



УДК 551.24+504.5+504.064.37
DOI 10.52575/2712-7443-2023-47-4-580-592

Потоки метана в тропосфере: геологические и антропогенные источники (по данным Sentinel-5P TROPOMI)

Гусев А.П.

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
Республика Беларусь, 246019, г. Гомель, ул. Советская, 104
E-mail: andi_gusev@mail.ru

Аннотация. Цель исследований – изучение взаимосвязи потоков метана (измеряемых с помощью дистанционного зондирования Земли) с геологическими и антропогенными источниками. По результатам съемки Sentinel-5P TROPOMI (лето 2022 года) получены содержания метана в тропосфере над регионами Восточной Европы, Юго-Западной Азии и Средней Азии. Повышенные концентрации метана (более 1900 ppb) характерны для Катара, Афганистана, Кувейта, Туркменистана, Пакистана и других стран, находящихся в зоне столкновения литосферных плит и обладающих высокой нефтегазоносностью недр. Установлена положительная корреляция между средним и медианным содержаниями тропосферного метана и сейсмической активностью (коэффициенты корреляции соответственно 0,756 и 0,786), запасами природного газа (0,745 и 0,759), поголовьем крупного рогатого скота (0,403 и 0,336), плотностью населения (0,322 и 0,447). Среднее содержание метана над городами положительно коррелирует с сейсмической активностью (0,557) и с численностью населения (0,355).

Ключевые слова: метан, Sentinel-5P, TROPOMI, корреляция, сейсмическая активность

Для цитирования: Гусев А.П. 2023. Потоки метана в тропосфере: геологические и антропогенные источники (по данным Sentinel-5P TROPOMI). Региональные геосистемы, 47(4): 580–592. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-580-592

Methane Flows in the Troposphere: Geological and Anthropogenic Sources (According to Sentinel-5P TROPOMI Data)

Andrei P. Gusev

F. Skorina Gomel State University
104 Sovetskaya St, Gomel 246019, Republic of Belarus
E-mail: andi_gusev@mail.ru

Abstract. The purpose of the research is to study the relationship between methane flows (measured by remote sensing of the Earth) and geological and anthropogenic sources. The results of the Sentinel-5P TROPOMI survey (summer 2022) made it possible to obtain data on the methane concentrations in the troposphere over the regions of Eastern Europe, Southwest Asia, and Central Asia. Increased methane concentrations (more than 1900 ppb) are characteristic of Qatar, Afghanistan, Kuwait, Turkmenistan, Pakistan and other countries located in the collision zone of lithospheric plates and possessing high oil and gas subsoil. A positive correlation between the average and median concentrations of tropospheric methane and seismic activity (correlation coefficients 0.756 and 0.786, respectively), natural gas reserves (0.745 and 0.759), cattle population (0.403 and 0.336), population density (0.322 and 0.447) was established. The average methane content over the cities positively correlates with seismic activity (0.557) and population density (0.355).

Key words: methane, Sentinel-5P, TROPOMI, correlation, seismic activity

For citation: Gusev A.P. 2023. Methane Flows in the Troposphere: Geological and Anthropogenic Sources (According to Sentinel-5P TROPOMI Data). *Regional Geosystems*, 47(4): 580–592. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-580-592

Введение

Метан (CH₄) играет важную роль в биосфере, что обусловлено взаимодействием метанового цикла с другими биогеохимическими циклами, влиянием метана на климат планеты, на перенос радиации и химические процессы в атмосфере [Елисеев, 2018; Семенов и др., 2018; Киселев, Кароль, 2019; Метан и климатические..., 2022]. Распространенные оценки эмиссии метана базируются на численном моделировании и инструментальных измерениях на локальных ключевых участках [Елисеев, 2018; Гречушникова, Школьный, 2019; Степаненко и др., 2020; Власов и др., 2021]. Считается, что на глобальном, континентальном и субконтинентальном уровнях наиболее надежными являются оценки, основанные на использовании моделей переноса и химических реакций в атмосфере, а на местном уровне – оценки, основанные на непосредственных измерениях [Елисеев, 2018].

Естественные потоки метана составляют от 183 до 248 млн т/год с наиболее вероятной оценкой 215 млн т/год. Среди природных источников метана доминируют: болота и переувлажненные земли, пресноводные водоемы, термиты. На геологические источники приходится 33–75 млн т/год [Киселев, Кароль, 2019; Метан и климатические..., 2022]. По другим данным вклад геологических источников в глобальную эмиссию метана составляет 30 ± 5 % от его глобальной эмиссии или от 40 до 64 млн т/год [Гаркуша, Федоров, 2019].

Антропогенные потоки метана в атмосферу оцениваются в 336–375 млн т/год [Семенов и др., 2018; Киселев, Кароль, 2019; Метан и климатические..., 2022]. Антропогенные процессы выделения метана: пищеварение домашних жвачных животных, рисоводство (деятельность анаэробных метаногенных бактерий), выделения из мест складирования отходов – свалок и сточных вод, выбросы при добыче угля, горение биомассы и топлива, выбросы при добыче, переработке, транспортировке, использовании природного газа, выбросы попутного нефтяного газа [Семенов и др., 2018; Киселев, Кароль, 2019; Monster et al., 2019; Метан и климатические..., 2022].

Отмечается заметная неопределенность оценок потоков метана, особенно в случае природных источников [Елисеев, 2018]. Так, по оценке [Сывороткин, 2002] ежегодный поток метана может составлять 1000–5000 млн т. Однако, как указывается в работе [Гаркуша, Федоров, 2019], большая часть метана, выделяющегося из подводных источников, окисляется микроорганизмами в верхних слоях донных осадков и водной толще. Поток метана, достигающий атмосферы, здесь зависит от глубины, скорости выброса метана, насыщенности метаном донных отложений. На суше поток метана зависит от микроорганизмов-метанотрофов, населяющих почву.

Космические методы играют важную роль в изучении геологических процессов¹. На основе спутниковых наблюдений стало возможно изучение выбросов метана на региональном и глобальном уровнях [Hu et al., 2018; Lunt et al., 2019; Maasackers et al., 2019; Schneising et al., 2020; Varay et al., 2021; Lorente et al., 2021; Chen et al., 2022; Shen et al., 2022]. На основе анализа комплекса данных (в том числе спутниковых наблюдений) проведена оценка эмиссии метана на территории США, Канады и Мексики в 2010–2017 гг. Обнаружена тенденция снижения антропогенных выбросов в Канаде и Мексике, обусловленных добычей и транспортировкой нефти и газа [Varay et al., 2021, Lu et al.,

¹ Гусев А.П. 2022. Спутниковый мониторинг геодинамики. Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 90 с.



2022]. Измерения содержания метана с высокой точностью и исключительным временным и пространственным разрешением обеспечивает сенсор *TROPOMI* спутника *Sentinel-5P*, что делает эти данные весьма ценными для оценки выбросов [Lorente et al., 2022]. Проведена валидация данных *Sentinel-5P TROPOMI* с помощью наземных наблюдений [Lorente et al., 2023]. В работе [Shen et al., 2022] показано, что *TROPOMI* может служить эффективным инструментом мониторинга выбросов метана в нефтегазовых бассейнах. Съемка *TROPOMI* была использована для оценки выбросов метана в городах США [Plant et al., 2022]. В ряде случаев показано, что поток метана, определяемый дистанционным зондированием Земли, выше, чем полученный с помощью моделирования или расчетов. Так, изучение эмиссии метана со свалок Буэнос-Айреса, Дели, Лахора и Мумбаи установило, что выбросы метана, зафиксированные спутниковой съемкой, на уровне города в 1,4–2,6 раза больше, чем по кадастровым данным [Maasackers et al., 2022].

Цель исследований – выяснить связь потоков метана, измеряемых с помощью спутника *Sentinel-5P TROPOMI*, с геологическими и антропогенными источниками. Решаемые задачи: 1) обработка и преобразование данных дистанционного зондирования (съемка сенсора *TROPOMI* спутника *Sentinel-5P*); 2) определение содержаний тропосферного метана над различными территориальными единицами (страны, крупные города); 3) изучение корреляционной связи между содержанием метана и сейсмической активностью, нефтегазоносностью недр, плотностью населения, численностью поголовья крупного рогатого скота (на примере стран), с сейсмической активностью и численностью населения (на примере городов).

Объекты и методы исследования

Потоки метана изучались над территориями: а) стран Восточной Европы, Юго-Западной и Средней Азии, в пределах Российской Федерации – субъектов европейской части страны (85 объектов); б) крупных городов – столиц, областных центров (всего 40 городов).

В ходе работы были использованы данные космической съемки спутника *Sentinel-5P* с сенсором *TROPOMI* (*TROPospheric Monitoring Instrument*), который определяет общее содержание метана в вертикальном столбе тропосферы. Измерения осуществляются ежедневно с октября 2017 года. Пространственное разрешение съемки 7x5,5 км. Величина случайной ошибки определения метана сенсором *TROPOMI* составляет не более 1 %. Данные находятся в свободном доступе на сайте NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/>) и представлены в виде архива (xxx.nc) значений концентрации сухого метана в толще атмосферы в миллиардных долях от объема (ppb). Архив преобразовывался нами с помощью модуля *Sentinel-5P data explorer* для *QGIS* в векторные слои точечного типа.

Поскольку атмосферные циркуляции на разных высотах рассеивают и перемешивают по горизонтали поток метана, то использовался метод осреднения измерений в заданном временном отрезке (лето 2022 года), что позволяет сгладить случайные колебания и выделить регулярную составляющую потока метана от земной поверхности. По данным съемок в течение июня – августа 2022 года получали временной ряд содержаний метана, для которого рассчитывали статистические характеристики – среднее, медиана, ошибка среднего, стандартное отклонение, интервал колебаний, минимальное и максимальное значения.

Для оценки связи между содержанием метана и характеристиками вероятных источников использованы непараметрический корреляционный анализ (рассчитывался коэффициент ранговой корреляции Спирмена) и метод множественной регрессии. Для статистического анализа применяли программу *STATISTICA 6.0*.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследований были получены усредненные за летний период содержания тропосферного метана по регионам Восточной Европы, Юго-Западной Азии и Средней Азии (рис. 1). В табл. 1 приведены данные по наиболее характерным регионам, существенно отличающимся в тектоническом отношении. Так, Беларусь, Литва и Польша находятся в пределах древней Восточно-Европейской платформы, их территории удалены от зон современной сейсмической активности и вулканизма на сотни километров. Страны Юго-Западной Азии представляют область столкновения Африканской, Аравийской, Индостанской и Евразийской литосферных плит [Collision and Collapse..., 2009]. Видно, что содержание метана в условиях древней платформы ниже, чем в регионах современного тектогенеза. Кроме того, повышенные концентрации метан наблюдаются над территориями стран-лидеров по добыче нефти и природного газа – Ираном, Ираком, Катаром, Кувейтом, Саудовской Аравией, Туркменистаном.

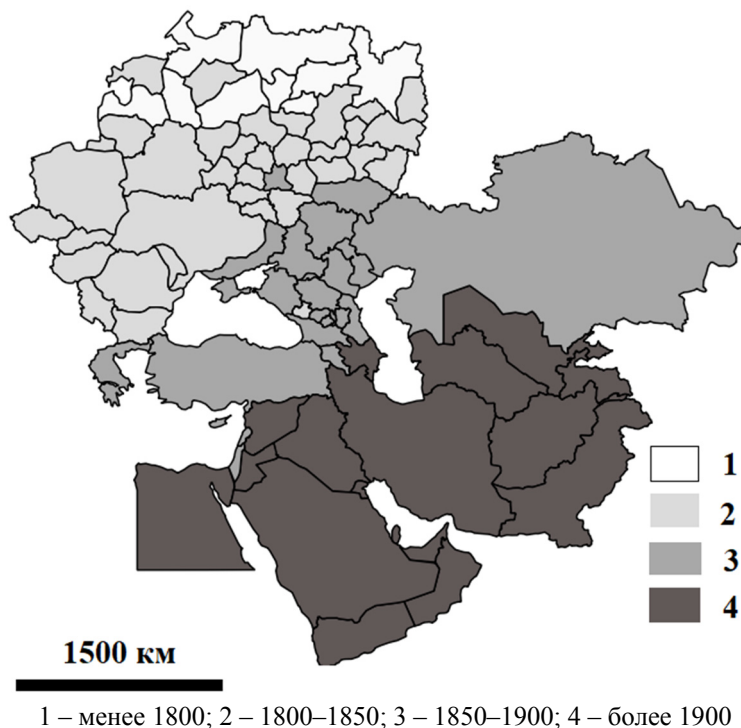


Рис. 1. Содержание метана в тропосфере над странами – лидерами по добыче нефти и природного газа летом 2022 года по данным съемки Sentinel-5P TROPOMI (ppb)

Fig. 1. Methane content in the troposphere over leading countries in oil and natural gas production in the summer of 2022 according to Sentinel-5P TROPOMI survey data (ppb)

Среди субъектов Российской Федерации наибольшая концентрация метана наблюдалась над Дагестаном ($1895,8 \pm 4,7$ ppb), Чеченской Республикой ($1890,9 \pm 6,0$ ppb), Республикой Калмыкией ($1892,2 \pm 2,9$ ppb), Астраханской областью ($1888,8 \pm 3,0$ ppb). Минимальные концентрации метана (менее 1800 ppb) были характерны для Ивановской, Ярославской, Кировской, Костромской, Псковской, Тверской и Вологодской областей.

При этом, повышенные концентрации тропосферного метана наблюдаются над странами, которые характеризуются незначительными площадями болот (Туркменистан, Афганистан и т. д.), являющихся по распространенным оценкам [Елисеев, 2018] ведущими источниками эмиссии метана. И, наоборот, над регионами с широким распространением болот (Республика Беларусь, Ленинградская, Новгородская, Тверская и другие области Российской Федерации) концентрации метана относительно невысоки.

Таблица 1
 Table 1

Содержание тропосферного метана над странами (в ppb)
 Tropospheric methane content over countries (in ppb)

Регион	Статистическая характеристика		
	Среднее и ошибка	Медиана	Интервал
Беларусь	1815,4 ± 7,1	1827,1	1693,2–1888,1
Литва	1811,3 ± 7,1	1820,1	1695,7–1891,4
Польша	1819,6 ± 8,5	1837,4	1690,5–1886,4
Азербайджан	1903,8 ± 4,3	1908,1	1782,0–1941,9
Ирак	1911,4 ± 1,7	1911,8	1881,5–1933,6
Иран	1911,1 ± 2,2	1913,1	1882,3–1940,3
Катар	1925,3 ± 3,1	1924,6	1891,4–1966,4
Кувейт	1921,5 ± 2,9	1925,0	1800,9–1953,5
Турция	1881,7 ± 2,5	1883,8	1828,5–1912,7
Сирия	1910,2 ± 1,8	1913,6	1881,4–1933,7
Афганистан	1924,6 ± 4,2	1926,6	1891,4–1959,0
Пакистан	1918,3 ± 4,7	1910,3	1886,0–1963,4
Туркменистан	1924,9 ± 2,0	1927,2	1894,7–1946,4
Узбекистан	1912,2 ± 2,5	1911,3	1877,6–1932,1

Схожая пространственная закономерность характерна для максимальных концентраций метана (2000–2500 ppb) – разовых выбросов из мощных источников (рис. 2). Видно, что наиболее частые выбросы метана приурочены к регионам столкновения литосферных плит и нефтегазоносным областям.

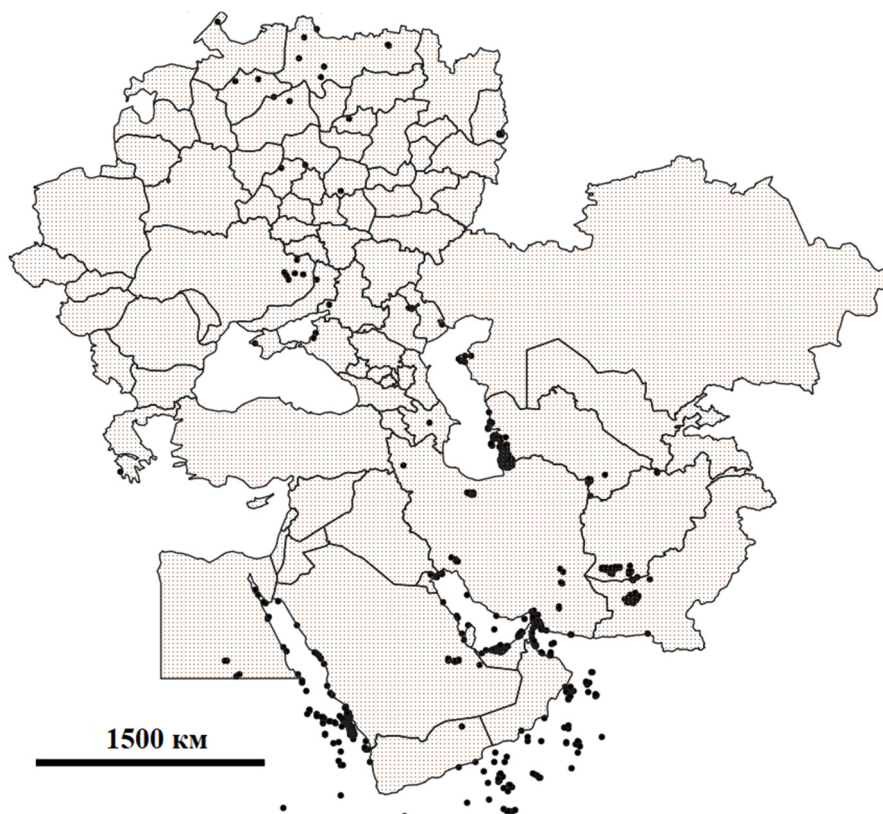


Рис. 2. Точки с максимальными концентрациями метана (более 2000 ppb) в августе 2022 года, по данным съемки Sentinel-5P TROPOMI
 Fig. 2. Points with maximum methane concentrations (more than 2000 ppb) in August 2022 according to Sentinel-5P TROPOMI survey data

Было изучено содержание метана над крупными городами (рис. 3). В табл. 2 приведены результаты по некоторым городам, представляющим различные регионы. Максимальные средние содержания отмечены над городами Тегеран (1933,6 ppb), Ашхабад (1926,1 ppb), Баку (1924,2 ppb), Эль-Кувейт (1920,1 ppb), Каир (1912,9 ppb), Ташкент (1911,2 ppb). Максимальные медианные содержания наблюдались также над этими же городами (Тегеран – 1932,9 ppb, Ашхабад – 1929,2 ppb, Баку – 1925,0 ppb и т. д.). Наибольший интервал колебаний концентраций метана в течение лета имел место в случае Санкт-Петербурга (480,5 ppb), Витебска (427,5 ppb), Могилева (405,8 ppb), Кишинёва (381,2 ppb), минимальный – Астрахани (77,8 ppb), Ашхабада (84,2 ppb), Ташкента (88,4 ppb), Волгограда (84,9 ppb), Баку (97,6 ppb). Кроме того, единичные максимальные концентрации метана наблюдались над Тегераном (2034,3 ppb), Воронежем (1972,8 ppb), Баку (1963,5 ppb), Эль-Кувейтом (1960,8 ppb), Каиром (1959,5 ppb), Ташкентом (1955,2 ppb).

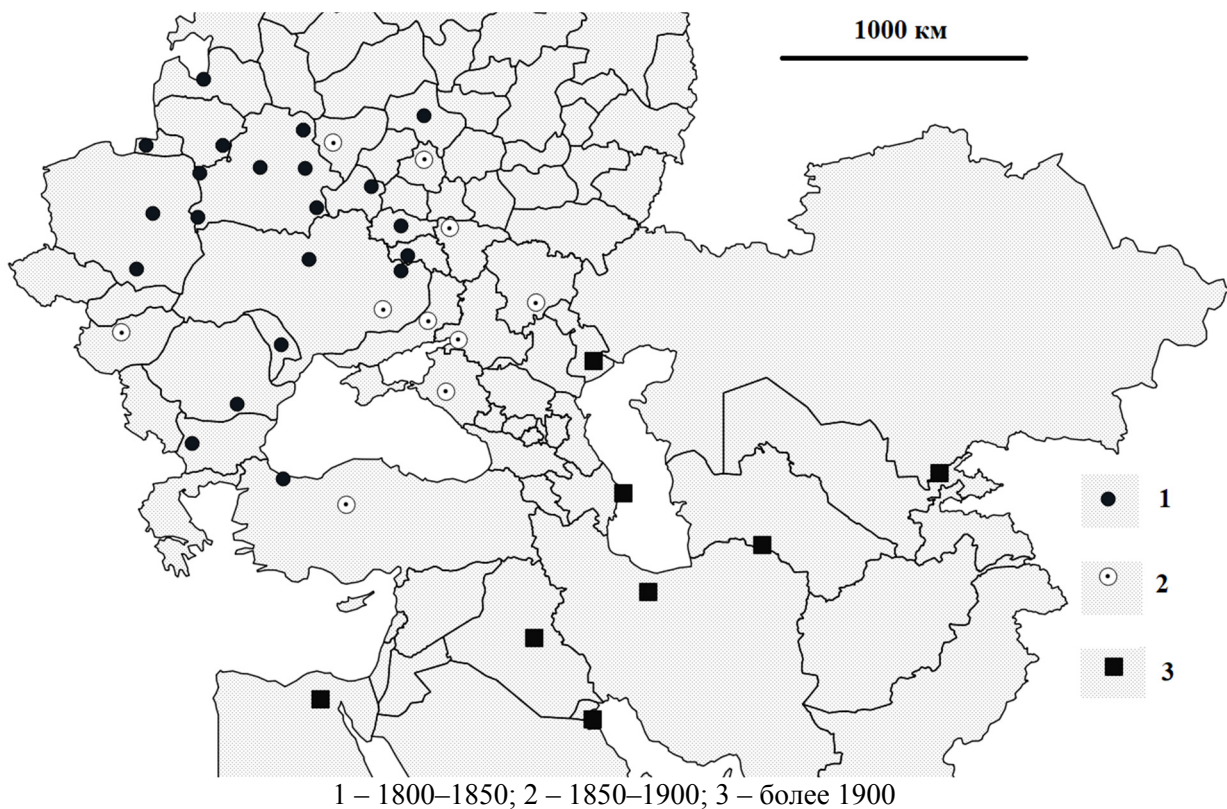


Рис. 3. Содержание метана в тропосфере над городами летом 2022 года, по данным съемки Sentinel-5P TROPOMI (ppb)

Fig. 3. Methane content in the troposphere over cities in the summer of 2022 according to Sentinel-5P TROPOMI survey data (ppb)

Содержание метана над городами сравнивалось с фоновым содержанием, т. е. средней концентрацией над территорией соответствующей страны (табл. 2). Выше фоновых значений среднее содержание метана над такими городами, как Астрахань (на 12,5 ppb), Баку (на 20,4 ppb), Брянск (на 32,9 ppb), Краснодар (30,6 ppb), Смоленск (60,1 ppb), Тегеран (22,5 ppb), Воронеж (25,0 ppb), Санкт-Петербург (41,6 ppb) и другие (всего в 59,0 % изученных городов). Среднее значения превышения фона для этой группы городов составляет 23,7 ppb. Однако превышения фонового содержания метана над городами в большинстве случаев статистически не достоверно. Кроме того, не превышают фоновые для всей страны значения содержания метана над Ашхабадом, Багдадом, Ташкентом, Белгородом, Курском, Каиром, Киевом, Стамбулом и т. д. (всего в 41,0 % городов).



В качестве факторов, влияющих на содержание метана в тропосфере, были рассмотрены: сейсмическая активность (оценивалась по риску максимальной интенсивности сейсмических сотрясений с вероятностью 10 % за 50 лет по шкале MSK-64 в баллах), запасы природного газа в месторождениях и добыча природного газа, поголовье крупного рогатого скота, плотность населения. Для городов – сейсмическая активность и численность населения.

Таблица 2
 Table 2

Содержание тропосферного метана над городами (в ppb)
 The content of tropospheric methane above the mountains (in ppb)

Город	Среднее и ошибка	Фоновое значение и его ошибка
Анкара	1896,3 ± 2,2	1881,7 ± 2,5
Астрахань	1901,3 ± 3,7	1888,8 ± 3,0
Ашхабад	1926,1 ± 1,4	1924,9 ± 2,0
Баку	1924,2 ± 0,8	1903,8 ± 4,3
Будапешт	1866,9 ± 4,0	1829,3 ± 3,2
Варшава	1804,0 ± 11,1	1819,5 ± 8,1
Воронеж	1875,0 ± 4,5	1850,0 ± 5,3
Каир	1912,9 ± 1,1	1908,3 ± 1,8
Киев	1817,2 ± 7,0	1839,4 ± 7,3
Минск	1840,7 ± 6,1	1817,8 ± 10,1
Москва	1832,3 ± 5,2	1809,5 ± 8,1
Санкт-Петербург	1838,1 ± 3,6	1796,5 ± 7,9
Ташкент	1911,2 ± 2,6	1912,2 ± 2,5
Тегеран	1933,6 ± 1,1	1911,1 ± 2,2

Сейсмическая активность отражает геодинамические процессы, обусловленные преимущественно тектоникой литосферных плит. Рост сейсмической активности приурочен к границам литосферных плит – зонам субдукции и коллизии, трансформным границам, рифтам¹. Здесь имеет место максимальное проявление дегазации земных недр, в том числе, метановой [Сывороткин, 2002]. Контролируют дегазацию глубинные разломы, причем в случае «сквозных» разломов (выходящих на земную поверхность) дегазация имеет концентрированный характер, а в случае разломов, перекрытых мощным осадочным чехлом, – рассредоточенный. В сейсмоактивных районах к зонам разломов тяготеют очаги землетрясений. Между сейсмическими процессами и дегазацией (и глубинным флюидопереносом в целом) существует тесная взаимосвязь. Потоки газов (в том числе метана) в морских бассейнах указывают на зоны разломов, а динамика их содержания коррелирует с сейсмотектоническими процессами [Шакиров, 2018].

Тесно связана с геодинамическими процессами нефтегазоносность недр. Так, согласно рифтогенной модели нефтегазообразования, генерация углеводородов в рифтовых бассейнах протекает за счет термолиза органического вещества осадочной толщи. Субдукционно-обдукционная модель нефтегазообразования предусматривает мобилизацию органики осадочной толщи континентальной окраины при надвигании на нее островной дуги или края другого континента.

По запасам природного газа в месторождениях можно косвенно судить о метанона-

¹ Гаврилов В.П. 2007. Геодинамика. М., МАКС Пресс, 346 с.

сыщенности недр, по добыче природного газа – о возможных утечках метана при извлечении из недр и транспортировке. Метан составляет 70–98 % добываемого природного газа [Шевелева, 2020]. Метан используется в бытовых целях, в качестве газомоторного топлива для промышленного органического синтеза, для получения продуктов хлорирования и т. д. Структура выбросов метана в нефтегазовом комплексе: добыча газа – 47 %, добыча нефти – 20 %, транспортировка и хранение – 19 %, распределение – 7 %, переработка – 7 % [Шевелева, 2020]. Имеются сведения, что над районами активной нефтегазодобычи в США съемка *Sentinel-5P TROPOMI* зафиксировала повышенные содержания метана [Schneising et al., 2020]. Как указывалось выше, высокие концентрации тропосферного метана устойчиво наблюдаются над городами, расположенными в пределах нефтегазовых месторождений (Баку, Эль-Кувейт).

Поголовье крупного рогатого скота обуславливает величину потока метана, связанного с данным фактором. Плотность населения – один из важных показателей антропогенной нагрузки в целом, поскольку коррелирует с величиной выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, объемами образования твердых коммунальных отходов, объемами используемого газа в жилищно-коммунальном хозяйстве. В случае городов использовалась численность населения, которая также характеризует уровень антропогенной нагрузки. На территории городов имеются разнообразные источники эмиссии метана, однако их вклад в общий поток практически не изучен [Кулачкова, Коваленко, 2021].

В разных регионах вклад того или иного фактора может существенно варьироваться. Так, например, в случае Пакистана повышенный поток метана может объясняться наличием как значительных по запасам газовых месторождений и сейсмоструктурной активностью, так и антропогенной составляющей, обусловленной высокой плотностью населения (280,9 чел./км²) и самым большим среди всех рассматриваемых стран поголовьем крупного рогатого скота (53,9 млн голов). В случае Катара или Кувейта роль крупного рогатого скота в повышенном потоке метана будет минимальна, а нефтегазоносности недр (и соответственно утечек метана при добыче и транспортировке углеводородов) – максимальна.

Для оценки влияния указанных факторов на потоки метана был проведен корреляционный анализ (рассчитывался коэффициент ранговой корреляции Спирмена). Установлено, что содержание метана в тропосфере положительно коррелирует с сейсмической активностью, запасами природного газа в месторождениях, добычей природного газа, численностью поголовья крупного рогатого скота и плотностью населения (табл. 3).

Однако величина коэффициентов корреляции существенно различается. Наибольшая – между содержанием метана и сейсмической активностью (0,756 – для среднего содержания, 0,786 – для медианного). Величина коэффициентов корреляции между содержанием метана и запасами природного газа чуть меньше (0,745 – для среднего, 0,759 – для медианного содержания). Существенно ниже коэффициенты корреляции содержания метана с поголовьем крупного рогатого скота (соответственно 0,403 и 0,336) и плотностью населения (соответственно 0,322 и 0,447).

Для выяснения того, какие из рассматриваемых факторов вносят больший вклад был использован метод множественной регрессии, который показал следующие результаты. В качестве зависимого фактора выступало среднее содержание метана за летний период 2022 года, в качестве независимых факторов – сейсмическая активность, плотность населения, численность поголовья крупного рогатого скота, запасы природного газа в месторождениях. В уравнение множественной регрессии достоверно вошли только сейсмическая активность и запасы природного газа в месторождениях. Коэффициент детерминации R^2 составил 0,573. Для медианного значения содержания метана был получен аналогичный результат.



Таблица 3
 Table 3

Корреляция между содержанием метана в тропосфере и показателями источников потенциального метанообразования (коэффициент корреляции Спирмена)
 Correlation between the content of methane in the troposphere and indicators of sources of potential methane production (Spearman correlation coefficient)

Показатель	Среднее содержание метана	Медианное содержание метана
Страны		
Сейсмическая активность (максимальная интенсивность сейсмических сотрясений с вероятностью 10 % за 50 лет, балл по шкале MSR-64)	0,756, $p < 0,00001$	0,786, $p < 0,00001$
Запасы природного газа в месторождениях (трлн т)	0,745, $p < 0,00001$	0,759, $p < 0,00001$
Добыча природного газа (млрд т в год)	0,653, $p < 0,00001$	0,672, $p < 0,00001$
Численность поголовья крупного рогатого скота (млн голов)	0,403, $p < 0,001$	0,336, $p < 0,01$
Плотность населения (чел./км ²)	0,322, $p < 0,01$	0,447, $p < 0,001$
Города		
Сейсмическая активность (максимальная интенсивность сейсмических сотрясений с вероятностью 10 % за 50 лет, балл по шкале MSR-64)	0,557, $p < 0,001$	0,504, $p < 0,01$
Численность населения, млн человек	0,355, $p < 0,05$	0,166, $p > 0,05$

Среднее содержание метана над городами положительно коррелирует с баллом сейсмической активности (коэффициент корреляции Спирмена составляет 0,557) и с численностью населения (0,355). Медианное содержание тропосферного метана над городами достоверно коррелирует только с баллом сейсмической активности (0,504). Статически значимая корреляция между медианным содержанием метана и численность населения отсутствует. Кроме того, содержание метана над городами положительно коррелирует со средним содержанием метана над территорией соответствующей страны (для среднего коэффициент Спирмена составил 0,702, для медианного – 0,687).

Заключение

Таким образом, на основе анализа съемки спутника *Sentinel-5P TROPOMI* в летний период 2022 года получены следующие выводы:

- наибольшие концентрации тропосферного метана отмечаются над странами, расположенными в областях повышенной сейсмической активности и нефтегазоносности недр, приуроченных к зонам столкновения литосферных плит (Туркменистан, Афганистан, Катар, Кувейт, Пакистан);
- наименьшие концентрации тропосферного метана наблюдаются над странами, расположенными в пределах древних платформ (Беларусь, Польша, Литва и другие);
- содержания метана над городами в большинстве случаев статистически достоверно не отличаются от фоновых содержаний для соответствующих стран;
- установлена корреляция между содержанием метана и сейсмической активностью, запасами природного газа в месторождениях, численностью поголовья крупного рогатого скота и плотностью населения стран изучаемых регионов;
- содержание метана над городами достоверно коррелирует с сейсмической активностью и в меньшей степени с численностью населения.

Исходя из полученных результатов, можно сделать заключение, что повышенные концентрации метана в тропосфере над рассматриваемыми регионами, вероятно, могут быть обусловлены в значительной степени современной геодинамической активностью и нефтегазонасностью недр (включая эмиссии метана при разработке месторождений углеводородов).

Список литературы

- Власов С.В., Коновалова О.В., Чудовская И.В., Власова И.В., Колотилова Н.Н., Снакин В.В. 2021. Метан в атмосфере, метанотрофы и развитие нефтегазовой промышленности. М., МАКС Пресс, 140 с. <https://doi.org/10.29003/m1986.978-5-317-06580-5>.
- Гаркуша Д.Н., Федоров Ю.А. 2019. Глобальная эмиссия метана геологическими источниками. Международный научно-исследовательский журнал, 3(81): 37–51. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.81.3.006>.
- Гречушникова М.Г., Школьный Д.И. 2019. Оценки эмиссии метана водохранилищами России. Водное хозяйство России. 2: 58–71.
- Елисеев А.В. 2018. Глобальный цикл метана: обзор. Фундаментальная и прикладная климатология. 1: 52–70. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-52-70>.
- Киселев А.А., Кароль И.Л. 2019. С метаном по жизни. Санкт-Петербург, Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 73 с.
- Кулачкова С.А., Коваленко А.В. 2021. Городские почвы одного из районов новой Москвы как источники поступления метана и углекислого газа в атмосферу. Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение, 4: 31–46.
- Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты. 2022. М., РАН, 388 с.
- Семенов С.М., Говор И.Л., Уварова Н.Е. 2018. Роль метана в современном изменении климата. М., НИИПЭ, 106 с.
- Степаненко В.М., Гречушникова М.Г., Репина И.А. 2020. Численное моделирование эмиссии метана из водохранилищ. Фундаментальная и прикладная климатология, 2: 76–99. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-2-76-99>.
- Сывороткин В.Л. 2002. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М., Геоинформцентр, 250 с.
- Шакиров Р.Б. 2018. Газогеохимические поля окраинных полей Восточной Азии. М., ГЕОС, 341 с.
- Шевелева Н.А. 2020. Управление выбросами метана в нефтегазовом секторе. Научный журнал Российского газового общества, 3(26): 48–59.
- Baray S., Jacob D.J., Maasackers J.D., Sheng J.-X., Sulprizio M.P., Jones D.B.A., Bloom A.A., McLaren R. 2021. Estimating 2010–2015 Anthropogenic and Natural Methane Emissions in Canada Using ECCS Surface and GOSAT Satellite Observations. Atmospheric Chemistry and Physics, 21: 18101–18121. <https://doi.org/10.5194/acp-21-18101-2021>.
- Chen Z., Jacob D.J., Nesser H., Melissa P., Sulprizio, Alba Lorente, Daniel J. Varon, Xiao Lu, Lu Shen, Zhen Qu, Elise Penn, and Xueying Yu. 2022. Methane Emissions from China: a High-Resolution Inversion of TROPOMI Satellite Observations. Atmospheric Chemistry and Physics, 22: 10809–10826. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10809-2022>.
- Collision and Collapse at the Africa–Arabia–Eurasia Subduction Zone 2009. Geological Society. Special Publications, 311: 368.
- Hu H., Landgraf J., Detmers R., Borsdorff T., de Brugh J.A., Aben I., Butz A., Hasekamp O. 2018. Toward Global Mapping of Methane with TROPOMI: First Results and Intersatellite Comparison to GOSAT. Geophysical Research Letters, 45: 3682–3689. <https://doi.org/10.1002/2018GL077259>
- Lorente A., Borsdorff T., Butz A., Hasekamp O., de Brugh J.A., Schneider A., Wu L., Hase F., Kivi R., Wunch D., Pollard D.F., Shiomi K., Deutscher N.M., Velasco V.A., Roehl C.M., Wennberg P.O., Warneke T., Landgraf J. 2021. Methane Retrieved from TROPOMI: Improvement of the Data Product and Validation of the First 2 Years of Measurements. Atmospheric Measurement Techniques, 14: 665–684.
- Lorente A., Borsdorff T., Martinez-Velarte M.C., Butz A., Hasekamp O.P., Wu L., Landgraf J. 2022. Evaluation of the Methane Full-Physics Retrieval Applied to TROPOMI Ocean Sun Glint



- Measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15: 6585–6603. <https://doi.org/10.5194/amt-15-6585-2022>
- Lorente A., Borsdorff T., Martinez-Velarte M.C., Landgraf J. 2023. Accounting for Surface Reflectance Spectral Features in TROPOMI Methane Retrievals. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16: 1597–1608.
- Lu X., Jacob D.J., Wang H., Maasackers J.D., Zhang Y., Scarpelli T.R., Shen L., Qu Z., Sulprizio M.P., Nesser H., Bloom A.A., Ma S., Worden J.R., Fan S., Parker R.J., Boesch H., Gautam R., Gordon D., Moran M.D., Reuland F., Villasana C.A.O., Andrews A. 2022. Methane Emissions in the United States, Canada, and Mexico: Evaluation of National Methane Emission Inventories and 2010–2017 Sectoral Trends by Inverse Analysis of in Situ (GLOBALVIEWplus CH₄ ObsPack) and Satellite (GOSAT) Atmospheric Observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22: 395–418. <https://doi.org/10.5194/acp-22-395-2022>
- Lunt M.F., Palmer P.I., Feng L., Taylor C.M., Boesch H., Parker R.J. 2019. An Increase in Methane Emissions from Tropical Africa between 2010 and 2016 Inferred from Satellite Data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(23): 14721–14740. <https://doi.org/10.5194/acp-19-14721-2019>
- Maasackers J.D., Jacob D.J., Sulprizio M.P., Scarpelli T.R., Nesser H., Sheng J.-X., Zhang Y., Hersher M., Bloom A.A., Bowman K.W., Worden J.R., Janssens-Maenhout G., Parker R.J. 2019. Global Distribution of Methane Emissions, Emission Trends, and OH Concentrations and Trends Inferred from an Inversion of GOSAT Satellite Data for 2010–2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19: 7859–7881. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7859-2019>
- Maasackers J.D., Varon D.J., Elfarsdyttir A., McKeever J., Jervis D., Mahapatra G., Pandey S., Lorente A., Borsdorff T., Foorhuis L.R., Schuit B.J., Tol P., van Kempen T.A., van Hees R., Aben I. 2022. Using Satellites to Uncover Large Methane Emissions from landfills. *Science advances*, 8: 1–8.
- Monster J., Kjeldsen P., Scheutz C. 2019. Methodologies for Measuring Fugitive Methane Emissions from Landfills: A Review. *Waste Management*, 87: 835–859.
- Plant G., Kort E.A., Murray L.T., Maasackers J.D., Aben I. 2022. Evaluating Urban Methane Emissions from Space Using TROPOMI Methane and Carbon Monoxide Observations. *Remote Sensing of Environment*, 268: 112756. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112756>
- Shen L., Gautam R., Omara M., Zavala-Araiza D., Maasackers J.D., Scarpelli T.R., Lorente A., Lyon D., Sheng J., Varon D.J., Nesser H., Qu Z., Lu X., Sulprizio M.P., Hamburg S.P., Jacob D.J. 2022. Satellite Quantification of Oil and Natural Gas Methane Emissions in the US and Canada Including Contributions from Individual Basins. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22: 11203–11215. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11203-2022>
- Schneising O., Buchwitz M., Reuter M., Vanselow S., Bovensmann H., Burrows J.P. 2020. Remote Sensing of Methane Leakage from Natural Gas and Petroleum Systems Revisited. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20: 9169–9182.

References

- Vlasov S.V., Konovalova O.V., Chudovskaya I.V., Vlasova I.V., Kolotilova N.N., Snakin V.V. 2021. Methane in the Atmosphere, Methanotrophs and Development of Oil and Gas Industry. Moscow, Publ. MAKS Press, 140 p. (in Russian).
- Garkusha D.N., Fedorov Yu.A. 2019. Global Emission of Methane by Geological Sources. *International Scientific Research Journal*, 3(81): 37–51 (in Russian). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.81.3.006>
- Grechushnikova M.G., Shkolny D.I. 2019. Estimation of Methane Emission from Reservoirs of Russia. *Water Sector of Russia*, 2: 58–71 (in Russian).
- Eliseev A.V. 2018. Global Methane Cycle: a Review. *Fundamental and Applied Climatology*, 1: 52–70 (in Russian). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-52-70>
- Kiselev A.A., Karol I.L. 2019. S metanom po zhizni [With methane through life]. Sankt-Peterburg, Publ. Glavnaya geofizicheskaya observatoriya im. A.I. Voyeykova, 73 p.
- Kulachkova S.A., Kovalenko A.V. 2021. Urban Soils of One of the New Moscow Districts as Sources of Methane and Carbon Dioxide to the Atmosphere. *Lomonosov Soil Science Journal*, 4: 31–46 (in Russian).
- Metan i klimaticheskkiye izmeneniya: nauchnyye problemy i tekhnologicheskkiye aspekty [Methane and Climate Change: Scientific Problems and Technological Aspects]. 2022. Moscow, Publ. RAN, 388 p.

- Semenov S.M., Govor I.L., Uvarova N.E. 2018. Rol' metana v sovremennom izmenenii klimata [The Role of Methane in Modern Climate Change]. Moscow, Publ. NIPE, 106 p.
- Stepanenko V.M., Grechushnikova M.G., Repina I.A. 2020. Numerical Simulation of Methane Emission from an Artificial Reservoir. *Fundamental and Applied Climatology*, 2: 76–99 (in Russian). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-2-76-99>.
- Syvorotkin V.L. 2002. Glubinnaya degazatsiya Zemli i global'nyye katastrofy [Deep Degassing of the Earth and Global Disasters]. Moscow, Publ. Geoinformatsentr, 250 p.
- Shakirov R.B. 2018. Gasgeochemical Fields of the Eastern Asia Marginal Seas. Moscow, Publ. GEOS, 341 p. (in Russian)
- Sheveleva N.A. 2020. Methane Emissions Control in the Oil and Gas Industry. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo gazovogo obshchestva*, 3(26): 48–59 (in Russian).
- Baray S., Jacob D.J., Maasackers J.D., Sheng J.-X., Sulprizio M.P., Jones D.B.A., Bloom A.A., McLaren R. 2021. Estimating 2010–2015 Anthropogenic and Natural Methane Emissions in Canada Using ECCO Surface and GOSAT Satellite Observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21: 18101–18121. <https://doi.org/10.5194/acp-21-18101-2021>.
- Chen Z., Jacob D.J., Nesser H., Melissa P. Sulprizio, Alba Lorente, Daniel J. Varon, Xiao Lu, Lu Shen, Zhen Qu, Elise Penn, and Xueying Yu. 2022. Methane Emissions from China: a High-Resolution Inversion of TROPOMI Satellite Observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22: 10809–10826. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10809-2022>.
- Collision and Collapse at the Africa–Arabia–Eurasia Subduction Zone 2009. Geological Society. Special Publications, 311: 368.
- Hu H., Landgraf J., Detmers R., Borsdorff T., de Brugh J.A., Aben I., Butz A., Hasekamp O. 2018. Toward Global Mapping of Methane with TROPOMI: First Results and Intersatellite Comparison to GOSAT. *Geophysical Research Letters*, 45: 3682–3689. <https://doi.org/10.1002/2018GL077259>
- Lorente A., Borsdorff T., Butz A., Hasekamp O., de Brugh J.A., Schneider A., Wu L., Hase F., Kivi R., Wunch D., Pollard D.F., Shiomi K., Deutscher N.M., Velasco V.A., Roehl C.M., Wennberg P.O., Warneke T., Landgraf J. 2021. Methane Retrieved from TROPOMI: Improvement of the Data Product and Validation of the First 2 Years of Measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14: 665–684.
- Lorente A., Borsdorff T., Martinez-Velarte M.C., Butz A., Hasekamp O.P., Wu L., Landgraf J. 2022. Evaluation of the Methane Full-Physics Retrieval Applied to TROPOMI Ocean Sun Glint Measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15: 6585–6603. <https://doi.org/10.5194/amt-15-6585-2022>
- Lorente A., Borsdorff T., Martinez-Velarte M.C., Landgraf J. 2023. Accounting for Surface Reflectance Spectral Features in TROPOMI Methane Retrievals. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16: 1597–1608.
- Lu X., Jacob D.J., Wang H., Maasackers J.D., Zhang Y., Scarpelli T.R., Shen L., Qu Z., Sulprizio M.P., Nesser H., Bloom A.A., Ma S., Worden J.R., Fan S., Parker R.J., Boesch H., Gautam R., Gordon D., Moran M.D., Reuland F., Villasana C.A.O., Andrews A. 2022. Methane Emissions in the United States, Canada, and Mexico: Evaluation of National Methane Emission Inventories and 2010–2017 Sectoral Trends by Inverse Analysis of in Situ (GLOBALVIEWplus CH4 ObsPack) and Satellite (GOSAT) Atmospheric Observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22: 395–418. <https://doi.org/10.5194/acp-22-395-2022>
- Lunt M.F., Palmer P.I., Feng L., Taylor C.M., Boesch H., Parker R.J. 2019. An Increase in Methane Emissions from Tropical Africa between 2010 and 2016 Inferred from Satellite Data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19 (23): 14721–14740. <https://doi.org/10.5194/acp-19-14721-2019>
- Maasackers J.D., Jacob D.J., Sulprizio M.P., Scarpelli T.R., Nesser H., Sheng J.-X., Zhang Y., Hersher M., Bloom A.A., Bowman K.W., Worden J.R., Janssens-Maenhout G., Parker R.J. 2019. Global Distribution of Methane Emissions, Emission Trends, and OH Concentrations and Trends Inferred from an Inversion of GOSAT Satellite Data for 2010–2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19: 7859–7881. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7859-2019>
- Maasackers J.D., Varon D.J., Elfarsdyttir A., McKeever J., Jervis D., Mahapatra G., Pandey S., Lorente A., Borsdorff T., Foorthuis L.R., Schuit B.J., Tol P., van Kempen T.A., van Hees R., Aben I. 2022. Using Satellites to Uncover Large Methane Emissions from landfills. *Science advances*, 8: 1–8.



- Monster J., Kjeldsen P., Scheutz C. 2019. Methodologies for Measuring Fugitive Methane Emissions from Landfills: A Review. *Waste Management*, 87: 835–859.
- Plant G., Kort E.A., Murray L.T., Maasackers J.D., Aben I. 2022. Evaluating Urban Methane Emissions from Space Using TROPOMI Methane and Carbon Monoxide Observations. *Remote Sensing of Environment*, 268: 112756. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112756>
- Shen L., Gautam R., Omara M., Zavala-Araiza D., Maasackers J.D., Scarpelli T.R., Lorente A., Lyon D., Sheng J., Varon D.J., Nesser H., Qu Z., Lu X., Sulprizio M.P., Hamburg S.P., Jacob D.J. 2022. Satellite Quantification of Oil and Natural Gas Methane Emissions in the US and Canada Including Contributions from Individual Basins. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22: 11203–11215. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11203-2022>
- Schneising O., Buchwitz M., Reuter M., Vanselow S., Bovensmann H., Burrows J.P. 2020. Remote Sensing of Methane Leakage from Natural Gas and Petroleum Systems Revisited. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20: 9169–9182.

Поступила в редакцию 03.10.2023;
поступила после рецензирования 29.10.2023;
принята к публикации 09.11.2023

Received October 03, 2023;
Revised October 29, 2023;
Accepted November 09, 2023

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гусев Андрей Петрович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий кафедрой геологии и географии, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Andrei P. Gusev, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Geology and Geography of Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus