

УДК. 502:631.4(98), 550.834(26)

Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал

В. И. Богоявленский¹, член-корреспондент РАН
ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН

О. С. Сизов², кандидат географических наук
ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН,
АО «Российские космические системы», Научный центр оперативного мониторинга Земли

И. В. Богоявленский³, **Р. А. Никонов**⁴
ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН

Показано, что термокарстовые озера на севере Сибири являются активным источником эмиссии метана в атмосферу. Разработаны критерии выявления поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике на примере озер Ямала по данным дистанционного зондирования из космоса. Поиск газопроявлений должен быть основан на ряде выявленных дистанционных признаков, к которым относятся: аномальный голубой цвет воды, наличие кратеров на дне и сипов газа в воде, наличие следов газовых скоплений в сезонном ледовом покрове, а также активная береговая эрозия и процессы мерзлотного пучения вблизи уреза воды. Выявленные признаки с высокой степенью достоверности могут использоваться для детального картирования газопроявлений в высоких широтах.

Ключевые слова: Арктика, полуостров Ямал, дистанционное зондирование, космоснимки, дегазация, газопроявления, выбросы газа, кратеры.

Введение

В последние годы значительно вырос интерес мировой научной общественности к проблеме эмиссии газа, широко распространенной на суше и акваториях Арктики [1—7; 9; 14; 21—23; 24—31; 34; 38; 40; 43—47]. В результате аэрокосмических исследований и ряда экспедиций, организованных в 2014—2016 гг. на полуостровах Ямал и Гыданский Некоммерческим партнерством «Российский центр освоения Арктики» при поддержке губернатора Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) Д. Н. Кобылкина и его заместителя А. В. Мажарова, обнаружено около десяти гигантских кратеров газовых выбросов. Пять из них наиболее хорошо изучены, однозначно образовались на месте бугров пучения (булгуннях — пинго), показаны на рис. 1 и описаны в ряде работ авторов настоящей статьи [1—6; 27; 30 и др.]. Кроме того, по данным аэрокосмической

съемки в 2015—2016 гг. выявлено более 150 озер с многочисленными кратерами в донных отложениях нередко с брустверами выброшенной породы [3—6; 21; 30 и др.], подобных известным покмаркам (rockmarks), часто наблюдаемым на дне многих акваторий Мирового океана [1—7; 21; 27; 28; 30; 34; 40]. При этом некоторые озера сезонно полностью или частично высыхают, и кратеры оказываются обнаженными на суше [21].

Активизации изучения газопроявлений на суше и на шельфе высоких широт способствует изменение оценки долевых вкладов в глобальное потепление углекислого газа и других парниковых газов, среди которых наиболее распространен метан. В структуре баланса эмиссии метана с российской территории больше половины составляют выбросы с поверхности переувлажненных территорий (заболоченных участков и водных объектов) [14].

Для арктических регионов установлены две основные зоны генерации газа, выходящего в атмосферу и водную толщу: верхняя часть разреза (ВЧР — от поверхности до глубин 800—1200 м)

¹ e-mail: vib@pgc.su.

² e-mail: kabanin@yandex.ru.

³ e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

⁴ e-mail: nikonovroman@gmail.com.

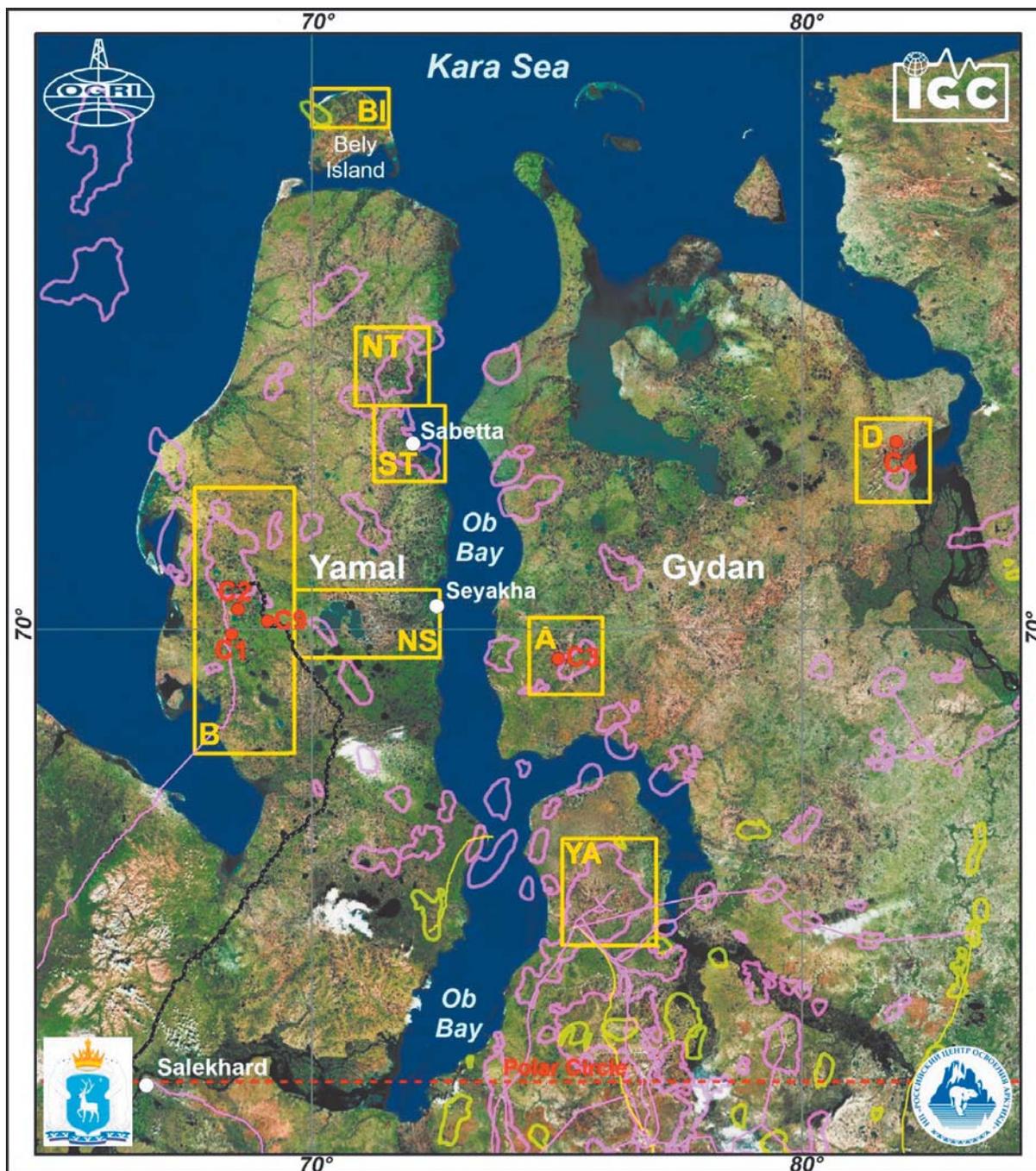


Рис. 1. Кратеры газовых выбросов в Южно-Карском регионе (С1, С2, С3, С4, С9). Условные обозначения: месторождения газа и нефти – розовый и зеленый цвета; участки детальных исследований Института проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН) – желтый цвет (В – Бованенковский, А – Антипаютинский, D – Дерябинский, ST – Южно-Тамбейский, NT – Северо-Тамбейский, NS – Нейтинско-Сеяхинский, YA – Ямбургский, BI – Белый остров); газопроводы и нефтепроводы – розовый и зеленый цвета; железная дорога – черный цвет. Картографическая основа – Bing

и нижележащая толща с неограниченной глубиной. В ВЧР генерируется биохимический газ, являющийся результатом микробной деятельности и выделяющийся при оттаивании многолетней мерзлоты и по таликам из многочисленных озер и рек [1—6; 21; 29; 44 и др.]. В нижележащей толще генерируется катагенетический (термогенный) газ, мигрирующий

в субвертикальном направлении как по активным проницаемым зонам (разломам и таликам), так и в результате заколонных перетоков в нефтегазопроисловых и эксплуатационных скважинах, которые приводят к формированию техногенных залежей и угрожают масштабными выбросами в атмосферу и водную среду [1—6; 21; 30 и др.].

Многочисленные исследования показали, что наиболее благоприятные условия для продуцирования метана в атмосферу в северных регионах складываются в пределах отрицательных форм рельефа — термокарстовых котловин, превратившихся в озера, высохших озер (хасыреев) и крупных речных долин [1—6; 9; 12; 16—18; 21; 30 и др.]. Результаты инструментальных измерений показали, что концентрации метана в отложениях гидроморфных участков могут составлять до 22 мл/кг, величины эмиссии иногда достигают 1200 мл/(м²·ч) [12; 25; 26]. Одним из круглогодичных источников метана являются донные отложения термокарстовых озер, где переработка углерода и выделение метана происходят даже при температурах, близких к 0°C [47]. Изучению термокарстовых озер севера Западной Сибири посвящено значительное количество работ, в которых рассматриваются вопросы динамики уровня воды, развития эрозионных береговых процессов, концентрации органического вещества и дегазации [3—6; 8; 13; 15—18; 21; 27; 28; 30 и др.]. Масштабные исследования различных аспектов газосодержания в озерах регулярно проводятся на Аляске и в Канаде [37; 45; 46]. Для выявления периодической и постоянной эмиссии метана на акваториях Арктики все более активно используются дистанционные методы [4; 5; 7; 31; 36; 39; 43].

Не вызывает сомнений, что в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ), богатой углеводородными ресурсами (в основном газом), во многих районах существуют субвертикальные природные притоки газа в толщу многолетнемерзлых пород (ММП) и его выходы в атмосферу и водную среду озер, рек и акваторий Северного Ледовитого океана. ММП являются региональным флюидоупором, способным перенаправлять потоки газа в субгоризонтальном направлении, при этом создаются аномально высокие пластовые давления, которые способствуют разрыву сплошности пород в наиболее слабых зонах, где развиты разломы и сквозные талики [1—6; 29; 30]. Учитывая расширение хозяйственной деятельности в АЗРФ и огромные концентрации метана в толще ММП и нижележащих отложениях, особую актуальность с позиций изучения причин глобальных изменений климата и промышленной безопасности представляет вопрос выделения дистанционных признаков поверхностных газопроявлений. Повсеместное развитие термокарста и высокая степень обводненности на данной территории обуславливают выбор в качестве основных объектов данного исследования термокарстовых озер, составляющих подавляющее большинство всех поверхностных водоемов.

В качестве основной территории исследований выбран полуостров Ямал (общая площадь — 117,6 тыс. км²), полностью расположенный в зоне ММП. Здесь наблюдается повсеместное развитие термокарста, а результаты ряда полевых исследований показали наличие в водоемах выходов газа с разных глубин, имеющего различный генезис [1—6;

25; 26; 29]. На полуострове Ямал разведаны крупные и уникальные нефтегазоконденсатные месторождения (НГКМ): Бованенковское, Крузенштернское, Харасавэйское, Новопортовское, Тамбейская группа и др. На Бованенковском и Новопортовском НГКМ начата промышленная добыча газа и нефти (с 2012 и 2014 гг.), расширяется сеть инфраструктуры включая нефтегазопроводы, аэропорты и железную дорогу (см. рис. 1). В этом отношении на примере освоенных территорий существует возможность оценить вклад в эмиссию газа антропогенных факторов, приводящих к нарушению целостности кровли ММП и появлению новых каналов для просачивания газа.

Основной фактической базой исследования является архив мультиспектральной съемки Landsat. Исходные данные со средним пространственным разрешением и наличием тепловых каналов распространяются на бесплатной основе через сервисы Американской геологической службы USGS. В работе использовались безоблачные бесснежные снимки 1984—1985 и 2013—2014 гг., а также безоблачные зимние снимки 2013—2016 гг. Калибровка и восстановление значений отраженной спектральной яркости осуществлялись с помощью специализированного модуля полуавтоматической классификации (Semi-Automatic Classification Plugin) в программном обеспечении QGIS. Для детального изучения морфологических и гидрологических особенностей термокарстовых озер использовались составленные авторами мозаики высокодетальных покрытий космической съемки, доступные через картографические сервисы Bing, Here и Google. Помимо оптических данных для оценки состояния льда на поверхности озер использовались радиолокационные снимки, полученные через портал Европейского космического агентства — European Space Agency (ESA).

За основу векторного слоя водных объектов для полуострова Ямал была взята актуальная версия открытой базы Global Lake and Wetlands Database (GLWD), включающая озера площадью более 10 га (0,1 км²), общее количество которых составило всего 1228, а суммарная площадь — 4100 км². Учитывая наличие значительных пробелов в базе данных GLWD, авторы данной работы скорректировали и дополнили векторный слой по данным космоснимков Landsat, при этом учитывались все озера площадью более 1 га. По итогам обновления и дополнения векторного слоя озер их общее число составило около 115 тыс. при общей площади свыше 13 тыс. км² (озеренность территории более 11%). Крупнейшими на Ямале являются озера Ярато-1 и Ярато-2 (247,5 и 150 км²), расположенные в 60—100 км к западу от Новопортовского НГКМ. Для уточнения границ и названий водоемов использовались топографические карты масштаба 1:100 000.

Основные методические приемы дешифрирования космических снимков подробно описаны в [10; 20]. Специфика северных регионов учтена в соответствии

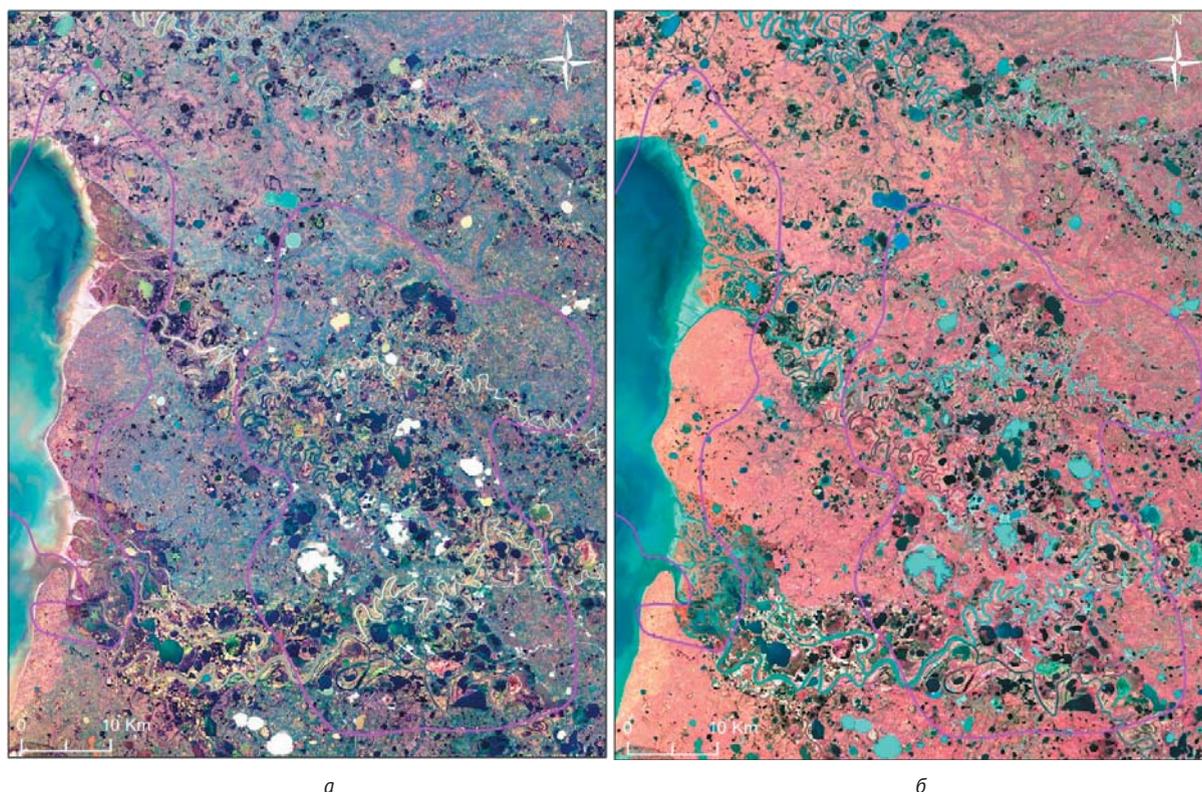


Рис. 2. Визуальное отображение озер в районе Бованенковского и Крузенштернского НГКМ (розовые контуры) на снимке Landsat-8 (а – видимые цвета, б – инфракрасный синтез)

с работами предшественников [7; 24; 32], а также на основе собственных полевых [2—6; 30] и камеральных [1; 27] исследований.

Дистанционные признаки газопроявлений

На основе детального изучения разнородных данных дистанционного зондирования, проведенного авторами настоящей статьи [2—6; 27; 30], и ряда перечисленных выше исследований других авторов, выделен ряд признаков газопроявлений из донных отложений термокарстовых озер на полуострове Ямал, описанных ниже.

Признак 1. Наиболее распространенным и хорошо изученным признаком, свидетельствующим о повышенном содержании метана в озерах, является характерный голубой цвет воды — повышенная по сравнению с фоновыми условиями яркость отраженного излучения в синем, зеленом и красном каналах (рис. 2). Озера с аномальным цветом воды на севере Западной Сибири известны с 1950—1960-х годов и впервые в литературе описаны И. Л. Кузиным [16]. Голубые озера характеризуются пониженным содержанием органического вещества, малым видовым разнообразием растительности и рыб, высоким (до 10—12,5 мг/л) содержанием сульфат-иона, на дне наблюдается массовое развитие сине-зеленых водорослей, которые окрашивают воду в зеленовато-голубой цвет [19]. Детальные исследования выявили устойчивую связь цвета воды с наличием

газопроявлений в донных отложениях [17; 18]. Эта связь возникает в ситуации, когда одним из источников серы (питательного вещества для сине-зеленых водорослей) является постоянный приток газонасыщенных подземных вод, содержащих в растворенном виде сульфиды из нижележащих морских отложений.

Для количественного анализа цвета воды дистанционными методами используются снимки с восстановленными значениями яркости отраженной радиации. Эти значения можно получить путем калибровки исходных данных по известным поправочным коэффициентам для каждого съемочного кадра с учетом параметров атмосферы на момент съемки. Анализ восстановленных спектральных кривых по данным Landsat-8 показывает, что для озер в естественном состоянии характерен темно-синий цвет, который определяется пониженными значениями яркости для каналов съемки 3, 4 и 5. В случае увеличения яркостей указанных каналов цвет воды меняется в широком диапазоне вплоть до голубого и светло-желтого в естественных цветах и светло-голубого в инфракрасных (ИК) цветах.

Аномалии цвета могут быть вызваны как развитием сине-зеленых водорослей, так и другими естественными причинами — повышенным содержанием органического вещества и повышенным содержанием взвесей. Интерес в этом отношении представляют озера с устойчивым аномальным цветом, который

Научные исследования в Арктике



Рис. 3. Космоснимок 24 июня 2011 г. со спутника WorldView-2 термокарстового озера с кратерами газовых выбросов к северу от поселка Сабетта (база данных – Bing)

с одинаковой интенсивностью проявляется на съемке в различные сезоны года на протяжении длительных периодов времени.

Признак 2. Активный процесс дегазации донных отложений приводит, как правило, к формированию специфических форм микрорельефа — воронок (кратеров) газовых выбросов [1—6; 19; 30], которые выявлены как на дне и в прибрежных зонах озер (рис. 3), так и на акваториях Мирового океана, где они традиционно называются покмарками [1—7; 21; 30; 34]. Непосредственной причиной их формирования является пневматический выброс газа из придонных отложений. Выбросы могут быть краткосрочными разовыми и многоразовыми (подобно механизмам грязевого вулканизма и гейзеров), а также непрерывными (струйными). В последнем случае в водной толще нередко наблюдаются «газовые факелы» [2—7; 28; 34]. Если формирование крупного кратера происходит в результате мощного газового выброса, то по периферии

происходит аккумуляция материала в виде концентрических брусстверов, хорошо различимых из космоса на мелководных участках озер (см. рис. 3) и зимних снимках суши среднего разрешения (рис. 4). Анализ разновременных снимков показывает, что для озер с сипами газа характерны значительные сезонные колебания уровня воды вплоть до полного осушения и образования хасыреев.

Изучение многочисленных детальных космических снимков показало, что в пределах Ямала существует широкий спектр размеров выявленных кратеров:

- небольшие (размером до 5 м) и средние (5—30 м), формирующиеся с высокой плотностью по мелководным окраинам озерных котловин; во многих случаях подобные кратеры различимы на дне неглубоких озер с прозрачной водой (см. рис. 3);
- крупные (свыше 30 м), образующиеся в центральной, реже в окраинных частях котловин средних и крупных по площади озер.

Отметим, что в 2015 г. в швейцарском озере Невшатель (Neuchâtel) найден самый крупный в мире кратер (покмарка) в пресноводных водоемах «Crazy crater» диаметром 160 м и глубиной 10 м [41], а на акваториях Мирового океана известны покмарки диаметром в несколько сотен метров и даже более километра [2—7; 34].

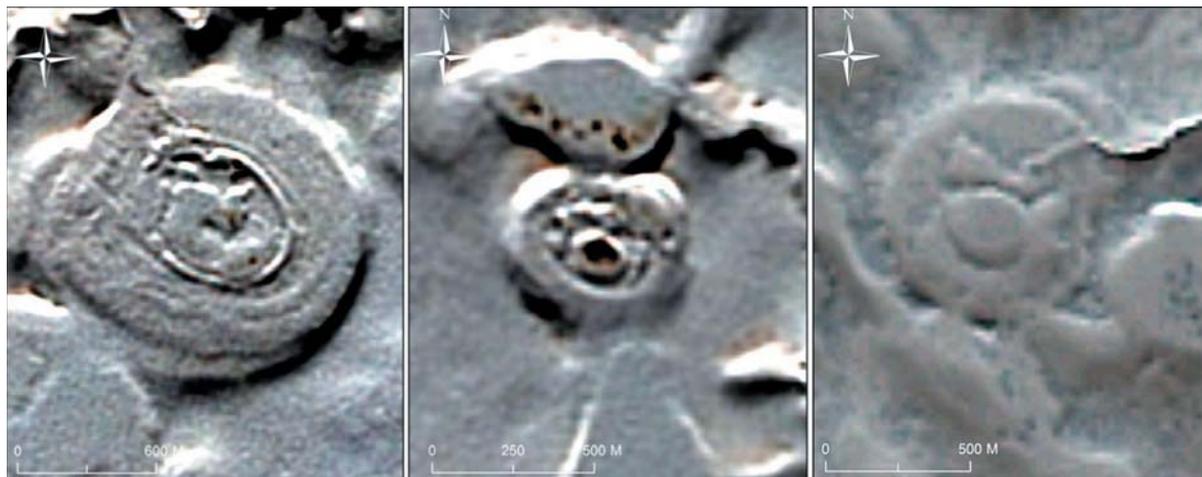


Рис. 4. Примеры аккумуляции материала на дне озер около возможных кратеров газовых выбросов (космоснимки Landsat-8)



Рис. 5. Космоснимки Кратерного озера южнее Бованенковского НГКМ со спутника QuickBird 4 июля 2009 г. (а) и 21 июля 2013 г. (б) [5]

Признак 3. Для ряда озер выявлено изменение степени прозрачности водной толщи. На рис. 5 приведены космоснимки спутника QuickBird (базы данных Bing и Here) одного из крупных озер диаметром около 600 м, расположенного в 10 км южнее Бованенковского НГКМ на широте около 70° и названного нами Кратерным [4]. Вокруг этого озера наблюдается ряд небольших и крупных озер (последние находятся за пределами приведенных снимков). Все эти озера характеризуются чистой водой. Абсолютно чистая вода в Кратерном озере (рис. 5а) 4 июля 2009 г. позволяет увидеть на его дне несколько глубоких каналов (кратеров) диаметром от 15 до 60 м, выделяющихся почти черным цветом, свидетельствующем об их значительной глубине. Особый интерес представляет то, что на снимке 21 июля 2013 г. вода в этом озере стала мутной (рис. 5б), в то время как во всех прилегающих озерах она осталась по-прежнему чистой. Причем источник загрязнения озера, видимо, связан с каналом размером 20×40 м, расположенным в юго-западной прибрежной части. Наиболее вероятным объяснением является то, что из этого канала произошел выброс газа или водогазовой смеси, поднявший придонные илистые отложения.

Кроме того, при осмотре озера из вертолета 4 сентября 2015 г. около небольшого восточного канала в его самой мелководной части были выявлены не размытые озерной водой остатки породы, возможно, являющиеся частью бруствера кратера газового выброса (рис. 6).

В случае замутненной водной толщи косвенным признаком поступления газонасыщенного потока грунтовых вод и активности сипов газа может являться наличие характерных шлейфов на поверхности воды, хорошо различимых при аэрокосмических исследованиях на мультиспектральной съемке среднего и высокого разрешения. Пространственное положение источников разгрузки флюидов может меняться в течение года, тем не менее имеются озера с устойчивыми притоками грунтовых вод и газа на протяжении многих лет.

В качестве примера приведем расположенное в центральной части Ямала на Нейтинско-Сеяхинском участке (см. рис. 1 — NS и рис. 7) огромное голубое озеро Нейто диаметром около 17 км, под южной частью которого на глубине более 600 м частично расположены залежи Нейтинского НГКМ. При постоянном подтоке глубинного газа в сеноманскую залежь этого месторождения по объему она намного меньше,



Рис. 6. Восточный участок Кратерного озера с возможным каналом газового выброса и остатками бруствера (фото В. И. Богоявленского из вертолета 4 сентября 2015 г.)

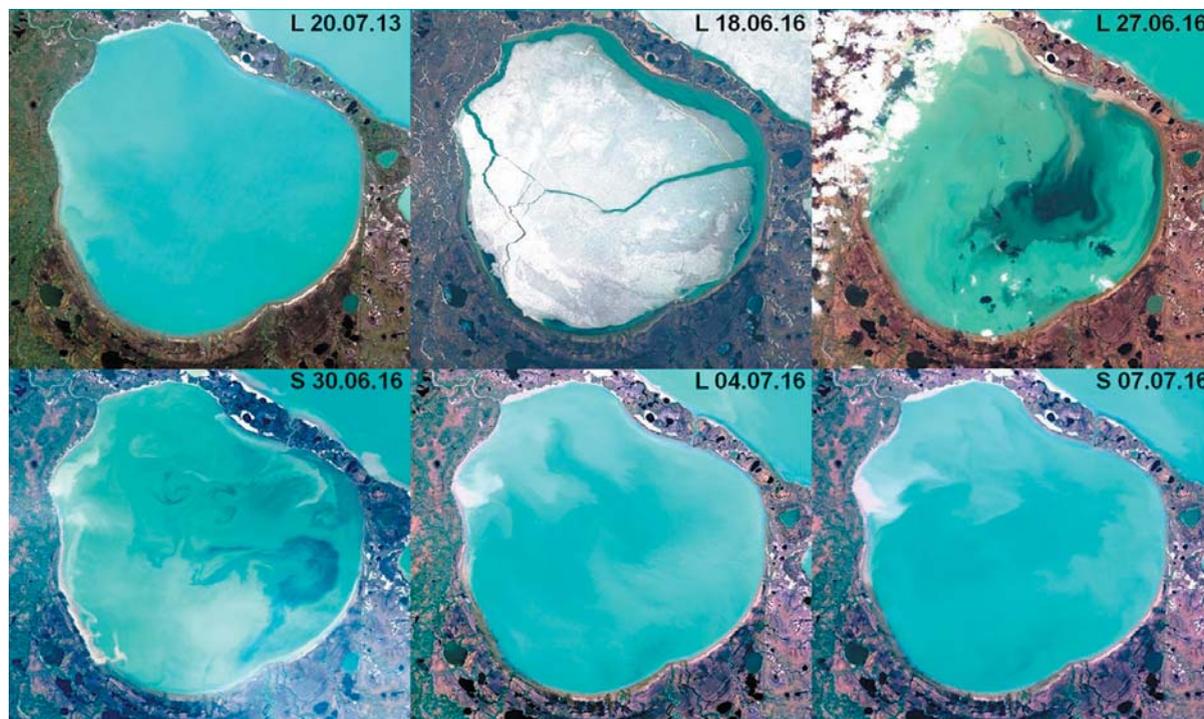


Рис. 7. Дистанционный мониторинг состояния воды озера Нейто со спутников Landsat-8 (L) и Sentinel-2 (S)

чем на соседних месторождениях, что объяснимо возможной утечкой газа по выявленным системам разломов на поверхность. Именно на Нейтинско-Нерстинской площади существуют сильная аномалия теплового поля Земли [4, с. 141] и глубинный разлом, показанный на Геологической карте России и прилегающих акваторий (2008 г.). Свидетельством подтока глубинных газов до залежи сеномана Нейтинского месторождения является наличие экстремально тяжелого изотопного состава углерода метана $\delta^{13}\text{C}$ — 38,8‰, более характерного в Ямал-Гыданском регионе для комплексов юры и нижней части мела [4, с. 142].

На рис. 7 приведена серия разновременных космоснимков этого озера, свидетельствующих об интенсивных геофлюидодинамических процессах в период с 27 июня по 7 июля 2016 г. На ряде космоснимков наблюдаются почти черные округлые разводы (см., например, снимки 27 и 30 июня), от которых распространялись активные мутьевые потоки. Судя по всему, в этом районе происходила многодневная (вероятнее всего, периодически многолетняя) разгрузка глубинных флюидов, что дополнительно подтверждается наличием многочисленных проталин во льду (видны при ближнем рассмотрении снимка 18 июня 2016 г.).

Признак 4. В связи с тем, что биогенное образование метана в донных отложениях озер происходит круглогодично, нередко скопления газа образуются под сезонным ледяным покровом озер АЗРФ. Это явление не является уникальным, оно нередко наблюдается и в других регионах мира (озеро Байкал,

подмосковные озера, озеро Онтарио в Канаде, озеро Сукок (Sukok) на Аляске, шельф моря Лаптевых) [7; 9; 28; 37; 45]. Подробно процесс выделения метана в различные сезоны года описан для субмеридиональной трансекты из 40 озер на Аляске [37]. В большинстве случаев растворенный во льду метан представляет собой небольшие, до 1 м в диаметре, газовые пузыри (линзы газа). Лишь в отдельных случаях формируются не замерзающие в течение всего зимнего периода проталины, через которые газ уходит в атмосферу [7; 46]. Крупные по объемам выбросы газа способны взломать лед, что мы обнаружили на озере около кратера С4 на Дерябинской площади (полуостров Гыданский) на космоснимке Landsat-8 24 апреля 2013 г. (см. ниже) [26]. В последние месяцы снеготаяния (конец весны — начало лета) в случае значительного объема выделившегося и вмерзшего в лед газа происходит неравномерное таяние с образованием ячеистой структуры разрушаемого ледяного покрова.

Для территории Ямала период с конца мая по начало июня — наиболее благоприятное время для дистанционного выявления озер с признаками растворения газа в ледяном покрове. В рамках изучения съемки с высоким пространственным разрешением большое количество подобных озер было выявлено в юго-западной части полуострова. На снимке WorldView-2 29 мая 2011 г. (база данных Here) озера Хэхханто, расположенного на юго-западе полуострова Ямал, хорошо различимы протаявшие линзы газовых пузырей размером до 25—30 м в диаметре (рис. 8). На поверхности льда данного озера в ряде

мест наблюдается линейная закономерность размещения цепочек протаявших линз, что, видимо, связано с дегазацией недр по разломам в строении дна. На отдельных озерах отмечается высокая плотность размещения газовых сипов (более 25% линз газа от общей площади льда). Существуют также примеры следов крупных линз газа диаметром более 50 м. Проведенное нами исследование зимних снимков среднего разрешения за 2013—2016 гг. не выявило незамерзающих участков на поверхности озер Ямала, что может быть связано в том числе с малой детальностью изображений — потенциальные талики, возможно, имеют диаметр менее 10 м.

Для выявления во льду газовых пузырей кроме оптических снимков в последнее время имеются примеры использования радиолокационных снимков [31; 43]. Наши предварительные оценки доступных данных показали, что для этих целей необходима съемка с разрешением лучше 15 м/пикс.

Признак 5. Комплексные признаки дегазации, проявляющиеся в синхронном аномальном изменении цвета озера с замутнением воды после взрыва бугра пучения (булгуннях — пинго), хорошо



Рис. 8. Поверхность озера Хэхэханто со следами сипов газа во льду по данным WorldView-2 29 мая 2011 г.

иллюстрируются на примере кратера С4 (рис. 9), расположенного к северу от Дерябинского месторождения (см. рис. 1 — D) [30]. Дешифрирование зимних снимков Landsat показало, что для Ямала пучение вблизи берегов озер является распространенной ситуацией, при этом примерно пятая часть выявленных бугров расположена на удалении до 100 м от берегов озер в равной степени как с голубой, так и с темной водой.

Признак 6. К прямым признакам дегазации недр относится выявление шлейфов газа или парогазовой смеси, распространяющихся в атмосфере, которые могут наблюдаться визуально или с помощью ИК съемки как при наземных, так и при аэрокосмических наблюдениях. В США с помощью ИК наземной и космической съемки неоднократно выявлялись невидимые для невооруженного глаза масштабные потоки газа (в основном метана), в частности исходящие из аварийного подземного хранилища газа Aliso Canyon и в районе добычи сланцевого газа [38].

Уникальное явление было обнаружено американскими учеными в результате дешифрирования ИК космоснимков со спутника NOAA-7 в Арктике. 18 февраля 1983 г. был выявлен сначала один, а затем несколько шлейфов газа, распространявшихся из прибрежной акватории острова

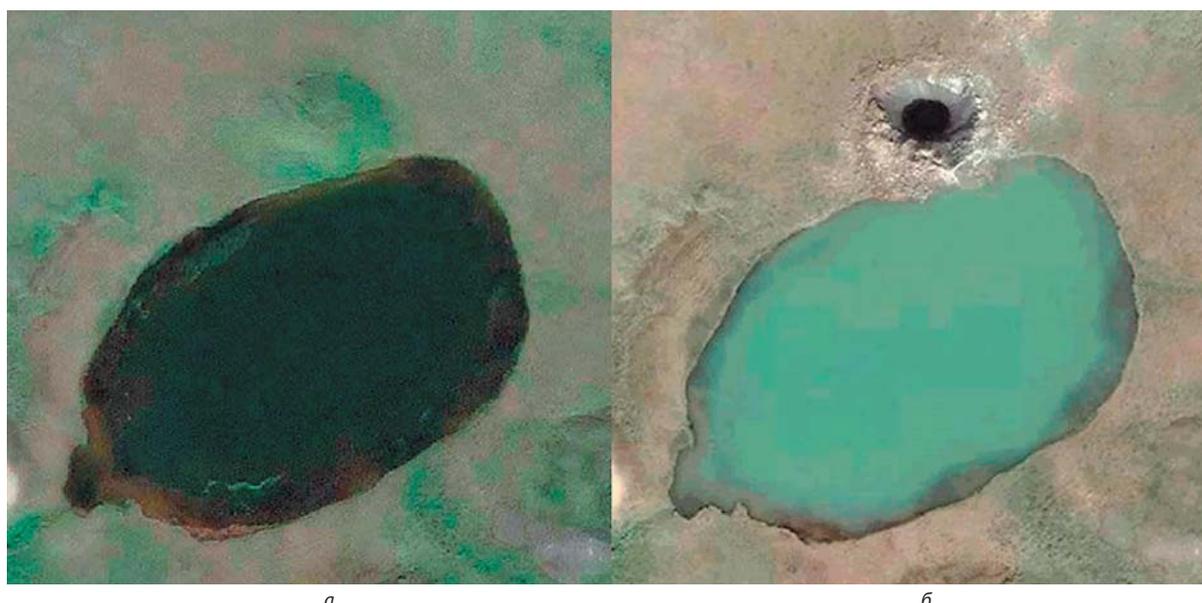


Рис. 9. Снимки Дерябинской площади со спутника DigitalGlobe 1 августа 2009 г. (а) и 19 июля 2013 г. (б) после формирования кратера газового выброса С4 [30]

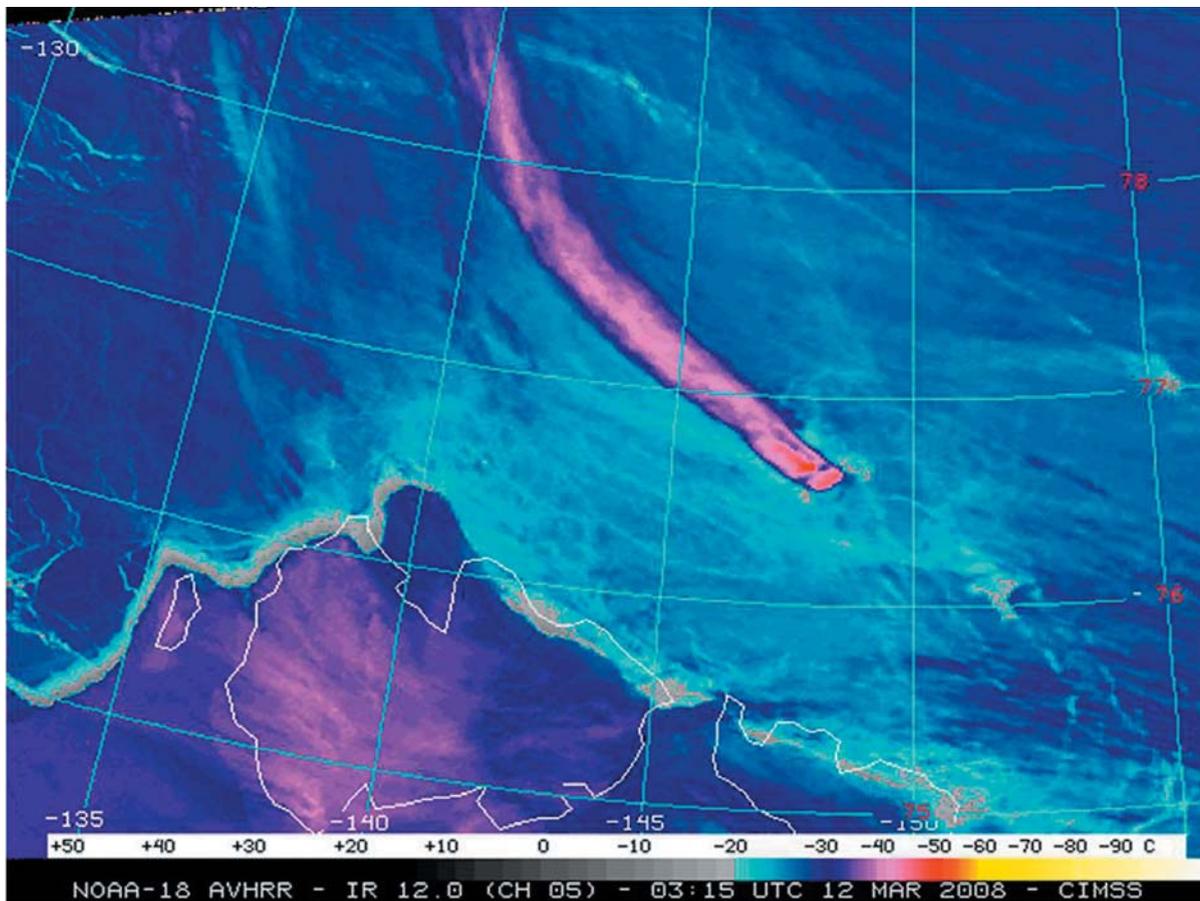


Рис. 10. Гигантский шлейф газа от острова Беннетта в Восточно-Сибирском море (ИК космоснимок со спутника NOAA-18)

Беннетта в Восточно-Сибирском море и имевших температуру ниже -40°C [35]. Длина одного из мощных шлейфов превышала 300 км, а ширина составляла более 10 км. Ретроспективный анализ космоснимков показал, что аналогичные события здесь происходили и ранее. В период с 17 марта 1973 г. по 30 декабря 1986 г. было выявлено 152 таких события, при этом в 1985 г. их зафиксировано максимальное количество (45) [22]. Регистрировались шлейфы газа и в дальнейшем. На рис. 10 приведен ИК снимок шлейфа газа протяженностью до 1000 км и шириной до 25 км, зарегистрированный 12 марта 2008 г. спутником NOAA-18 (радиометр AVHRR). Самая низкая температура шлейфа (около -48°C) наблюдается вблизи точки его зарождения около острова Беннетта в районе существования загадочной Великой Сибирской польны (между островами Анжу и Де-Лонга). Природа шлейфов газа изучена недостаточно, высказываются различные гипотезы об их происхождении, в том числе вулканическая и газогидратная [7; 22; 35].

Признак 7. К косвенным признакам, которые могут отражать выходы газа в прибрежной зоне, относится активизация процессов береговой эрозии (возможно, частично проявляется в прибрежной зоне озера Нейто — см. рис. 7). В подтверждение

приведем пример криогенного оползня вблизи города Фэрбанкс (Аляска), детальное изучение которого показало, что в зоне разработки полезных ископаемых в толще мерзлых пород был вскрыт талый газонасыщенный горизонт, который послужил плоскостью скольжения для оползневой массы [47].

В целом результаты дешифрирования оптической и радарной съемки высокого и среднего разрешения показали, что выделенные дистанционные признаки по большей части охватывают многообразие поверхностных газопроявлений на территории Ямала.

Анализ полученных результатов

Использование дистанционных данных для картирования голубых озер активно применялось с 1980-х годов — на территории Западно-Сибирской газонной провинции (за исключением Ямала и Гыдана) И. Л. Кузиным было выделено более тысячи подобных объектов, 58% которых расположено над месторождениями нефти и газа [44]. В рамках проведенных нами исследований по состоянию на 2013—2014 гг. такое соотношение характерно только для 19,5% площади голубых озер, что ставит под сомнение взаимосвязь цвета воды с наличием месторождений углеводородов. При этом количество открытых месторождений не изменилось. В обоих

случаях пытаться устанавливать такую взаимосвязь не совсем корректно, так как еще далеко не все месторождения открыты.

Детальные изотопные анализы углерода в метане многолетнемерзлых пород показали, что глубина проникновения биохимического газа намного превышает глубину сезонно талого слоя и отмечается в разрезах как эпигенетического, так и сингенетического промерзания [42]. Если учесть пространственное и высотное распределение голубых озер, то более вероятной является их взаимосвязь не со скоплениями газа, а с размываемыми серосодержащими морскими отложениями. Тем не менее в ряде случаев, особенно для озер с устойчивым на протяжении 30 лет голубым цветом и для озер со значительными колебаниями уровня воды, вполне возможен привнос газонасыщенных глубинных вод с повышенным содержанием сульфат-иона по активным зонам. Связь расположения озер с высокой долей метана и известных разломов показана на примере территории Аляски [17]. Для ямальских озер дистанционное подтверждение повышенного газосодержания помимо аномального цвета, по всей видимости, должно опираться на комплекс дополнительных дешифровочных признаков. К числу таких признаков можно отнести наличие небольших сипов и крупных кратеров газовых выбросов в термокарстовых котловинах и на озерных террасах. Геологическое строение подобных сипов хорошо изучено на примере озер Teshekruk и Qalluugaq на севере Аляски [45].

Самым простым и однозначным методом выявления сипов газа в воде и кратеров выбросов газа на дне существующих озер являются геоакустические исследования с многолучевыми сонарами и эхолотами, с помощью которых на акваториях Мирового океана уже выделены десятки тысяч газовых факелов и покмарок [2—7; 13; 23; 28; 30; 34]. Так, на примере результатов измерения глубин озера Недармато в юго-восточной части котловины выделяется кратер газового выброса глубиной более 25 м [13]. Однако даже при наличии крупных воронок газовых выбросов сложно однозначно говорить о глубинном происхождении метана. По данным И. Л. Кузина [44], изотопный анализ гелия и углерода в воде подобных озер показал как глубинный, так и поверхностный генезис составляющих газа.

Антропогенный вклад в увеличение количества и площади голубых озер в результате бурения скважин можно показать на примере Бованенковского НГКМ (см. рис. 2). По состоянию на 1985 г. здесь было 61 голубое озеро общей площадью 49 км². В последующие 30 лет подготовки к промышленному освоению добавилось 34 подобных водоема, при этом площадь возросла только на 11,4 км², что несколько меньше средних значений по всей территории полуострова.

Несмотря на стабильный интерес исследователей к экзогенным процессам [13] и образованию котловин спущенных озер на севере Западной Сибири [19],

до настоящего времени нет полноценного объяснения механизмов этих процессов и оценки роли эндогенных факторов в их развитии. Поскольку отдельные слои газонасыщенных талых пород могут выклиниваться на склонах, большой интерес представляет связь криогенных оползней с процессом эмиссии метана. Вполне вероятно, что для озер верхних геоморфологических уровней с крутыми подмываемыми берегами наличие газопроявлений может являться определяющим фактором развития оползневых процессов. Скрытый талый слой может выступать зеркалом скольжения, и при благоприятных условиях на подобных участках активизируется процесс криогенного оползания, чему способствует диссоциация (разложение) залежей газогидрата, существование которых вблизи поверхности ММП возможно за счет эффекта самоконсервации [29]. Диссоциация залежей газогидрата на свободный газ и воду из-за изменения термобарических условий приводит к потере прочностных свойств грунтов («разжижению») с последующим их сдвигом (формированием оползня) в районах береговых и подводных (в том числе континентальных) склонов. В Норвежском море недалеко от полярного круга обнаружен оползень Сторегга (Storegga Slide), который признан одним из крупнейших в мире [34].

В методическом отношении можно отметить развитие дистанционных методов при изучении поверхностных газопроявлений. Так, простота автоматизированного картирования термокарстовых озер позволяет создавать детальные картографические базы данных и проводить крупномасштабную оценку эмиссии метана с водной поверхности озер и рек в пределах всей Арктической зоны [39]. Появление общедоступных радиолокационных данных со спутников Sentinel-1 даст возможность использовать существующие методические наработки по оценке сезонного ледового покрова озер [31; 42] для широкого круга исследователей. Успешные примеры использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при проведении локальных исследований и выполнении сверхвысокодетальной съемки, в частности вмерзших в лед газовых пузырей [36], позволяют предположить расширение областей их применения, в том числе для оценки площадей и объемов ежегодного криогенного оползания и динамики абразионных процессов по периферии озер с активным гидрологическим режимом.

Основные выводы

1. Термокарстовые озера на севере Сибири являются активным источником эмиссии метана в атмосферу, при этом для полуострова Ямал поступающий на поверхность газ имеет как биохимический, так и катагенетический генезис.

2. Современные материалы дистанционного зондирования Земли позволяют решать широкий круг задач, связанных с выявлением и картированием поверхностных газопроявлений, наблюдаемых в донных

Научные исследования в Арктике

отложениях озер. Результаты проведенного исследования показали, что поиск газопроявлений должен быть основан на ряде выявленных дистанционных признаков, к которым относятся: аномальный голубой цвет воды, наличие кратеров на дне и сипов газа в воде, наличие следов газовых скоплений в сезонном ледовом покрове, а также активная береговая эрозия и процессы мерзлотного пучения вблизи уреза воды. Выявленные признаки с высокой степенью достоверности могут использоваться для детального картирования газопроявлений в высоких широтах.

3. Надежность прогноза газовой эмиссии может быть существенно повышена за счет использования оптической съемки с расширенными мультиспектральными характеристиками (WorldView-3, Sentinel-2), радарной съемки с улучшенными показателями детальности (Sentinel-1 в режиме Spot) и оптической съемки с БПЛА.

4. Большой интерес представляет комплексирование результатов регионального дистанционного картирования с проводимыми на Ямале многолетними стационарными геологическими и геохимическими экспедиционными исследованиями как в пределах разрабатываемых месторождений, так и на территориях с фоновыми природными условиями.

Авторы работы благодарят губернатора ЯНАО Д. Н. Кобылкина и других руководителей Правительства ЯНАО за многолетнее содействие развитию разносторонних научных исследований в Арктике. Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства ЯНАО (совместный грант 16-45-890247).

Литература

1. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. — Ч. 1 // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 13—18.
2. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. — Ч. 2 // Бурение и нефть. — 2014. — № 10. — С. 4—8.
3. Богоявленский В. И. Чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов нефти и газа в Арктике и Мировом океане // Арктика: экология, экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 48—59.
4. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов. — М.: ВЭО, 2014. — С. 11—175. — (Тр. Вольного экон. о-ва, т. 182).
5. Богоявленский В. И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. — 2015. — № 6. — С. 4—10.
6. Богоявленский В. И., Мажаров А. В., Пушкарев В. А., Богоявленский И. В. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал. Предварительные

результаты экспедиции 8 июля 2015 г. // Бурение и нефть. — 2015. — № 7—8. — С. 8—13.

7. 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.

8. Брыксина Н. А., Полищук Ю. М. Исследование точности дистанционного измерения площадей озер с использованием космических снимков // Геоинформатика. — 2013. — № 1. — С. 64—68.

9. Буданцева Н. А. Газопроявления в мерзлых породах // Криосфера нефтегазокоденсатных месторождений полуострова Ямал. — Т. 1: Криосфера Харасавэйского газоконденсатного месторождения. — Тюмень; С.-Петербург: Недра, 2006. — С. 235—248.

10. Верещака Т. В., Зверев А. Т., Сладкопевцев С. А., Судакова С. С. Визуальные методы дешифрирования. — М.: Недра, 1990. — 344 с.

11. Лабутина И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М.: Аспект пресс, 2004. — 184 с.

12. Гафаров Н. А., Баранов Ю. Б., Ванярхо М. А. и др. Использование космической информации в газовой промышленности. — М.: ООО «Газпром экспо», 2010. — 132 с.

13. Дворников Ю. А. Процессы термоденудации в криолитозоне и их индикация по растворенному органическому веществу: Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — Тюмень, 2016. — 177 с. (<http://www.ikz.ru/wp-content/themes/ikz/images/dvornikov-full.pdf>).

14. Киселев А. А., Решетников А. И. Метан в Российской Арктике: результаты наблюдений и расчетов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 2 (96). — С. 5—15.

15. Крицук Л. Н. Подземные льды Западной Сибири. — М.: Науч. мир, 2010. — 352 с.

16. Кузин И. Л. Развитие представлений о новейшей тектонике и ее влиянии на формирование и размещение месторождений нефти и газа // Тр. ЗапСибНИГНИ [Тюмень]. — 1973. — Вып. 73. — С. 6—20.

17. Кузин И. Л., Любина Ю. Н., Рейнин И. В. Газопроявления на озерах Западной Сибири и их связь с месторождениями нефти и газа // Тектонические критерии выделения и прогноза зон нефтегазоносности (с использованием космической информации). — Л.: ВНИГРИ, 1990. — С. 117—127.

18. Кузин И. Л. О природе аномальных озер — показателей скоплений углеводородов в глубоких горизонтах осадочного чехла // Проблемы оценки новых зон нефтегазоаккумуляции в основных продуктивных толщах Западной Сибири. — СПб.: ВНИГРИ, 1992. — С. 129—137.

19. Кузин И. Л. Голубые озера областей гумидного климата // Изв. Рус. геогр. о-ва. — 2001. — Т. 133, вып. 3. — С. 44—57.

20. Лабутина И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М.: Аспект пресс, 2004. — 184 с.

21. 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.
22. Масуренков Ю. П., Слёзин Ю. Б., Собисевич А. Л. Газовые шлейфы у острова Беннетта // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2013. — № 3. — С. 86—95.
23. Мельников В. П., Спесивцев В. И., Куликов В. Н. О струйной дегазации углеводородов как источнике новообразований льда на шельфе Печорского моря // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике: Материалы международной конференции. — Новосибирск: Наука, 1997. — С. 259—269.
24. Протасьева И. В. Аэрометоды в геокриологии. — М.: Наука, 1967. — 196 с.
25. Ривкин Ф. М. Метан в мерзлых породах и прогноз его выделения при потеплении климата и техногенных нарушениях поверхности // Изв. РАН. Сер. геогр. — 1998. — № 2. — С. 64—75.
26. Ривкин Ф. М. Газосодержание в верхних горизонтах мерзлых пород // Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштерновского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал). — М.: ГЕОС, 2003. — С. 133—146.
27. Сизов О. С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68.
28. Шахова Н. Е., Сергиенко В. И., Семилетов И. П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестн. РАН. — 2009. — Т. 79. — С. 507—518.
29. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.
30. Vagojavlensky V. Gas Blowouts on the Yamal and Gydan Peninsulas // GeoExPro [London]. — 2015. — Vol. 12, № 5. — Oct. — P. 74—78.
31. Engram M., Walter K. M., Meyer F. J., Grosse G. Synthetic aperture radar (SAR) backscatter response from methane ebullition bubbles trapped by thermokarst lake ice // Canadian J. of Remote Sensing. — 2013. — Vol. 38, № 6. — P. 667—682. — doi:10.5589/m12-054.
32. Fitzgerald D., Riordan B. A. Permafrost and ponds. Remote sensing and GIS used to monitor Alaska wetlands at the landscape level // Agroborealis. — 2003. — Vol. 35, № 1. — P. 30—35.
33. Hormann C. Interpolating elevation data grids from contour lines // http://www.imagico.de/pov/earth_interpolate.php.
34. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. — Cambridge, 2007. — 475 p.
35. Kienle J., Roederer J. G., Shaw G. E. Volcanic event in Soviet Arctic // EOS. — 1983. — Vol. 64, № 20. — P. 377.
36. Lindgren P. R., Grosse G., Walter Anthony K. M., Meyer F. J. Detection and spatiotemporal analysis of methane ebullition on thermokarst lake ice using high-resolution optical aerial imagery // Biogeosciences. — 2016. — 13 (1). — P. 27—44. — doi:10.5194/bg-13-27-2016.
37. Martinez-Cruz K., Sepulveda-Jauregui A., Walter Anthony K., Thalasso F. Geographic and seasonal variation of dissolved methane and aerobic methane oxidation in Alaskan lakes // Biogeosciences. — 12. — P. 4595—4606. — doi:10.5194/bg-12-4595-2015, 2015.
38. O'Connor T. Infrared Camera Reveals Huge, Wafting Cloud of Methane over California's Aliso Canyon // Bio. — 2015. — Dec. 10.
39. Paltan H., Dash J., Edwards M. A refined mapping of Arctic lakes using Landsat imagery // Int. J. Remote Sens. — 2015. — 36. — P. 5970—5982. — doi:10.1080/01431161.2015.1110263.
40. Portnov A., Smith A. J., Mienert J. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf // Geoph. Res. Lett. — 2013. — Vol. 40. — P. 1—6. — doi:10.1002/grl.50735.
41. Reusch A., Loher M., Bouffard D. et al. Giant lacustrine pockmarks with subaqueous groundwater discharge and subsurface sediment mobilization // Geoph. Res. Lett. — 2015. — 13 May. — doi:10.1002/2015GL064179.
42. Smith L. C., Sheng Y., MacDonald G. M., Hinzman L. D. Disappearing Arctic lakes // Science. — 2005. — 308. — P. 1429. — doi:10.1126/science.1108142.
43. Walter K. M., Engram M., Duguay C. R. et al. The potential use of synthetic aperture radar for estimating methane ebullition from Arctic lake // J. Am. Water Resour. As. — 2008. — 44. — P. 305—315.
44. Walter K. M., Chanton J. P., Chapin F. S. et al. Methane production and bubble emissions from Arctic lakes: Isotopic implications for source pathways and ages // J. Geophys. Res. — 2008. — Vol. 113. — G00A08.
45. Walter Anthony K. M., Vas D. A., Brosius L. et al. Estimating methane emissions from northern lakes using ice bubble surveys // Limnology and Oceanography: Methods. — 2010. — Vol. 8, № NOV. — P. 592—609.
46. Walter Anthony K. M., Anthony P., Grosse G., Chanton J. Geologic methane seeps along boundaries of Arctic permafrost thaw and melting glaciers // Nature Geoscience. — 2012. — Vol. 5. — P. 419—426.
47. Wooller M. J., Pohlman J. W., Gaglioti B. V. et al. Reconstruction of past methane availability in an Arctic Alaska wet-land indicates climate influenced methane release during the past ~12,000 years // J. of Paleolimnology. — 2012. — 48. — P. 27—42. — doi:10.1007/s10933-012-9591-8.
48. Zimov S. A., Voropaev Y. V., Semiletov I. P. et al. North Siberian lakes: a methane source fueled by Pleistocene carbon // Science. — 1997. — Vol. 277. — P. 800—802.