DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-304-319 УДК 502.171, 504.7

# МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ АРКТИКИ В 2019—2021 гг. ПО ДАННЫМ СПЕКТРОМЕТРА ТКОРОМІ

В. И. Богоявленский, О. С. Сизов, Р. А. Никонов, И. В. Богоявленский ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 10 июня 2022 г.

Впервые выполнен комплексный анализ изменений концентрации метана в атмосфере (КМА) над сушей Циркумарктического мегарегиона и полуострова Ямал по данным спектрометра TROPOMI за 2019– 2021 гг. Установлено, что средняя КМА в мегарегионе все три года была примерно на 40–50 ppb ниже глобальной, а также ниже средней для полуострова Ямал на 2–12 ppb. Выявлены региональные особенности изменений КМА, в основном зависящие от температуры воздуха вблизи земной поверхности, влияющей на процессы эмиссии метана. Несмотря на снижение КМА на большей части Ямала в относительно холодном 2021 г., в его центральной части обнаружено аномальное повышение КМА, видимо, связанное с геологическими факторами, включая миграцию глубинного газа в районе озера Нейто по разломам, дробящим газоносные залежи Нейтинского месторождения. Несмотря на активное расширение освоения ресурсов углеводородов на полуострове Ямал, доля антропогенного вклада в изменения КМА представляется пренебрежимо малой.

**Ключевые слова:** Ямал, парниковые газы, метан, эмиссия газа, концентрация метана в атмосфере (КМА), кратеры выброса газа, термокарстовые озера, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), спектрометр TROPOMI.

# Введение

В последнее десятилетие резко возрос интерес к изучению процессов и объемов эмиссии парниковых газов в атмосферу, среди которых одним из наиболее значимых является метан [1—3]. Начиная с 2007 г. наблюдается устойчивый рост концентрации метана в атмосфере (КМА) Земли, возобновившийся после временного периода стабилизации 1999—2006 гг. (около 1770 ppb), возникшего после периода снижения темпов роста КМА в 1984— 1998 гг. [4—6]. Понимание причин этих изменений и роли растущей КМА имеет большое значение в свете предпринимаемых в мире попыток замедления процесса потепления климата.

Одним из возможных объяснений отмеченных выше трендов является потенциальная связь с изменениями мировых объемов добычи (потребления и потерь) углеводородов: в 1980—1985 гг. произошло падение объемов нефтедобычи с их замедленным ростом в последующие годы, а в последние 15 лет наблюдается активный рост газодобычи (особенно за счет освоения месторождений сланцевого газа) [7]. Также не исключено, что рост КМА с 2007 г. обусловлен увеличением эмиссии микробиального метана, что находит подтверждение в изменениях изотопного состава углерода метана [8].

В январе и марте 2022 г. американское Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA — National Oceanic and Atmospheric Administration) зафиксировало рекордные значения КМА — 1908,9 и 1909,2 ppb, что примерно на 1% выше, чем в те же месяцы 2021 г. (1890,7 и 1888,8 ppb) [6]. Это почти в 2,4 раза больше максимальных значений КМА в доиндустриальное время в продолжительном (около 800 тыс. лет) процессе изменений климата с рядом ледниковых периодов (диапазон изменений — 320—800 ppb),

<sup>©</sup> Богоявленский В. И., Сизов О. С., Никонов Р. А., Богоявленский И. В., 2022



Рис. 1. Космоснимок WorldView-2 термокарстового озера с кратерами выбросов газа в Сеяхинском районе Ямала (А) и его увеличенный фрагмент (В) (19 июля 2013 г., компания ESRI) Fig. 1. WorldView-2 satellite image of a thermokarst lake with gas blowout craters in the Seyakha region of the Yamal Peninsula (A)

and its enlarged fragment (B) (19.07.2013, ESRI)

что подтверждено результатами геохимических исследований образцов ледового керна из Антарктиды [9]. Доказано, что метан и другие парниковые газы вносят значительный вклад в ледниковомежледниковые изменения температур на Земле [9]. Хотя метана в атмосфере намного меньше, чем углекислого газа, он гораздо сильнее поглощает тепловое инфракрасное излучение и является более сильным парниковым газом [2].

Основной объем информации о содержании парниковых газов в атмосфере на глобальном уровне поступает по сети наземных наблюдений и по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе спектральной обработки отраженной от Земли солнечной радиации с применением различных модификаций спектрометров [4; 5; 10; 11]. В результате анализа этих данных доказано, что в последнее десятилетие наметился опасный тренд увеличения скорости возрастания глобальной КМА: от 4,9—5,2 ppb в 2010—2012 гг. до 15,1 и 18,1 ppb в 2020 и 2021 гг. [6].

Одним из основных факторов активного роста эмиссии метана в атмосферу абсолютное большинство экспертов считает вклад антропогенных источников (сельское хозяйство и животноводство, утечки при добыче и потреблении углеводородов и угля) [2; 11]. Также значительный вклад в объем эмиссии метана вносят природные источники, включая болота, озера и геологические источники [5; 6; 10].

В Арктике рост эмиссии метана в атмосферу сдерживается низкими среднегодовыми температурами атмосферы и наличием многолетнемерзлых пород, которые тормозят процессы миграции глубинных газов и генерации биохимического метана в приповерхностных отложениях, а также анаэробным и аэробным окислением метана [12]. Однако метанотрофные поглотители не справляются с его большими потоками в газовой фазе, что приводит к прямому выходу метана в атмосферу. Наличие в зимнее время ледового покрова на поверхности озер, рек и морей сдерживает эмиссию метана в атмосферу, при этом его концентрация в водной толще и в самом льду возрастает [12].

Начиная с 2014 г. на севере Западной Сибири обнаружено около 20 гигантских кратеров мощных выбросов газа, образовавшихся в массивах подземного льда, перекрытых мерзлым грунтом преимущественно глинистого состава [13—30]. Установлено, что абсолютное большинство кратеров расположено на полуострове Ямал в районе Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) [23]. Проведенные исследования свидетельствуют о преимущественно метановом составе газа, при этом во всех трех случаях, в которых были очевидцы, происходили самовоспламенение и взрыв газа [23; 25; 30].

На многих термокарстовых озерах Арктики, как и на акваториях Мирового океана, зафиксированы выходы метана в виде потоков пузырей (газовые факелы), а на дне нередко видны кратеры (покмарки) [5; 10; 13; 16—23; 25; 26; 31—40]. Доказано, что в ряде случаев со дна озер возможны мощные выбросы газа, способные разбить лед толщиной 1,5— 2 м [20; 34]. На основе комплексного анализа данных ДЗЗ и экспедиционной валидации результатов установлено, что все перечисленные выше объекты вносят существенный вклад в общую эмиссию метана в Арктике [10].

В качестве примера на рис. 1 приведен космоснимок со спутника WorldView-2 19 июля 2013 г. одного из многочисленных термокарстовых озер с кратерами выбросов газа (ТОКВГ), расположенного в 33 км к юго-западу от поселка Сеяха вблизи реки Северная Хальмеръяха. Данное ТОКВГ имеет размеры 360×680 м и представляет особый интерес тем, что у многих кратеров хорошо сохранились брустверы выброшенной породы (светлые обрамления вокруг темных жерл кратеров), в том числе на временно высохшей части дна. Наибольшее количество кратеров (около 150) расположено в северной части озера (см. рис. 1В), при этом их диаметры изменяются от долей метра до 9—14 м.

Практически все исследователи едины во мнении, что происходящие климатические изменения активизируют деградацию многолетнемерзлых пород и увеличивают эмиссию метана в Арктике [3—5; 10; 12—32 и др.]. Однако вклад метана Арктики (особенно со дна морей и озер) в глобальный баланс еще недостаточно исследован, при этом имеются противоречивые представления о величине этого вклада — от небольшой [4; 5] до значительной [39—42] и даже способной привести к «метановой катастрофе» [42].

Анализ КМА в Циркумарктическом мегарегионе (на суше Арктики) по данным ДЗЗ в ряде предыдущих работ выполнялся в летне-осенний сезон [4; 5; 10]. В [4] показано, что летне-осенний рост КМА в основном обусловлен освободившимися от ледового экрана водоемами (озера, реки и болота) и таянием сезонно-талого слоя (СТС), находящегося в мерзлом (или частично мерзлом) состоянии в другое время года.

В результате исследований КМА в 2019 г. в Арктической зоне России по данным спектрометра TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) авторами были выявлены природные аномальные зоны и дано объяснение их возможного генезиса [10]. В частности, для северной части Сибирской платформы сильно выделяющиеся позитивные аномалии КМА были нами объяснены потенциальной эмиссией метана из-за его субвертикальной миграции из кембрийских отложений и/или его субгоризонтальной миграции из регионально угленосных отложений Тунгусского. Ленского и Таймырского бассейнов [10]. Эти аномальные зоны позднее были предположительно связаны с разложением залежей газогидратов из-за прогрева поверхности [43], что вызывает сомнение, так как сезонному прогреву подвержен лишь тонкий СТС.

Анализ причин локальных аномалий повышенной КМА, зафиксированных TROPOMI в 2019 г. на полуострове Ямал [10], показал их общерегиональную связь с распространением 1860 зон активной дегазации дна ТОКВГ, включая 1667 озер, 2 залива и 4 реки, обнаруженных авторами по данным Д33 и во время экспедиционных полетов на вертолетах [10; 17—23 и др.]. Также был обоснован потенциально антропогенный генезис нескольких небольших локальных аномалий КМА в зонах активной нефтегазодобычи и прохождения магистральных газопроводов (преимущественно вблизи компрессорной станции газопровода Бованенково — Ухта) [10]. Основной целью данной работы является выявление и анализ природы изменений КМА над сушей Циркумарктического мегарегиона и полуостровом Ямал в трехлетний период 2019, 2020 и 2021 гг. по данным спектрометра TROPOMI. Новое комплексное исследование является прямым развитием результатов первого года анализа КМА в 2019 г. [10] и логическим продолжением серии предыдущих исследований авторов [7; 10; 13—28; 34—36 и др.], ориентированных на изучение источников и процессов дегазации Земли в Арктике.

# Методы дистанционного мониторинга эмиссии метана в атмосферу

Один из основных способов анализа КМА по данным ДЗЗ — оценка поглощения солнечного излучения в коротковолновом ИК-диапазоне (SWIR short wave infrared) 1650-2400 нм (зона поглощения метана). Такая возможность реализована в спектрометре TROPOMI, созданном для развития европейской программы Copernicus, предусматривающей комплексные исследования Земли. состава атмосферы и изменений климата [11; 44]. Спектрометр создан специалистами Космического управления Нидерландов NSO (Netherlands Space Office) по заказу Европейского космического агентства ESA (European Space Agency). Он был выведен на солнечно-синхронную околоземную орбиту 13 октября 2017 г. на борту космического аппарата Sentinel-5P, запущенного с космодрома «Плесецк» российской ракетой-носителем «Рокот».

Спектрометр TROPOMI позволяет измерять мошность отраженной солнечной радиации в ультрафиолетовом, видимом, ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах электромагнитного спектра [45-47]. Он имеет четыре детектора, в одном из которых используется SWIR диапазон 2305—2385 нм, оптимальный для анализа КМА. В алгоритме RemoTeC-S5P дополнительно используется ближний ИКдиапазон (NIR — Near Infra Red) 757—774 нм [46; 47]. В результате анализа определяется усредненная доля метана в сухом воздухе, представляющая КМА. Среднее пространственное разрешение в формируемом двумерном цифровом растровом графическом изображении (пиксель) составляет около 7×3,5 км, а ширина полосы захвата — около 2600 км. Sentinel-5P охватывает всю поверхность Земли наблюдениями, осуществляемыми в надир ежедневно в 13.30 местного времени. По данным [48], величина случайной ошибки определения КМА не превышает 1%. Однако при наличии облачности, пониженном или повышенном альбедо могут возникать значительно большие погрешности, которые обычно принудительно фильтруются [11].

Накапливание результатов многократных наблюдений за заданный период позволяет повысить надежность и достоверность выделения стабильных природных и антропогенных эмитентов газа непосредственно вблизи земной поверхности, снизив ис-



Рис. 2. Пространственное распределение концентрации метана в атмосфере (ppb) в Циркумарктическом мегарегионе по данным спектрометра TROPOMI в 2019 г. (A), 2020 г. (B) и 2021 г. (C). Картографическая основа — GEBCO Fig. 2. Spatial distribution of atmospheric methane concentration (ppb) in the Circum-Arctic megaregion according to the TROPOMI spectrometer data in 2019 (A), 2020 (B) and 2021 (C). Base map — GEBCO



Рис. 3. Диаграммы распределения значений концентрации метана в атмосфере (CM, ppb) для суши Циркумарктического мегарегиона ( $P_{AR}$ ) и полуострова Ямал ( $P_{YA}$ ) в 2019 г. (A), 2020 г. (B) и 2021 г. (C) Fig. 3. Diagrams of the distribution of atmospheric methane concentrations (CM, ppb) for the land of the Circum-Arctic megaregion

(P<sub>ar</sub>) and the Yamal Peninsula (P<sub>va</sub>) in 2019 (A), 2020 (B) and 2021 (C)

кажающее влияние случайных факторов, включая переменные направления ветра. На геоплатформе Google Earth Engine данные TROPOMI/CH4 (набор OFFL/L3\_CH4) доступны с 8 февраля 2019 г. [44]. Более подробно использование данных TROPOMI описано в [10; 11].

В настоящей работе проведен анализ цифровых массивов данных КМА спектрометра TROPOMI для Северного полушария, сформированных отдельно для 2019, 2020 и 2021 гг., как и в [10], в летне-осенний период с 1 июня по 15 октября, который, как отмечено выше, характеризуется повышенной эмиссией метана.

#### Результаты мониторинга КМА

Циркумарктический мегарегион

На рис. 2 приведены схемы летне-осенних распределений КМА в Циркумарктическом мегарегионе за 2019, 2020 и 2021 гг., сформированные по данным спектрометра TROPOMI для территории суши в диапазоне северных широт 58—90°. Единая легенда с диапазоном изменений КМА 1700—1900 ppb позволяет наглядно видеть ее существенное возрастание в течение трех лет. По рис. 2 видно, что в целом КМА в регионах севера Сибири и Чукотки выше, чем на севере Европы, Северной Америки и в Гренландии. На общем фоне выделяются две протяженные экстремально высокие аномалии КМА на севере Сибири, анализ генезиса которых сделан в [10].

Количественная оценка массивов данных КМА (P<sub>AR</sub>) приведена на диаграммах их распределения (рис. 3) и в табл. 1. В зависимости от года количество пикселей изменяется от 370 613 в 2020 г. до 428 773 в 2021 г. (см. табл. 1). Сопоставление диаграмм мегарегиона за трехлетний период показывает стабильный рост КМА. Однако если в 2020 г.

Характеристика	C	уша Арктик	И	Полуостров Ямал			
Год анализа КМА	2019	2020	2021	2019	2020	2021	
Количество пикселей	409 394	370 613	428 773	4098	4183	4433	
Медиана, ppb	1817	1834	1844	1829	1846	1846	
Мода, ррb	1813	1831	1847	1833,5	1843	1847	

Таблица 1. Статистические характеристики массивов данных о концентрации метана в атмосфере Циркумарктического мегарегиона и полуострова Ямал

медиана и мода (значение экстремума) диаграммы Р<sub>АR</sub> выросли соответственно на 17 и 18 ppb, то в 2021 г. они выросли меньше — на 10 и 16 ppb.

Сравнительный анализ изменений КМА в различные годы наблюдений с выявлением разномасштабных аномалий и трендов возможен путем расчета разностных массивов. На рис. 4 приведено пространственное распределение изменений КМА в Циркумарктическом мегарегионе в 2020 и 2021 гг. по сравнению с 2019 г. (А и В), а также в 2021 г. по сравнению с 2020 г. (С). Для комплексного восприятия разностные массивы КМА даны в единой цветовой легенде от минимального (-55 ppb) до максимального (+70 ppb) значений. Благодаря этому хорошо виден преимущественный рост КМА в 2020 и 2021 гг. относительно уровня 2019 г. Однако в 2021 г. (см. рис. 4В) в ряде районов Арктики наблюдается снижение КМА ниже уровня 2019 г. В частности, это видно на полуострове Таймыр, а также на некоторых островах Канадского Арктического архипелага, включая Девон, Сомерсет и Баффинову Землю. Сравнение КМА 2021 г. по отношению к 2020 гг. (см. рис. 4С) в основном показало небольшой рост, при этом значительные территории характеризуются снижением КМА, например север Западной Сибири, частично Гренландия, острова Канадского Арктического архипелага.

Количественные распределения аномальных значений КМА (АСМ, ppb) в Циркумарктическом мегарегионе и их статистические характеристики приведены на диаграмме рис. 5 и в табл. 2. Преимущественный рост КМА в 2020 и 2021 гг. по сравнению с 2019 г. характеризуется тем, что абсолютное большинство пикселей (около 97,4%) имеет положительные значения, а медианы равны 18,6 и 27,0 ppb. Разностная диаграмма между 2020 и 2019 гг. имеет распределение значений, близкое к нормальному, а между 2021 и 2019 гг. близка к бимодальной. На диаграмме разностей 2021 и 2020 гг. около 78,3% пикселей имеют положительные значения, а медиана равна 8,5 ppb.

#### Полуостров Ямал

Особый интерес представляет анализ пространственных изменений КМА на полуострове Ямал, на котором в последнее десятилетие активно расширяется освоение ресурсов углеводородов на трех уникальных по запасам месторождениях (Бованенковском, Южно-Тамбейском и Новопортовском) [7],



Рис. 4. Пространственные распределения аномалий концентраций метана (ACM, ppb) в атмосфере Циркумарктического мегарегиона в 2020 и 2021 гг. по сравнению с 2019 г. (А и В) и в 2021 г. по сравнению с 2020 г. (С). Картографическая основа — GEBCO

Fig. 4. Spatial distributions of anomalous atmospheric methane concentrations (ACM, ppb) in the Circum-Arctic megaregion in 2020 and 2021 relative to 2019 (A and B) and in 2021 relative to 2020 (C). Base map – GEBCO



Рис. 5. Диаграммы распределений аномальных значений концентрации метана в атмосфере (ACM, ppb) над сушей Циркумарктического мегарегиона (P<sub>AR</sub>) и полуостровом Ямал (P<sub>YA</sub>): в 2020 и 2021 гг. по сравнению с 2019 г. (А и В), в 2021 г. по сравнению с 2020 г. (С)

Fig. 5. Diagrams of distributions of anomalous atmospheric methane concentrations (ACM, ppb) over land in the Circum-Arctic megaregion ( $P_{a,b}$ ) and the Yamal Peninsula ( $P_{y,a}$ ): in 2020 and 2021 relative to 2019 (A and B), in 2021 relative to 2020 (C)

Таблица 2. Статистические характеристики разностных массивов концентрации метана в атмосфере (КМА) Циркумарктического мегарегиона и полуострова Ямал в 2020 и 2021 гг. по сравнению с 2019 г. (А и В), в 2021 г. по сравнению с 2020 г. (С)

Характеристика	۲	/ша Аркти	ки	Полуостров Ямал		
Период анализа КМА	А	В	С	А	В	С
Количество пикселей	358 040	388 056	366 383	3958	4024	4155
Доля пикселей с увеличением КМА, %	97,4	97,4	78,3	97,8	98,0	48,9
Медиана, ppb	18,6	27,0	8,5	17,0	16,6	-0,3
Мода, ррb	19	33	12	19	15	3

являющихся потенциальными антропогенными источниками эмиссии метана в атмосферу.

На рис. 6 приведено пространственное распределение КМА над полуостровом Ямал в летне-осенний период 2019, 2020 и 2021 гг. в единой цветовой легенде в диапазоне изменений 1800—1890 ppb. Количество пикселей сформированных массивов данных TROPOMI для данного региона изменялось в диапазоне 4098—4433, что составляет около 1,0—1,1% объема всех данных по суше Циркумарктического мегарегиона (см. табл. 1). Отметим, что в районах крупных водоемов, включая озера и акватории Карского моря с Обской губой, данные КМА не приводятся из-за указанных в предыдущем разделе ограничений алгоритмов расчетов [11; 46; 47].

Визуальное сопоставление основных различий трех схем КМА (рис. 6А, 6В и 6С) позволяет сделать

следующие выводы. В целом наименьший уровень КМА наблюдался в 2019 г., а наиболее высокий в 2020 г., что особенно ярко видно в северо-восточной части Ямала (до 1876—1892 ppb), а также в его центральной части к западу и северу от поселка Сеяха (1876—1881 ppb). При этом в 2021 г. КМА в северной части Ямала была ниже, чем в 2020 г., но выше, чем в 2019 г. Однако при этом в центральной части Ямала к западу от поселка Сеяха (главным образом в районе крупных озер Нейто и Ямбуто [17]) в 2021 г. наблюдалась экстремально высокая КМА (до 1878—1896 ppb). Это хорошо согласуется с данными количественной оценки с построением диаграмм распределения КМА, приведенными на рис. 3 и в табл. 1. В 2019 г. медиана КМА составила 1829 ppb, а мода — 1833,5 ppb. В 2020 г. по сравнению с 2019 г. медиана диаграммы КМА выросла



Рис. 6. Пространственные распределения концентрации метана в атмосфере (ppb) над полуостровом Ямал по данным спектрометра TROPOMI в 2019 г. (A), 2020 г. (B) и 2021 г. (C). Обозначения на легенде: 1 — кратеры выбросов газа, 2 — озеро Открытие, 3 — населенные пункты, 4 — контуры месторождений, 5 — нефтепровод, 6 — газопровод Бованенково — Ухта, 7 — железная дорога. Обозначения нефтегазовых месторождений на картах: 1 — Бованенковское, 2 — Нейтинское, 3 — Новопортовское, 4 — Южно-Тамбейское, 5 — Северо-Тамбейское. Картографическая основа — космоснимок ESRI Fig. 6. Spatial distributions of atmospheric methane concentration (ppb) over the Yamal Peninsula according to the TROPOMI spectrometer data in 2019 (A), 2020 (B), and 2021 (C). Legend: 1 — craters of gas blowouts, 2 — Lake Otkrytie, 3 — settlements, 4 — contours of deposits, 5 — oil pipeline, 6 — gas pipeline Bovanenkovo — Ukhta, 7 — railway. Legend of oil and gas fields on the maps: 1 — Bovanenkovskoye, 2 — Neytinskoye, 3 — Novoportovskoye, 4 — South-Tambeyskoye, 5 — North-Tambeyskoye. Base map — ESRI satellite mosaic

на 17 ppb и достигла 1846 ppb, а мода КМА выросла на 29,5 ppb до 1863 ppb. Диаграмма КМА за 2020 г. имеет ярко выраженный бимодальный характер, при этом основная мода расположена на 1843 ppb, а вторая мода — на 1863 ppb (соответствует правому экстремуму диаграммы). При этом аномально повышенные значения КМА вблизи второй моды приурочены к северной и северо-восточной частям Ямала. В 2021 г. по сравнению с 2020 г. медиана КМА не изменилась и осталась на уровне 1846 ppb, а мода выросла на 4 ppb (по отношению к основной в 2020 г.). Таким образом, в 2021 г. в целом на Ямале не было признаков роста КМА, как в 2020 г.

На рис. 7 приведены пространственные распределения аномалий КМА (разностные массивы АСМ, ppb) над полуостровом Ямал в 2020 и 2021 гг. по сравнению с 2019 г. (А и В), а также в 2021 г. по сравнению с 2020 г. (С). По своей сути они являются увеличенными фрагментами рис. 4, поэтому для комплексного восприятия приведены в той же цветовой легенде (от –55 ppb до +70 ppb).

Визуальный анализ разностных массивов рис. 7А и 7В позволяет сделать вывод о практически повсеместных повышениях уровней КМА в 2020 и 2021 гг. по сравнению с 2019 г. за исключением небольших участков отрицательных аномалий (до 400—900 км<sup>2</sup>). В 2020 г. наиболее значимые превышения КМА на локальных уровнях произошли в северо-восточной и северной частях Ямала (до 61 ррb, см. рис. 7В), а в 2021 г. — до 36 и 46 ррb (см. рис. 7С) в его центральной части в районе крупнейших озер Нейто и Ямбуто, а также ТОКВГ Открытие и Сеяхинского кратера С11 [10; 17; 19; 21; 25; 26; 34]. Небольшие аномальные участки с отрицательными



Рис. 7. Пространственные распределения аномалий концентраций метана в атмосфере (ACM, ppb) над полуостровом Ямал в 2020 и 2021 гг. по сравнению с 2019 г. (А и В) и в 2021 г. по сравнению с 2020 г. (С). Обозначения — см. рис. 6 Fig. 7. Spatial distribution of anomalous atmospheric methane concentrations (ACM, ppb) over the Yamal Peninsula in 2020 and 2021 relative to 2019 (A and B) and in 2021 relative to 2020 (C). Legend — see Fig. 6

значениями КМА до –38 ppb в 2020 г. и –26 ppb в 2021 г. по сравнению с 2019 г. (см. рис. 7А и 7В), а также до –53 ppb в 2021 г. по сравнению с 2020 г., видимо, обусловлены долговременными природными факторами и/или образовались в результате вычитания аномально повышенных значений КМА в годах, с которыми проводился сравнительный анализ (2019 и 2020 гг.).

Согласно построенным диаграммам распределений аномальных значений КМА, приведенным на рис. 5, в 2020 и 2021 гг. по отношению к 2019 г. выявлены их превышения (см. табл. 2): медианы соответственно на 17 и 16,6 ppb, а моды — на 19 и 15 ppb. При этом согласно расчетам в эти два года прирост КМА произошел в абсолютном большинстве пикселей — 97,8% и 98,0% (см. табл. 2).

Сопоставление КМА 2021 г. и 2020 г. (см. рис. 7С) свидетельствует, что около половины полуострова (в основном его северная часть) характеризуется существенными снижениями значений вплоть до экстремума –52 ppb в прибрежной части Северо-Тамбейского ГКМ. Однако центральная часть Ямала характеризуется повышенными значениями КМА (до 46—48 ppb), при этом экстремум 46 ppb (см. рис. 7С) расположен в контуре Нейтинского ГКМ (см. ниже и [17]). Диаграмма распределений аномальных значений КМА для разностного массива между 2021 и 2020 гг. (см. рис. 5 — Yamal, С) кардинально отличается от предыдущих (между 2020 и 2019 гг. и между 2021 и 2019 гг. — А и В) практически равномерным распределением отрицательных и положительных значений (медиана –0,3 ppb). Из этого следует, что в 2021 г. по сравнению с 2020 г. произошло ослабление среднего уровня КМА на 51,1% пикселей, а повышение — на 48,9% (см. табл. 2).

#### Обсуждение результатов

Для комплексного анализа полученных распределений КМА в Циркумарктическом мегарегионе и на полуострове Ямал были привлечены гидрометеорологические данные, включая замеры температур на суше по данным ДЗЗ и на наземных стационарах полуострова Ямал, а также результаты мониторинга



Рис. 8. Пространственное распределение аномалий годовых температур в приземном воздушном слое в 2020 и 2021 гг. по сравнению с 2019 г. (А и В) и в 2021 г. по сравнению с 2020 г. (С) (создано авторами по данным NASA [49; 50]) Fig. 8. Spatial distribution of annual temperature anomalies in the surface air layer in 2020 and 2021 relative to 2019 (A and B) and in 2021 relative to 2020 (C) (created by the authors based on NASA data [49; 50])

ледовой обстановки в Северном Ледовитом океане по данным Д33.

Согласно данным Всемирной метеорологической организации WMO (World Meteorological Organization), 2016, 2019 и 2020 гг. стали тремя самыми теплыми годами на Земле за всю историю наблюдений (места в порядке указанного следования, но с разницей менее погрешностей расчета ±0,1°С) [1]. По сравнению с 1850—1900 гг. средняя глобальная температура воздуха вблизи земной поверхности в 2019 и 2020 г. выросла на 1,1°С и 1,2°С, а в 2021 г. она снизилась до 1,11°С [1]. При этом по данным NASA [49; 50] в российской Арктике средняя региональная температура в 2020 г. по сравнению с 2016 и 2019 гг. была выше на 1—4°С, а характер положительных аномалий подобен (рис. 8А). Аномально холодный 2021 г. (см. рис. 8В) в европейской и азиатской частях Северного полушария был связан со снижающей солнечную радиацию повышенной облачностью, видимо, обусловленной пониженным атмосферным давлением [51].

Несмотря на то что 2021 г. в Северном полушарии и особенно на севере евро-азиатской части России был аномально холодным, здесь произошло повышение КМА. Однако если в среднем рост КМА в аномально теплом 2020 г. составил 17 ppb, то в 2021 г. — всего 10 ppb (см. табл. 1).

Сопоставительный анализ пространственного распределения и статистических характеристик КМА в Циркумарктическом мегарегионе и на полуострове Ямал в трехлетний период 2019—2021 г. (см. рис. 2, 3 и 6, табл. 1) показал, что Ямал ежегодно характеризуется повышенной КМА. В 2019 и 2020 гг. разницы медиан на диаграммах мегарегиона и Ямала составили 12 ppb (1817 и 1829, 1834 и 1846 ppb), а мод — 20,5 и 30 ppb. Однако в относительно холодном на Ямале 2021 г. разница медиан составила всего 2 ppb (1844 и 1846 ppb), а моды совпали (1847 ppb). Таким образом, в 2021 г. КМА на Ямале лишь немного превышала КМА для всего мегарегиона.

Описанные выше и показанные на рис. 8 изменения среднегодовых температур в приземном воздушном слое на Ямале хорошо согласуются с результатами расчета КМА и аномалий КМА, приведенных на рис. 6 и 7. В частности, аномальное повышение температур до +6°С в 2020 г. по сравнению с 2019 г. на 2—4°С (см. рис. 8А) привело к аномальному повышению КМА в среднем на 17 ррb. В результате аномально холодного 2021 г. (по отношению к 2019 и 2020 гг.) согласно табл. 2 средняя для Ямала КМА не только не выросла, но даже немного снизилась по сравнению с 2020 г. (на 0,3 ppb).

За последние полвека Россия характеризуется аномальной скоростью потепления климата: согласно данным Росгидромета, в 1976—2020 гг. она в среднем составляла 0,49°С за десятилетие [4], что в 2,7 раза больше глобальной (0,18°С [3; 52]). Зима 2019—2020 гг. была самой теплой с 1936 г. В целом 2020 г. был аномально теплым: рекордное отклонение от среднего за 1961—1990 гг. составило +3,22°С, что примерно на 1°С выше, чем предыдущий максимум 2007 г. Оценки сделаны на основе анализа данных 702 метеостанций (в том числе по территории России — 577). Для территории Ямало-Ненецкого автономного округа и севера Красноярского края аномалия среднегодовой температуры превышала 6°С. при этом эпицентр аномалии пришелся на полуостров Таймыр. В частности, 2020 г. в Арктике на севере Сибири в районе Верхоянска июнь стал самым теплым в истории, а 20 июня был зарегистрирован абсолютный рекорд температуры +38°С [53]. Видимо, в результате аномально теплого 2020 г. (см. рис. 7А) на Ямале произошел значительный рост КМА (см. рис. 6В).

За аномально теплым летом 2020 г. последовала холодная зима 2020—2021 гг., для которой средняя для России аномалия составила –0,46°С, а для Западной Сибири она достигла –2,38°С [3]. Лето 2021 г. в России было рекордно теплым — аномалия +2,0°С (предыдущие три самых теплых лета — 2016, 2012 и 2010 гг.). Однако в целом 2021 г. был холоднее 2020 г., отклонение от среднего за 1961—1990 гг. составило +1,3°С, что почти на 2°С меньше, чем в 2020 г. На значительной части Ямала и особенно в его северной части в относительно



Рис. 9. Среднегодовые локальные температуры в Ямальском регионе по данным метеостанций: 1 — Салехард, 2 — Новый Порт, 3 — Марре-Сале, 4 — Сеяха, 5 — остров Белый (создано авторами по данным [54])

Fig. 9. Average annual local temperatures in the Yamal region based on data of weather stations: 1 - Salekhard, 2 - Novy Port, 3 - Marre-Sale, 4 - Seyakha, 5 - Bely Island (created by the authors according to [54])

холодный 2021 г. наблюдалось снижение КМА (см. рис. 6С и 7С).

Более детально изменения КМА на Ямале могут быть проанализированы с привлечением результатов локальных измерений среднегодовых температур за пятилетний период 2017—2021 гг. на метеостанциях в регионе полуострова Ямал [54], которые в целом согласуются с вышеприведенной информацией. На рис. 9 видно принципиальное подобие характера изменений температур на метеостанциях в Салехарде, Новом Порту, Марре-Сале, Сеяхе и на острове Белый, но различные уровни этих изменений, зависящие в основном от широты расположения метеостанций. Наиболее высокие температуры зафиксированы на юге региона в Салехарде (диапазон от -5,6°С до -1,1°С), а наиболее низкие — на самой северной метеостанции на острове Белый (от -8,8°С до -4,9°С). Из приведенных данных видно, что за пятилетний период самым теплым был 2020 г., а самым холодным — 2021 г. (рис. 9). При этом разница температур на разных метеостанциях достигала 3,9-4,5°С. Аномальное повышение КМА в 2020 г. (см. рис. 7В) соответствует локальным аномально повышенным температурам (см. рис. 9), а понижение КМА в 2021 г. (см. рис. 7С) — пониженным температурам.

В пределах полуострова Ямал аномалии КМА (см. рис. 7) хорошо объясняются изменением мощности СТС, являющейся важным интегральным показателем температурного режима. На севере Западной Сибири в 2020 г. относительно 2019 г. мощность СТС повсеместно увеличилась (на острове Белый на 12 см до рекордных 131 см, в Марре-Сале — на 16 см до рекордных 137 см), а в 2021 г. относительно 2020 г. — почти повсеместно уменьшилась (на острове Белый — на 10 см, в Марре-Сале — на 17 см) [3]. При этом КМА изменилась от +17 ppb до –0,3 ppb (см. табл. 2). Данные показатели СТС и КМА хорошо согласуются с пространственным распределением аномалий годовых температур в приземном воздушном слое (см. рис. 8): сильная положительная аномалия 2020 г. (см. рис. 8А) и сильная отрицательная аномалия 2021 г. (см. рис. 8С). Эти данные соответствуют выводам о «синфазных» изменениях КМА и мощности СТС [4].

Необходимо отметить, что если самые большие приросты КМА в 2020 г. по отношению к 2019 г. (до 61 ppb в районе Северо-Тамбейского месторождения) были в северной части Ямала (см. рис. 7А), то там же в 2021 г. по отношению к 2020 г. наблюдались самые сильные снижения КМА (до -46 и -52 ppb в районе Северо-Тамбейского месторождения). Это явление можно объяснить дополнительными влиянием на сильно выдающуюся в акваторию Карского моря северную часть Ямала атмосферы и гидросферы Северного Ледовитого океана, характерным интегральным отображением температур в котором является минимальная суммарная площадь льда. Согласно автоматизированным расчетам Национального центра данных по снегу и льду NSIDC (National Snow and Ice Data Center, Университет Колорадо, США), выполняемым на основе анализа данных Д33 [55], минимальная площадь льда 16 сентября 2020 г. была 3,818 млн км<sup>2</sup> (второе место после рекорда 17 сентября 2012 г. — 3,387 млн км<sup>2</sup>), а 16 сентября 2021 г. — 4,772 млн км<sup>2</sup>. Площадь льда в 2021 г. была на 25% больше, чем в 2020 г., и самой большой за последние семь лет (2015-2021 гг.). В результате раннего льдообразования в ноябре 2021 г. на Северном морском пути за-

На всех трех схемах КМА (см. рис. 6) в центральной части Ямала к западу и северу от поселка Сеяха выделяется аномально повышенная Сеяхинская зона с рядом экстремальных значений: в 2019 г. — 1853 и 1856 ppb, в 2020 г. — 1876 и 1881 ppb, в 2021 г. — 1878, 1886 и 1896 ppb. Наиболее ярко эта зона видна на различных отображениях КМА относительно холодного 2021 г. (см. рис. 6С. 7В и 7С). Самое вероятное объяснение образования Сеяхинской аномальной зоны КМА состоит в том, что именно здесь расположена одна из наиболее активных зон дегазации Земли на Ямале, выявленная нами ранее по высокой концентрации ТОКВГ. обнаруженной по данным ДЗЗ [10]. Кроме того, ранее мы показали, что самое крупное озеро Нейто и несколько соседних ТОКВГ являются источником перманентной эмиссии метана в атмосферу, что частично обусловлено миграцией газа из недр расположенного здесь Нейтинского ГКМ, разбитого разломами [17]. Дополнительно отметим, что проведенные нами исследования ряда ТОКВГ в центральной части Ямала, включая ТОКВГ Открытие и Сеяхинский кратер С11 [10; 17; 19; 21; 25; 26; 34], показали наличие многолетних перманентной эмиссии и мощных импульсных выбросов газа, в том числе с его самовоспламенением [22; 23]. Подобные события зафиксированы также в кратере СЗ на полуострове Гыданский [16].

Замеры КМА на Ямале по данным спектрометра TROPOMI оказались ниже прямых замеров концентрации метана на метеостанции Новый Порт (67,68°N, 72,88°E). По данным Росгидромета, в 2021 г. КМА в районе Нового Порта изменялась в диапазоне 1980—2180 ppb при рекордном среднем значении около 2070 ppb [50, с. 91]. Из табл. 1 видно, что все рассчитанные на основе показаний спектрометра TROPOMI значения КМА на Ямале (до 1900 ppb) оказались ниже среднего замера в районе Нового Порта на 7,8—12,6%. Это различие можно объяснить локальным замером на метеостанции и интегральными данными TROPOMI в пределах пикселя (7×3,5 км) и вертикального атмосферного столба, в котором осуществляется оценка поглощения солнечного излучения. Не исключается и локальное антропогенное влияние за счет разработки Новопортовского НГКМ, расположенного на небольшом (20-30 км) удалении к западу от метеостанции.

Однозначного влияния техногенной эмиссии метана в атмосферу на характер распределения КМА на трех разрабатываемых месторождениях Ямала в виде стабильных аномалий КМА не обнаружено (см. рис. 6 и 7). Возможно, это связано с тем, что при расчете схем КМА (см. рис. 6) проведено накапливание и осреднение данных за длительные промежутки времени (с 1 июня по 15 октября), при этом разовые локальные выбросы нивелируются. Поэтому при анализе антропогенных факторов необходим анализ результатов разовой съемки (без временного накапливания), но это является целью отдельных исследований.

#### Заключение

Впервые выполнены комплексные мониторинговые исследования КМА над сушей Циркумарктического мегарегиона и полуострова Ямал по данным спектрометра TROPOMI 2019—2021 гг. Установлено, что КМА в мегарегионе все три года была примерно на 40—50 ppb ниже глобального уровня (около 1900 ppb в середине 2022 г.). При этом в целом на Ямале относительно мегарегиона установлено ежегодное превышение средней КМА на 2—12 ppb.

В мегарегионе выявлена общая тенденция повышения КМА в 2020 г. на 18,6 ppb до среднего уровня 1834 ppb и в 2021 г. на 10 ppb до 1844 ppb. На Ямале в 2020 г. в среднем произошло повышение КМА на 17 ppb до 1846 ppb при экстремальных значениях в северо-восточной части 1886—1892 ppb, а в 2021 г. установлено преимущественное снижение КМА за исключением центральной части, в которой произошло рекордное повышение, местами на 36—46 ppb до 1886—1896 ppb. Также понижение КМА в 2021 г. произошло на большей части севера Западной Сибири и на отдельных участках Таймыра и Чукотки.

Таким образом, на большей части Ямала (за исключением его центральной части) выявлена прямая зависимость КМА от температуры воздуха вблизи земной поверхности, рост которой усиливает процессы эмиссии метана, в том числе за счет увеличения мощности сезонно-талого слоя и возможного роста микробиологической активности.

В центральной части Ямала к западу от поселка Сеяха, главным образом в районе крупных озер Нейто и Ямбуто, наблюдаются аномально повышенные КМА, которые пространственно согласуются с одним из районов самых высокоплотных распространений зон активной дегазации со дна ТОКВГ, выявленных по данным ДЗЗ [10]. Наиболее ярко эти аномалии проявились в относительно холодном 2021 г., характеризующемся преимущественным снижением КМА на большей части Ямала. Весьма вероятно, что эти аномалии обусловлены геологическими факторами, включая миграцию глубинного газа в районе озера Нейто по разломам, дробящим газоносные залежи Нейтинского месторождения.

В КМА в Арктике в целом, включая Ямал, возможен существенный вклад метана за счет его переноса воздушными массами от удаленных природных и антропогенных источников из нижних широт. Однако этот вклад, вероятно, имеет региональное монотонное распределение и не привносит аномальных изменений в КМА отдельных зон в пределах Ямала. Несмотря на активное развитие проектов освоения ресурсов нефти и газа на полуострове Ямал (Бованенковского, Южно-Тамбейского и Новопортовского НГКМ), в 2019—2021 гг. локальный перманентный антропогенный вклад в изменения КМА по сравнению с природными факторами представляется пренебрежимо малым.

Для выявления и анализа природы локальных аномалий КМА от кратковременных природных и антропогенных выбросов газа необходим детальный анализ данных расчетов КМА раздельно по дням наблюдений.

Повышение достоверности и корректности оценок выбросов парниковых газов зарубежными экспертами на основе применяемых систем мониторинга по данным ДЗЗ из космоса требует создания независимых отечественных технических средств спектрального анализа КМА из космоса с широкой валидацией по наземным наблюдениям.

Работа выполнена по госзаданию ИПНГ РАН по теме «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата» (№ АААА-А19-119021590079-6).

#### Литература/References

1. State of the Global Climate 2021. World Meteorological Organization, WMO-No.1290, 2022, 57 p.

2. Jackson R. B., Saunois M., Bousquet P. et al. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. Environmental Research Letters, 2020, vol. 15, no. 7, p. 071002.

3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. — М.: Росгидромет, 2022. — 110 с.

Report on climate features in the Russian Federation for 2021. Moscow, Rosgidromet, 2022, 110 p. (In Russian).

4. 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.

Anisimov O. A., Kokorev V. A. Comparative Analysis of the Land, Marine and Satellite Observations of Methane in the Lover Atmosphere in the Russian Arctic under the Conditions of the Changing Climate. Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2015, no. 2, p. 1—14. (In Russian).

5. Анисимов О. А., Зимов С. А., Володин Е. М., Лавров С. А. Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // Метеорология и гидрология. — 2020. — № 5. — С. 131—143.

Anisimov O. A., Zimov S. A., Volodin E. M., Lavrov S. A. Methane Emission in the Russian Permafrost Zone and Evaluation of Its Impact on Global Climate. Russian Meteorology Hydrology, 2020, no. 45, pp. 377–385.

6. *Dlugokencky E.* Global CH<sub>4</sub> Monthly Means. NOAA/ GML, 2022. Available at: gml.noaa.gov/ccgg/ trends\_ch4//.

7. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Арктика и Мировой океан: глобальные и российские тренды развития нефтегазовой отрасли // Аналит. материалы МАЭФ: Труды Вольного эконом. о-ва России. — 2019. — Т. 218. — С. 152—179.

*Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V.* Arctic and World Ocean: global and Russian trends of oil and gas industry development. Scientific works of the Free Economic Society of Russia, 2019, vol. 218, pp. 152—179. (In Russian).

8. Oh Y., Zhuang Q., Welp L. R., Liu1 L., Lan X. et al. Improved global wetland carbon isotopic signatures support post-2006 microbial methane emission increase. Communications Earth & Environment, 2022, 3, 159.

9. Loulergue L., Schilt A., Spahni R. et al. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH<sub>4</sub> over the past 800,000 years. Nature, 2008, 453, pp. 383—386. 10. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 6—22.

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. A. Earth degassing in the Arctic: the genesis of natural and anthropogenic methane emissions. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2020, no. 3 (39). pp. 6—22. (In Russian).

11. Успенский А. Б. Измерения распространения содержания парниковых газов в атмосфере со спутников // Фундамент. и прикладная климатология. — 2022. — Т. 8, № 1. — С. 122—144.

*Uspensky A. B.* Satellite-based measurements of the Greenhouse Gases concentration in atmosphere. Fundamental and applied climatology, vol. 8, no. 1, pp. 122—144. (In Russian).

12. James R. H., Bousquet P., Bussmann I. et al. Effects of climate change on methane emissions from seafloor sediments in the Arctic Ocean: A review. Limnol. Oceanogr., 2016, 61, pp. 283—299.

13. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Тр. ВЭО России. — 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175. *Bogoyavlensky* V. I. Arctic and the World Ocean: current state, perspectives and challenges of hydrocarbon production. Monograph. Scientific works of the Free Economic Society of Russia, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).

14. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 13—18.

*Bogoyavlensky V. I.* The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic cryolithozone. Yamal craters. Oil and Drilling, 2014, no. 9, pp. 13—18. (In Russian).

15. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала. — Ч. 2 // Бурение и нефть. — 2014. — № 10. — С. 4—8.

*Bogoyavlensky V. I.* The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic cryolithozone. Yamal and Taymyr craters. Pt. 2. Oil and Drilling, 2014, no. 10, pp. 4—8. (In Russian).

16. Богоявленский В. И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 1 (29). — С. 48—55.

*Bogoyavlensky V. I.* Gas-hydrodynamics in the Arctic craters of gas blowout. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2018, no. 1 (29), pp. 48—55. (In Russian).

17. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Технологии дистанционного выявления и мониторинга дегазации Земли в Арктике: полуостров Ямал, озеро Нейто // Арктика: экология и экономика. — 2018. —  $N^{\circ}$  2 (30). — С. 83—93. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Sizov O. S., Nikonov R. A. Technologies for remote detection and monitoring of the Earth degassing in the Arctic: Yamal peninsula, Neito lake. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2018, no. 2 (30), pp. 83—93. (In Russian).

18. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Природные и техногенные угрозы при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов в Арктике // Минер. ресурсы России. Экономика и управление. — 2018. — № 2. — С. 60—70.

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V. Natural and technogenic threats in prospecting, exploration and development of hydrocarbon fields in the Arctic. Mineral Resourses of Russia. Economics and Management, 2018, no. 2, pp. 60—70. (In Russian).

19. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 88—105.

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V., Bogoyavlensky I. V. et al. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2019, no. 1 (33), pp. 88—105. (In Russian).

20. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 2 (34). — С. 31—47.

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A., Sizov O. S. Earth degassing in the Artic: remote and field studies of the thermokarst lakes gas eruption. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2019, no. 2 (34). pp. 31—47. (In Russian). 21. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 52—68.

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V. et al. Earth Degassing in the Arctic: Comprehensive Studies of the Distribution of Frost Mounds and Thermokarst Lakes with Gas Blowout Craters on the Yamal Peninsula. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2019, no. 4 (36), pp. 52—68. (In Russian).

22. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Гор. пром-сть. — 2020. — № 1 (149). — С. 97—118.

*Bogoyavlensky V. I.* Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere. Gor. prom-st', 2020, no. 1 (149), pp. 97—118. (In Russian).

23. Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 51—66.

*Bogoyavlensky V. I.* Fundamental aspects of the catastrophic gas blowout genesis and the formation of giant craters in the Arctic. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 51—66. (In Russian).

24. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11. № 3. — С. 363—374.

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N. Catastrophic gas blowout in 2020 on the Yamal Peninsula in the Arctic. Results of comprehensive analysis of aerospace RS data. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 3. pp. 363—374. (In Russian).

25. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Yakushev V., Sevastyanov V. Permanent gas emission from the Seyakha Crater of gas blowout, Yamal Peninsula, Russian Arctic. Energies, 2021, 14, p. 5345.

26. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. Seyakha catastrophic gas blowout and explosion from the cryosphere of the Arctic Yamal Peninsula. Cold Regions Science and Technology, 2022, vol. 196, p. 103507.

27. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing. Geosciences, 2021, no. 71.

28. Сизов О. С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68.

Sizov O. S. Remote analysis of the surface gas shows consequences in the north of Western Siberia. Geomatika, 2015, no. 1. pp. 53—68. (In Russian).

29. Баду Ю. Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. — М.: Науч. мир, 2018. — 232 с.

*Badu Yu. B.* Cryogenic stratum of gas-bearing structures of Yamal. On the influence of gas deposits on the formation and development of a cryogenic stratum. Moscow, Nauch. mir, 2018, 232 p. (In Russian).

30. *Kizyakov A., Zimin M., Sonyushkin A. et al.* Comparison of Gas Emission Crater Geomorphodynamics on Yamal and Gydan Peninsulas (Russia), Based on Repeat Very-High-Resolution Stereopairs. Remote Sens, 2017, no. 9, p. 1023.

31. *Hovland M., Judd A. G.* The global production of methane from shallow submarine sources. Cont. Shelf Res., 1992, no. 12, pp. 1231—1238.

32. *Judd A., Hovland M.* Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge, 2007, 475 p.

33. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al. Massive blowout craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. Science, 2017, 356, 6341, 948—953.

34. Богоявленский В. И., Ерохин Г. Н., Никонов Р. А. и др. Изучение зон катастрофических выбросов газа в Арктике на основе пассивного микросейсмического мониторинга (на примере озера Открытие) // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 1 (37). — С. 93—104.

Водоуаvlensky V. I., Erokhin G. N., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Bryksin V. M. Study of catastrophic gas blowout zones in the Arctic based on passive microseismic monitoring (on the example of Lake Otkrytiye). Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2020, no. 1 (37), pp. 93—104. (In Russian). 35. Богоявленский В. И., Казанин А. Г., Кишанков А. В., Казанин Г. А. Дегазация Земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 2. — С. 178—194.

Bogoyavlensky V. I., Kazanin A. G., Kishankov A. V., Kazanin G. A. Earth degassing in the Arctic: comprehensive analysis of powerful gas emission in the Laptev Sea. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 2, pp. 178—194. (In Russian).

36. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Докл. Акад. наук. — 2021. — Т. 500, № 1. — С. 83—89.

Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G. Permafrost, Gas Hydrates, and Gas Seeps in the Central Part of the Laptev Sea. Doklady Earth Sciences, 2021, vol. 500, pt. 1. pp. 766—771.

37. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С. 30—43.

Bondur V. G., Kuznetsova T. V. Detection of gas seeps in the Arctic offshore areas, using remote sensing data. Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2015, no. 4, pp. 30— 43. (In Russian).

38. Кругликов Н. М., Кузин И. Л. Выходы глубинного газа на Уренгойском месторождении // Структурная геоморфология и неотектоника Западной Сибири в связи с нефтегазоносностью. — Тюмень, 1973. — С. 96—106. — (Тр. ЗапСибНИГНИ; вып. 3).

*Kruglikov N. M., Kuzin I. L.* Emissions of deep gas on the Urengoy field. Structural geomorphology and neotectonics of Western Siberia in connection with oil and gas potential. Tyumen, 1973, pp. 96—106. (Tr. ZapSib-NIGNI, iss. 37). (In Russian).

39. Walter K. M., Zimov S., Chanton J. P. et al. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. Nature, 2006, no. 443, pp. 71–75.

40. *Walter K. M., Smith L. C., Chapin III F. S.* Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget Phil. Trans. R. Soc. A, 2007, no. 365, pp. 1657—1676.

41. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. Science, 2010, no. 327, pp. 1246—1250.

42. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Шахова Н. Е. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. — 2012. — Т. 446, № 3. — С. 330—335.

Sergienko V. I., Lobkovskii L. I., Semiletov I. P. et al. The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of east arctic seas as a potential cause of the "Methane Catastrophe": some results of integrated studies in 2011. Doklady Earth Sciences, SP MAIK Nauka/Interperiodica, 2012, no. 446 (1), pp. 1132—1137.

43. Froitzheim N., Majka J., Zastrozhnov D. Methane release from carbonate rock formations in the Siberian permafrost area during and after the 2020 heat wave. PNAS, 2021, vol. 118, no. 41.

44. Sentinel-5P OFFL CH4: Offline Methane. 08.02.2019. Available at: https://developers.google.com/earth-engine/ datasets/catalog/COPERNICUS\_S5P\_OFFL\_L3\_CH4. 45. *Ingmann P., Veihelmann B., Langen J. et al.* Requirements for the GMES Atmosphere Service and ESA's implementation concept: Sentinels-4/-5 and-5p. Remote Sensing of Environment, 2012, no. 120, pp. 58—69.

46. Lorente A., Borsdorff T., Butz A., Hasekamp O. et al. Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements. Atmos. Meas. Tech., 2021, no. 14, pp. 665—684.

# Научные исследования в Арктике

47. Hasekamp O., Lorente A., Hu H. et al. Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor Methane Retrieval. SRON-S5P-LEV2-RP-001, 2021, 63 p.

48. Jacob D. J., Turner A. J., Maasakkers J. D. et al. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, no. 16 (22), pp. 14371—14396.

49. GISTEMP Team, 2022: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies. Dataset accessed 20YY-MM-DD at data.giss.nasa.gov/gistemp/.

50. *Lenssen N., Schmidt G., Hansen J. et al.* Improvements in the GISTEMP uncertainty model. J. Geophys. Res. Atmos., 2019, vol. 124, no. 12, pp. 6307—6326. 51. *Thompson T.* Arctic sea ice hits 2021 minimum. Nature, 2021, 29 Sept.

52. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. — М.: Росгидромет, 2021. — 104 с.

Report on climate features in the Russian Federation for 2020. Moscow, Rosgidromet, 2021, 104 p. (In Russian).

53. State of the Global Climate 2020. Provisional report. World Meteorological Organization, 2021, 38 p.

54. Погода в 243 странах мира. — URL: https://rp5.ru/. Weather in 243 countries of the world. Available at: https://rp5.ru/.

55.ArcticSealceExtent.NSIDC,2022.Availableat:https:// nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactivesea-ice-graph/.

# Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией «Шельф», главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

**Сизов Олег Сергеевич**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Никонов Роман Александрович, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Богоявленский Игорь Васильевич, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

#### Библиографическое описание данной статьи

Богоявленский В. И., Сизов О. С., Никонов Р. А., Богоявленский И. В. Мониторинг изменений концентрации метана в атмосфере Арктики в 2019—2021 гг. по данным спектрометра TROPOMI // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 3. — С. 304—319. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-304-319.

# MONITORING OF THE METHANE CONCENTRATION CHANGES IN THE ARCTIC ATMOSPHERE IN 2019—2021 ACCORDING TO THE TROPOMI SPECTROMETER DATA

Bogoyavlensky, V. I., Sizov, O. S., Nikonov, R. A., Bogoyavlensky, I. V. Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

#### The article was received on June 10, 2021

# Abstract

For the first time, the authors carried out a comprehensive analysis of changes in the atmospheric methane concentrations (AMC) over the land of the Circum-Arctic megaregion and the Yamal Peninsula according to the TROPOMI spectrometer in 2019—2021. They established that the average AMC in the mega-region was approximately 40—50 ppb below the global one for all three years, and also below the average for the Yamal Peninsula by 2—12 ppb. The authors revealed the regional features in the AMC changes, mainly depending on the air temperature near the earth's surface, which affects the processes of methane emission. Despite a decrease in the AMC in most of Yamal, in relatively cold 2021, an anomalous increase in the AMC was detected in its central part, apparently associated with geological factors, including the migration of deep gas in the area of Lake Neito along faults in the gas-bearing structures of the Neytinskoye field. With the active expansion of hydrocarbon resources' development on the Yamal Peninsula, the share of the anthropogenic contribution in AMC changes seems to be negligible.

**Keywords:** Yamal, Arctic, greenhouse gases, methane, gas emission, atmospheric methane concentration (AMC), craters of gas blowouts, thermokarst lakes, Earth remote sensing (ERS), TROPOMI spectrometer.

The research was carried out according to the state assignment of the Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences on the topic "Rational nature management and efficient development of oil and gas resources in the Arctic and subarctic zones of the Earth in a changing climate" (No. 122022800264-9).

#### Information about the authors

**Bogoyavlensky, Vasily Igorevich**, Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Head of "Shelf" Laboratory, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

*Sizov, Oleg Sergeevich*, PhD of Geography, Senior Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: kabanin@yandex.ru.

*Nikonov, Roman Aleksandrovich,* Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Bogoyavlensky, Igor Vasilievich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

## **Bibliographic description**

Bogoyavlensky, V. I., Sizov, O. S., Nikonov, R. A., Bogoyavlensky, I. V. Monitoring of the methane concentration changes in the Arctic atmosphere in 2019—2021 according to the TROPOMI spectrometer data. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2022, vol. 12, no. 3, pp. 304—319. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-304-319. (In Russian).

© Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., 2022