

ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ В АРКТИКЕ: ГЕНЕЗИС ПРИРОДНОЙ И АНТРОПОГЕННОЙ ЭМИССИИ МЕТАНА

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

Статья поступила в редакцию 29 июля 2020 г.

В результате анализа концентрации метана в Циркумарктическом регионе по данным спектрометра TROPOMI (спутник Sentinel-5P ESA) выявлены сильные природные аномалии в Арктической зоне России и сформулированы вероятные причины их образования. Для северной части Сибирской платформы обоснованы модели повышенной эмиссии метана в атмосферу за счет субвертикальной миграции из кембрийских отложений и/или субгоризонтальной миграции газа из регионально угленосных отложений Тунгусского, Ленского и Таймырского бассейнов. По данным дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения, на полуострове Ямал впервые выявлено 1860 зон активной дегазации с кратерами выбросов газа на дне 1667 термокарстовых озер, 2 заливов и 4 рек. Установлена однозначная региональная связь выявленных зон дегазации с районами повышенной концентрации метана в атмосфере, зафиксированными спектрометром TROPOMI. Обоснован потенциально антропогенный генезис ряда локальных аномалий концентрации метана в атмосфере над полуостровом Ямал в зонах активной нефтегазодобычи и транспортировки газа (преимущественно вблизи компрессорных станций). Подтверждена необходимость валидации абсолютных значений содержания метана в атмосфере по данным TROPOMI для разнообразных природных условий суши и акватории Арктики, в том числе для зон активного недропользования.

Ключевые слова: Циркумарктический регион, Арктика, Ямал, парниковые газы, метан, угольный метан, миграция газа, эмиссия газа, Тунгусский угольный бассейн, Попигайская астроблема, термокарстовые озера, кратеры выброса газа, покмарки, ДЗЗ, Sentinel-5P.

Введение

В современном мире все большую остроту приобретают вопросы глобального изменения климата на Земле, особенно сильно сказывающегося в Арктике. Это выражается в постоянно растущем количестве научных исследований, публикаций и правительственных документов, посвященных различным аспектам данной проблемы [1—42]. Не вызывают сомнений циклические изменения климата на Земле, связанные с особенностями межпланетных взаимодействий, в первую очередь с Солнцем [43]. В далеком и близком геологическом прошлом эти изменения периодически корректировались глобальными катастрофическими событиями, связанными

с падением крупных метеоритов или сверхмощными извержениями стратовулканов. При этом загрязнения атмосферы Земли смесями газов и поднятых взрывами частиц породы неоднократно нарушали сложившееся природно-климатическое равновесие. В особых случаях происходили вымирания многочисленных видов животного и растительного мира (пермское, меловое, эоцен-олигоценное и др.).

Большинство экспертов признает, что активное природопользование (антропогенный фактор) вносит значительный вклад в происходящие климатические изменения и многочисленные катаклизмы [2; 8; 11; 18; 20; 22; 23; 25—34 и др.]. Антропогенный фактор также выражается в возрастающей эмиссии парниковых газов, в первую очередь углекислого газа и метана. Антропогенная эмиссия газа связана с разнообразными видами жизнедеятельности че-

ловека, включая сельское хозяйство и природопользование, ориентированное на добычу, переработку и транспортировку полезных ископаемых. Аварийные выбросы газа на предприятиях добывающей, нефтегазохимической и химической отраслей не только загрязняют экосистему, но и часто приводят к крупным катастрофам с массовой гибелью людей. В дополнение к «Климатической доктрине Российской Федерации», утвержденной указом Президента РФ в 2009 г., в 2013 г. Россия приняла обязательства «обеспечить к 2020 году сокращение объема выбросов парниковых газов до уровня не более 75 процентов объема указанных выбросов в 1990 году» [21].

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса является уникальным методом мониторинга состояния атмосферы и верхней части гидросферы и литосферы. Особо важно применение ДЗЗ на гигантских труднодоступных территориях Арктики. Данные ряда спутников являются открытыми для широкого пользования на безвозмездной основе. В частности, открыты данные спутников Sentinel программы Copernicus Европейского космического агентства ESA (European Space Agency), осуществляемой Евросоюзом для «Глобального мониторинга окружающей среды и безопасности» GMES (Global Monitoring for Environment and Security) Земли и ее атмосферы.

В данной работе, являющейся логическим продолжением предыдущих исследований [2—11; 18; 26; 27], приведены результаты анализа причин аномальной концентрации метана в атмосфере над территорией Ямала и других арктических регионов России, установленной по данным ДЗЗ.

Дистанционный мониторинг эмиссии газов в атмосфере

Длительное время анализ эмиссии газов по данным ДЗЗ проводился на основе спектральной обработки отраженной от Земли солнечной радиации с помощью спектрометров: TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer, спутники Nimbus-7, Meteor-3-5, ADEOS-I и др., запуски NASA 1978—2001 гг.); OMI (Ozone Monitoring Instrument, спутник Aura, NASA 2004 г.); SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY, европейский спутник Envisat, ESA 2002—2012 гг.); TANSO-FTS GOSAT и GOSAT-2 (Greenhouse Gases Observing Satellite, японские спутники IBUKI и IBUKI-2, JAXA 2009 и 2018 гг.). Эти спектрометры успешно использовались для мониторинга атмосферного содержания озона и эмиссии различных газов, в том числе при извержении камчатских вулканов [19].

В процессе валидации измерений концентраций газа выявлен эффект перегрева парниковых газов над территориями с высокими значениями альбедо, в частности над тропическими пустынями (Сахарой, Аравийской и др.), что приводит к завышенным более чем в 10 раз определяемым значениям кон-

центрации, а также явно ошибочные завышенные значения наблюдаются над ледниками Антарктиды и Гренландии [30].

В настоящее время появились новые усовершенствованные возможности определения концентрации различных парниковых газов в атмосфере, обусловленные запуском 13 октября 2017 г. спутника Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P). Спутник Sentinel-5P массой более 900 кг функционирует на солнечно-синхронной орбите высотой 824 км. Гарантийный срок его активного существования составляет семь лет. Основной аппаратурой Sentinel-5P является спектрометр TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), который предназначен для измерения мощности отраженной солнечной радиации в ультрафиолетовой, видимой, ближней и средней ИК-зонах электромагнитного спектра [33]. Это первый спутник программы Copernicus, созданный для ежедневного глобального мониторинга загрязнения воздуха. Спектрометр TROPOMI позволяет оценивать атмосферные концентрации озона O_3 , метана CH_4 , формальдегида CH_2O , монооксида углерода CO , диоксида серы SO_2 и диоксида азота NO_2 . TROPOMI является научно-технологическим развитием аппаратуры TOMS, OMI и SCIAMACHY.

Одним из основных способов выявления метана по данным ДЗЗ является оценка поглощения солнечного излучения в среднем ИК-диапазоне (SWIR — short wave infrared) от 1,65 до 2,4 мкм (зона поглощения метана). На TROPOMI используется узкий диапазон 2,305—2,385 мкм, кроме того, дополнительно учитывается поглощение кислорода в диапазоне 0,757—0,774 мкм. Полоса обзора составляет около 2600 км при среднем пространственном разрешении (пиксель) $7 \times 5,5$ км. Наблюдения осуществляются в надир ежедневно в 13.30 местного времени. По данным [31], величина случайной ошибки определения концентрации метана (respective random error) не превышает 1%.

Исходные данные TROPOMI по метану предоставляются в режиме реального времени (не более двух часов после съемки) через информационную систему DIAS программы Copernicus, а также после обработки через геоплатформу GoogleEarthEngine. В настоящее время для пользователей доступны данные только на площадь суши в ограниченной на треть полосе обзора. Наблюдения над океанами будут добавлены позднее, после устранения искажающего эффекта бликов. Результаты наблюдений над горными районами заблокированы ESA из-за превышения предельных углов отражения и обозначены как «no data».

В геоплатформе GoogleEarthEngine данные TROPOMI/CH₄ (набор OFFL/L3_CH4) доступны с 8 февраля 2019 г. [38]. Согласно рекомендациям ESA, данные отфильтрованы по порогу (маске) качества менее 50%, однако некоторые единичные пиксели могут содержать ошибочные значения, связанные с недостаточной фильтрацией внутренних

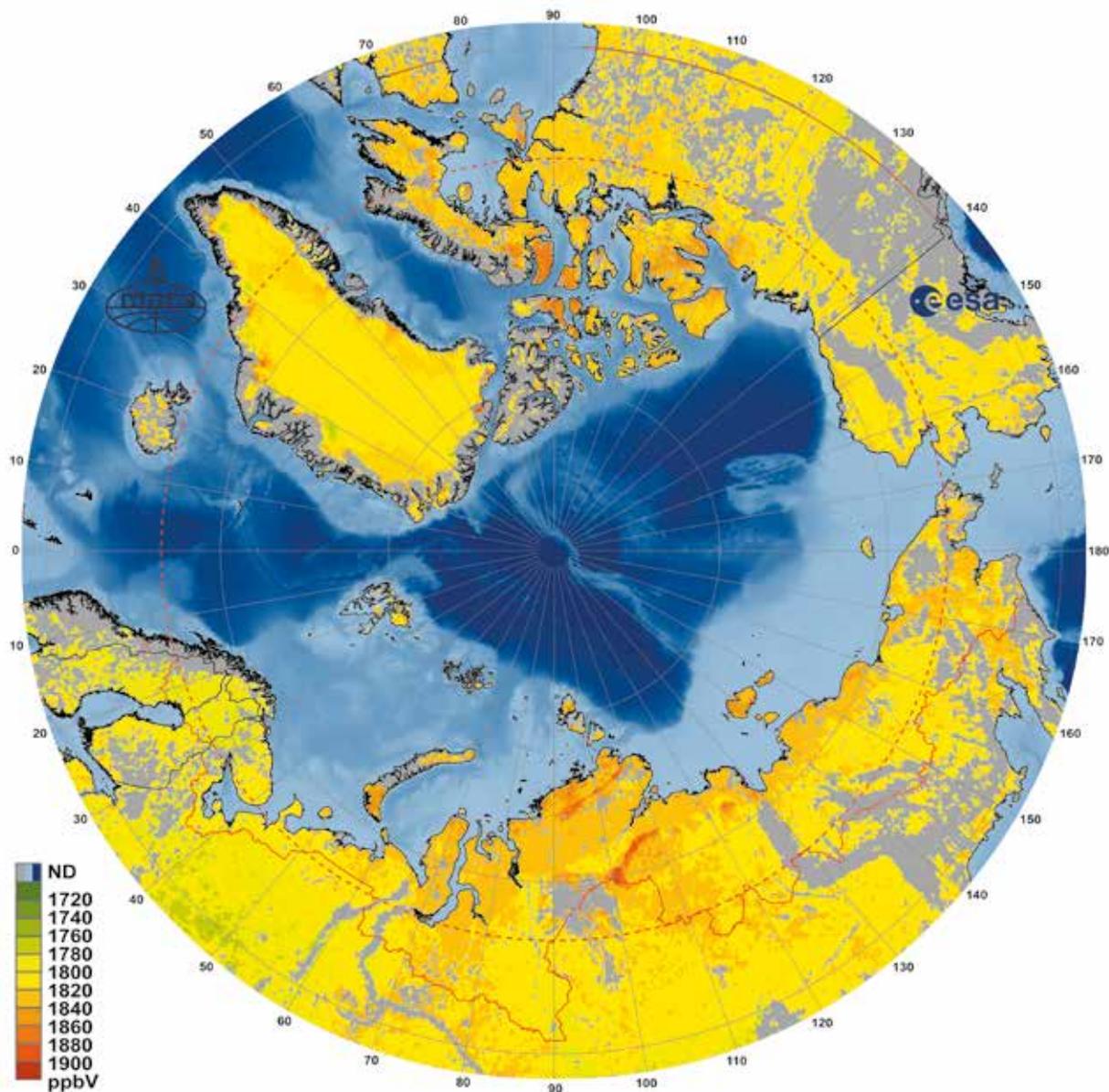


Рис. 1. Картографическая схема концентрации метана в Циркумарктическом регионе летом 2019 г. по данным спектрометра TROPOMI спутника Sentinel-5P (ND – отсутствие данных). Картографическая основа Мирового океана – батиметрия GEBCO
 Fig. 1. Cartographic diagram of the methane concentration in the Circum-Arctic region in summer 2019 based on Sentinel-5P TROPOMI spectrometer data (ND – no data). The World Ocean base map – GEBCO bathymetry

водоемов, избыточным наблюдением (overpass), выбросами на границе суши и океана. Данные предоставляются в формате GeoTIFF и непосредственно содержат значения концентрации сухого метана в толще атмосферы, измеренные в миллиардных долях от объема ppbV (10^{-3} ppmV, или 10^{-3} см³/м³).

Очевидно, что ветровые эффекты приводят к рассеиванию и перемешиванию по горизонтали вертикально мигрирующего плюма газа. Однако возможность осреднения измерений в задаваемом периоде приводит к накоплению регулярных составляющих и подавлению случайных (в том числе возникающих за счет переноса газовых плюмов ветром).

Таким образом, за счет накопления результатов наблюдений выделяются фактические данные природных и антропогенных эмитентов газа вблизи поверхности Земли.

На рис. 1 приведена картографическая схема концентрации метана в Циркумарктическом регионе в летнее время 2019 г. по данным спектрометра TROPOMI, при этом выборка данных сделана с осреднением значений за период 1 июня — 15 октября. При формировании схемы отсутствующие (обозначенные ESA как «no data»/ND) данные TROPOMI по акваториям Мирового океана заполнены трехмерным изображением рельефа дна по батиметри-

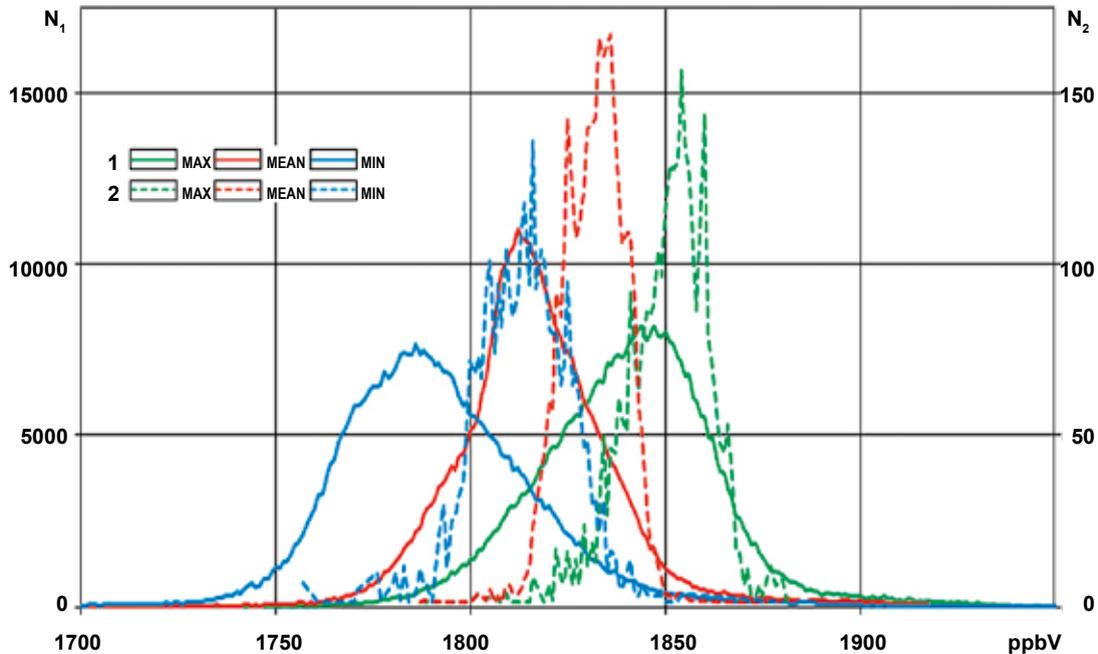


Рис. 2. Диаграммы распределения значений концентрации метана для Циркумарктического региона (1) и полуострова Ямал (2)
 Fig. 2. Distribution diagrams of methane concentration values for the Circum-Arctic region (1) and the Yamal Peninsula (2)

ческим данным GEBCO, а на суше — серым фоном. Всего в построении использовано 409 394 пикселей размером $7 \times 5,5$ км, содержащих средние (mean) значения концентрации метана за указанный период. На рис. 2 приведено статистическое распределение значений концентрации метана (в ppbV) для всего региона (N_1), а также для полуострова Ямал (N_2). Для Циркумарктического сектора диапазон значений концентрации метана составил 1597—1999 ppbV (с учетом одиночных крайних значений). Средневзвешенная концентрация метана для всего региона составила 1816,7 ppbV, что ниже среднего глобального значения для лета 2019 г., которое, по данным NOAA, составило около 1860 ppbV [40]. При этом европейская территория к югу от Полярного круга до широты 58° (за исключением европейских городов) и практически весь Скандинавский полуостров характеризуются преимущественно пониженными до 1750—1780 ppbV значениями, а территория заполярных секторов — повышенными до 1880—1900 ppbV.

Отметим, что формирование растрового изображения с выборкой значений концентрации метана по минимальным и максимальным значениям (min, max) смещает распределение значений средневзвешенной концентрации (mean) примерно на 25,7 ppbV в меньшую и на 23,9 ppbV в большую сторону, но на качественном уровне не меняет восприятие наблюдаемых аномалий (см. рис. 2). При этом средневзвешенные значения концентрации метана для Циркумарктического региона составляют соответственно 1791 и 1840,6 ppbV.

Подобные построения и расчеты были выполнены для полуострова Ямал, для которого массив дан-

ных с осредненными значениями концентрации метана (N_2) составил 3177 пикселей (см. рис. 2). При этом были получены следующие результаты: диапазон изменения средних значений концентрации метана — 1787—1880 ppbV, средневзвешенная концентрация — 1831,5 ppbV, средневзвешенные концентрации по выборкам минимальных и максимальных значений — 1813,6 и 1850,3 ppbV. Таким образом, территория Ямала характеризуется более высокой концентрацией метана (по mean на 14,8 ppbV), чем весь Циркумарктический регион, что представляет несомненный интерес для дальнейших исследований.

На рис. 1 в пределах Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) выделяются обширные территории повышенной концентрации метана, преимущественно приуроченные к тундровой зоне. Кроме того, видны наиболее выраженные во всем Циркумарктическом регионе аномалии на севере Сибирской платформы в западной и северной частях Анабарской антеклизы протяженностью около 620 км и шириной 50—110 км (рис. 3, А) и округлая аномалия на Оленекском плато (блоне) диаметром около 100 км (рис. 3, О). Также выделяется аномалия в северо-восточной части Западно-Сибирской плиты вдоль фундамента полуострова Таймыр в горах Бырранга (высоты до 1100 м) протяженностью около 600 км и шириной 10—50 км (рис. 3, Т). Специалисты ESA оценили данные концентраций метана по этим зонам как надежные [35]. Особенно важно то, что подобные три аномалии наблюдаются и при выборке данных спектрометра TROPOMI за период 1 июня — 25 июля 2020 г., что свидетельствует об их

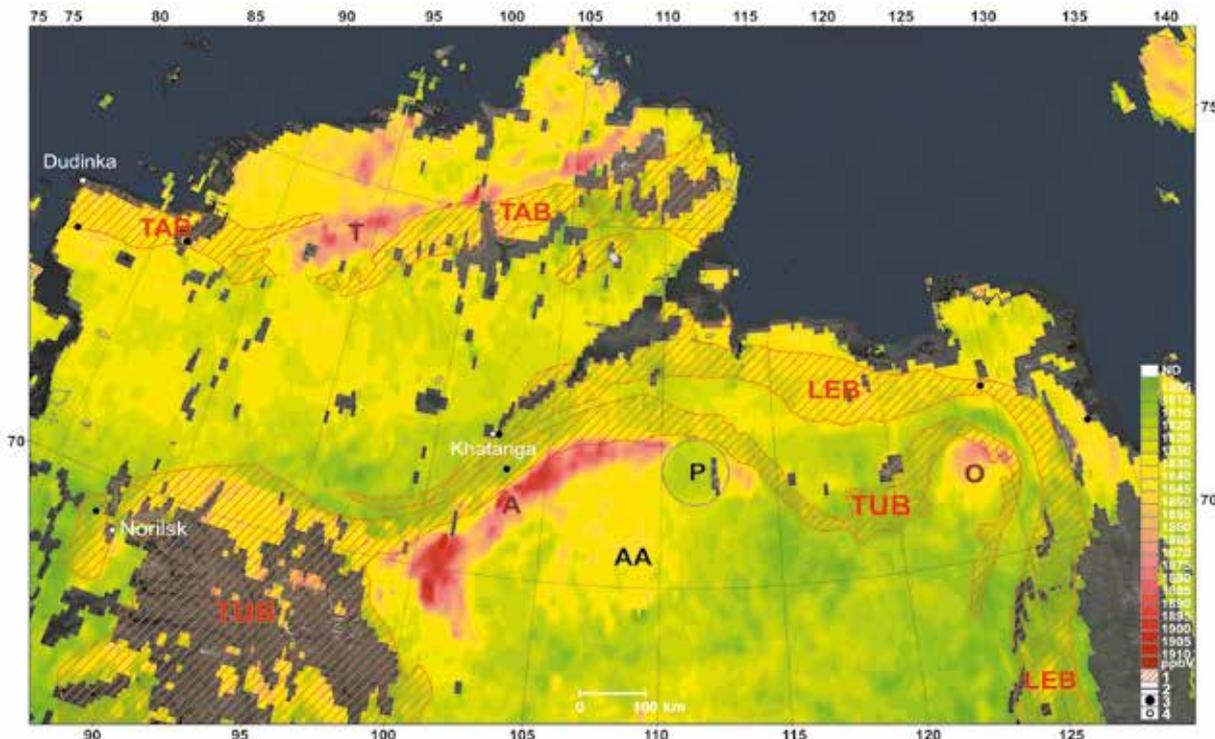


Рис. 3. Картографическая схема концентрации метана в северных частях Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты на полуострове Таймыр. Обозначения: А, О и Т – аномалии в западной части Анабарской антеклизы (А), на Оленекском поднятии (О) и вдоль полуострова Таймыр (Т); АА – центр Анабарской антеклизы; Р – Попигайский кратер; 1 – угольные бассейны: Тунгусский (ТUB), Ленский (LEB) и Таймырский (TAB); 2 – граница Попигайского кратера; 3 – угольные шахты и разрезы; 4 – города. Основа – мозаика космоснимков ESRI

Fig. 3. Cartographic scheme of methane concentration in the northern parts of the Siberian platform and the West Siberian plate on the Taimyr Peninsula. Legend: A, O and T – anomalies in the western part of the Anabar antecline (A), on the Olenek uplift (O) and along the Taimyr Peninsula (T); AA – center of the Anabar antecline; P – Popigai crater; 1 – coal basins: Tunguska (TUB), Lena (LEB) and Taimyr (TAB); 2 – the boundary of the Popigai crater; 3 – coal mines and opencasts; 4 – cities. Base map – ESRI imagery mosaic

стабильности. В связи с этим представляется важным проанализировать генезис их формирования.

Анализ возможных геологических причин их образования показал однозначную связь с выходами на поверхность обнажений различных комплексов пород [44; 45], что наглядно видно даже по общедоступной мозаике космоснимков высокого разрешения ESRI (рис. 4).

Аномалия А на севере Сибирского плоскогорья (см. рис. 3) в геоморфологическом плане четко приурочена к краевой части Котуй-Анабарского плато [15, с. 184] с обнажениями кембрийского комплекса пород в западной и северо-западной частях Анабарской антеклизы вокруг Анабарского кристаллического массива архейского возраста. Интересно, что северная часть аномалии А разрывается Попигайской астроблемой (центр кратера 71,467° с. ш., 111,183° в. д., диаметр около 100 км, входит в пятерку крупнейших в мире), образовавшейся в конце эоцена, примерно 35,7 млн лет назад, при падении гигантского (диаметром около 7 км) метеорита [46]. К Попигайскому кратеру приурочено крупнейшее в мире одноименное месторождение импактных алмазов (от англ. impact — удар). Не вызывает со-

мнений, что из-за импакта породы фундамента и осадочного чехла в северной части Сибирской платформы подверглись дроблению и разломным тектоническим процессам в радиусе до нескольких сотен километров, облегчающим миграцию углеводородов (в первую очередь газа) и их накопление в коллекторах трещиноватого типа при наличии покровов. Кроме того, в обнажениях кембрия и перми периферии Анабарской антеклизы встречаются поверхностные выходы битумов, включая крупнейшее в мире Оленекское месторождение.

Весьма вероятно, что отсутствие покровов в полосе региональных обнажений эродированной поверхности доломитов и известняков верхнего и среднего кембрия протяженностью около 620 км и шириной 50—110 км (см. рис. 3), формирующих холмистый рельеф местности, приводит к повышенной эмиссии метана, мигрирующего в субвертикальном направлении и формирующего аномалию А. Местами сильно эродированные обнажения кембрийских пород разорваны интрузиями нижнетриасового возраста, возвышающимися на отдельных участках в виде денудационных останцов. Например, на Эвурийской площади (рис. 5, координаты

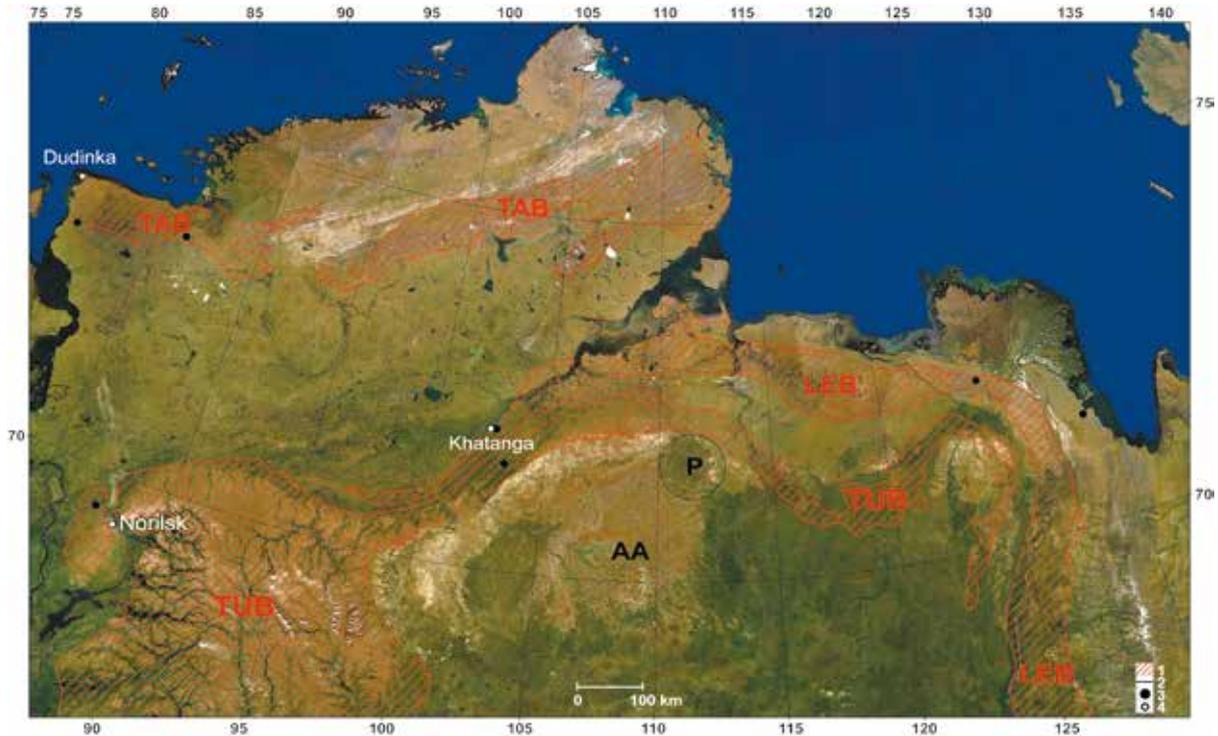


Рис. 4. Мозаика базовых космоснимков ESRI северных частей Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты с зонами угольных бассейнов. Обозначения: AA – центр Анабарской антеклизы; 1 – угольные бассейны: Тунгусский (TUB), Ленский (LEB) и Таймырский (TAB); 2 – граница Попигайского кратера; 3 – угольные шахты и разрезы; 4 – города
 Fig. 4. ESRI satellite imagery mosaic base map of the northern parts of the Siberian platform and the West Siberian plate with zones of coal basins. Legend: AA – center of the Anabar antecline; 1 – coal basins: Tunguska (TUB), Lena (LEB) and Taimyr (TAB); 2 – the boundary of the Popigai crater; 3 – coal mines and opencasts; 4 – cities

центра 69,59° с. ш. и 98,89° в. д.) при средней альтуде поверхности 600—700 м наблюдаются возвышающиеся на 250—300 м гора Эвури (подножие 2,6×3,6 км, высота 1056 м) и гора Конус (1,8×2,2 км, высота 1030 м).

На площади Попигайского кратера концентрация метана снижается (см. рис. 3 - P), а к востоку от нее вновь повышается, и аномальная зона продолжается еще на участке длиной около 70 км. Это, видимо, обусловлено переработкой (дроблением и расплавлением) кембрийских отложений высокотемпературным взрывом метеорита и экранированием возможной миграции газа заполняющими кратер терригенными отложениями, находящимися в мерзлом состоянии.

К северу и западу обнажения кембрийского комплекса перекрыты терригенно-карбонатными отложениями палеозоя и мезозоя с региональными залежами углей Тунгусского и Ленского мегабассейнов [44; 45]. Большинство залежей угля в Арктике характеризуется повышенной метанообильностью [11]. В значительной степени это объясняется наличием малопроницаемых покрышек с многолетнемерзлыми породами (ММП) над большей частью угольных залежей, препятствующих вертикальной миграции и естественному выветриванию газа. За счет этого могут создаваться аномально высокие и сверхвысокие пластовые давления (АВПД и СВД),

и метан угольных пластов может мигрировать в субгоризонтальном направлении по системе разломов и трещин импактного генезиса. Вероятность этого процесса может быть подтверждена механизмом формирования нефтяной залежи в трещиноватых коллекторах гранитоидного фундамента месторождения Белый Тигр, на основе которого был выполнен прогноз потенциальной нефтегазоносности Восточного полушария Циркумарктического региона [5].

Таким образом, аномалия концентрации метана А (см. рис. 3) может быть обусловлена выветриванием (эмиссией) газа из кембрийских отложений, в которые он попал в результате субгоризонтальной миграции из угольных отложений верхнепалеозойского комплекса северного окончания Тунгусского угольного мегабассейна, опоясывающего в виде шлейфа западную и северную периферии Анабарской антеклизы и всю аномалию А кембрийского комплекса. При этом в зоне обнажений пермских терригенных пород (включая уголь) у реки Котуй в Котуйской шахте у поселка Каяк (71,50602° с. ш., 103,24425° в. д.) в 1947—2010 гг. велась добыча каменного угля в годовом объеме до 40—50 тыс. т для обеспечения потребностей поселка Хатанга, а расстояние от Каякского месторождения до аномалии А всего 20 км. В 2013 г. началась добыча бурого угля в разрезе «Восточный» Хатангского месторождения, располо-



Рис. 5. Трехмерное изображение эродированных обнажений доломитов и известняков кембрия с интрузиями. Вид со стороны реки Кунгтыкахи (сформировано в Google)

Fig. 5. 3D image of eroded Cambrian dolomite and limestone outcrops with intrusions. View from the side of the Kungtykakhi River (generated by Google)

женного в 7 км к востоку от Хатанги (75 км от аномалии А). Оно относится к северной полосе Ленского угольного бассейна. К нему же приурочены добыча бурого угля, проводившаяся ранее из обнажений вблизи поселка Нордвиг (до 20 тыс. т в год), и осуществляемая в настоящее время в непромышленных масштабах добыча каменного угля на нижнемеловых обнажениях Сындасского месторождения силами коренного населения поселка Сындасско.

Подобные обоснования генезиса повышенной концентрации метана имеют Оленекская и Таймырская аномалии, приуроченные к эрозионным обнажениям (см. рис. 4 и 5). Оленекская аномалия (см. рис. 3, О) находится внутри подковообразной полосы верхнепалеозойских отложений угля Тунгусско-мегабассейна, вблизи которых залегают бурые угли мезозойского возраста Ленского мегабассейна. Таймырская аномалия контактирует с северной границей Таймырского бассейна с залежами каменного угля пермского возраста (см. рис. 3, Т). При этом известен факт естественного многовекового горения угля в ряде обнажений в горах Бырранга, в том числе в низовье реки Шренк [47].

Таким образом, с учетом вышеупомянутого дробления пород при падении Попигайского метеорита субгоризонтальная миграция угольного газа в зоны трех аномалий концентрации метана (см. рис. 3, А, Т и О) с последующим выветриванием в атмосферу вполне вероятна.

Геоэкологические исследования дегазации Земли на полуострове Ямал

В данном разделе приведены результаты исследования причин повышенного уровня концентрации метана над полуостровом Ямал, установлено выше при статистическом анализе данных ДЗЗ спектрометра TROPOMI (см. рис. 2).

Полуостров Ямал по уровню нефтегазоносности является уникальным регионом глобального значения. Рельеф его поверхности с перепадами высот от 0 до 80—95 м имеет равнинный характер. На Ямале существует густая сеть рек, сток воды которых ориентирован преимущественно в западном и восточном направлениях на акватории Карского моря и Обской губы. Территория сильно заболочена, на ней широко развиты термокарстовые озера. Мощность ММП меняется от 50—150 м в прибрежных зонах до 300—400 м в центральных частях. Широкое распространение имеют пластовые льды с зафиксированными максимальной толщиной до 30 м и площадью до 10 км². В приповерхностной части ММП существуют криопэги с минерализацией воды до 20—100 г/л (до температуры ММП –6°C), включая региональный на глубинах 10—35 м [48]. Под озерами и реками широко распространены талики, в том числе сквозные под Обской губой и под крупными полностью незамерзающими озерами Нейто-Малто, Яррото и др., «приуроченными к зонам крупных разломов» [48]. На ряде детально изучен-

ных площадей по данным сейсморазведки и бурения доказано существование многочисленных глубинных разломов и зон дробления (месторождения Новопортское, Нейтинское, Бованенковское и др.), пронизывающих всю осадочную толщу или ее часть [49].

В центральной части Ямала выделяется группа из крупных термокарстовых озер, включая Нейто-Малто (размер 15,6×16,6 км, площадь по данным ДЗЗ 207,8 км²), Ямбуто (8×22 км, 170,3 км²), Ясавэйто (9—12 км, 90,7 км²), Яррото 1-е (13×23,7 км, 245,5 км²), Яррото 2-е (6—8×21,6 км, 157,791 км²). Глубины этих озер по данным эхолокации в основном небольшие (до 5—20 м), однако выделяются локальные (горизонтальные размеры до 100—1000 м) «воронки» — углубления до 50—63,7 м с максимальным значением в северной части озера Ямбуто [50]. Их «происхождение пока не изучено», хотя предполагается, что они «связаны с вытравиванием инъекционных ледяных образований» (т. е. термокарст) [50]. Такая гипотеза представляется сомнительной, так как на севере озера Нейто-Малто на участке более 2 км существуют обнажения тающего пластового льда мощностью до 20 м (возможно, немного больше) [50]. Авторы работы [50] признают недостаточную плотность батиметрических исследований этих озер, отмечая, что озеро Яррото 2-е исследовано «по одному продольному и нескольким поперечным профилям». Очевидно, что множество локальных углублений (в том числе видимых по данным ДЗЗ из космоса) оказалось пропущенным.

Размеры выявленных «воронки» и исследования озер Ямала по данным ДЗЗ позволяют предположить, что по крайней мере часть из них является кратерами мощных выбросов газа — покмарками [2—11; 25; 27; 32]. Впервые подобные кратеры — покмарки в Арктике были выявлены и исследованы И. Л. Кузиным и Н. М. Кру-



Рис. 6. Термокарстовое озеро с кратерами выбросов газа в северо-восточной части Ямала (фото В. И. Бोगоявленского из вертолета 15 июля 2015 г.)
Fig. 6. Thermokarst lake with gas blowout craters in the north-eastern part of Yamal (photo by V. I. Bogoyavlensky from a helicopter on July 15, 2015)

гликовым в 1971—1972 гг. в озерах в районе Уренгойского месторождения и охарактеризованы как «воронки взрыва — газового прорыва» [16; 17]. Анализ изотопного состава гелия (до 0,005% объема газа) и углерода метана, проведенный во Всероссийском нефтяном научно-исследовательском геологоразведочном институте, свидетельствует об их поступлении из глубоких (1—3 км) горизонтов [16]. В составе газа Еркутинского кратера (С12 в созданной авторами ГИС «Арктика-Мировой Океан» / ГИС «АМО») выявлены этан и пропан, что также свидетельствует о притоке газа с больших глубин из зоны генерации нефти и жирного газа [29]. В других регионах покмарки в строении дна были выявлены на многих озерах и акваториях Мирового океана, включая арктические, при этом по данным сейсморазведки в донных отложениях под покмарками нередко наблюдаются разломы (газоподводящие каналы с больших глубин) — «газовые трубы» (gas chimneys, gas pipes) [2—11; 18; 25; 32]. На суше Ямала также выявлено более 10 кратеров мощных выбросов газа, причем газ имеет преимущественно метановый состав, неоднократно самовоспламенялся и взрывался [2—11; 14; 18; 24; 26—29].

По данным высокодетальных аэрокосмических наблюдений в оптическом диапазоне частот (данные ДЗЗ из космоса преимущественно с разрешением 0,3—0,5 м, съемки из вертолетов и беспилотных летательных аппаратов), на дне водоемов рек и озер Ямала по состоянию на начало 2019 г. авторами выявлено и внесено в базу ГИС «АМО» 415 термокарстовых озер с кратерами выбросов газа (ТОКВГ) [10; 11]. ТОКВГ являются объектами с прямыми признаками дегазации недр, при которой за счет выбросов значительных объемов газа, скопившегося в придонных отложениях и сформировавшего зоны АВПД и СВД [11], образуются подводные кратеры выбросов газа (покмарки) и брустверы из выброшенной породы (рис. 6) [3—11].

В 2018—2019 гг. авторы провели комплексные экспедиционные геолого-геофизические исследования ряда ТОКВГ, выделенных по данным ДЗЗ, и затопленного речной водой Сеяхинского кратера, обозначенного в ГИС «АМО» как С11 [9—11; 18; 27]. Батиметрические исследования этих озер осуществлялись с надувных моторных лодок с применением комплекса эхолотов «Garmin Striker Plus 7cv», «Deeper

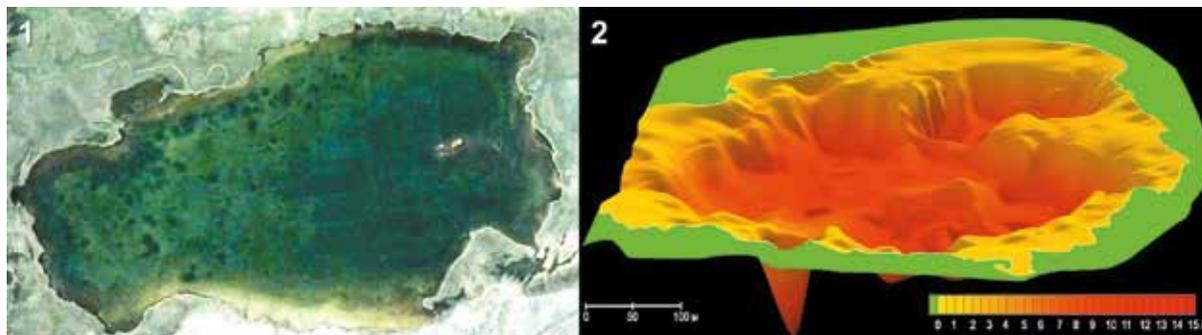


Рис. 7. Космоснимок QuickBird 6 июля 2003 г. озера LC-1 (1) и трехмерная батиметрическая модель рельефа его дна в 2018 г. (2)

Fig. 7. The LC-1 Lake QuickBird satellite image of July 6, 2003 (1) and 3D bathymetric model of its bottom in 2018 (2)

Smart Sonar» и георадара «Око-3», имеющих GPS навигацию. При обработке полевых данных построены батиметрические карты, 3D-модели дна этих озер и приповерхностных отложений. На рис. 7 приведены космоснимок и 3D-модель рельефа дна озера LC-1, на которой наблюдается ряд углублений, в том числе один аномальный локальный объект диаметром около 60 м и глубиной от поверхности воды 15 м (13 м от дна). Поскольку на космоснимке QuickBird 6 июля 2003 г. этот объект не наблюдался, можно предположить, что в период 2003—2018 гг. (вероятно, незадолго до 2018 г.) здесь произошел мощный выброс газа с формированием кратера (остатки бруствера видны на 3D-модели). Это подтверждается наличием на эхограмме факела газа, выходящего из центра кратера. Многочисленные небольшие покмарки, наблюдаемые на дне озера LC-1 по данным ДЗЗ в 2003 г., при батиметрической съемке практически не выделяются, что связано с их активным субаквальным захоронением осадками, ранее доказанным для ряда кратеров выброса газа на Ямале (С1, С3 и С11 в ГИС «АМО») [6—11; 18; 26; 27] и гигантского кратера Figge-Maar в Северном море [2; 32].

Анализ дополнительных космоснимков ДЗЗ высокого разрешения в 2019—2020 гг. позволил расширить базу данных ГИС «АМО» по Ямалу на 1252 ТОКВГ, 2 залива и 4 реки с 1445 зонами дегазации, при этом на 87 крупных озерах (размером свыше 1—1,5 км) и 2 заливах было выделено от 2 до 27 обособленных зон. В частности, в прибрежных зонах самого крупного озера Яррото 1-е выделено 6 зон, а в крупном (19×23 км) заливе Мутный Байдарачской губы — 27. В итоге общее число ТОКВГ на Ямале достигло 1667, а зон дегазации — 1860. Схема расположения ТОКВГ, включая все зоны дегазации, показана на рис. 8.1, а на рис. 8.2 приведены результаты расчета плотности распространения всех ТОКВГ и зон дегазации на базе осреднения 25 км² (5×5 км). Максимальные плотности распространения ТОКВГ выявлены на Южно-Тамбейском участке (22 озера на 25 км², или 0,88 озера/км²) и на

Северо-Сеяхинском участке вблизи кратера С11 (18 озер на 25 км², или 0,72 озера/км²).

Рассмотрение схем рис. 8.1 и 8.2 на более детальном уровне показывает, что в большинстве случаев ТОКВГ группируются в цепочки, в основном расположенные вдоль рек, что указывает на связь ТОКВГ с приразломными газогидродинамическими режимами [10]. Возможно, в приразломных зонах произошло формирование газогидратных полей (залежей), и газ, вырывающийся из придонных отложений ТОКВГ, выделяется при диссоциации газогидратов. Существование газогидратов на суше Арктики доказано на ряде площадей Канады, США и России (включая Бованенковское и Ямбургское месторождения) [2; 11]. В региональном плане выделяются три широкие полосы наибольшей плотности распространения ТОКВГ, две из которых ориентированы на северо-запад, а одна — в перпендикулярном северо-восточном направлении (см. рис. 8.2). Природу этих зон необходимо исследовать. Вполне вероятно, что она обусловлена положением грабен-рифтов [10].

При анализе данных мозаик космоснимков Sentinel-2 в оптическом диапазоне частот в зимний период с разрешением 10 м, ранее выполненном авторами, на территории полуострова Ямал было обнаружено 7185 многолетних бугров пучения (МБП), которые сформировали отдельный раздел в ГИС «АМО» и были использованы для выявления криогенных и газодинамических процессов [2—11; 18; 26; 27]. Специфика и детальность исходных данных ДЗЗ позволяет говорить об уверенном выделении на этих космоснимках целевых объектов с горизонтальными размерами свыше 30—40 м (3—4 пикселя, а по площади 7—13 пикселей). Ранее проведенные авторами исследования доказали, что бугры пучения могут формироваться не только за счет криогенных процессов, но также за счет давления газа, мигрирующего в приповерхностные отложения по проницаемым каналам (разломам, трещинам, пластам-резервуарам) из зон их генерации и аккумуляции, расположенных на разных уровнях седиментосферы (включая криолитозону) и фундамента [2—11; 27].

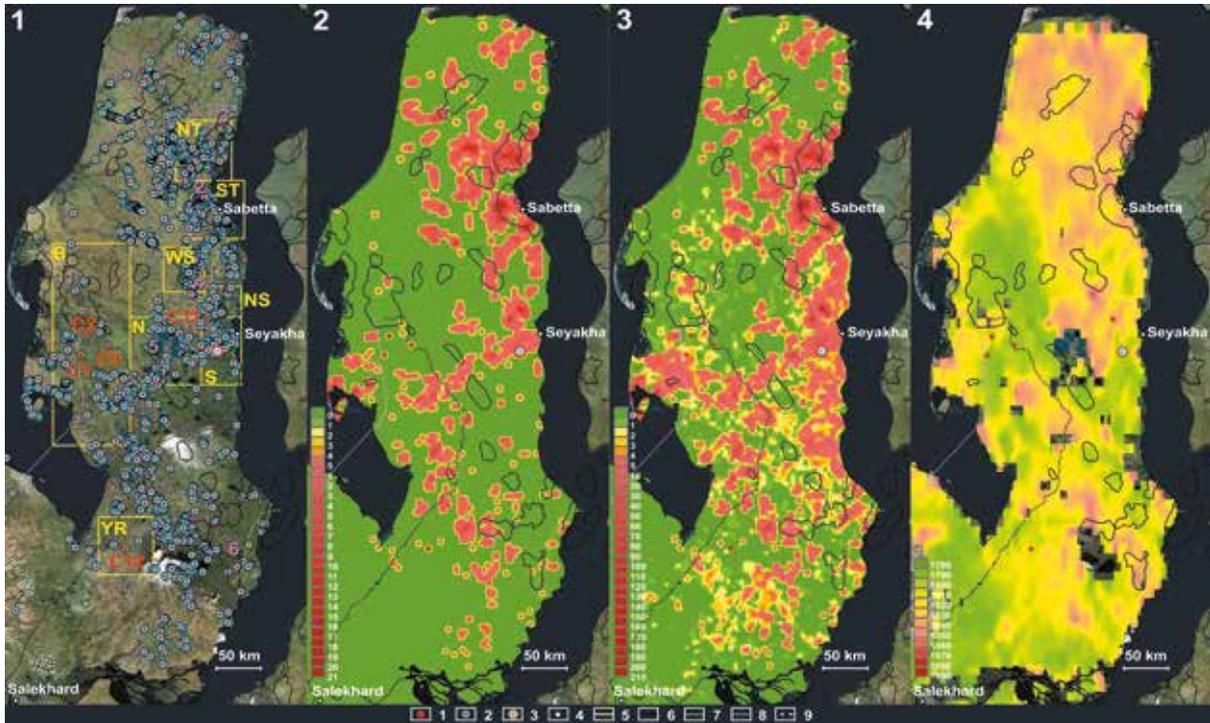


Рис. 8. Схемы распространения кратеров выбросов газа на суше полуострова Ямал и зон дегазации из термокарстовых озер с кратерами на дне (1), плотности распространения зон дегазации из озер с кратерами на дне (2), условного риска мощных выбросов газа (3) и распределение концентрации метана по данным спектрометра TROPOMI спутника Sentinel-5P (4). Обозначения: 1 – кратеры выбросов газа C1, C2, C9, C11 и C12; 2 – озера с кратерами на дне; 3 – озеро Открытие; 4 – населенные пункты; 5 – участки детальных исследований (B – Бованенковский, ST – Южно-Тамбейский, NT – Северо-Тамбейский, N – Нейтинский, S – Сеяхинский, NS – Северо-Сеяхинский, WS – Западно-Сеяхинский, YR – Еркутинский); 6 – месторождения углеводородов, включая показанные цифрами Бованенковское (1), Южно-Тамбейское (2), Северо-Тамбейское (3), Западно-Сеяхинское (4), Нейтинское (5) и Новопортовское (6); 7 – нефтепровод; 8 – газопровод Бованенково-Ухта; 9 – железная дорога. Картографическая основа – ESRI

Fig. 8. Distribution schemes of gas blowout craters on the Yamal Peninsula and degassing zones from termokarst lakes with gas emission craters at the bottom (1), density distribution patterns of degassing zones from the lakes with gas emission craters at the bottom (2), scheme of relative risk of gas blowouts (3) and methane concentration distribution based on Sentinel-5P TROPOMI spectrometer data (4). Legend: 1 – gas blowout craters C1, C2, C9, C11 and C12; 2 – lakes with gas emission craters at the bottom; 3 – Lake Otkrytiye; 4 – settlements; 5 – areas of detailed studies of the OGRI RAS (B – Bovanenkovsky, ST – South Tambeysky, NT – North Tambeysky, N – Neytinsky, S – Seyakhinsky, NS – North Seyakhinsky, WS – West Seyakhinsky, YR – Yerkutinsky); 6 – hydrocarbon fields, including Bovanenkovskoye (1), South Tambeyskoye (2), North Tambeyskoye (3), West Seyakhinskoye (4), Neytinskoye (5) and Novoportovskoye (6), shown in pink; 7 – oil pipeline, 8 – gas pipeline Bovanenkov-Ukhta; 9 – railway. Base map – ESRI

С учетом ранее построенной схемы плотности распространения 7185 МБП на основе принципов, подробно изложенных в [10], построена вторая версия (2020 г.) картографической схемы условного риска выбросов газа (см. рис. 8.3), которая в целом подтверждает корректность первой, но отличается по количественным характеристикам за счет выявления новых ТОКВГ (количество зон эмиссии метана увеличилось в 4,49 раза). Наиболее газозрывоопасными объектами являются Южно-Тамбейский и Сеяхинский участки.

Отметим, что наличие МБП в большинстве случаев свидетельствует о криогидродинамических процессах, протекающих на дне пересохших термокарстовых озер (хасыреев) и других зон, и не имеет прямой связи с эмиссией метана. Однако, как было показано авторами в предыдущих работах [6; 10; 11; 27 и др.], в ряде случаев формирование МБП обус-

ловлено газодинамическим процессом. При этом приуроченность термокарстовых озер и МБП к системам субвертикальных разломов отмечалась во многих работах [12; 15; 29; 50], включая публикации авторов [2—11; 18; 26; 27].

В редких случаях на дне ТОКВГ в зонах развития таликов авторами также обнаружены бугры пучения диаметром до 20—30 м (30 м на озере Яррото 2-м), генезис которых может быть только газо- и/или гидродинамическим. Наиболее вероятно, что формирование и взрыв бугров в талых зонах являются краткосрочным (дни, недели, месяцы) процессом, так как талые породы обладают меньшей прочностью и большей газопроницаемостью, что способствует более быстрому выбросу газа, чем с прочной крышкой из ММП. Например, процесс роста до взрыва 28 июня 2017 г. МБП с формированием гигантского Сеяхинского кратера C11 в русле мелкой

полностью промерзающей зимой реки Мюдриаха составил около четырех лет [10; 11; 27]. В результате исследований на объектах С3, С11 и кратерном озере Открытие доказано действие вулканического механизма с повторными выбросами газа [6; 9—11; 27]. На озере Открытие было впервые доказано, что выбросы газа могут обладать большой мощностью, достаточной для разрушения толстого льда (около 1,5 м) и разлета его крупных кусков на значительные расстояния от подводного кратера и образовавшейся полыньи [10; 11; 27].

На рис. 8.4 приведена картографическая схема распределения концентрации метана на полуострове Ямал по данным спектрометра TROPOMI спутника Sentinel-5P (фрагмент схемы на рис. 1 с детализированной шкалой). Визуальное сопоставление данной схемы со схемой на рис. 8.2 однозначно свидетельствует об их взаимной связи. Это позволяет утверждать, что на фоне средней для ямальской тундры концентрации метана на уровне 1831,5 ppbV аномально повышенные зоны (до 1840—1860 ppbV) обусловлены эмиссией со дна выявленных ТОКВГ. В частности, локальная аномалия приурочена к Селяхинскому кратеру С11, где авторами доказана активная эмиссия газа в 2017—2019 гг. [9—11; 27].

Локальные различия схем на рис. 8.2 и 8.4 на ряде участков могут быть обусловлены тем, что по данным ДЗЗ не всегда удается распознать наличие кратеров на дне озер. Это может быть связано с отсутствием кондиционных снимков в общей мозаике для всего полуострова Ямал по причинам частой облачности, ветровой ряби на поверхности водоема, замутнения воды и поглощения света на больших глубинах. Кроме того, различия могут быть вызваны антропогенным фактором.

Полученные результаты подтверждаются данными экспедиционных исследований экспертов из США и Канады [37; 41; 42], в которых обосновывается крупный вклад термокарстовых озер в глобальную эмиссию метана. По их оценкам, в Циркумарктическом регионе около половины подземного органического углерода сосредоточено в районах термокарстовых ландшафтов, составляющих около 20% территории развития ММП (около 3,6 млн км²) [37]. Северная часть Западно-Сибирской низменности, включая полуостров Ямал, Северный склон Аляски и долину реки Маккензи, отнесена к арктическим территориям с «очень высоким» (60—100%) уровнем развития термокарстового ландшафта (thermokarst landscapes) и бореальных болот (boreal peatland). По результатам экспедиционных исследований [41] около 95% эмиссии метана из термокарстовых озер на севере Якутии около реки Колымы происходит в виде всплывания пузырей газа (ebullition/bubbling), нередко формирующего картину «кипения» воды. При этом объем эмиссии озерного метана в данном регионе составляет около 3,8 Тг в год (3,8 млн т, или 5,3 млрд м³ в год). Экстраполяция измеренных потоков по 16 районам Циркумарктического региона

к северу от широты 45° свидетельствует, что термокарстовые озера эмитируют в атмосферу от 13,7 до 34,7 млн т в год (19,1—48,3 млрд м³ в год) [42]. Согласно обновленным данным Международного энергетического агентства IEA (International Energy Agency) глобальная эмиссия метана оценивается в 570 млн т (795 млрд м³), включая около 40% из природных источников и 60% из антропогенных [36]. С учетом этих данных доля газа термокарстовых озер составляет 3,3—8,5% общей эмиссии, или 8,25—21,25% эмиссии из природных источников.

Антропогенные выбросы метана и других газов

На рис. 8.4 наблюдается значительная аномалия концентрации метана в пределах практически всего разрабатываемого Новопортовского месторождения, на котором в 2019 г. сжигались большие объемы попутного нефтяного газа и обнаружено всего одно ТОКВГ. Эта аномалия, видимо, обусловлена не эмиссией из ТОКВГ, а техногенными утечками метана. Подобная картина наблюдается в южной части разрабатываемого Бованенковского месторождения, где расположена основная часть инфраструктуры промысла. В районах расположения компрессорных станций магистрального газопровода высокого давления (120 атм) Бованенково — Ухта диаметром 1420 мм на двух противоположных берегах Байдарачной губы (положение наземного и подводного газопровода показано на рис. 8) ТОКВГ не обнаружены, однако на рис. 8.4 видны четкие аномалии содержания метана. Это также может свидетельствовать об их техногенных причинах.

Исследования устьев многих старых и действующих скважин на месторождениях углеводородов и подземных хранилищах газа во многих регионах, включая Арктику, показывают значительные утечки в атмосферу газа преимущественно метанового состава. Из-за деградации ММП в приустьевой зоне скважин часто формируются провалы поверхностного грунта и наблюдается выделение пузырей газа [1; 2]. Во многих случаях изотопный состав углерода метана и наличие примесей этана, пропана и других газов подтверждают их глубинный (термогенный) генезис [1; 2; 11; 18; 26; 27; 29].

Особенно велика эмиссия газа в старых районах добычи нефти, так как первоначально в XIX в. скважины бурились без обсадных колонн или за 100—150 лет имеющиеся колонны подверглись сильной коррозии. Мы неоднократно отмечали, что за счет заколонных и межколонных перетоков, возникающих из-за низкого качества строительства скважин, в верхней части разреза «над многими месторождениями сформировались крупные техногенные залежи, угрожающие экосистемам осваиваемых регионов и экономической безопасности страны» [2; 11; 21]. Газ из этих приповерхностных залежей находит субвертикальные каналы миграции и проникает в гидросферу и атмосферу в виде небольших струй

(сипов) или приводит к мощным пневматическим выбросам, при этом он нередко самовоспламеняется и взрывается [2—11; 18; 26; 27]. Ранее авторами была доказана продолжающаяся эмиссия газа на ряде месторождений (Кумжинском, Бованенковском и др.) в местах катастрофических выбросов газа при бурении скважин во времена СССР, которая четко видна на данных ДЗЗ [4; 11; 18; 27].

Техногенные выбросы в атмосферу газа с устьев скважин трудно оценить, и в настоящее время они не учитываются ни в каких кадастрах выбросов газа. Однако примерные оценки для штата Пенсильвания [34] показали, что они достигают 4—7% общей эмиссии антропогенного метана. Очень высокая техногенная эмиссия газа также зафиксирована в районах добычи сланцевых нефти и газа.

Подобная ситуация имеет место и на угольных месторождениях, где проводится постоянная принудительная вентиляция шахт и лишь небольшая часть угольного метана утилизируется (например, используется для выработки электроэнергии) [11]. Отметим, что в Китае, являющемся мировым лидером по добыче угля, в последние два десятилетия действовало по разным данным от 10 до 16 тыс. шахт, при этом эмиссия угольного метана в 2012 г. была оценена разными экспертами в диапазоне 14—28 Тг в год (14—28 млн т, или 19,5—39,1 млрд м³ в год) — более 60% мировой эмиссии угольного метана при долях в мировых добыче и потреблении около 48% и 50,5—50,7% [39].

27 декабря 2019 г. исполнилось 50 лет со дня начала разработки месторождений углеводородов в Арктике, что ознаменовалось официальным принятием в эксплуатацию газопровода протяженностью 263 км, проложенного от Мессояхского месторождения в Норильск и на Норильский горно-металлургический комбинат (ныне ПАО «ГМК «Норникель»). С начала 1970-х годов для электрического и теплового снабжения на смену углю пришел газ, норильские шахты и разрезы были законсервированы, что позволило значительно сократить техногенную эмиссию парниковых газов в Арктике. Однако техногенные выбросы газа на многих предприятиях в Арктике продолжают, и мы находимся лишь в начале пути к их сокращению.

Заключение

В результате проведенного анализа измерений концентрации метана спектрометром TROPOMI (спутник Sentinel-5P ESA) в Циркумарктическом регионе выявлены аномалии в различных частях АЗРФ и дано обоснование причин их образования. Весьма вероятно, что самая сильная аномалия на севере Сибирской платформы, обрамляющая западную и северную периферии Анабарской антеклизы, обусловлена выветриванием газа через эродированные поверхности трещиноватых кембрийских доломитов и известняков. При этом газ мог мигрировать в субвертикальном направлении из глубин кембрийских

и докембрийских отложений или попасть в зону выветривания при субгоризонтальной миграции из прилегающих палеозойских регионально угленосных отложений Тунгусского мегабассейна.

По данным ДЗЗ, на полуострове Ямал впервые выявлено 1667 термокарстовых озер и 1860 обособленных зон с кратерами выбросов газа на дне. Построены картографическая схема плотности их распространения и детализированная схема условного риска мощных выбросов газа (версия 2020 г.). Установлена однозначная связь зон повышенной концентрации метана в атмосфере с зонами наибольшей плотности распространения термокарстовых озер с кратерами выбросов газа.

Ряд локальных аномалий концентрации метана в атмосфере над полуостровом Ямал, видимо, обусловлен повышенной техногенной эмиссией метана в зонах активной нефтегазодобычи и транспортировки газа. Однако техногенные аномалии по уровню соизмеримы с природными, создаваемыми в зонах дегазации термокарстовых озер с кратерами.

Данные спектрометра TROPOMI представляют большое значение для геоэкологического мониторинга обстановки в труднодоступных регионах Арктики. Причины образования крупных по размерам аномалий концентрации метана имеют геологическое обоснование, а генезис отдельных локальных аномалий имеет техногенный характер. Вместе с тем не вызывает сомнений необходимость дальнейшей валидации получаемых значений для разнообразных геологических условий суши и акваторий Арктики, в которых существуют значительные изменения альбедо, как в летнее, так и в зимнее время.

Post scriptum

На памятнике академику В. И. Вернадскому (1863—1945) высечена оптимистичная эпитафия «Мы живем в замечательное время, когда человек становится геологической силой, меняющей лик нашей планеты». Наряду с отдельными положительными фактами воздействия человека на природу, к сожалению, мы имеем широкомасштабные негативные последствия, многие из которых устранить фактически невозможно. Объемы добычи горючих ископаемых продолжают расти. Растут и объемы эмиссии парниковых газов. Судя по всему, мир действительно вступил в эпоху антропоцена. На основе документально подтвержденного небывало быстрого роста утраты биоразнообразия на Земле ряд авторитетных ученых считает, что наступила эпоха очередного массового вымирания [51; 52].

Работа выполнена по государственному заданию по теме «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли» (№ АААА-А19-119021590079-6). Авторы благодарны правительству Ямало-Ненецкого автоном-

ного округа, ПАО «НОВАТЭК» и ОАО «Ямал СПГ» за большую помощь в проведении экспедиционных работ. Авторы благодарят члена-корреспондента РАН В. Н. Захарова за консультацию о границах угольных бассейнов Сибири и признательны Европейскому космическому агентству ESA за предоставление данных ДЗЗ по мониторингу концентрации метана в Арктике.

Литература/References

1. Аветов Н. Р., Краснова Е. А., Якушев В. С. Некоторые особенности приустьевых газопроявлений из интервала криолитозоны на территории Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения // Газовая пром-сть. — 2017 — № 8. — С. 44—47.
 Avetov N. R., Krasnova E. A., Yakushev V. S. Nekotorye osobennosti priustyevykh gazoproavleniy iz intervala kriolitozony na territorii Yamburgskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya [Some peculiarities of near-wellhead gas shows on the territory of Yam-burg oil, gas and condensate field]. *Gazovaya prom-st'*, 2017, no. 8. pp. 44—47. (In Russian).

2. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Тр. Вольного экон. о-ва. — 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175.
 Bogoyavlensky V. I. Arktika i Mirovoi okean: sovremennoe sostoyanie, perspektivy i problemy osvoeniya resursov uglevodorodov. Monografiya. [Arctic and the World Ocean: current state, perspectives and challenges of hydrocarbon production. Monograph]. *Tr. Volnogo ekon. o-va*, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).

3. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 13—18.
 Bogoyavlensky V. I. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Yamala. [The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic cryolithozone. Yamal craters]. *Burenie i nef't*, 2014, no. 9, pp. 13—18. (In Russian).

4. 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. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Yamala. Pt. 2. [The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic cryolithozone. Yamal and Taymyr craters. Pt. 2]. *Burenie i nef't*, 2014, no. 10, pp. 4—8. (In Russian).

5. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Богоявленская О. В., Никонов Р. А. Перспективы нефтегазоносности седиментационных бассейнов и фундамента Циркумарктического региона // Геология нефти и газа. — 2017. — № 5. — С. 5—20.
 Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Bogoyavlenskaya O. V., Nikonov R. A. Perspektivy neftegazonosnosti sedimentatsionnikh basseynov i fundamenta Tsirkumark-ticheskogo regiona. [Oil and gas occurrence prospects

of the Circum-arctic sedimentation basins and base-ment]. *Geologiya nef'ti i gaza*, 2017, no. 5, pp. 5—20. (In Russian).

6. Богоявленский В. И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 1 (29). — С. 48—55. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55.
 Bogoyavlensky V. I. Gazogidrodinamika v kraterakh vybrosa gaza v Arktike. [Gas-hydrodynamics in the Arctic craters of gas blowout]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2018, no. 1 (29), pp. 48—55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55. (In Russian).

7. 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. — № 2 (30). — С. 83—93. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-83-93.
 Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Sizov O. S., Nikonov R. A. Tekhnologii distantsionnogo viyavleniya i monitoring degazatsii Zemli v Arktike: poluostrov Yamal, ozero Neito. [Technologies for remote detection and monitoring of the Earth degassing in the Arctic: Yamal peninsula, Neito lake]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2018, no. 2 (30), pp. 83—93. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-83-93. (In Russian).

8. 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. Prirodnye i tekhnogennye ugrozy pri poiske, razvedke i razrabotke mestorozhdeniy uglevodorodov v Arktike. [Natural and technogenic threats in prospecting, exploration and development of hydrocarbon fields in the Arctic]. *Miner. resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2018, no. 2, pp. 60—70. (In Russian).

9. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сейхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 88—105. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47.
 Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N., Kishankov A. V. Degazatsiya Zemli v Arktike: distantsionnye i ekspedit-sionnye issledovaniya katastroficheskogo Seyakhinskogo vybrosa gaza na poluostrove Yamal. [Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019, no. 1 (33), pp. 88—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47. (In Russian).

10. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термоарстовых озер с кратерами выбро-

- сов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 52—68. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68.
- Vogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N.* Degazatsiya Zemli v Arktike: kompleksnyye issledovaniya rasprostraneniya bugrov pucheniya i termokarstovykh ozer s kraterami vybrosov gaza na poluostrove Yamal. [Earth Degasing 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*, 2019, no. 4 (36), pp. 52—68. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68. (In Russian).
11. *Богоявленский В. И.* Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Горная промышленность. — 2020. — 1 (149). — С. 97—118. — DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118.
- Vogoyavlensky V. I.* Prirodnye i tekhnogennyye ugrozy pri osvoenii mestorozhdeniy goryuchikh iskopaemykh v kriolitosfere Zemli. [Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere]. *Gornaya prom-st'*, 2020, no. 1 (149), pp. 97—118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian).
12. *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 Y. B.* Kriogennaya tolscha gazonosnykh struktur Yamala. O vliyaniy gazovykh zalezhey na formirovaniye i razvitiye kriogennoy tolschi. [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).
13. *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. — DOI: 10.7868/S020596141504003X.
- Bondur V. G., Kuznetsova T. V.* Vyyavlenie gazovykh sipov v akvatoriyakh arkticheskikh morey s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya. [Detection of gas seeps in the Arctic offshore areas, using remote sensing data]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, no. 4, pp. 30—43. DOI: 10.7868/S020596141504003X. (In Russian).
14. *Власов А. Н., Хименков А. Н., Волков-Богородский Д. Б., Левин Ю. К.* Природные взрывные процессы в криолитозоне // Наука и технол. разработки. — 2017. — Т. 96, № 3. — С. 41—56.
- Vlasov A. N., Khimenkov A. N., Volkov-Bogorodskiy D. B., Levin Yu. K.* Prirodnyye vzryvnyye protsessy v kriolitozoneye. [Natural explosive processes in cryolithozone]. *Nauka i tekhnol. razrabotki*, 2017, vol. 96, no. 3, pp. 41—56. (In Russian).
15. *Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э. Д. Ершова.* — М., 1989. — 414 с.
- Geokriologiya SSSR. Srednaya Sibir'.* [Geocryology of the USSR. Middle Siberia]. Ed. by E. D. Yerшов. Moscow, 1989, 414 p. (In Russian).
16. *Кругликов Н. М., Кузин И. Л.* Выходы глубинного газа на Уренгойском месторождении // Структурная геоморфология и неотектоника Западной Сибири в связи с нефтегазонасностью. — Тюмень, 1973. — С. 96—106. — (Тр. ЗапСибНИГНИ; вып. 3).
- Kruglikov N. M., Kuzin I. L.* Vykhyody glubinnogo gaza na Urengoyском mestorozhdenii. [Emissions of deep gas on the Urengoy field]. *Strukturnaya geomorfologiya i neotektonika Zapadnoy Sibiri v svyazi s neftegazonosnostyu*, 1973, pp. 96—106. (Tr. ZapSibNIGNI, iss. 37). (In Russian).
17. *Кузин И. Л.* О природе аномальных озер — показателей углеводородов в глубоких горизонтах осадочного чехла. Проблемы оценки новых зон нефтегазонакопления в основных продуктивных толщах Западной Сибири. — СПб.: ВНИГРИ, 1992. — С. 129—137.
- Kuzin I. L.* O prirode anomal'nykh ozer — pokazateley uglevodorodov v glubokikh gorizontakh osadochnogo chekhla. [About the nature of blue lakes — the indicators of hydrocarbon accumulations in deep horizons of sedimentary cover]. *Problemy otsenki novykh zon neftegazonakopleniya v osnovnykh produktivnykh tolschakh Zapadnoy Sibiri.* St. Petersburg, VNIIGRI, 1992, pp. 129—137. (In Russian).
18. *Лаверов Н. П., Богоявленский В. И., Богоявленский И. В.* Фундаментальные аспекты рационального освоения ресурсов нефти и газа Арктики и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 2 (22). — С. 4—13.
- Laverov N. P., Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V.* Fundamentalnyye aspekty ratsionalnogo osvoyeniya resursov nefti i gaza Arktiki i shelfa Rossii: strategiya, perspektivy i problem. [Fundamental aspects of rational Russian Arctic and shelf oil and gas resources development: strategy, perspectives and challenges]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2016, no. 2 (22), pp. 4—13. (In Russian).
19. *Мельников Д. В.* Применение данных OMI/Aura для задач мониторинга извержений вулканов Камчатки // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2008. — Т. 5, № 1. — С. 371—375.
- Melnikov D. V.* Primeneniye dannykh OMI/Aura dlya zadach monitoring izverzheniy vulkanov Kamchatki. [The use of OMI/Aura data for Kamchatka volcanos monitoring]. *Sovremennyye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 371—375. (In Russian).
20. *Осипов В. И.* Опасные природные процессы — стратегические риски России. — М.: РБОФ «Знание» им. С. И. Вавилова, 2009. — Вып. 15. — 40 с.
- Osipov V. I.* Opasniye prirodniye protsessy — strategicheskiye riski Rossii. [Dangerous natural processes — strategic risks of Russia]. Moscow, Znaniye, 2009, iss. 15, 40 p. (In Russian).

21. Указ Президента РФ «О сокращении выбросов парниковых газов» от 30 сентября 2013 г. № 752. — URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/37646>. Decree of the Russian President “O sokrashchenii vibrosov parnikovyykh gazov”. [On the reduction of greenhouse gases emission] from 30th of September, 2013 no. 752. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/37646>. (In Russian).
22. Семёнов С. М., Говор И. Л., Уварова Н. Е. и др. Роль метана в изменении климата / Под ред. д-ра хим. наук, проф. А. Г. Ишкова. — М.: ИГКЭ, 2018. — 106 с. *Semyonov S. M., Govor I. L., Uvarova N. E. et al. Rol' metana v izmenenii klimata*. [The role of methane in the climate change]. Ed. by A. G. Ishkov. Moscow, IGKE, 2018, 106 p. (In Russian).
23. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Семилетов И. П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. Акад. наук. — 2012. — Т. 446, № 3. — С. 330—335. *Sergienko V. I., Lobkovsky L. I., Semiletov I. P. et al. Degradatsiya podvodnoy merzloty i razrushenie gidratov shelfa morey Vostochnoy Arktiki kak vozmozhnaya prichina “metanovoy katastrofy”: nekotorye rezultaty kompleksnykh issledovaniy 2011 goda*. [The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of the East Arctic seas as a potential cause of the methane catastrophe: some results of integrated studies in 2011]. Dokl. Akad. nauk, 2012, vol. 446, no. 3, pp. 330—335. (In Russian).
24. Сизов О. С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68. *Sizov O. S. Distantsonniy analiz posledstviy poverkhnostnykh gazoprovyavleniy na severe Zapadnoy Sibiri*. [Remote analysis of the surface gas shows consequences in the north of Western Siberia]. Geomatika, 2015, no. 1, pp. 53—68. (In Russian).
25. *Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor*. Science, 356, 2017, 18 p. DOI: 10.1126/science.aal4500.
26. *Bogoyavlensky V. Gas Blowouts on the Yamal and Gydan Peninsulas*. GeoExPro, [London], 2015, vol. 12, no. 5, Oct., p. 74—78.
27. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kishankov A. Complex of Geophysical Studies of the Seyakha Catastrophic Gas Blowout Crater on the Yamal Peninsula, Russian Arctic*. Geosciences, 2020, 10, 215. 22 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences10060215>.
28. *Chuvilin E., Sokolova N., Davletshina D. et al. Conceptual Models of Gas Accumulation in the Shallow Permafrost of Northern West Siberia and Conditions for Explosive Gas Emissions*. Geosciences, 2020, 10 (5), 195, pp. 1—13. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences10050195>.
29. *Chuvilin E., Stanilovskaya J., Titovsky A. et al. A Gas-Emission Crater in the Erkuta River Valley, Yamal Peninsula: Characteristics and Potential Formation Model*. Geosciences, 2020, 10, 170, pp. 1—16. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences10050170>.
30. *Collins W. D., Feldman D. R., Kuo C., Nguyen T. P. Large regional shortwave forcing by anthropogenic methane informed by Jovian observations*. Science Advances, 2018, vol. 4, no. 9, eaas9593. DOI: 10.1126/sciadv.aas9593.
31. *Jacob D. J., Turner A. J., Maasackers J. D., Sheng J. et al. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions*. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16 (22), pp. 14371—14396.
32. *Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment*. Cambridge, 2007. 475 p.
33. *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, 120, pp. 58—69.
34. *Kanga M., Kanna C. M., Reida M. C. et al. Direct measurements of methane emissions from abandoned oil and gas wells in Pennsylvania*. PNAS, 2014, 111 (51), pp. 18173—18177. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1408315111>.
35. *Lambert J.-C., Compernelle S., Eichmann K.-U. et al. Quarterly Validation Report of the Copernicus Sentinel-5 Precursor Operational Data Products #06: April 2018 — February 2020. S5P MPC Routine Operations Consolidated Validation Report series, Issue #06, Version 06.0.1, 2020. 154 p. Available at: http://s5p-mpc-vdaf.aeronomie.be/ProjectDir/reports/pdf/S5P-MPC-IASB-ROCVR-06.0.1-20200330_FINAL.pdf.*
36. *McGlade C., Michaels K. C., Gould T. Global methane emissions from oil and gas. Insights from the updated IEA Methane Tracker*. IEA, 31 Mar. 2020. Available at: <https://www.iea.org/articles/global-methane-emissions-from-oil-and-gas>.
37. *Olefeldt D., Goswami S., Grosse G. et al. Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes*. Nat. Commun., 2016, 7, 13043. DOI: 10.1038/ncomms13043.
38. Sentinel-5P OFFL CH4: Offline Methane. Available at: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_CH4.
39. *Sheng J., Song S., Zhang Y., Prinn R. G., Janssens-Maenhout G. Bottom-Up Estimates of Coal Mine Methane Emissions in China: A Gridded Inventory, Emission Factors, and Trends*. Environmental Science & Technology Letters, 2019, 6 (8), pp. 473—478. DOI: 10.1021/acs.estlett.9b00294.
40. Trends in Atmospheric Methane. NOAA. Global Monitoring Laboratory. 2020. Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/.
41. *Walter K. M., Zimov S., Chanton J. P., Verbyla D., Chapin III F. S. Methane bubbling from Siberian thaw lakes*

- as a positive feedback to climate warming. *Nature*, 2006, 443, 71—75. DOI: 10.1038/nature05040.
42. *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) 365, pp. 1657—1676. DOI:10.1098/rsta.2007.2036.
43. Проблемы зарождения и эволюции биосферы. — Ч. 2 / Под ред. акад. Э. М. Галимова. — М.: КРАСАНД, 2013. — 640 с.
Problemy zarozhdeniya i evolyutsii biosfery. Ch. 2 [Problems of biosphere genesis and evolution. Pt. 2]. Ed. by E. M. Galimov. Moscow, KRASSAND, 2013, 640 p. (In Russian).
44. Государственная геологическая карта СССР: Карта дочетвертичных образований. R-48-(50). Масштаб 1:1 000 000. — Л.: ВСЕГЕИ, 1979.
Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR. Karta dochetvertichnykh obrazovaniy [State geological map of USSR. Map of Pre-Quaternary deposits]. R-48-(50). Scale 1:1 000 000. Leningrad, VSEGEI, 1979. (In Russian).
45. Карта угленосности, сланценосности и геохимической специализации углей и горючих сланцев России. Масштаб 1:10 000 000 / Авт.: Б. Б. Голубев, В. В. Кирюков, А. А. Смыслов, Л. И. Тихомиров; под ред. Ю. Н. Малышева. — СПб.: ВСЕГЕИ, 1998.
Karta uglenosnosti, slantsenosnosti i geokhicheskoy spetsializatsii ugley i goryuchikh slantsev Rossii. [Map of coal and shale bearing and geochemical specialization of coals and oil shales of Russia]. By B. B. Golubev, V. V. Kryukov, A. A. Smyslov, L. I. Tikhomirov, ed. by Yu. N. Malyshev. St. Petersburg, VSEGEI, 1998. (In Russian).
46. *Масайтис В. Л. и др.* Алмазонасные импактиты Попигаиской астроблемы. — СПб.: ВСЕГЕИ, 1998. — 165 с.
Massaytis V. L. et al. Almazonosnye impaktity Popigaiskoi astroblemy. [Diamond bearing impact glasses of Popigay astrobleme]. St. Petersburg, VSEGEI, 1998, 165 p. (In Russian).
47. *Горшков В.* Таймырский дневник. — Ч. 7: Горящие угли Бырранга. Available at: <https://vitaly-gorshkov.livejournal.com/9719.html>.
- Gorshkov V.* Taymyrskiy dnevnik. Goryashchiye ugli Byrranga. [Taimyr diary. Pt. 7. Burning coals of Byrranga]. Available at: <https://vitaly-gorshkov.livejournal.com/9719.html>. (In Russian).
48. *Шишкин М. А., Файбусович Я. Э., Шкарубо С. И и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист R-42 — п-ов Ямал: Объяснительная записка. — СПб.: Картограф. ф-ка ВСЕГЕИ, 2015. — 366 с.
Shishkin M. A., Faybusovich Ya. E., Shkarubo S. I., Nazarov D. V. et al. Gosudarstvennaya Geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Mashtab 1:1 000 000 (tretye pokoleniye). Seriya Zapadno-Sibirskaya. List R-42 — p-ov Yamal. Obyasnitelnaya zapiska [The State Geological map of Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). Western Siberian series. Sheet R-42 — Yamal peninsula. Explanatory letter]. St. Petersburg, Kartograf. f-ka VSEGEI, 2015, 366 p. (In Russian).
49. *Скоробогатов В. А., Строганов Л. В., Копеев В. Д.* Геологическое строение и нефтегазоносность Ямала. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 352 с.
Skorobogatov V. A., Stroganov L. V., Kopeev V. D. Geologicheskoe stroenie i gazoneft' enosnost' Yamala. [Geological structure and oil and gas potential of Yamal]. Moscow, ООО "Nedra-Biznestsentr", 2003, 352 p. (In Russian).
50. *Эдельштейн К. К., Алябян А. М., Горин С. Л., Попрядухин А. А.* Гидрологические особенности крупнейших озер полуострова Ямал // Тр. КНЦ РАН. — 2017. — № 10. — С. 3–16. — DOI: 10.17076/lim571.
Edelshtein K. K., Alabyan A. M., Gorin S. L., Popryadukhin A. A. Hidrogeologicheskiye osobennosti krupneyshikh ozyor poluostrova Yamal. [Hydrological and hydrochemical features of the largest lakes of the Yamal peninsula]. Tr. KNTs RAN, 2017, no. 10, pp. 3—16. DOI: 10.17076/lim571. (In Russian).

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: vib@pgc.su.

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.

Каргина Татьяна Николаевна, младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: tatyana.nik92@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

Богоявленский В. И., Сизов О. С., Никонов Р. А. и др. Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 6—22. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22.

EARTH DEGASSING IN THE ARCTIC: THE GENESIS OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC METHANE EMISSIONS

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on July 29, 2020

Abstract

Through the analysis of the methane concentration in the Circum-Arctic region according to the data of the TROPOMI spectrometer (satellite Sentinel-5P ESA) the authors revealed strong natural anomalies in the Arctic zone of Russia and suggested possible reasons for their formation. For the northern part of the Siberian platform, the authors have substantiated models of the elevated methane emissions into the atmosphere due to sub-vertical migration from the Cambrian deposits and/or sub-horizontal gas migrations from the regional coal-bearing deposits of the Tunguska, Lena and Taimyr basins. According to ultra-high resolution remote sensing data, the researchers have identified 1860 zones of active degassing with gas emission craters at the bottom of 1667 thermokarst lakes, 2 bays and 4 rivers on the Yamal Peninsula. These zones have unambiguous connection with the areas of elevated methane concentration in the atmosphere recorded by the TROPOMI spectrometer. The authors have outlined the necessity of further TROPOMI data validation in different natural conditions of Arctic land and water, including zones of active subsurface use.

Keywords: *Circum-Arctic region, Arctic, Yamal, greenhouse gases, methane, coalbed methane, gas migration, gas emission, Tunguska coal basin, Popigai astrobleme, thermokarst lakes, gas blowout craters, pockmarks, RS, Sentinel-5P.*

The research was conducted according to the state assignment on the topic "Rational nature management and effective development of oil and gas resources in the Arctic and Subarctic zones of the Earth" (No. AAAA-A19-119021590079-6). The authors are grateful to the government of the Yamalo-Nenets Autonomous District, PJSC NOVATEK and OJSC Yamal LNG for their considerable aid during expeditionary work. The authors are grateful to the European Space Agency (ESA) for providing Earth remote sensing data on the Arctic methane concentration monitoring.

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: vib@pgc.su.

Sizov Oleg Sergeyevich, 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 Vasilyevich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Kargina Tatiana Nikolayevna, Junior Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: tatyana.nik92@gmail.com.

Bibliographic description

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. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 3 (39), pp. 6—22. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22. (In Russian).

© Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., 2020