

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ МЕТАНА ДЛЯ НЕКОТОРЫХ РАЙОНОВ СИБИРИ НА ОСНОВЕ СЕРВИСА ECCAD И КОРРЕЛЯЦИЯ ДАННЫХ СЕРВИСА С НАЗЕМНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ ДЛЯ РАЙОНА ТЕРИБЕРКИ

© 2025 г. Н. В. Родионова<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл., Россия

\*E-mail: rny1948123@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.08.2024 г.

На основе базы данных CAMS-GLOB-ANT онлайн-сервиса ECCAD сделана оценка среднегодовых вариаций антропогенных выбросов метана для Уренгойского месторождения и отдельных угольных шахт Кузбасса, Красноярского края, Иркутской области и Бурятии для периода 2000–2023 гг. По кадастру CAMS-GLOB-ANT для каждой ячейки сетки ( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ) карты выбросов метана доступна информация об объемах выбросов за месяц или год. Существенные изменения в эксплуатации участков отслеживаются по скачкам в количестве выбросов  $\text{CH}_4$ . Сравнение объемов выбросов метана в угольных разрезах с утечками на месторождении в пределах элемента разрешения показало, что в угольных разрезах объемы выбросов  $\text{CH}_4$  почти в 10 раз превышают утечки на месторождении. Утечки метана на месторождении при добыче и транспортировке имеют тенденцию к уменьшению с 2015 года. Для угольных разрезов наблюдается положительный тренд в выбросах метана. Показана тесная связь между наземными измерениями концентрации метана на стационаре в Териберке и оценкой выбросов метана на основе данных кадастра CAMS-GLOB-ANT.

**Ключевые слова:** антропогенные выбросы метана, онлайн-сервис ECCAD, наземные и спутниковые измерения, Териберка, Сибирь

DOI: 10.7868/S3034540525030036

### ВВЕДЕНИЕ

Метан  $\text{CH}_4$  – один из основных парниковых газов, вклад которого в глобальное потепление является вторым после  $\text{CO}_2$ . Соотношение вклада естественных и антропогенных источников в эмиссию метана по данным 1990 года составляло примерно 2/3, однако по оценкам 2000 года вклад обоих источников сравнялся скорее всего из-за недооценки природных источников (Киселев, Кароль, 2019). До 80% от природных выбросов  $\text{CH}_4$  приходится на болота. Естественными источниками выбросов метана являются также лесные пожары, дикие животные, таяние вечной мерзлоты. Антропогенные источники – добыча ископаемого топлива, бытовые отходы и сточные воды, сельское хозяйство (крупный рогатый скот, рисовые плантации). Большая часть метана вырабатывается в ходе хозяйственной деятельности человека. В первую очередь (порядка 30%) это разведение сельскохозяйственных животных – так же, как и дикие, домашние жвачные животные производят в процессе пищеварения метан (каждая корова, например, ежедневно отправляет в атмос-

феру порядка 300 литров газа) (<https://ecosphere.press/2023/01/30/metan-samyj-opasnyj-parnikovyj-gaz-ili-klyuch-k-resheniyu-klimaticheskogo-krizisa/?yclid=lt4b5y572211440007>). Важнейшим стоком метана в атмосфере, составляющим почти 90% от полной интенсивности стока, является его разрушение при реакции с гидроксил-радикалом OH с образованием углекислого газа и паров воды (Cicerone, Oremland, 1988). В зимние месяцы, когда процессы стока метана прекращаются, метан начинает накапливаться в атмосфере, а летом включаются процессы стока метана (Белан, Креков, 2012). Время жизни метана в атмосфере порядка 10 лет.

Количественная оценка эмиссии  $\text{CH}_4$  в атмосфере является проблемой вплоть до настоящего времени, прежде всего из-за сложности оценки природной эмиссии. Для определения эмиссии используются наземные измерения на станциях, спутниковые измерения, инвентаризация выбросов. Число постоянно действующих российских станций четыре, все они расположены в арктическом регионе: Териберка, Тикси, Новый порт и Черский.

Данные наблюдений собраны и систематизированы исследовательской группой NOAA, результаты представлены на интернет портале <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/>.

Возможности спутниковых измерений эмиссии метана значительно расширятся в связи с запуском спутников NASA MethaneSAT (4/03/2024) и первого из серии спутников Carbon Mapper Tanager-1 (16/09/2024) (Jackson et al., 2024). Предполагается, что новые данные появятся в свободном доступе в конце 2024 года. В качестве спутниковых измерений в настоящей работе использовались данные американского спутника AQUA на базе спектрометра AIRS (Atmospheric Infrared Sounder). Содержание метана в тропосфере оценивается по ослаблению излучения в спектральных диапазонах, соответствующих максимумам полос поглощения этого газа. Данные о содержании метана в атмосфере находятся в свободном доступе в системе анализа и визуализации данных Giovanni, доступные по ссылке <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>. В использовании спутниковых оценок эмиссии CH<sub>4</sub> есть свои проблемы, связанные с тем, что спутник дает информацию о концентрациях газа не у земной поверхности, а на другом барическом уровне (Юрганов и др., 2016; Анисимов О.А., Кокорев В.А., 2015; Родионова, 2022). Приборы AIRS (спутник AQUA), использующие уходящее излучение Земли в средней ИК области около 7.8 мкм, имеют пониженную чувствительность к нижней тропосфере. Для надежного определения концентраций атмосферных газов ниже высоты 5 км необходим достаточно большой положительный температурный контраст (ТК) между температурами подстилающей поверхности и пограничного слоя с одной стороны и температурами вышележащих слоев воздуха – с другой (Юрганов и др., 2016). Можно предположить, что для ТК < 10°С измеренная спутником концентрация метана понижена (Юрганов и др., 2016). Основная причина снижения спутниковых значений концентрации метана в зимний сезон в том, что спутник не видит поверхность и значения концентрации метана определяет не у поверхности, а у более высоких слоев (Юрганов и др., 2016). Это происходит, если разность температур на поверхности (уровень 1000 гПа) и на высоте порядка 4 км (600 гПа) меньше 10°С, т.е. ТК < 10°С.

Одним из источников информации об эмиссии метана является находящийся в открытом доступе онлайн-сервис ECCAD (Emissions of atmospheric Compounds & Compilation of Ancillary Data) (<http://eccad.aeris-data.fr>) (Lamarque et al., 2010; Granier et al., 2011). Изначально ECCAD был разработан для того, чтобы обеспечить пользователям легкий доступ к большому количеству данных о выбросах вместе с инструментами анализа. ECCAD разработан как часть французского портала AERIS (<http://www.aeris-data.fr>), который предоставляет доступ

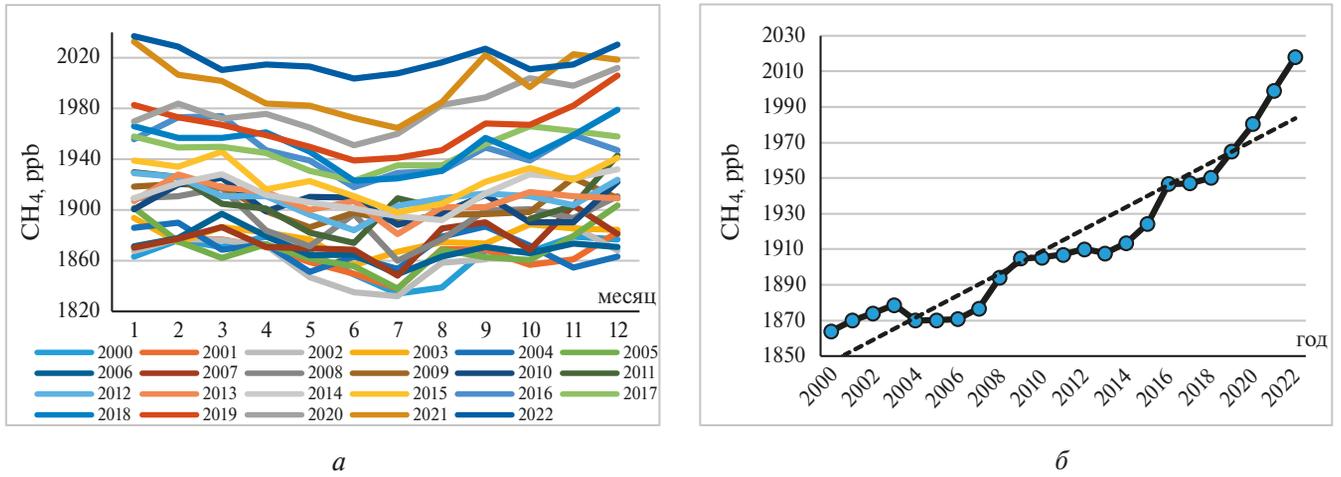
к различным продуктам, связанным с науками об атмосфере, таким как наземные, спутниковые наблюдения, лабораторная и спектроскопическая информация, инструменты моделирования и выбросы с поверхности. Более 100 наборов данных об эмиссии загрязняющих веществ в глобальном и региональном масштабах, с различными пространственными и временными разрешениями и временными периодами доступны к настоящему времени на онлайн-сервисе ECCAD. Несколько проектов онлайн-сервиса ECCAD включают оценку эмиссии CH<sub>4</sub> с разными пространственными разрешениями (ПР) и временными промежутками доступа. В данной работе использовалась база данных CAMS-GLOB-ANT, входящая в проект CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) (6 баз данных) с ПР = 0.1° × 0.1° для периода 2000–2023 гг.

Цель данной работы состоит в использовании кадастра CAMS-GLOB-ANT онлайн-сервиса ECCAD для оценки утечки метана при добыче и транспортировке топлива на нефтегазовых предприятиях и на угольных разрезах Сибири, определив предварительно наличие корреляции данных сервиса ECCAD с находящимися в открытом доступе наземными измерениями концентрации метана в атмосфере района Териберки.

#### НАЗЕМНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ CH<sub>4</sub> В РАЙОНЕ ТЕРИБЕРКИ. ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ ПО КАДАСТРУ CAMS-GLOB-ANT. КОРРЕЛЯЦИЯ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СО СПУТНИКОВЫМИ И С ДАННЫМИ СЕРВИСА ECCAD

Данные по наземным измерениям концентрации метана в приземном слое атмосферы в России находятся в открытом доступе для стационаров в Тикси и Териберке. В настоящей работе были использованы измерения на станции фонового мониторинга “Териберка”, которая находится на Кольском полуострове (69°09'39"N, 35°08'42"E). Данные по наземным измерениям концентрации метана в приземном слое атмосферы в Териберке получены на стационарах Главной Геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) (Ivakhov, Paramonova, 2021) и доступны на сайте WDCGG – World Data Centre Greenhouse Gases <https://gaw.kishou.go.jp/>.

На рис. 1 показаны графики вариаций среднемесячной и межгодовой концентрации метана по наземным измерениям на стационаре ГГО Териберка для 2000–2022 гг. (ppb-частей на миллиард). Отмечаем минимум концентрации метана в июле и максимум в осенние и зимние месяцы. Обратная корреляция с температурой воздуха связана с пе-



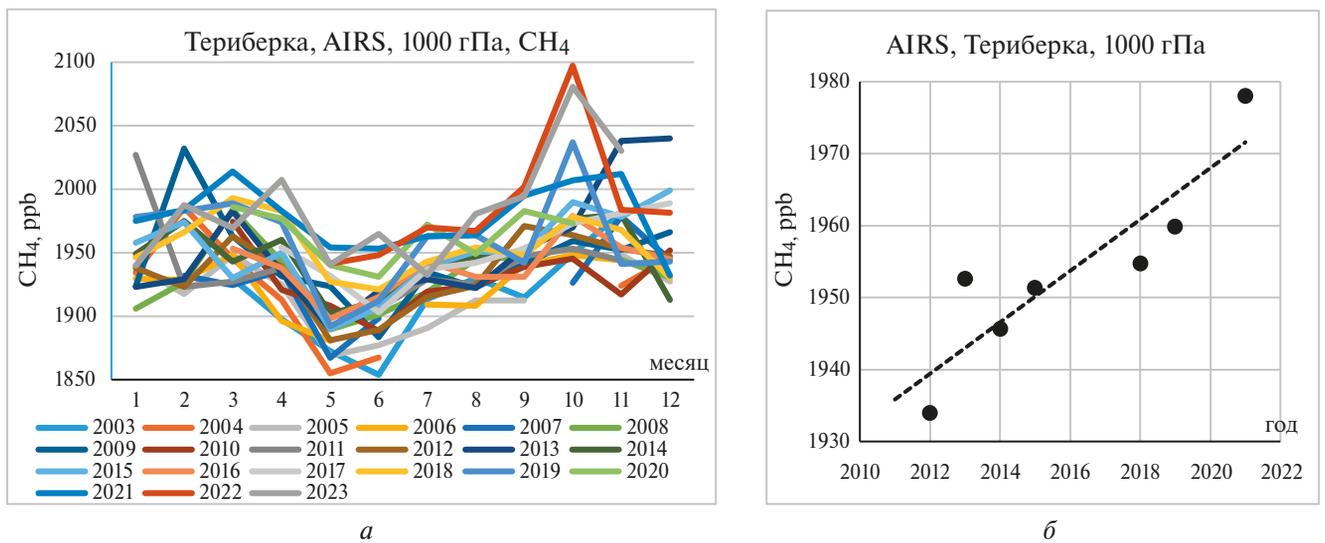
**Рис. 1.** Сезонные (а) и межгодовые (б) вариации концентрации метана в приземном слое атмосферы по наземным измерениям на станции фоновый мониторинга Териберка.

риодами эмиссии и стока метана в атмосфере. На графике межгодовых вариаций (рис. 1б) отмечаем устойчивый рост значений концентрации CH<sub>4</sub> с 2000 года по 2022 год.

На рис. 2 приведены графики сезонных (а) и межгодовых (б) вариаций концентрации метана в приземной атмосфере для района Териберки по среднемесячным данным AIRS (продукт AIRS3STM v.7.0), барическая высота 1000 гПа, пространственное разрешение 1° × 1°, на период 2003–2023 гг. Существенным отличием сезонного хода концентраций метана по наземным измерениям (рис. 1а) от спутниковых (рис. 2а) является значительное уменьшение значений концентрации метана в зимний сезон

по спутниковым данным. Причина состоит, как сказано выше, из-за возможной инверсии температуры воздуха в зимний период.

В таблице, приведенной ниже, показано, как меняется корреляция между наземными измерениями концентрации CH<sub>4</sub> на фоновой станции Териберка и спутниковыми измерениями на разных барических уровнях. Корреляция определяется с помощью программы Attestat, находящейся в свободном доступе и используемой как надстройка в Excel. Наименьшее значение коэффициента корреляции Спирмена (ККС) между наземными и спутниковыми измерениями CH<sub>4</sub> получено для барического уровня 1000 гПа. Для зимних, летних и осенних ме-



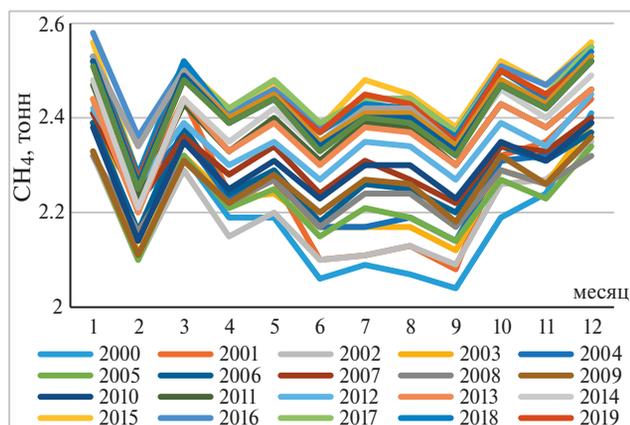
**Рис. 2.** Сезонные (а) и межгодовые (б) вариации концентрации метана в атмосфере уровня 1000 гПа по данным AIRS, продукт AIRS3STM v.7.0 для района Териберки.

**Таблица.** Значения ККС  $\rho_s$  между наземными измерениями концентрации метана в атмосфере в районе Териберки и спутниковыми измерениями на разных барических уровнях ( $p$  – коэффициент значимости,  $N$  – число измерений)

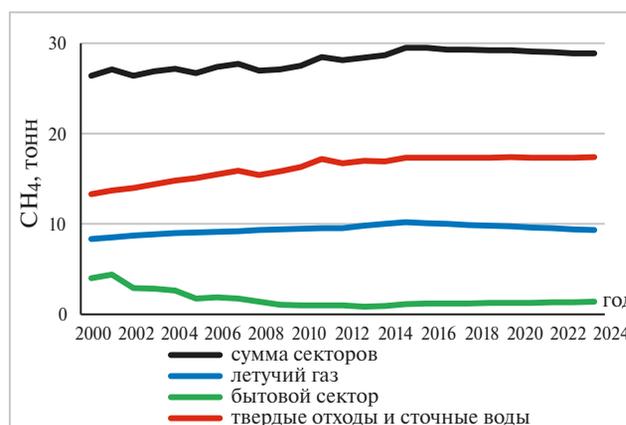
	1000 гПа			
	Зима (1-2-12)	Весна (3-4-5)	Лето (6-7-8)	Осень (9-10-11)
$\rho_s$	0.25	0.56	0.46	0.13
$p$	0.11	$6e^{-4}$	$5e^{-3}$	0.25
$N$	26	29	30	28
	Среднее (700 + 850) гПа			
$\rho_s$	0.67	0.8	0.66	0.8157
$p$	$3e^{-5}$	0	$3e^{-5}$	0
$N$	29	30	30	29
	Среднее (400 + 500) гПа			
$\rho_s$	0.65	0.9	0.48	0.76
$p$	$1e^{-5}$	0	0.0035	$2e^{-6}$
$N$	28	30	30	30

сяцев наибольшая корреляция отмечена на среднем уровне (700 + 850) гПа. Для весенних месяцев наибольшая корреляция соответствует среднему значению на уровне (400 + 500) гПа. На корреляцию

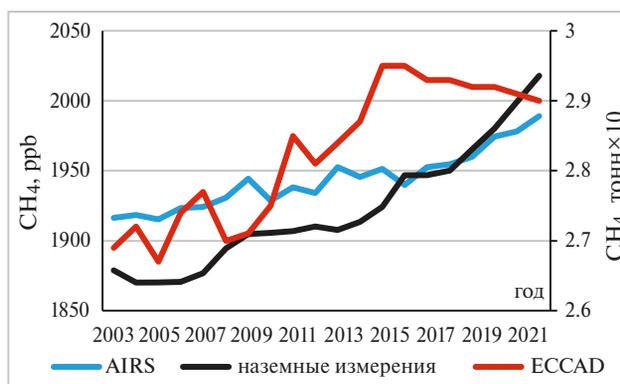
между наземными и спутниковыми данными влияет еще и то, что наземные измерения проводятся локально на небольшой территории, а ПР спутниковых измерений AIRS/AQUA составляет  $1^\circ \times 1^\circ$ ,



*a*



*б*



*в*

**Рис. 3.** *a* – Сезонные вариации выбросов  $CH_4$ , *б* – секторы, ответственные за выбросы  $CH_4$ , *в* – межгодовые вариации концентрации метана в приземном слое атмосферы по наземным, спутниковым и ECCAD данным для станции фонового мониторинга Териберка.

и поскольку Териберка находится на побережье Баренцева моря, то спутник при данном ПР захватывает не только континентальную часть, но и морскую поверхность, что также влияет на корреляцию наземных и спутниковых данных.

Графики значений выбросов метана в районе Териберки на основе базы данных CAMS-GLOB-ANT с ПР  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  для периода 2000–2023 гг. показаны на рис. 3: сезонные вариации  $\text{CH}_4$  (суммарные выбросы за месяц по сумме секторов) (рис. 3а); секторы, ответственные за выбросы  $\text{CH}_4$  (рис. 3б); вариации суммарных выбросов  $\text{CH}_4$  за год на базе сервиса ECCAD, среднегодовые наземные и спутниковые измерения (рис. 3в). Основной сектор, ответственный за выбросы  $\text{CH}_4$  в Териберке – это сектор “твердые отходы и сточные воды” (solid waste and waste water), на втором месте – летучий газ (fugitive gas), и незначительный вклад в выбросы метана дает бытовой сектор (residential). Коэффициент корреляции Спирмена  $\rho_s$  между среднегодовыми наземными значениями и полученными по онлайн сервису ECCAD (суммарные

выбросы  $\text{CH}_4$  за год по сумме секторов), равен  $\rho_s = 0.84$  ( $p = 0$ ), что означает тесную связь между переменными.

#### МЕЖГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ $\text{CH}_4$ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ РАЙОНОВ СИБИРИ ПО ДАНЫМ ОНЛАЙН СЕРВИСА ECCAD

Тесная связь наземных межгодовых вариаций концентрации  $\text{CH}_4$  с их оценкой по онлайн-сервису ECCAD стала положительным фактором для использования сервиса при оценке антропогенных выбросов метана в нескольких районах Сибири. На рис. 4 показан фрагмент карты выбросов  $\text{CH}_4$  по базе данных CAMS-GLOB-ANT. Для каждой ячейки сетки карты, размером  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , доступна информация о среднемесячных и годовых выбросах метана и информация о секторах, ответственных за эти выбросы. На карте выделяются прямые линии газопроводов, идущих от Уренгойского НГКМ, и само месторождение.

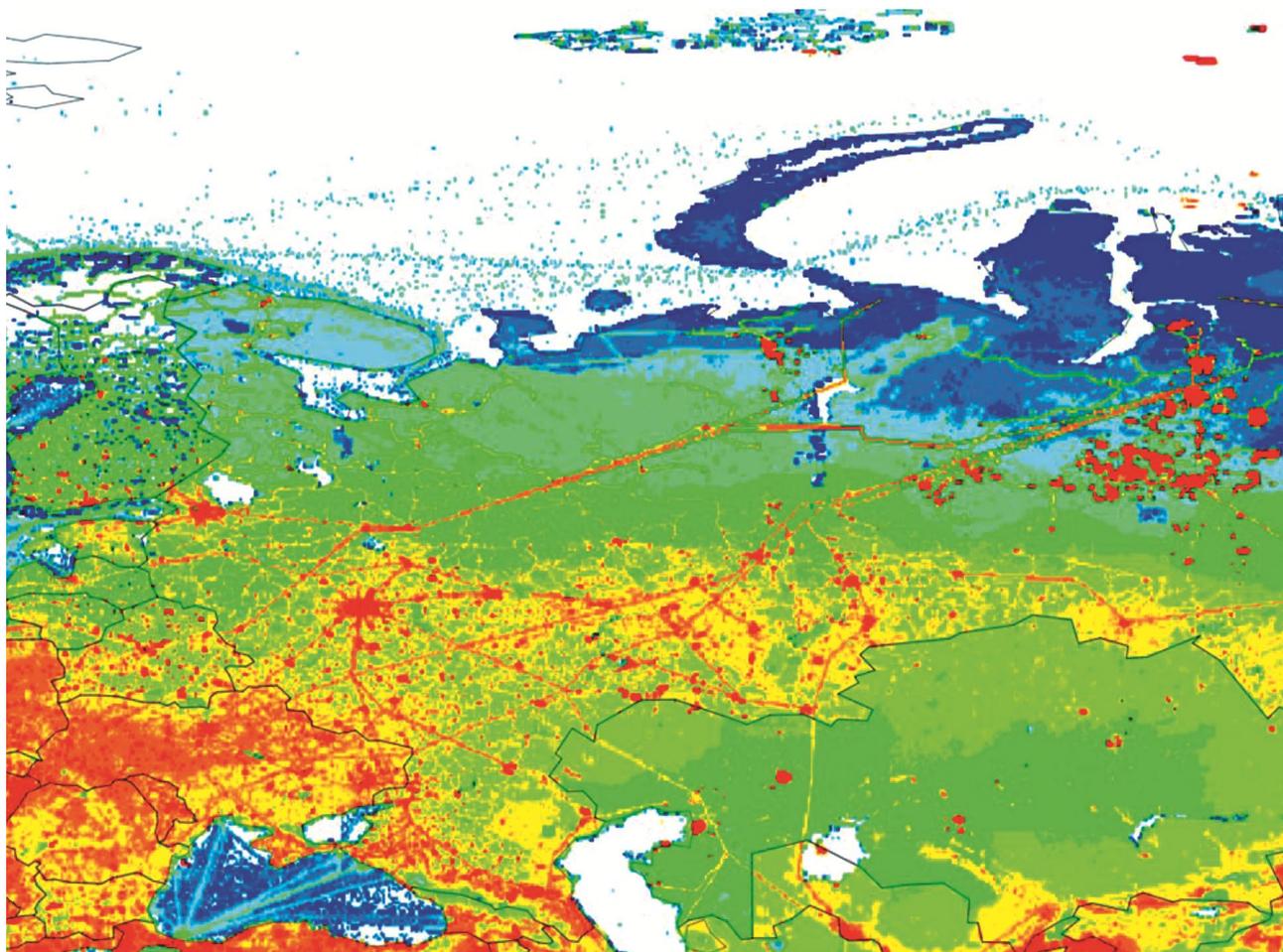


Рис. 4. Карта выбросов  $\text{CH}_4$  на основе базы данных CAMS-GLOB-ANT онлайн-сервиса ECCAD.

Рассмотрим несколько примеров использования онлайн сервиса ECCAD для оценки антропогенных выбросов  $\text{CH}_4$  в некоторых районах Сибири.

#### ПРИМЕРЫ УТЕЧКИ $\text{CH}_4$ ПРИ ДОБЫЧЕ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ ТОПЛИВА НА УРЕНГОЙСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ПО ДАННЫМ СЕРВИСА ECCAD

На севере Тюменской области, в Пуровском районе Ямало-Ненецкого автономного округа в 1966 году было открыто Уренгойское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ), одно из крупнейших месторождений мира на тот период. Протяженность месторождения с севера на юг составляет 220 км, а его площадь более 6 тыс. кв. км. В нефтегазовой отрасли метан может выделяться при разведке, добыче, транспортировке, переработке и распределении. Выбросы метана могут быть непреднамеренными или преднамеренными, причем непреднамеренные выбросы могут быть вызваны утечками в оборудовании, дефектными уплотнениями или соединениями при транспортировке и хранении ископаемого топлива.

На рис. 5 показан один из участков этого месторождения и ячейка сетки карты, для которой определялась утечка  $\text{CH}_4$  при эксплуатации данного участка по базе данных CAMS-GLOB-ANT.

График среднегодовых значений эмиссий  $\text{CH}_4$  по сумме секторов (fugitive gas – летучий газ, fugitive oil – утекающая нефть) для ячейки сетки карты показан на рис. 6а. Для соседней справа ячейки ситуация сходная, однако для всех остальных ячеек рис. 5 графики аналогичны графику на рис. 6б ( $T_g = 10^6$  тонн). То есть утечки практически прекратились с 2011 года, возможно в связи с прекращением эксплуатации

участков. Снижение утечек метана для действующих участков наблюдается с 2015 года. Отметим, что графики на рис. 6 характерны и для других участков Уренгойского НГКМ.

Пример утечки  $\text{CH}_4$  при транспортировке по газопроводам приведен на рис. 7, где на карте стрелкой показана ячейка, для которой на рис. 7б приведен график годовых утечек метана, а для соседней справа ячейки – на рис. 7в. Утечки  $\text{CH}_4$  при транспортировке почти в 30 раз меньше, чем в местах добычи топлива.

С 2015 года есть тренд снижения утечек метана при транспортировке.

#### ВЫБРОСЫ $\text{CH}_4$ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Как и в случае с нефтью и газом, при добыче угля образуются выбросы метана. Добываемый уголь образуется в течение миллионов лет, когда биогенные вещества сжимаются и нагреваются. В ходе этого геологического процесса метан и углекислый газ задерживаются в угольных пластах. Улавливаемый газ известен как пластовый газ, и в его составе обычно содержится 95–97% чистого метана. Пластовый газ выделяется при разведке, добыче, хранении, транспортировке или распределении угля как из подземных, так и из наземных шахт. После прекращения добычи нефти, газа и угля заброшенные скважины и рудники также могут продолжать выделять метан (<https://www.sinai.com/post/what-are-fugitive-emissions-and-why-are-they-important>).

Большие количества метана (около 28 млрд  $\text{m}^3$ ) ежегодно выбрасываются в атмосферу в результате добычи угля по всему миру. Этот метан представляет собой не только значительный парниковый газ,

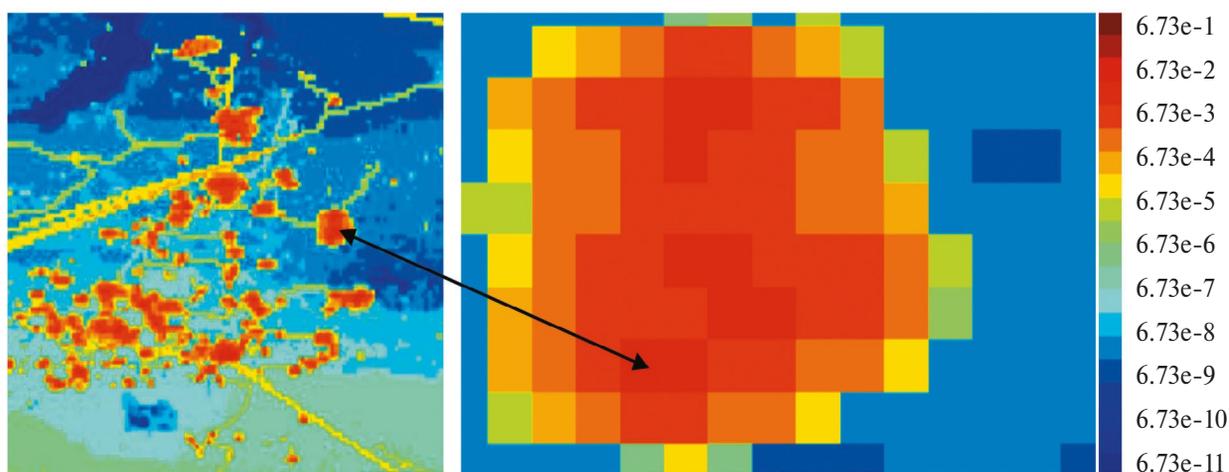


Рис. 5. Один из участков Уренгойского НГКМ на карте выбросов  $\text{CH}_4$  на основе данных кадастра CAMS-GLOB-ANT сервиса ECCAD.

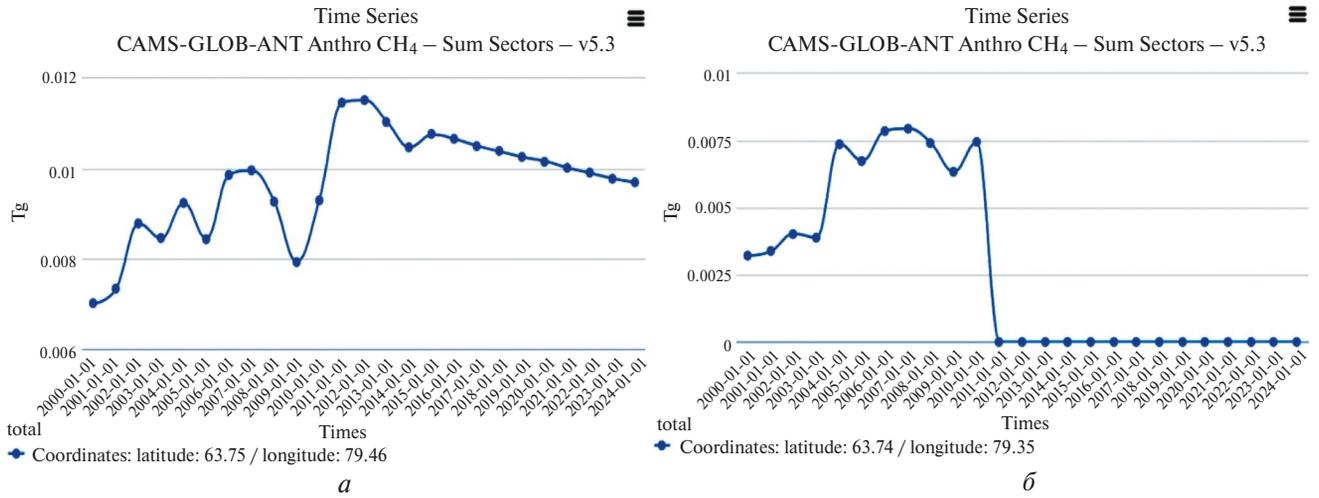


Рис. 6. Среднегодовые вариации утечки метана при эксплуатации двух участков Уренгойского НГКМ.

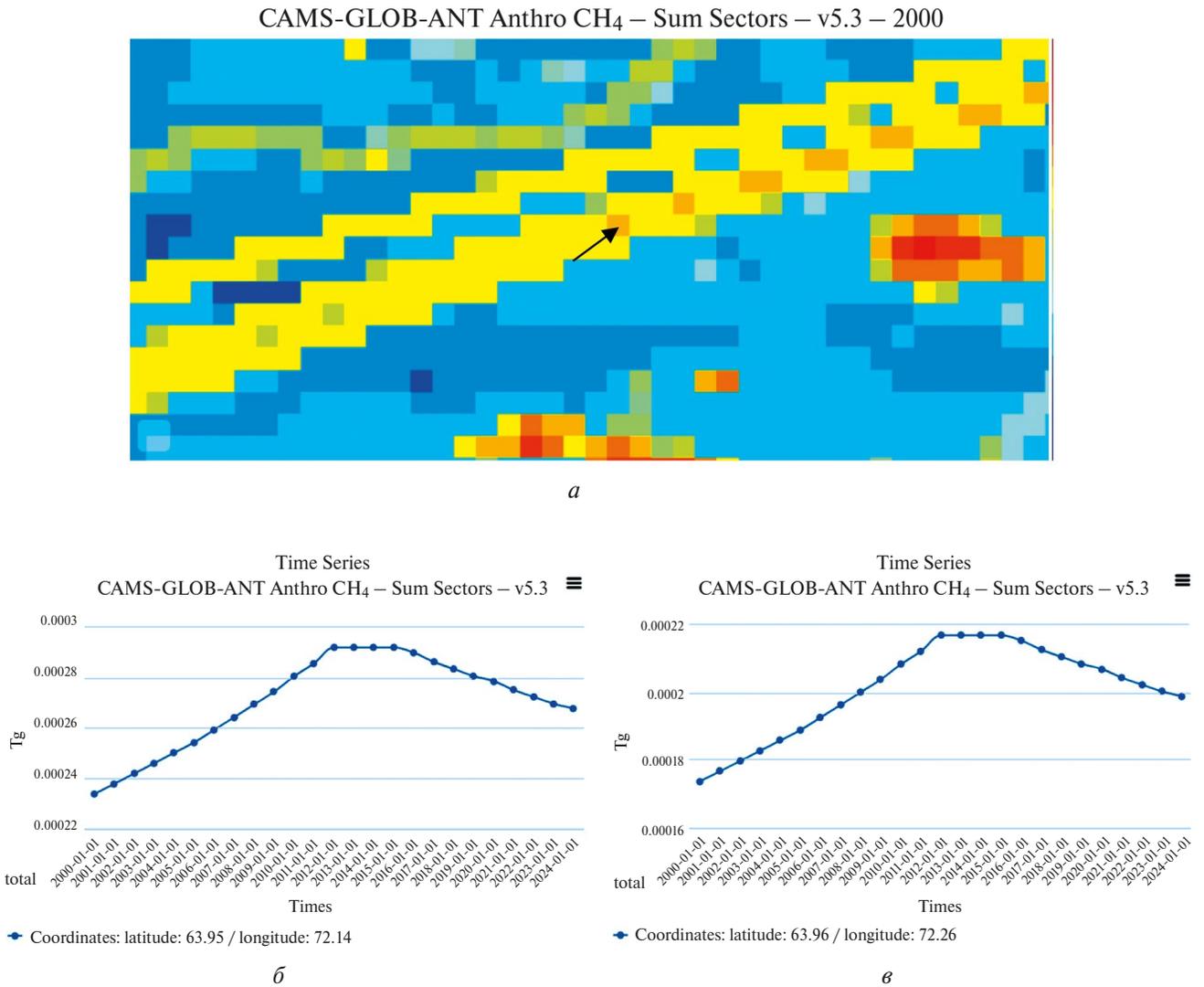


Рис. 7. Среднегодовые вариации утечки метана при транспортировке для двух участков Уренгойского НГКМ.

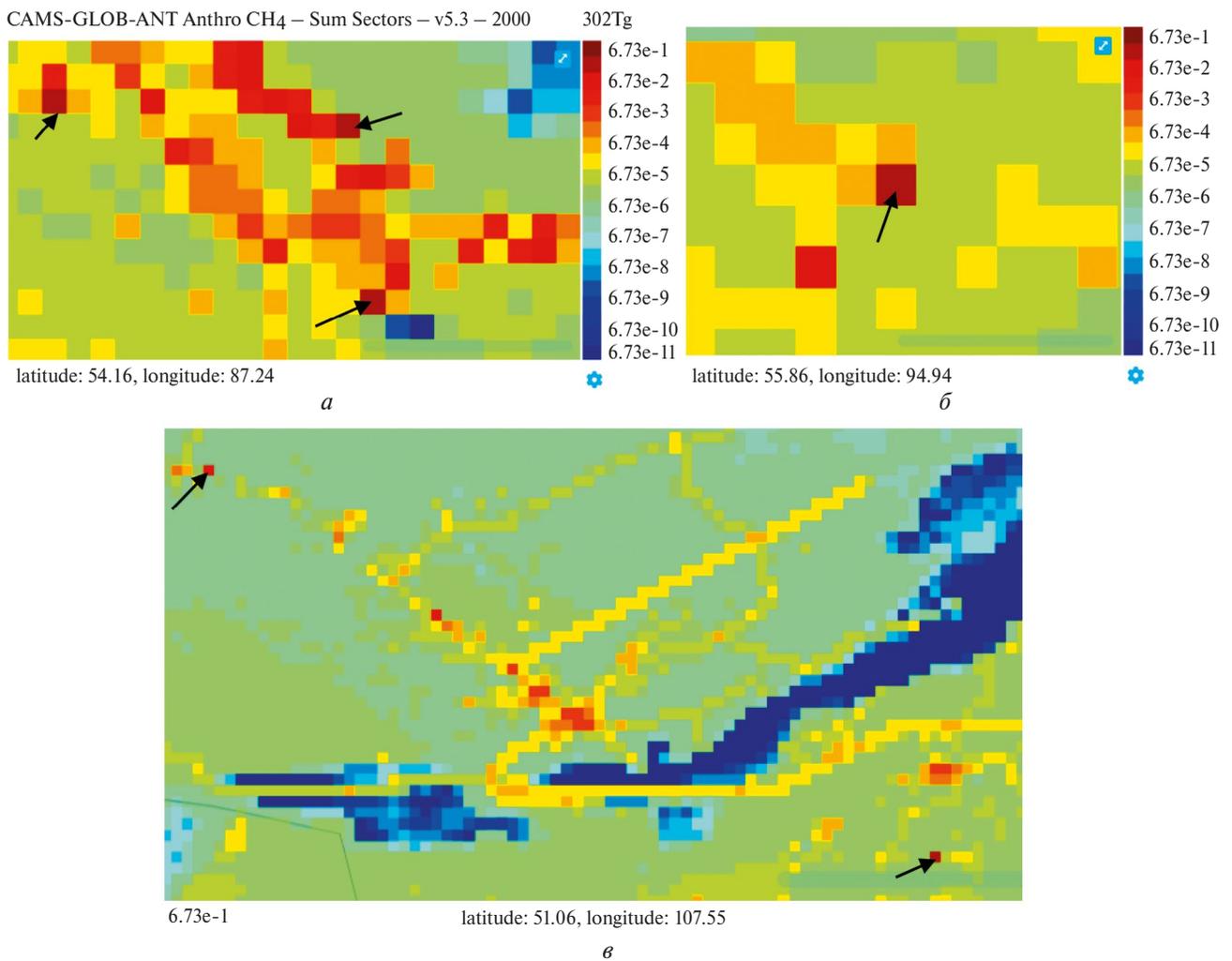
способствующий глобальному изменению температуры, но и является неиспользуемым энергетическим ресурсом.

На примере нескольких угольных разрезов в Кузбассе, Красноярском крае, Иркутской области и Бурятии, оценим объем выбросов метана при эксплуатации разрезов по данным сервиса ECCAD. На карте выбросов  $\text{CH}_4$  на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT (рис. 8а) показано местоположение угольных разрезов Кузбасса (черные стрелки): Раздольный (54.26° с.ш., 86.03° в.д.), Талдинский (54.18° с.ш., 87.25° в.д.), Калтанский (53.46° с.ш., 87.34° в.д.). Местоположение разреза Бородинский (55.85° с.ш., 94.95° в.д.) в Красноярском крае показано на рис. 8б. Местоположение разреза Тулунский (54.57° с.ш., 100.85° в.д.) в Иркутской области и Тугнуйский (51.05° с.ш., 107.55° в.д.) в Мухоршибирском районе республики Бурятия показано на рис. 8в. Разрезы легко иденти-

фицируются на карте ECCAD по цвету ячеек сетки, соответствующему наибольшему значению  $\text{CH}_4$  по шкале справа.

Графики среднегодовых выбросов метана на шести угольных разрезах Сибири приведены на рис. 9. По объемам выбросов метана выделились Кузбасс и Бурятия, причем с 2000 года объемы выбросов увеличились почти в 2 раза при общем положительном тренде. В Красноярском крае и Иркутской области объем выбросов метана на угольных разрезах значительно (почти в 2 раза) уступает Кузбассу и Бурятии. Для всех рассмотренных угольных разрезов есть положительный тренд выбросов метана (для Бородинского с 2014 года).

Сравнение объемов утечек  $\text{CH}_4$  на Уренгойском НГКМ (рис. 6а) при оценке для ячейки сетки размером  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  показало, что утечки метана почти на порядок меньше, чем для такой же ячейки для угольных разрезов (рис. 9).



**Рис. 8.** *а* – Кузбасс, угольные разрезы: Раздольный, Талдинский, Калтанский; *б* – Красноярский край: разрез Бородинский; *в* – Иркутская область: разрез Тулунский; Бурятия: разрез Тугнуйский.

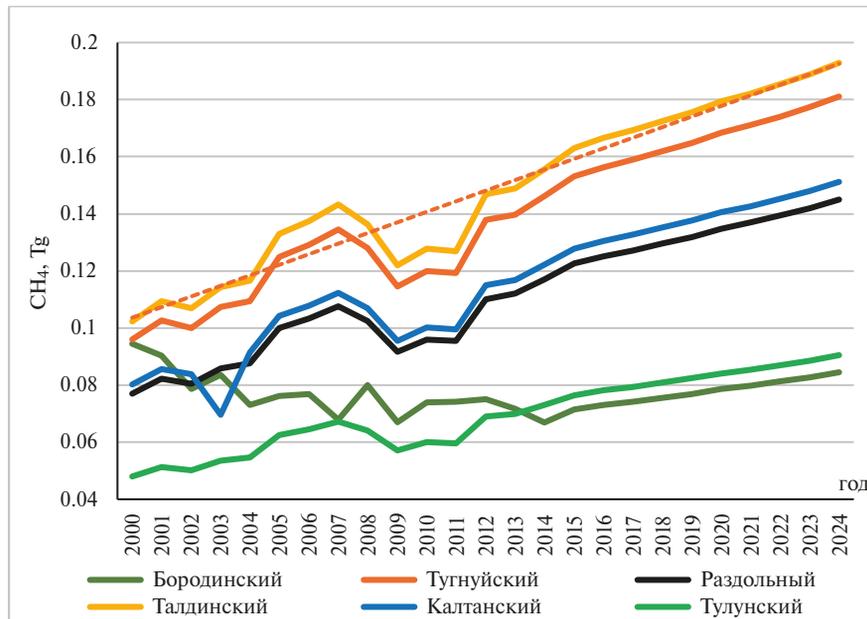


Рис. 9. Среднегодовые вариации выбросов в атмосферу  $\text{CH}_4$  в результате добычи угля на угольных разрезах Сибири.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе базы данных CAMS-GLOB-ANT онлайн-сервиса ECCAD с  $\text{PR} = 0.1^\circ \times 0.1^\circ$  сделана оценка среднегодовых вариаций антропогенных выбросов метана для Уренгойского месторождения и отдельных угольных шахт Кузбасса, Красноярского края, Иркутской области и Бурятии для периода 2000–2023 гг. Предварительно определена корреляция данных кадастра CAMS-GLOB-ANT о выбросах метана с наземными измерениями для станции Териберка, показавшая тесную связь между этими данными с коэффициентом корреляции Спирмена  $\rho_s = 0.84$ . Сравнение объемов выбросов метана в угольных разрезах с утечками на месторождении в пределах ячейки сетки показало, что в угольных разрезах объемы выбросов  $\text{CH}_4$  почти в 10 раз превышают утечки на месторождении. Снижение утечек метана для действующих участков месторождения наблюдается с 2015 года. Для угольных разрезов наблюдается положительный тренд в среднегодовых выбросах метана.

Следует отметить, что разные базы данных могут предоставлять разную информацию о выбросах загрязняющих веществ для одной и той же территории. В работе (Granier et al., 2011) при сравнении нескольких кадастров среди причин различий между ними приводятся такие: 1) данные о деятельности и подробные сведения о факторах выбросов, которые используются для составления кадастров, как правило, не предоставляются вместе с кадастрами, 2) кадастры выбросов регулярно обновляются с использованием самых последних данных

о деятельности и коэффициентах выбросов, что может привести к значительным различиям между различными версиями одного кадастра, 3) каждый набор данных/модель отличается способом обработки данных и подготовки к расчетам. Такая информация либо не предоставляется, либо ее довольно сложно оценить, если она есть.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по теме «Космос-2».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов О.А., Кокорев В.А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменения климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 1–14.
- Белан Б.Д., Креков Г.М. Влияние антропогенного фактора на содержание парниковых газов в тропосфере. 1. Метан // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 4. С. 361–373.
- Киселев А.А., Кароль И.Л. С метаном по жизни. СПб: ГГО им. А.И. Воейкова. 2019. 73 с.
- Родионова Н.В. Корреляция наземных и спутниковых измерений концентрации метана в приземном слое атмосферы в районе Тикси // Исследование Земли из космоса. 2022. № 4. С. 3–11.
- Юрганов Л.Н., Лейфер А., Майр К. Лунд. Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного метана над морями Северного Ледовитого океана по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 107–119.

- Cicerone R.J., Oremland R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 1988. Vol. 2. No. 4. P. 299–327.
- Granier C., Bessagnet B., Bond T., D'Angiola A., van der Gon H.D., Frost G.J., Heil A., Kaiser J.W., Kinne S., Klimont Z., Kloster S., Lamarque J.-F., Lioussé C., Masui T., Meleux F., Mieville A., Ohara T., Raut J.-C., Riahi K., Schultz M.G., Smith S.J., Thompson A., van Aardenne J., van der Werf G.R., van Vuure D.P. Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period // *Climatic Change*. 2011. 109. P. 163–190. DOI: 10.1007/s10584-011-0154-1.
- Ivakhov V. (MGO), Paramonova N. (MGO). Atmospheric CH<sub>4</sub> at Teriberka by Voeikov Main Geophysical Observatory, dataset published as CH4\_TER\_surface-flask\_MGO\_data1 at WDCGG, ver. 2021-10-17-2320, [https://doi.org/10.50849/WDCGG\\_0046-6003-1002-01-02-9999](https://doi.org/10.50849/WDCGG_0046-6003-1002-01-02-9999) (Reference date: 2022/01/05).
- Jackson R.B., Saunio M., Martinez A., Canadell J.G., Yu X., Li M., Poulte B., Raymond P.A., Regnier P., Ciais P., Davis S.J., and Patra P.K. Human activities now fuel two-thirds of global methane emissions // *Environ. Res. Lett.* 2024. 19 101002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad6463>.
- Lamarque J.-F., Bond T.C., Eyring V., Granier C., Heil A., Klimont Z., Lee D., Lioussé C., Mieville A., Owen B., Schultz M.G., Shindell D., Smith S.J., Stehfest E., Van Aardenne J., Cooper O.R., Kainuma M., Mahowald N., McConnell J.R., Naik V., Riahi K., and van Vuuren D.P. Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. 10. P. 7017–7039.

## Estimation of Anthropogenic Methane Emissions for Some Areas of Siberia Based on the ECCAD Service and Correlation of Service Data with Ground Measurements for the Teriberka Area

N. V. Rodionova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow Region, Russia*

Based on the CAMS-GLOB-ANT database of the ECCAD online- service, an estimate of the average annual variations in anthropogenic methane emissions for the Urengoykoye field and individual coal mines of Kuzbass, Krasnoyarsk Territory, Irkutsk Region and Buryatia for the period 2000–2023 was made. For each grid cell with a size of  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  according to the CAMS-GLOB-ANT inventory, information on the volume of CH<sub>4</sub> leakage per month or year is available. Significant changes in the operation of sites (termination) are tracked by jumps in CH<sub>4</sub> emissions. A comparison of methane emissions from coal mines with field leaks within the grid cell showed that CH<sub>4</sub> emissions in coal mines are almost 10 times higher than field leaks. Methane leaks in the field during production and transportation have tended to decrease since 2015. For coal mines, there is a positive trend in methane emissions. A close relationship is shown between ground-based measurements of methane concentration in Teriberka and an estimate of methane emissions based on CAMS-GLOB-ANT inventory data.

**Keywords:** anthropogenic methane emissions, online- service ECCAD, ground and satellite measurements, Teriberka, Siberia

### REFERENCES

- Anisimov O.A., Kokorev V.A. Sravnitel'nyj analiz nazemnyh, morskikh i sputnikovyh izmerenij metana v nizhnej atmosfere rossijskoj chasti Arktiki v usloviyah izmeneniya klimata [Comparative analysis of terrestrial, marine and satellite measurements of methane in the lower atmosphere of the Russian Arctic under climate change] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2015. № 2. P. 1–14. (In Russian).
- Belan B.D., Krekov G.M. Vliyanie antropogennogo faktora na sodержanie parnikovyh gazov v troposfere. 1. Metan [The influence of anthropogenic factors on the content of greenhouse gases in the troposphere. 1. Methane] // *Optika atmosfery i okeana*. 2012. Vol. 25. № 4. P. 361–373. (In Russian).
- Cicerone R.J., Oremland R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 1988. Vol. 2. No. 4. P. 299–327.
- Granier C., Bessagnet B., Bond T., D'Angiola A., van der Gon H.D., Frost G.J., Heil A., Kaiser J.W., Kinne S., Klimont Z., Kloster S., Lamarque J.-F., Lioussé C., Masui T., Meleux F., Mieville A., Ohara T., Raut J.-C., Riahi K., Schultz M.G., Smith S.J., Thompson A., van Aardenne J., van der Werf G.R., van Vuure D.P. Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period // *Climatic Change*. 2011. 109. P. 163–190. DOI: 10.1007/s10584-011-0154-1.
- Ivakhov V. (MGO), Paramonova N. (MGO). Atmospheric CH<sub>4</sub> at Teriberka by Voeikov Main Geophysical Observatory, dataset published as CH4\_TER\_surface-flask\_MGO\_data1 at WDCGG, ver. 2021-10-17-2320, [https://doi.org/10.50849/WDCGG\\_0046-6003-1002-01-02-9999](https://doi.org/10.50849/WDCGG_0046-6003-1002-01-02-9999) (Reference date: 2022/01/05).
- Jackson R.B., Saunio M., Martinez A., Canadell J.G., Yu X., Li M., Poulte B., Raymond P.A., Regnier P., Ciais P., Davis S.J., and Patra P.K. Human activities now fuel two-thirds of global methane emissions // *Environ. Res. Lett.* 19 (2024) 101002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad6463>.
- Kiselev A.A., Karol' I.L. S metanom po zhizni. SPb: GGO im. A.I. Voejkova. 2019. — 73 s. (In Russian).
- Lamarque J.-F., Bond T.C., Eyring V., Granier C., Heil A., Klimont Z., Lee D., Lioussé C., Mieville A., Owen B., Schultz M.G., Smith S.J., Thompson A., van Aardenne J., van der Werf G.R., van Vuure D.P. Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period // *Climatic Change*. 2011. 109. P. 163–190. DOI: 10.1007/s10584-011-0154-1.

*Shindell D., Smith S.J., Stehfest E., Van Aardenne J., Cooper O.R., Kainuma M., Mahowald N., McConnell J.R., Naik V., Riahi K., and van Vuuren D.P.* Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. 10. P. 7017–7039.

*Rodionova N.V.* Korrelyatsiya nazemnyx i sputnikovyx izmerenij koncentracii metana v prizemnom sloe atmosfery, v rajone Tiksi [Correlation of ground-based and satellite measurements of methane concentration in the surface layer of the

atmosphere in the Tiksi region] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2022. №4. P. 3–11. (In Russian).

*Yurganov L.N., Lejfer A., Majr K. Lund.* Sezonnaya i mezhdovaya izmenchivost, atmosfernogo metana nad moryami Severnogo Ledovitogo okeana po sputnikovym dannym [Seasonal and interannual variability of atmospheric methane over the seas of the Arctic Ocean according to satellite data] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. Vol. 13. № 2. P. 107–119. (In Russian).