метана виден резкий перепад в диапазоне ~1560–1660 нм, а у углекислого газа в диапазоне ~2090–2290 нм. Наиболее широко используемые спутниковые спектрометры для мониторинга атмосферы на данный момент – это прибор TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) на борту спутника Sentinel-5P и прибор EMIT (Earth Surface Mineral Dust Source Investigation) на борту МКС. Спектрометр TROPOMI измеряет отраженное солнечное излучение в ультрафиолетовом, видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах [8]. Пространственное разрешение TROPOMI составляет 7×3,5 км. EMIT – гиперспектрометр, содержащий 285 спектральных каналов в диапазоне от 381 до 2493 нм, со спектральным разрешением порядка 7,5 нм [9]. Полоса обзора EMIT составляет в интервале между 52° с.ш. и 52° ю.ш., пространственное разрешение – 60 м.

Результаты

Рассмотрим основные базы спутниковых данных парниковых выбросов. Эти базы данных формируются под эгидой крупных космических или климатических международных агентств. Их сводный перечень представлен в табл. 1.

IMEO (International Methane Emissions Observatory) Methane Data – глобальный набор данных о выбросах метана, включая систему оповещения об аномальных разовых (крупных) выбросах метана (Methane Alert and Response System, MARS) с января 2023 г. Каталог IMEO Methane Data использует спутниковые данные Sentinel-2,5P, EMIT, Landsat-8,9, GOES, PRISMA и EnMAP.

Climate TRACE – глобальный набор данных о выбросах парниковых газов с 2021 г., включающий детальную инвентаризацию источников выбросов на основе государственных отчетных материалов (база данных имеет записи о более чем 380 млн источников выбросов). Climate TRACE использует спутниковые данные Sentinel-2,5P, EMIT, Landsat-8,9 и другие для расчетов в том числе и приземных концентраций парниковых газов².

Global Methane Emitters Tracker (GMET) – содержит наборы данных выбросов метана в результате деятельности добычи ископаемого угля, нефти и газа, а также транспортировки и хранения природного газа. В каталог включены данные как точечных выбросов, так и мониторинга формирующихся шлейфов метана. Каталог GMET использует данные проекта Climate TRACE для формирования своих оценок деятельности добывающих предприятий.

EMIT Methane Point Source Plume Complexes – содержит глобальные наборы данных выбросов и шлейфов метана, полученные гиперспектрометром EMIT [9] начиная с 1 августа 2022 г.

Kayrros Methane Watch – глобальный набор данных о выбросах метана и идентификации эмитентов выбросов с января 2019 г. По большей части эмитенты связаны с добычей угля, нефти и газа. Каталог Kayrros Methane Watch использует спутниковые данные Sentinel-5P, EMIT и GHGSat.

SPON Methane plume maps – оперативные (еженедельный мониторинг) наборы данных о выбросах метана и идентификации эмитентов выбросов с ноября 2017 г. Сервис ориентирован как на природные, так и на антропогенные источники. Каталог SPON Methane plume maps использует спутниковые данные Sentinel-5P.

Выводы

Результаты измерений спутниковых спектрометров показывают не приземную концентрацию вещества, а его общую молярную массу по высоте атмосферного столба, зондируемого сенсором с привязкой его к координатам. Молярная масса в этом случае измеряется в молях на квадратный метр (распределение по площади). Для перехода к приземным концентрациям (нормируемых при мониторинге загрязняющих веществ) необходимо использовать специальные модели массопереноса химических веществ в атмосфере. Приземная концентрация загрязняющих веществ зависит от факторов климата, погоды, протекающих химических реакций. Для их учета и моделирования приземной концентрации на основе спутниковых измерений используются, например, модели WRF-chem [10] или GEOS-Chem [11]. Поэтому прямое сопоставление данных спутникового мониторинга и приземных концентраций загрязняющих веществ пока не представляется возможным.

Однако активно развиваются методы моделирования эмиссии парниковых газов на основе спутниковых данных (проект Climate TRACE). Рассмотренные базы спутниковых данных эмиссии парниковых газов представляют большой интерес для мониторинга объектов добывающей промышлен-

² Climate TRACE methodologies. Available at: <https://github.com/climatetracecoalition/methodology-documents/tree/main> (accessed: 12.04.2024).

ленности. Глобальный спутниковый мониторинг позволяет выявлять зоны аномальной концентрации и идентифицировать новые источники парниковых газов. А в некоторых случаях даже сопоставлять их с наземными измерениями загрязняющих веществ. Определенную перспективу в этом

отношении представляет сопоставление наземных и спутниковых данных на карбоновых полигонах³, находящихся в добывающих регионах России.

³ Карбоновые полигоны Российской Федерации. Режим доступа: <https://carbon-polygons.ru/> (дата обращения: 10.04.2024).

Список литературы / References

- Zhu Q., Liu J., Peng C., Chen H., Fang X., Jiang H., Yang G., Zhu D., Wang W., Zhou X. Modelling methane emissions from natural wetlands by development and application of the TRIPLEX-GHG model. *Geoscientific Model Development*. 2014;7(3):981–999. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-981-2014>
- Тетельмин В.В. Количественная оценка глобального потепления. *Горная промышленность*. 2023;(3):64–70. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-64-70>
Tetelmin V.V. Quantitative estimation of global warming. *Russian Mining Industry*. 2023;(3):64–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-64-70>
- Saunio M., Stavert A.R., Poulter B., Bousquet P., Canadell J.G., Jackson R.B. et al. The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*. 2020;12(3):1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J. et al. *IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press; 2013. 1535 p. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (accessed: 10.04.2024).
- Jacob D.J., Varon D.J., Cusworth D.H., Dennison P.E., Frankenberg C., Gautam R. et al. Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022;22(14):9617–9646. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9617-2022>
- Kholod N., Evans M., Pilcher R.C., Roshchanka V., Ruiz F., Coté M., Collings R. Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production. *Journal of Cleaner Production*. 2020;256:120489. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>
- Varon D.J., Jervis D., McKeever J., Spence I., Gains D., Jacob D.J. High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020;14(4):2771–2785. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2771-2021>
- Veefkind J.P., Aben I., McMullan K., Förster H., Vries J. de, Otter G. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*. 2012;120:70–83 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
- Thompson D.R., Green R.O., Bradley C., Brodrick P.G., Mahowald N., Dor E.B. et al. On-orbit calibration and performance of the emit imaging spectrometer. *Remote Sensing of Environment*. 2023;303:113986. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113986>
- Grell G.A., Peckham S.E., Schmitz R., McKeen S.A., Frost G., Skamarock W.C., Eder B. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*. 2005;39(37):6957–6975. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>
- Bey I., Jacob D.J., Yantosca R.M., Logan J.A., Field B.D., Fiore A.M. et al. Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2001;106(D19):23073–23095. <https://doi.org/10.1029/2001JD000807>

Информация об авторах

Антошин Владислав Викторович – директор управления по промышленной безопасности, охраны труда и охраны окружающей среды, ООО НГК «Горный», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: antoshinVV@ngk-gornyi.ru

Маневич Александр Ильич – научный сотрудник лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН, старший преподаватель кафедры геологии и маркшейдерского дела, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: ai.manevich@yandex.ru

Гаврилова Алевтина Александровна – студент кафедры геологии и маркшейдерского дела, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: anitvelag@mail.ru

Камаев Артем Анатольевич – инженер лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН, аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: artemkakamaev@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.04.2024

Поступила после рецензирования: 06.05.2024

Принята к публикации: 07.06.2024

Information about the authors

Vladislav V. Antoshin – Director of Industrial Safety, Health and Environment Safety Department, NGK Gorny LLC, Moscow, Russian Federation; e-mail: antoshinVV@ngk-gornyi.ru

Alexandr I. Manevich – Research Scientist, Laboratory of Geodynamics, Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Lecturer of the Department of the Geology and Surveying, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: ai.manevich@yandex.ru

Alevtina A. Gavrilova – Student of the Department of the Geology and Surveying, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: anitvelag@mail.ru

Artyom A. Kamaev – Engineer, Laboratory of GEODYNAMICS, Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Postgraduate Student of the Department of the Geology and Surveying, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: artemkakamaev@gmail.com

Article info

Received: 12.04.2024

Revised: 06.05.2024

Accepted: 07.05.2024