

ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ВЫЯВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА ДЕГАЗАЦИИ ЗЕМЛИ В АРКТИКЕ: ПОЛУОСТРОВ ЯМАЛ, ОЗЕРО НЕЙТО

В. И. Богоявленский

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

О. С. Сизов

ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, АО «Российские космические системы» (Москва, Российская Федерация)

И. В. Богоявленский, Р. А. Никонов

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 8 мая 2018 г.

Рассматриваются вопросы дистанционного выявления и мониторинга дегазации недр на полуострове Ямал. Предлагаемая технология предусматривает комплексное использование мультиспектральной и радиолокационной съемки среднего разрешения (10–60 м), позволяющей выявить неоднородности в ледовом покрове, связанные с включениями газа во льду. Наличие высокочастотной съемки позволяет установить участки с регулярными газопроявлениями, что может служить дополнительным признаком природной и природно-техногенной эндогенной активности. Применение указанной технологии позволит повысить эффективность и безопасность поиска и освоения ресурсов углеводородов в Арктике.

Ключевые слова: Арктика, Ямал, север Западной Сибири, озеро Нейто, Нейтинское месторождение, поверхностные газопроявления, кратеры выбросов газа, криолитозона, многолетнемерзлые породы, данные ДЗЗ, радиолокационная съемка из космоса.

Введение

В последние годы возросло внимание к исследованиям процессов субвертикальной миграции газа и дегазации Земли, особенно на суше и акваториях Арктики [1—16]. В значительной степени это обусловлено потребностью оценки вклада в глобальное потепление эмиссии углекислого и других парниковых газов, среди которых одним из важнейших является метан. В структуре баланса эмиссии метана на российской территории Арктики больше половины составляют выбросы с поверхности переувлажненных территорий (заболоченных участков и водных объектов). Для арктических регионов установлено два основных источника эмиссии — биохимический газ, являющийся результатом микробной деятельности и выделяющийся при оттаивании

многолетнемерзлых пород (ММП), и катагенетический газ, формирующийся на больших глубинах и мигрирующий вверх по разрезу. Пути его миграции являются активные природные субвертикальные проницаемые зоны развития разломов и трещиноватости, а также техногенные каналы, формирующиеся в заколонном и межколонном пространствах глубоких поисково-разведочных и эксплуатационных скважин, бурящихся при освоении ресурсов нефти и газа [1; 2—5; 14].

Многочисленные исследования показали, что наиболее благоприятные условия для продуцирования метана в атмосферу в северных регионах складываются в пределах термокарстовых котловин, хасыре-ев и крупных речных долин. Одним из круглогодичных источников метана являются донные отложения озер, где переработка углерода и выделение метана происходят круглогодично даже при температурах, близких к 0°C [16].

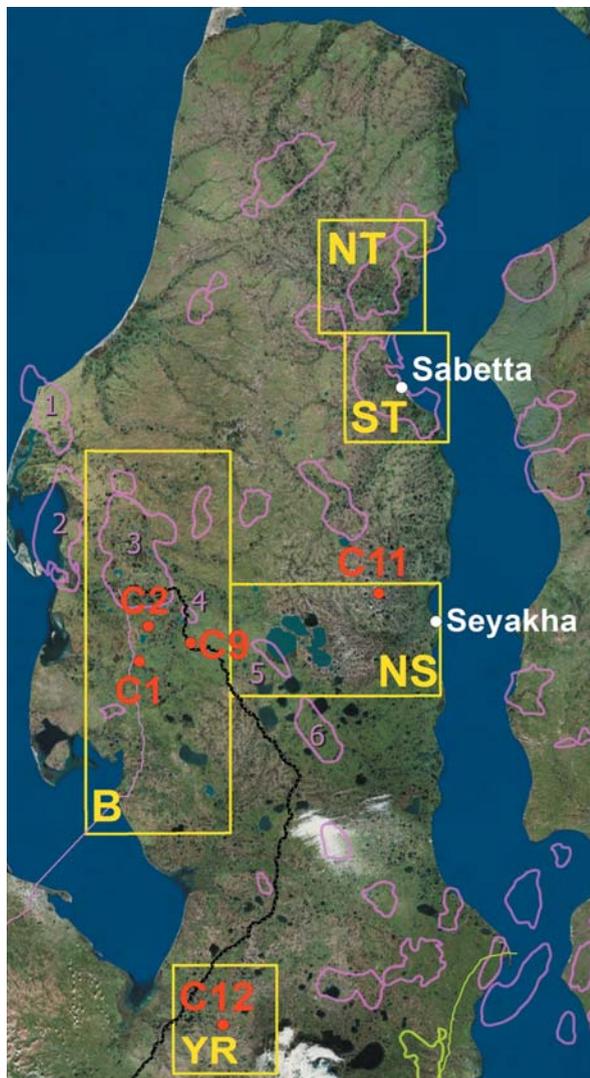


Рис. 1. Кратеры выбросов газа на Ямале (C1, C2, C9, C11, C12). Условные обозначения: участки детальных исследований Института проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН – желтый цвет (B – Бованенковский, ST – Южно-Тамбейский, NT – Северо-Тамбейский, NS – Нейтинско-Сеяхинский, YR – Еркутинский); месторождения – розовый цвет (1 – Харасавэйское, 2 – Крузенштерское, 3 – Бованенковское, 4 – Нерстинское, 5 – Нейтинское, 6 – Арктическое); газопровод Бованенково-Ухта – розовый цвет; железная дорога – черный цвет. Картографическая основа – Bing

Все многообразие поверхностных газопроявлений широко представлено на территории гигантского полуострова Ямал площадью 117,6 тыс. км². Он полностью расположен в зоне сплошного развития ММП за исключением сквозных таликов под крупными озерами и реками, являющихся благоприятными зонами для дегазации недр (рис. 1). На Ямале разведан ряд уникальных и крупных месторождений углеводородов (УВ), ведется промышленная добыча газа и нефти на Бованенковском, Новопортовском и Южно-Тамбейском месторождениях, расширяется сеть инфраструктуры.

В 2014—2017 гг. на севере Ямало-Ненецкого автономного округа и Красноярского края было выявлено

около 10 крупных кратеров (воронок) мощных выбросов газа. При этом некоторые из них расположены вблизи инфраструктуры Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). В частности, самый известный кратер C1 (индексация согласно ГИС «АМО» [3—5]) расположен в 30 км южнее этого месторождения и всего в 3,5 км к востоку от магистрального газопровода высокого давления «Бованенково — Ухта», а кратер C9 — в 1,6 км от железной дороги на Ямале «Обская — Карская» (см. рис. 1).

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса — уникальный инструмент мониторинга различных природных геоэкологических процессов, включая дегазацию недр. При анализе космической съемки, выполненной в зимний период с разрешением 15 м, нами выявлено около 7 тыс. бугров пучения на территории полуострова Ямал, которые представляют интерес для дальнейших исследований с целью анализа их потенциальной газозрывоопасности. Кроме того, по данным аэрокосмических наблюдений (вертолетные облеты местности и анализ высокодетальных материалов ДЗЗ) выявлено около 300 озер, на дне которых наблюдаются сотни и даже тысячи кратеров выброса газа [1—5; 11]. Все это свидетельствует о широкомасштабных процессах дегазации недр в Арктике.

Очевидно, что заниматься одновременным детальным исследованием всего многотысячного массива выделенных нами потенциально опасных объектов нереально. Представляется необходимым сконцентрировать внимание на избранных объектах, расположенных вблизи населенных пунктов и инфраструктуры нефтегазовых промыслов (включая трубопроводы, железные дороги и пр.). Кроме того, необходимы мониторинг всех обнаруженных объектов активной дегазации недр и выявление закономерностей их размещения.

В данной работе основное внимание уделяется описанию технологии дистанционного мониторинга газопроявлений из донных отложений термокарстовых озер на территории Ямала.

Объекты исследований

В качестве основного объекта детальных исследований в данной работе на Нейтинско-Сеяхинском участке (см. рис. 1 — NS) выбрано крупное термокарстовое голубое озеро Нейто (Ней-То в переводе М. Н. Окотетто с ненецкого языка означает Налимье озеро). Иногда его также называют Малто (Мал-То — Конечное озеро). Центр озера Нейто (рис. 2) имеет координаты 70,05° с. ш., 70,58° в. д., его средний диаметр — около 16,5 км, площадь — около 220 км², глубина — до 21 м. К востоку и северо-востоку от него расположены три других крупных голубых озера: Ямбуто (Ямбу-То — Длинное озеро) площадью около 17 км², Нейто (Ерто) и Нейто-1 (Незвахыто, Мутное). В тектоническом плане озеро Нейто расположено в осевой части Нурминского мегавала, одного из основных тектонических элементов полуострова Ямал, к которому приурочена Центральнo-Ямальская зона

газонефтенакопления. Мегавал пересекает полуостров в северо-западном направлении. Вдоль его оси расположено несколько антиклинальных поднятий, на которых открыты крупные и уникальные НГКМ, включая Бованенковское, Крузенштернское и Харасавэйское. В. А. Скоробогатов с соавторами связывают образование термокарстового озера Нейто с зоной «пересечения разнонаправленных разломов... и проявления современных тектонических движений» [12, с. 74].

Нурминский мегавал характеризуется наиболее высоким тепловым потоком на Ямале, превышающим в его западной части 60—70 мВт/м². При этом градиенты температур достигают 3,6—4,4°C/100 м, а аномально высокие пластовые давления (АВПД) начинаются с меньших глубин (около 2 км), чем в других частях Ямала. На глубинах 2,4—3,5 км АВПД характеризуется коэффициентами аномальности 1,8—2,05 [2]. Это обусловлено главным образом наличием вдоль северного склона вала «зоны глубинных разломов с отходящими в стороны “опережающими” разломами, часть которых распространяется и на локальные поднятия в осевой части мегавала» [12]. Разломы способствуют субвертикальной миграции глубинных флюидов.

В результате трехмерного моделирования в центральной части мегавала на Нерстинско-Нейтинской площади выявлены самые высокие температуры на глубинах

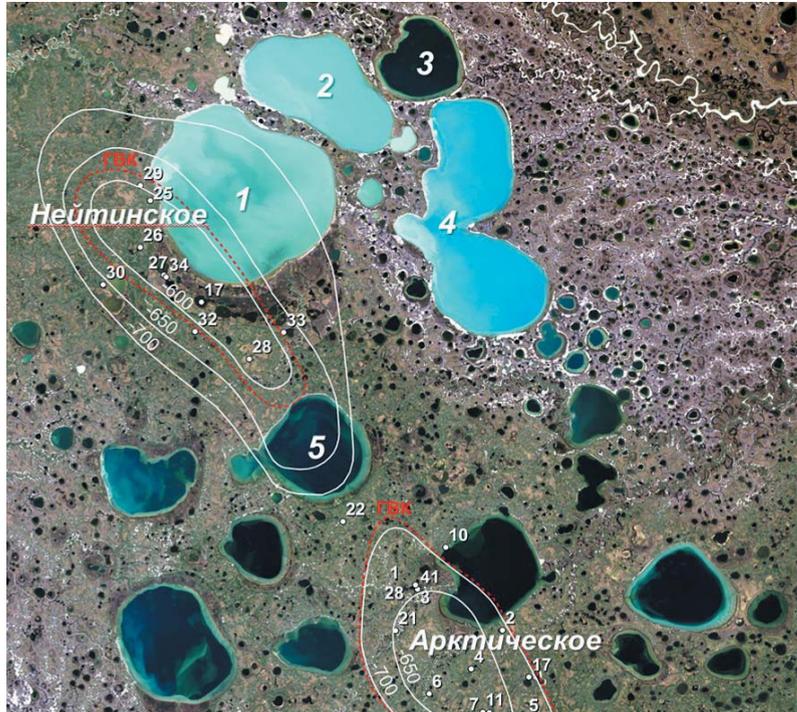


Рис. 2. Крупные голубые озера в центральной части Ямала, Нейтинское и Арктическое НГКМ с точками расположения глубоких скважин. Условные обозначения: озера: 1 – Нейто (Малто), 2 – Нейто (Ерто), 3 – Нейто-1, 4 – Ямбуто, 5 – Палтау-То; красный пунктир – газо-водяной контакт (ГВК); белые линии – замкнутые изолинии структур

750—1500 м, при этом необходимо отметить ограниченный объем точечных замеров температур [2]. На этой площади Ямальской геологоразведочной экспедицией «Главтюменьгеологии» 4 марта 1975 г. поисковой скважиной № 25 (забой 2829 м) была открыта сеноманская залежь Нейтинского НГКМ, а в 1984 г. — Нерстинского газового месторождения (рис. 3).

На Нейтинском НГКМ при испытании в скважине № 25 интервала 636—640 м сеноманской залежи был получен приток газа дебитом 298 тыс. м³/сут (штуцер 20 мм), а абсолютно свободный приток составил 626 тыс. м³/сут. Залежь газа в сеномане характеризуется средней пористостью 28%, пластовым давлением, близким к гидростатическому, — 62 атм, газо-водяной контакт расположен на уровне –606 м, а площадь газоносности — 176 км². Газ сеномана содержит 98,4% метана и 1,33%

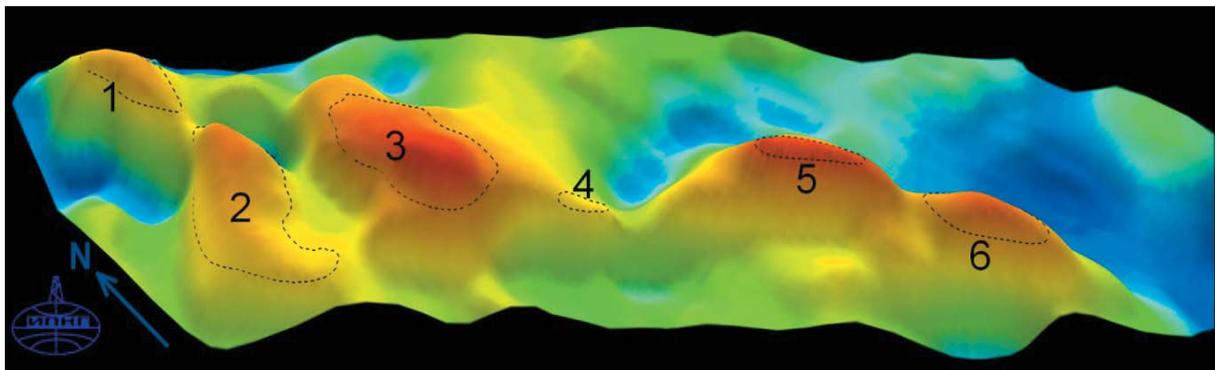


Рис. 3. Трехмерная модель строения Нурминского мегавала по кровле сеноманского горизонта «Г» с месторождениями: 1 – Харасавэйское, 2 – Крузенштернское, 3 – Бованенковское, 4 – Нерстинское, 5 – Нейтинское, 6 – Арктическое (пунктирные линии – ГВК)

Изучение и освоение природных ресурсов Арктики

азота, 0,19% углекислого газа и 0,008% гелия. Всего на месторождении пробурено 10 скважин. При этом в меловых и юрских отложениях выявлено 8 залежей УВ (в основном газ) на глубинах от 600 м (сеноман) до 2600 м (юра). Из отложений нижнего мела были получены притоки нефти. Существенные нефтепроявления были в скважинах № 25, 17 и 28, вскрывших юрские отложения. Общие запасы газа оценены ГКЗ (Государственной комиссией по запасам) в 97,4 млрд м³.

В результате сейсморазведки методом общей глубинной точки и поисково-разведочного бурения на Нейтинском антиклинальном поднятии доказано наличие субвертикальных разломов — зон дробления [12]. Экстремально тяжелый изотопный состав углерода биогенного метана $\delta^{13}\text{C}$ (–38,8‰) в сеноманской залежи Нейтинского НГКМ обусловлен субвертикальной миграцией абиогенного газа из нижнего мела и юры [12]. Обычно изотопный состав углерода биогенного метана $\delta^{13}\text{C}$ меняется от –55‰ до –88...–92‰ [1; 7; 8; 13 и др.]. Обобщение данных $\delta^{13}\text{C}$ сеноманских залежей газа ряда месторождений Ямала показало широкий диапазон его изменений от –38,8‰ до –65,36‰: экстремально тяжелый, –38,8‰, — на Нейтинском НГКМ; от –47,54‰ до –56,5‰ — на Бованенковском, Арктическом, Харасавэйском и Крузенштернском месторождениях (катагенетический и биогенный); легкий, –65,36‰ (биогенный), — в практически не нарушенном разломами Малыгинском ГКМ [1; 8; 14 и др.]. Для сенон-туронского и сеноманского комплексов $\delta^{13}\text{C}$ (in situ) близки, а газ локальных залежей в ММП Бованенковского НГКМ (глубины 65—70 м) в основном имеет $\delta^{13}\text{C}$ от –70,3‰ до –74,6‰.

Нейтинская структура по кровле сеноманского продуктивного резервуара (горизонт «Г») по замкнутой изолинии –700 м имеет площадь 595 км², что в 2,2 раза больше, чем по тому же контуру Арктической структуры (272 км²) (см. рис. 2 и 3). При этом контур газоносности (ГВК –606 м) Нейтинской залежи имеет площадь всего 176 км², что в 1,7 раза меньше, чем у Арктической (293 км² при ГВК –705 м) (см. рис. 2 и 3). Соответственно запасы Нейтинской залежи в 6,3 раза меньше, чем у Арктической. Кроме того, ее запасы в 24 раза меньше, чем на Крузенштернском месторождении, и в 26 раз, чем на Бованенковском. При постоянном подтоке глубинного абиогенного газа в сеноманскую залежь Нейтинского НГКМ ее меньшие запасы объяснимы только возможной утечкой газа по выявленным системам разломов в вышележащие резервуары и на поверхность. Поэтому мы согласны с В. А. Скоробогатовым и его соавторами, что «ничем другим, как частичным разрушением Нейтинского месторождения, это не объяснимо» [12].

Мониторинг процессов дегазации

Ряд дистанционных признаков, позволяющих выделить участки поверхностных газопроявлений, был описан нами ранее [2; 11]. Наиболее хорошо изучен

признак, свидетельствующий о повышенном содержании метана в озерах, — характерный голубой цвет воды. Озера с аномальным цветом воды на севере Западной Сибири известны с 50—60-х годов прошлого века и впервые описаны И. Л. Кузиным [10]. 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. Дальнейшие детальные исследования выявили устойчивую связь цвета воды с наличием газопроявлений в донных отложениях [10]. Эта связь возникает в ситуации, когда одним из источников серы (питательного вещества для сине-зеленых водорослей) является устойчивый приток газонасыщенных подземных вод, содержащих в растворенном виде сульфиды из нижележащих морских отложений.

В 1971—1972 гг. на Уренгойской площади на дне озер Регин-То и Второе Длинное были выявлены воронки выброса газа (грифоны) [1; 10]. Собранные образцы газа были исследованы во Всероссийском нефтяном научно-исследовательском геологоразведочном институте, при этом анализ изотопного состава гелия (до 0,005% объема газа) и углерода метана показал миграцию газа из глубоких (1—3 км) горизонтов [10].

Первые признаки газопроявлений в озере Нейто мы обнаружили с помощью ДЗЗ весной-летом 2016 г. В работе [2] на примере космоснимков озера Нейто показана возможность выявления газогидродинамических процессов, приводящих к изменению обычного вида поверхности голубых озер с замутнением водной толщи и формированием характерных шлейфов на поверхности воды. 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. Также возможно использование данных Landsat, прошедших необходимую атмосферную коррекцию оператором спутников. Однако явления выброса газа могут быть быстротечными (секунды, минуты, часы), а замутнения воды также краткосрочными (часы), что порождает проблему их фиксации при ДЗЗ. Кроме того, замутнения воды могут быть вызваны другими процессами (термоденудацией, дождями, впадающими реками и ручьями). Более надежным способом является анализ состояния ледового покрова, толщина которого на полуострове Ямал достигает 1,5—2 м.

Поскольку метанообразование в донных отложениях и эмиссия газа в воду происходят круглогодично, нередко скопления газа образуются внутри сезонного ледового покрова озер, являющегося практически непроницаемым для газа флюидоупором (покрышкой). За счет прижатия

давлением воды пузырями газа ко льду в большинстве случаев их включения во льду представляются собой небольшие, до 1—2 м в диаметре, слегка сплюснутые газовые линзы. Включения газа во льду — широко распространенное и давно известное природное явление. Пузыри газа во льду встречаются даже в подмосковных озерах и водохранилищах, при этом в толстом (1—2 м) льду они обычно располагаются на нескольких уровнях (рис. 4). Лишь в отдельных случаях, при стабильно-активных потоках газа (газовые струи, газовые факелы), формируются не замерзающие в течение всего морозного периода проталины, через которые газ выходит в атмосферу [6; 16]. При значительных струйных притоках газа и отсутствии проталины при его контакте с ледовым флюидоупором происходит миграция (перераспределение) пузырей газа по горизонтали. Нередко дегазация происходит из ряда соседних источников. Все это приводит к формированию крупных неоднородных зон с многочисленными включениями газа во льду размерами до нескольких десятков и даже сотен метров по латерали.

Большую часть зимы лед арктических озер покрыт снегом, что не позволяет видеть на оптических снимках ДЗЗ неоднородности во льду за редким исключением (например, крупные раскрытые разломы и тальные полыньи). В случае значительного объема выделившегося и законсервированного во льду газа в последние месяцы снеготаяния (конец весны — начало лета) происходит неравномерное таяние ледового покрова с образованием ячеистой структуры, что мы уже показывали ранее на оптических снимках ДЗЗ [2]. Для территории Ямала наиболее благоприятное время для выявления озер с признаками содержания газа во льду — конец мая — начало июня. В результате детального анализа снимка Landsat-8 (18 июня 2016 г. и др.) с разрешением 15 м во льду озера Нейто были выделены многочисленные отверстия, что является свидетельством дегазации донных отложений [2]. Однако мониторинг состояния озер по оптическим снимкам высокого и среднего разрешения в необходимом коротком интервале времени (до 5—10 дней) для арктических широт не всегда возможен из-за частой облачности. Поэтому в рамках разрабатываемой нами технологии для выявления неоднородности ледового покрова озер применено комплексирование оптических и радиолокационных (радарных) данных ДЗЗ.

Крупные неоднородные зоны во льду (десяти и сотни метров) должны быть различимы при



Рис. 4. Пузыри газа во льду одного из озер Подмосковья (фото Е. А. Лазаревой, 26 декабря 2015 г.)

радиолокационной съемке среднего разрешения. Однозначным достоинством радарной съемки является ее малая зависимость от погодных условий, практическая независимость от наличия облаков и времени суток (освещенности) в изучаемых регионах суши и акваторий. Радарная съемка отлично себя зарекомендовала при мониторинге загрязнений поверхности моря жидкими УВ (oil slicks). Особенностью радиолокации является возможность проникать на небольшую глубину (до нескольких метров для L-диапазона) в снег и лед, выделяя различные неоднородности и объекты с различными коэффициентами отражения электромагнитных волн.

Для районов Крайнего Севера наиболее доступны мультиспектральные данные ДЗЗ среднего разрешения (10—60 м) Landsat-5,7,8 и Sentinel-2, обладающие высокой периодичностью (регулярностью) и широкой полосой захвата (180—290 км). Помимо оптических данных для оценки отдельных признаков газопроявлений могут использоваться радиолокационные снимки в С-диапазоне (от 8 до 4 ГГц) с космического аппарата Sentinel-1A (режим съемки — EW и IW с приведенным разрешением 40 и 10 м, уровень обработки — 2A, формат — GRD, поляризация — hh, vv, vh и hv). Все указанные типы данных ДЗЗ распространяются через официальные порталы Американской геологической службы (USGS) и Европейского космического агентства (ESA).

В качестве тестовой отработки были проанализированы данные ДЗЗ радиолокационных (Sentinel-1) и оптических (Sentinel-2) снимков за три последних

зимних периода (2015—2016, 2016—2017 и 2017—2018 гг.). В начале зимнего периода непосредственно после замерзания поверхности озера Нейто на радарных снимках от 23 декабря 2015 г., 6 декабря 2016 г. и 25 декабря 2017 г. (рис. 5.1, 5.4 и 5.7) лед характеризуется относительной однородностью, видны лишь несколько трещин во льду. Темный оттенок льда говорит о его однородном характере и низком коэффициенте отражения электромагнитных волн, поглощающихся водной толщей. Отметим, что на всех этих трех снимках в одном и том же месте в юго-западной части озера выделяется одинаковая неоднородность. Она же видна на большинстве других снимков.

К концу весны снимок радара спутника Sentinel-1 от 28 мая 2015 г. (рис. 5.2) не дает однозначной информации о неоднородностях во льду и трещинах, что объясняется его невысоким разрешением (40 м) и особенностями поляризации сигнала в режиме съемки EW. В то же время на радарном снимке 23 мая 2017 г. (рис. 5.5), полученном в режиме IW с поляризацией vh и vv , на фоне массива светлого льда наблюдаются контрастные почти черного цвета многочисленные (более 400) неоднородности и трещина в северо-западном направлении. Наибольшим отражением электромагнитных волн характеризуется шероховатый лед или лед с наличием многочисленных включений пузырьков, на которых происходит их значительное рассеяние/отражение [13]. Почти черный цвет льда обусловлен меньшим коэффициентом отражения электромагнитных волн и их максимальным поглощением в ледово-водной толще. Это обводненные зоны с наименьшей толщиной льда или его отсутствием. На однотипном снимке 6 мая (рис. 5.8) видны около 150 неоднородностей (24 апреля их было только около 50) и разломы во льду. При этом размеры первичных неоднородных объектов увеличились. Отметим, что меньшее количество неоднородностей на снимках 24 апреля и 6 мая 2018 г. по сравнению со сделанным 23 мая 2017 г. может быть обусловлено меньшей активностью эмиссии газа, а также тем, что они сделаны в более раннее (холодное) время года.

Таким образом, современные радарные съемки с разрешением 10 м позволяют устойчиво фиксировать под поверхностью льда ярко выраженные неоднородные локальные участки уменьшенной толщины льда диаметром до 80—550 м (см. рис. 5.5 и 5.8), которые связаны с вмержанием в лед газовых пузырей (линз газа) и в некоторой степени их тепловым воздействием. Доказано, что такие результаты можно получать в широком временном диапазоне (апрель-май, возможно, что и шире).

Анализ трехлетних май-июньских оптических снимков Sentinel-2 с разрешающей способностью 10 м позволяет сделать следующие выводы: 21 мая 2016 г. были хорошо видны многочисленные неоднородности во льду (см. рис. 5.3), 18 июня 2017 г. (см. рис. 5.6) неоднородности были практически не видны за исключением нескольких трещин, 3 мая

2018 г. (см. рис. 5.9) все озеро было покрыто снегом, неоднородности не видны за исключением нескольких крупных трещин. Удачный снимок 21 мая 2016 г. (см. рис. 5.3) обусловлен ранним приходом экстремально жаркого лета и, возможно, особенно активными газогидродинамическими процессами. Последнее подтверждается хорошо видимыми кольцевыми завихрениями мутьевых (грязевых) потоков после схода льда, зафиксированными на космоснимках Landsat-8 18 и 30 июня 2016 г., опубликованных нами в 2016 г. [2].

Однако по оптическим снимкам высокого разрешения обнаружить неоднородности во льду можно только при сквозном протаивании его поверхности на участках со сниженной за счет включений газовых пузырей толщиной льда при высокочастотной съемке, качество и информативность которой в северных широтах ограничены условиями частой облачности. Поэтому на большинстве снимков неоднородности в покрытом или оголившемся от снега льду в конце весны практически не наблюдаются (или наблюдаются при детальном рассмотрении на снимках высокого разрешения), так как поверхность льда сохраняет ровную форму. В частности, множество таких неоднородностей было обнаружено на снимке Landsat-8 18 июня 2016 г. [2].

Для радарной съемки Sentinel-1 в детальном режиме IW с приведенным разрешением 10 м периодичность составляет от 11 до 14 дней. Для оптической съемки Sentinel-2 за счет большей полосы захвата (290 км) периодичность съемки выше и достигает 3—4 дней (при одновременной работе на орбите двух спутников). За счет дополнительного использования съемки Landsat-7 и Landsat-8 периодичность получения данных ДЗЗ может составлять 2—3 дня.

На большинстве радарных снимков и на некоторых оптических снимках видны крупные, а на радарных — нередко и мелкие трещины во льду. Наибольшей регулярностью и относительно стабильным положением характеризуются крупные трещины, стабильно начинающиеся в юго-восточной части озера и с небольшой флуктуацией изгиба, доходящие до противоположного (северо-западного) берега. В юго-восточную часть озера Нейто впадает небольшая река Тане-Яха, а в северо-западной части берет начало река Сеяха. Отметим, что реки часто приурочены к разломам в осадочной толще. В связи с этим можно с высокой степенью вероятности прогнозировать наличие активного разлома, секущего озеро в северо-западном направлении. Это хорошо согласуется с приведенными выше данными о сейсмических и буровых исследованиях Нейтинской структуры и одноименного НГКМ.

Интересным и важным является факт, что на многих соседних крупных озерах, расположенных восточнее и севернее озера Нейто (Нейто-Ерто, Ямбута и др.), неоднородности во льду практически отсутствуют или они одиночны (рис. 6). На озере Нейто самая высокая плотность включений газа наблюдается в южной и северо-западной частях (см. рис. 5.3

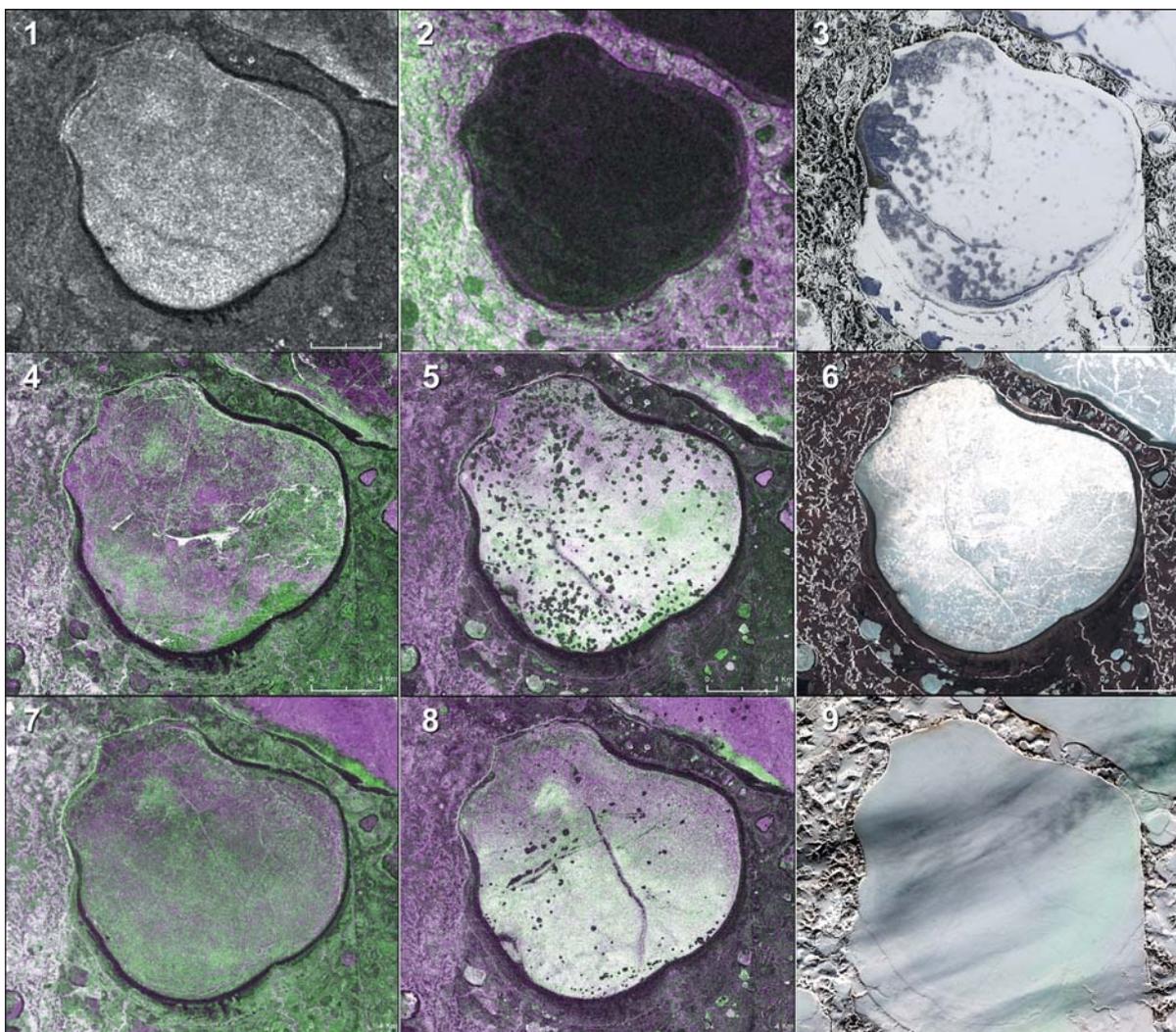


Рис. 5. Дистанционный мониторинг газодинамики озера Нейто: радарные снимки Sentinel-1 23 декабря 2015 г. (1), 28 мая 2017 г. (2), 6 декабря 2016 г. (4), 23 мая 2017 г. (5), 25 декабря 2017 г. (7) и 6 мая 2018 г. (8); оптические снимки Sentinel-2 21 мая 2016 г. (3), 18 июня 2017 г. (6) и 3 мая 2018 г. (9)

и 5.5). Именно под южной частью озера на глубине около 600 м и ниже расположены залежи газа Нейтинского НГКМ, существенно разбитые разломами. Возможно, что и к северо-западной части озера Нейто также приурочена залежь газа или газовый карман (небольшая залежь газа в верхней части разреза). Кроме того, в некоторых направлениях наблюдаются цепочки включений газа, позволяющие предположить их приуроченность к зонам разломов (см. рис. 5.3, 5.5 и 5.8). Это свидетельствует об активных геодинамических и газогидродинамических процессах в районе озера Нейто. При этом к глубинной (мел-юрской) эмиссии газа мы не исключаем и дополнительный «газогидратный вклад» из зоны ММП (газ гидратных залежей также может быть смешанного типа) [14]. Многочисленные неоднородности во льду наблюдаются и в озере Полтау-То (озеро Окунуться — перевод с ненецкого М. Н. Окотетто), расположенном рядом с юго-восточной частью Нейтинского НГКМ (см. рис. 2 и 6).

Под ним размещается юго-западная периклинали Нейтинской структуры по сеноманским отложениям с замкнутыми контурами изолиний на уровне –650 и –700 м (см. рис. 2). Судя по всему, утечка газа происходит по всему замкнутому контуру Нейтинской структуры (ловушка мигрирующего газа из нижележащих отложений), возможно, что и шире. В других озерах неоднородностей во льду гораздо меньше, чем в Нейто. Например, в Ямбуто и Нейто-1 их не более пяти (рис. 6). При этом на снимке 23 мая 2017 г. на 18 из 20 озер (90%) черные неоднородности (проталины) наблюдаются именно на фоне светлого льда, что также видно на рис. 6.

Таким образом, комплексный анализ разнородных данных ДЗЗ (оптических и радарных снимков), проведенный в районе озера Нейто, доказал возможность получения более детальных, своевременных и достоверных сведений о газогидродинамике в течение длительного (октябрь-июнь) существования снежного и ледового покрова озер. Проведение

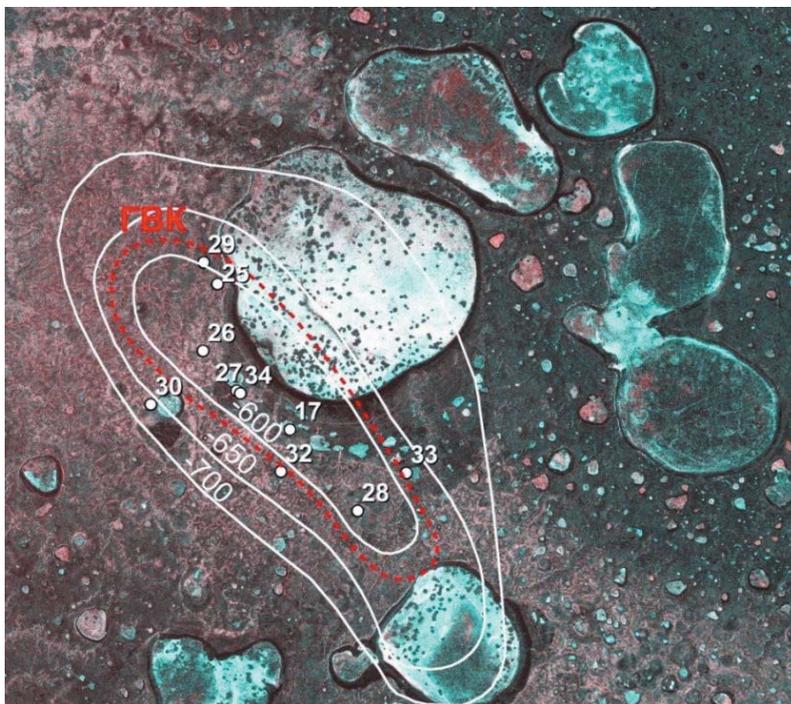


Рис. 6. Радиолокационный космоснимок Sentinel-1 от 23 мая 2017 г. района озера Нейто и Нейтинского НГКМ. Красный пунктир – ГВК, белые линии – замкнутые изолинии структуры по кровле сеномана

таких исследований позволяет планировать и рационально проводить экспедиционные работы, ориентированные на взятие проб газа с целью определения его генезиса и местоположений каналов дегазации недр, включая кратеры выбросов газа. Выявление газогидродинамической активности озер будет способствовать повышению эффективности поиска новых месторождений и снижению угроз при их освоении.

По данным ДЗЗ нам удалось доказать продолжающуюся эмиссию газа (в отдельных случаях и жидких УВ) в Антипаютинском кратере [4] и нескольких кратерах, образовавшихся в зонах старых катастроф при бурении скважин на территории бывшего СССР и других стран Европы и Америки. В частности, после ликвидации катастрофического фонтанирования УВ на Кумжинском ГКМ их эмиссия продолжается более 30 лет [3; 5].

Во время жаркого засушливого лета 2016 г. представитель коренного населения М. Н. Ококетто информировал нас, что 5 июля в районе больших озер (Нейто, Ямбуто и др.) он увидел мощное столбовое облако пара высотой до 5 км, напоминающее извержение вулкана [17]. ИПНГ РАН и Российский центр освоения Арктики оперативно организовали экспедицию. По прибытии в район озера был обнаружен обширный многодневный пожар тундры, зафиксированный нами одновременно 15 июля при полете на вертолете и на космоснимке Landsat-8 (рис. 7). Высокий уровень риска отравления угарным газом не позволил высадиться и обследовать район пожара. Подобный прогноз М. Н. Ококетто о выбросе газа 28 июня 2017 г. по столбовому дыму севернее поселка Сеяха полностью подтвердился, и уже 2 июля мы исследовали новый «Сеяхинский» кратер С11 [4; 5]. При этом тундровая растительность в радиусе до 60—100 м была опалена огнем, но пожар не ушел на большие удаления от источника из-за ее высокой влажности, что характерно для начала лета. Не вызывает сомнений, что мониторинг тундры, проводимый коренными жителями в реальном времени, требует особого внимания и поддержки со стороны научных организаций и административных органов.

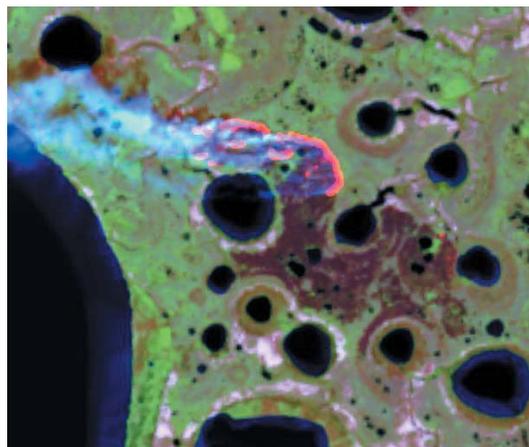


Рис. 7. Пожар тундры в районе озера Нейто 15 июля 2016 г.: фотография из вертолета (В. И. Богоявленский) и космоснимок Landsat-8

Заключение

Современные высокопериодические оптические и радиолокационные данные ДЗЗ позволяют решать широкий круг задач, связанных с выявлением поверхностных газопроявлений, наблюдаемых в донных отложениях озер криолитозоны России. Технология дистанционного мониторинга газодинамики в озерах должна основываться на устойчивых дистанционных признаках, к которым относятся аномальный голубой цвет воды, мутневые потоки и наличие характерных неоднородностей ледового покрова. Наличие озер с постоянными признаками притока газа, фиксируемое результатами сравнения разновременной съемки (мониторинга), может служить дополнительным индикаторным признаком эндогенной активности на локальном и региональном уровнях.

В целом выявленные новые признаки наличия неоднородностей во льду и светлого фона льда озер на радиолокационных данных ДЗЗ с высокой степенью достоверности могут использоваться для детального картирования озер (в том числе кратерных) с видимыми природными и техногенными газопроявлениями. Современные средства получения и обработки данных ДЗЗ позволяют применять предлагаемую технологию на всей территории заморзания поверхности озер, рек и морей (более трех четвертей площади России).

Вполне вероятно, что возгорания тундры в ряде случаев инициируются выбросами газа, который нередко самовоспламеняется не только на суше, но и в морских условиях.

ДЗЗ является незаменимым инструментом изучения и мониторинга состояния опасных природных и природно-техногенных объектов и процессов, особенно в малолюдных регионах Арктики.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Арктика — научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития» по теме «Разработка технологий выявления и мониторинга опасных природных и техногенных объектов и явлений в Арктической зоне Российской Федерации на основе данных дистанционного зондирования Земли на примере полуострова Ямал».

Литература

1. *Богоявленский В. И.* Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография. — М.: ВЭО, 2014. — С. 11—175.
2. *Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В., Никонов Р. А.* Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 3 (23). — С. 4—15.
3. *Богоявленский В. И., Бойчук В. М., Переналин С. О. и др.* Катастрофа Кумжи // Бурение и нефть. — 2017. — № 1. — С. 18—24.
4. *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.
5. *Богоявленский В. И., Богоявленский И. В.* Природные и техногенные угрозы при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов в Арктике // Минер. ресурсы. — 2018. — № 2. — С. 60—70.
6. *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/SO20596141504003X.
7. *Буданцева Н. А.* Газопроявления в мерзлых породах // Криосфера нефтегазокоденсатных месторождений полуострова Ямал. — Т. 1: Криосфера Харасавейского газоконденсатного месторождения. — Тюмень; Санкт-Петербург: Недра, 2006. — С. 235—248.
8. *Дворецкий П. И., Гончаров В. С., Есиков А. Д. и др.* Изотопный состав природных газов севера Западной Сибири: Обзор. — М.: ИРЦ ОАО «Газпром», 2000. — 80 с.
9. *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.
10. *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.
11. *Сизов О. С.* Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68.
12. *Скоробогатов В. А., Строганов Л. В., Копеев В. Д.* Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 352 с.
13. *Смирнова И. О., Русанова А. А., Камышников Н. В.* Анализ характеристик ледяного покрова озер Большеземельской тундры по радиолокационным данным ALOS PALSAR // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2017. — Т. 14, № 7. — С. 198—209. — DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-198-209.
14. *Якушев В. С.* Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.
15. *Anthony K. M. W., 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.
16. *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.
17. Новая ямальская воронка? Ученые уже начали изучать странное явление по космоснимкам // Вести Ямал. — 2016. — 11 июля. — URL: http://vesti-yamal.ru/ru/vjesti_jamal/na_yamale_vozmojno_poyavilas_novaya_tundrovaya_voronka155695.

Изучение и освоение природных ресурсов Арктики

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3), заведующий кафедрой геоэкологии, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., 65), e-mail: vib@pgc.su.

Богоявленский Игорь Васильевич, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3), Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., 65), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Никонов Роман Александрович, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3), Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., 65), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Сизов Олег Сергеевич, кандидат географических наук, доцент, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., 65), главный специалист, АО «Российские космические системы» (127490, Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

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.

TECHNOLOGIES FOR REMOTE DETECTION AND MONITORING OF THE EARTH DEGASSING IN THE ARCTIC: YAMAL PENINSULA, NEITO LAKE

Bogoyavlensky V. I.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Sizov O. S.

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),
Russian space systems (Moscow, Russian Federation)

Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Abstract

The article relates to the issues of subsurface degassing remote detection and monitoring on the Yamal peninsula. The proposed technology provides the integrated use of multispectral and radar surveying of medium resolution (10-60 m), which allows to reveal heterogeneities in the ice cover associated with gas inclusions in ice. The presence of a high-frequency survey makes it possible to detect areas with regular gas shows, which may serve as an additional sign of natural and technogenic endogenous activity. Application of the technology will increase the efficiency and safety of the hydrocarbon resources search and development in the Arctic.

Keywords: Arctic, Yamal, north of Western Siberia, Neito Lake, Neytinskoye field, surface gas emission, craters of gas blowout, cryolithozone, permafrost, remote sensing data, space-based radar survey.

References

1. 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]. Moscow, VEO, 2014, pp. 11—175. (In Russian).
2. Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Distantionnoe vyvaylenie uchastkov poverkhnostnykh gazoprovyavlenii i gazovykh vybrosov v Arktike: poluostrov Yamal. [Remote detection of surface gas shows zones and gas blowouts in the Arctic. The Yamal peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2016, no. 3 (23), pp. 4—15. (In Russian).
3. Bogoyavlensky V. I., Boichuk V. M., Perekalin S. O., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N. Katastrofa Kumzhi. [Kumzha gas and condensate field catastrophe]. Burenie i neft', 2017, no. 1, pp. 18—24. (In Russian).
4. 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).

5. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V. Prirodnye i tekhnogennye ugrozy pri poiske, razvedke i razrabotke mestorozhdenii uglevodorodov v Arktike. [Natural and technogenic threats in Arctic hydrocarbon fields search, prospecting and development]. *Miner. resursy*, 2018, no. 2, pp. 60—70. (In Russian).
6. Bondur V. G., Kuznetsova T. V. Detecting Gas Seeps in Arctic Sea Water Areas Using Remote Sensing Data. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 9, pp. 1060—1072. DOI: 10.1134/S0001433815090066.
7. Budantseva N. A. Gazoproyavleniya v merzlykh porodakh. [Gas shows in frozen rocks]. *Kriosfera neftegazokodensatnykh mestorozhdenii poluoostrova Yamal. Vol. 1. Kriosfera Kharasaveiskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya*. Tyumen'; St. Petersburg, Nedra, 2006, pp. 235—248. (In Russian).
8. Dvoretiskii P. I., Goncharov V. S., Esikov A. D. et al. Izotopnyi sostav prirodnykh gazov severa Zapadnoi Sibiri: Obzor. [Isotope contents of East Siberia North natural gases]. Moscow, IRTs OAO "Gazprom", 2000, 80 p. (In Russian).
9. Kuzin I. L. Razvitie predstavlenii o noveishei tektonike i ee vliyanii na formirovanie i razmeshchenie mestorozhdenii nefiti i gaza. [Development of global tectonics notions and its influence on formation and allocation of oil and gas fields]. *Tr. ZapSibNIGNI [Tyumen']*, 1973, iss. 73, pp. 6—20. (In Russian).
10. Kuzin I. L. O prirode anomal'nykh ozer — pokazatelei skoplenii uglevodorodov v glubokikh gorizontakh osadochnogo chekhla. [About the nature of blue lakes — the indicators of hydrocarbon accumulations in deep horizons of sedimental cover]. *Problemy otkrytiya novykh zon neftegazonakopleniya v osnovnykh produktivnykh tolshchakh Zapadnoi Sibiri*. St. Petersburg, VNIGRI, 1992, pp. 129—137. (In Russian).
11. Sizov O. S. Distantionnyi analiz posledstviy povernkhnostnykh gazoproyavlenii na severe Zapadnoi Sibiri. [Remote analysis of surface gas shows effects on the North of Western Siberia]. *Geomatika*, 2015, no. 1, pp. 53—68. (In Russian).
12. Skorobogatov V. A., Stroganov L. V., Kopeev V. D. Geologicheskoe stroenie i gazoneftenosnost' Yamala. [Geological structure and oil and gas potential of Yamal]. Moscow, OOO "Nedra-Biznestsentr", 2003, 352 p. (In Russian).
13. Smirnova I. O., Rusanova A. A., Kamyshnikova N. V. Analiz kharakteristik ledyanogo pokrova ozer Bol'shezemel'skoi tundry po radiolokatsionnym dannym ALOS PALSAR. [Analysis of ice cover characteristics of lakes in Bolshezemel'skaya Tundra using ALOS PALSAR radar data]. *Sovremennye problemy distants. zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 7, pp. 198—209. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-198-209. (In Russian).
14. Yakushev V. S. Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone. [Natural gas and gas hydrates in permafrost]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (In Russian).
15. Anthony K. M. W., Anthony P., Grosse G., Chanton J. Geologic methane seeps along boundaries of Arctic permafrost thaw and melting glaciers. *Nature Geoscience*, 2012, vol. 5, pp. 419—426.
16. 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, pp. 800—802.
17. Novaya yamal'skaya voronka? Uchenye uzhe nachali izuchat' strannoe yavlenie po kosmosnimkam. [Is there a new crater on Yamal? Scientists have already begun studying it with satellite data]. *Vesti Yamal*, 2016, July 11. Available at: http://vesti-yamal.ru/ru/vjesti_jamal_na_yamale_vozmojno_poyavilas_novaya_tundrovaya_voronka155695. (In Russian).

Information about the authors

Bogoyavlensky Vasily Igorevich, Corresponding member of RAS, Doctor of Technical Science, Professor, Deputy Director for Science, Oil and Gas Research Institute of the RAS (3, Gubkina st., Moscow, Russia, 119333), Head of the Geoecology Department, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: vib@pgc.su.

Sizov Oleg Sergeevich, Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky prosp., Moscow, Russia, 119991), Chief Expert, Russian space systems (h. 25, b. 51, Decabristov st., Moscow, Russia, 127490), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Bogoyavlensky Igor Vasilyevich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of the RAS (3, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia), Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Nikonov Roman Aleksandrovich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of the RAS (3, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia), Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Bibliographic description

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Technologies for Remote Detection and Monitoring of the Earth Degassing in the Arctic: Yamal Peninsula, Neito Lake. *Arctic: ecology and economy*, 2018, no. 2 (30), pp. 83—93. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-83-93. (In Russian).