

УДК 504.5.06
DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art75

ТЕХНОЛОГИЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПОВЕРХНОСТНЫХ ГАЗОПРОЯВЛЕНИЙ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ (НА ПРИМЕРЕ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ)

Богоявленский В.И.^{1,2}, Сизов О.С.^{1,2,3}, Богоявленский И.В.^{1,2},
Никонов Р.А.^{1,2}, Каргина Т.Н.¹

1 – ИПНГ РАН, 2 – РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 3 – НЦ ОМЗ ГК «Роскосмос»
E-mail: vib@pgc.su

Аннотация. Рассматриваются вопросы дистанционного выявления поверхностных газопроявлений на полуострове Ямал. В рамках технологии выявления предлагается использование мультиспектральной и радиолокационной съемки среднего разрешения (10–60 м). Основой технологии является применение устойчивых индикационных признаков, реализуемых с помощью алгоритмов автоматического дешифрирования. Наличие высокочастотной съемки позволяет установить участки с регулярными газопроявлениями, что может служить дополнительным признаком эндогенной активности. Современные средства получения и обработки данных ДЗЗ позволяют масштабировать разрабатываемую технологию вплоть до границ распространения многолетней мерзлоты.

Ключевые слова: данные ДЗЗ, поверхностные газопроявления, Ямал, север Западной Сибири, криолитозона, дешифрирование.

TECHNOLOGIES FOR REMOTE MONITORING OF SURFACE DEGASSING IN THE PERMAFROST AREA (YAMAL PENINSULA)

Bogoyavlensky V.I.^{1,2}, Sizov O.S.^{1,2,3}, Bogoyavlensky I.V.^{1,2}, Nikonov R.A.^{1,2}, Kargina T.N.¹

1 – OGRI RAS, 2 – Gubkin Oil and Gas University,
3 – Earth Monitoring Operational Center of SC «Roskosmos»
E-mail: vib@pgc.su

Abstract. The article considers the issues of surface gas shows remote detection on the Yamal Peninsula. The detection technology proposes the use of medium resolution (10–60 m) multispectral and radar surveys. The technology is based on the use of stable indicative signs implemented using automatic interpretation algorithms. High frequency of surveys allows you to detect areas with regular gas shows, which can be an additional sign of endogenous activity. Modern ways of obtaining and processing remote sensing data allow the developed technology to be scaled up to the whole area of permafrost distribution.

Keywords: Remote sensing data, surface gas shows, Yamal peninsula, North of the Western Siberia, permafrost zone, interpretation.

Активному изучению поверхностных газопроявлений на суше и на шельфе высоких широт в настоящее время способствует изменение оценки вклада в глобальное потепление помимо углекислого газа других парниковых газов, среди которых одним из важнейших является метан [1–4, 8]. В структуре баланса эмиссии метана с российской территории больше половины составляют выбросы с поверхности переувлажненных территорий (заболоченных участков и водных объектов). Для арктических регионов установлено два основных источника эмиссии – биохимический газ, который является результатом микробной деятельности и выделяется при оттаивании многолетнемерзлых пород (ММП), и катагенетический газ, который формируется на больших глубинах и способен мигрировать вверх по разрезу, как по активным проницаемым зонам, так и в результате заколонных перетоков в процессе освоения месторождений углеводородов (УВ) [2, 4, 9].

Многочисленные исследования показали, что наиболее благоприятные условия для продуцирования метана в атмосферу в северных регионах складываются в пределах термокарстовых котловин, хасыреев и крупных речных долин [8]. Одним из круглогодичных источников метана являются донные отложения озер, где переработка углерода и выделение метана происходят даже при температурах, близких к 0°C [11].

Все многообразие поверхностных газопроявлений широко представлено на территории полуострова Ямала (общая площадь – 117,6 тыс. км²), полностью расположенного в зоне сплошного развития ММП (за исключением сквозных таликов под крупными озерами и реками). На Ямале разведан ряд уникальных и крупных месторождений УВ, ведется промышленная добыча газа и нефти на Бованенковском, Новопортовском и Южно-Тамбейском месторождениях, расширяется сеть инфраструктуры.

Для дистанционного выявления поверхностных газопроявлений наилучшим образом подходят мультиспектральные данные ДЗЗ среднего разрешения (10-60 м) Landsat-5,7,8 и Sentinel-2, обладающие высокой периодичностью и широкой полосой захвата (180–290 км). Помимо оптических данных для оценки отдельных признаков газопроявлений могут использоваться радиолокационные снимки в С-диапазоне с космического аппарата Sentinel-1A (режим съемки – EW и IW с приведенным разрешением 40 и 10 м, уровень обработки – 2A, формат – GRD, поляризация – hh и hv).

Все указанные типы данных ДЗЗ распространяются через официальные порталы Американской геологической службы (USGS) и Европейского космического агентства (ESA).

Большинство дистанционных признаков, которые позволяют выделить участки газопроявлений, были описаны ранее [1, 8]. В данной работе основное внимание уделяется описанию технологии мониторинга газопроявлений из донных отложений термокарстовых озер на территории Ямала.

Наиболее распространенным и хорошо изученным признаком, свидетельствующим о повышенном содержании метана в озерах, является характерный голубой цвет воды. Озера с аномальным цветом воды на севере Западной Сибири известны с 50-60-х годов и впервые в литературе описаны И.Л. Кузиным [6]. 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 [7]. Эта связь возникает в той ситуации, когда одним из источников серы (питательного вещества для синезеленых водорослей), является устойчивый 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. Также возможно использование данных Landsat, прошедших необходимую атмосферную коррекцию оператором спутников.

Анализ восстановленных спектральных кривых по данным Landsat-8 (рис. 1) показывает, что для озер в естественном состоянии характерен темно-синий цвет, который определяется пониженными значениями яркости для 3, 4 и 5 каналов.

Большая часть выделенных озер (741 озеро площадью 1237 км²) расположены в высотном интервале 0-20 м над уровнем моря (рис.2), общее распределение по абсолютной высоте местности показано на рис. 3.

Сравнение архивной съемки с актуальными данными за 2013–2014 гг. позволило выявить основные изменения, произошедшие за практически 30-летний период

климатических изменений и активного промышленного освоения территории. В целом установлено следующее:

- 896 озер площадью 1198,4 км² сохранили голубой оттенок воды;
- 854 «голубых» озера площадью 414,6 км² изменили цвет на более темный, соответствующий фоновым условиям повышенного содержания органики;
- 242 озера площадью 176,1 км² испытали значительное понижение уровня воды (большинство трансформировались в хасыреи);
- 1532 озера площадью 608,7 км² приобрели голубой оттенок.

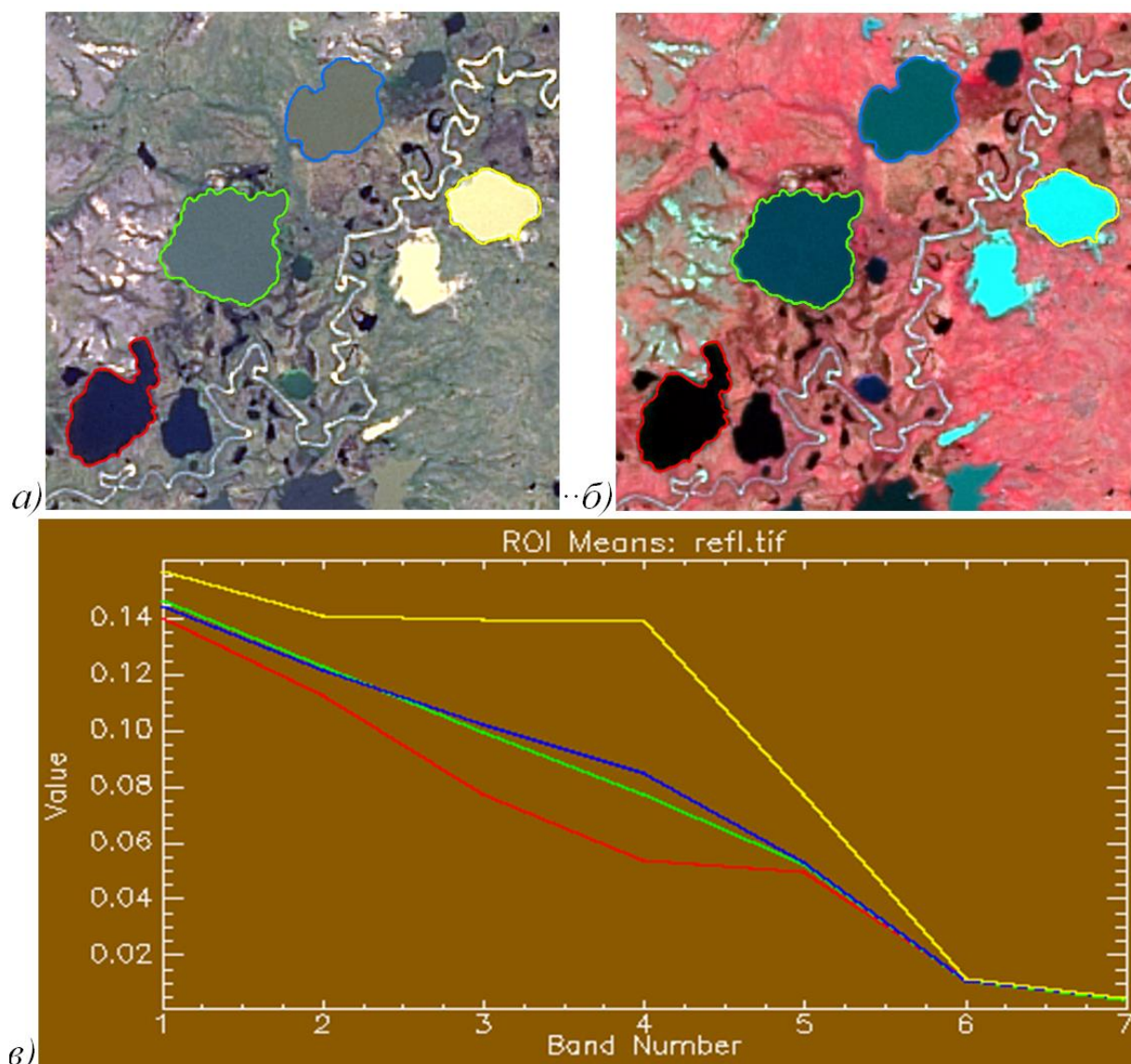


Рис. 1. Визуальное представление озер на снимке Landsat-8 (а – видимые цвета, б – инфракрасный синтез) и кривые значений спектральной яркости (в), озеро с фоновыми значениями обозначено красным цветом, ID исходного снимка – LC81650102013202LGN00

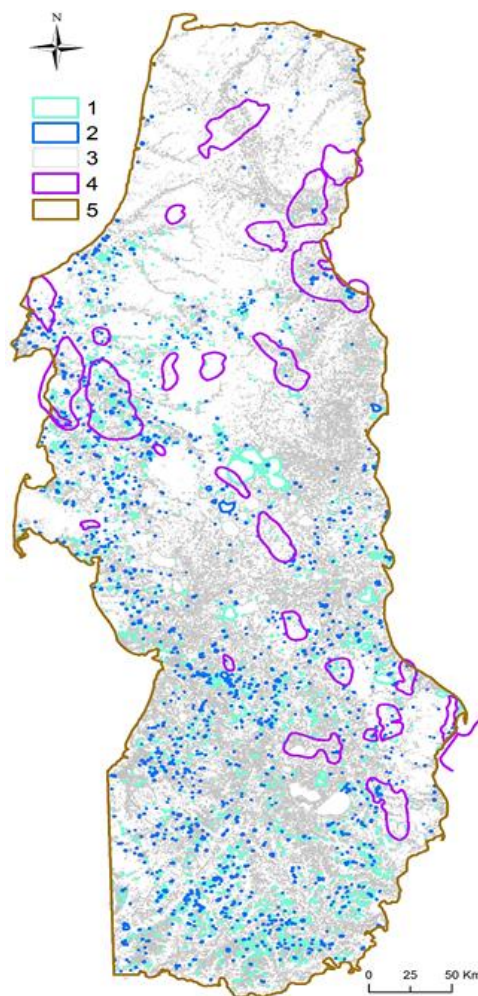


Рис. 2. Пространственное распределение голубых озер на территории полуострова Ямал:
1 – голубые озера по состоянию на 1985 г.; 2 – вновь появившиеся к 2014 г. голубые озера; 3 – озера полуострова Ямал; 4 – границы известных месторождений УВ;
5 – граница территории исследований

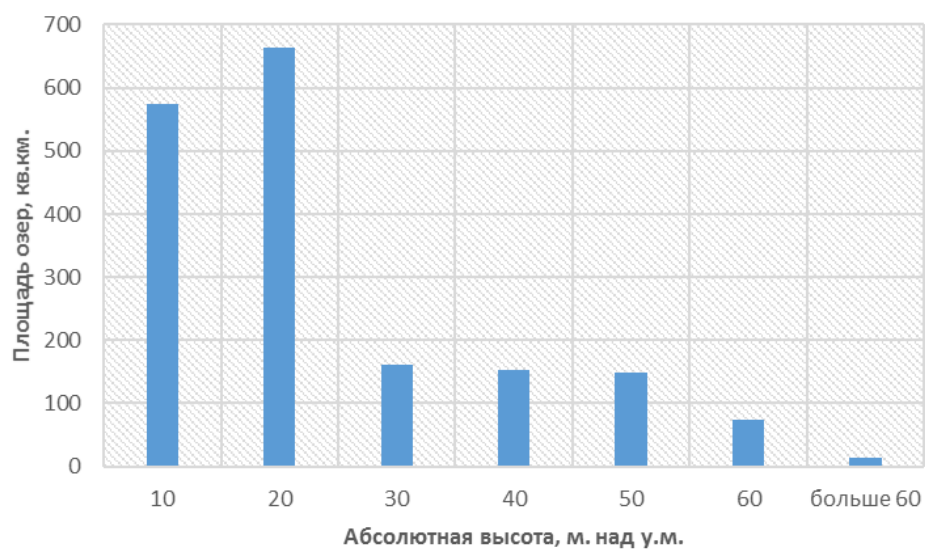


Рис. 3. Высотное распределение голубых озер, по состоянию на 1985 г.

Поскольку метанообразование в донных отложениях происходит круглогодично, нередко скопления газа образуются под сезонным ледовым покровом озер, являющимся практически непроницаемым для газа флюидоупором (покрышкой). За счет прижатия давлением воды пузырей газа ко льду, в большинстве случаев их включения во льду представляют собой небольшие, до 1 м в диаметре, сплюснутые газовые линзы. Лишь в отдельных случаях, при стабильно-активных выходах газа, формируются незамерзающие в течение всего морозного периода сипы [10]. Последовательное вмерзание в лед газовых пузырей от поднимающихся со дна газовых струй (газовых факелов) над каналом их выхода со дна, а также миграция (перераспределение) пузырей газа по горизонтали при его контакте с ледовым флюидоупором приводит к формированию крупных неоднородных зон до нескольких десятков и даже сотен метров, которые должны быть различимы при радиолокационной съемке среднего разрешения.

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 [1]. Для территории Ямала наиболее благоприятное время для выявления озер с признаками растворения газа во льду – конец мая - начало июня. В рамках разрабатываемой технологии для выявления неоднородности ледового покрова озер применено комплексирование оптических и радиолокационных данных.

В качестве одного из объектов исследований выбрано крупное озеро Нейто диаметром около 17 км и площадью около 225 км², которое характеризуется устойчиво светло-голубым цветом при оптической съемке (рис. 4а). В ранее проведенных исследованиях мы уже отмечали, что после схода льда на озере Нейто и некоторых других озерах Ямала периодически наблюдаются мутьевые потоки, характерные для активной газогидродинамики [1].

В начале зимнего периода, непосредственно после замерзания поверхности озера Нейто на радарном снимке (рис. 4б) лед характеризуется относительной однородностью. К концу весны радар фиксирует под поверхностью льда ярко выраженные неоднородные локальные участки уменьшенной толщины льда (рис. 4в), которые связаны с вмерзанием в лед газовых пузырей (линз газа) и, в некоторой степени, их тепловым воздействием. В то же время по оптическим данным (рис. 4г) неоднородность льда в конце весны практически не выделяется, так как его поверхность сохраняет свою ровную форму.

Видны лишь крупные трещины во льду, которые еще лучше выделяются на радарном снимке (рис. 4в). Достоверное визуальное выделение включений газа в лед возможно только при полном сквозном протаивании участков со сниженной за счет включений газовых пузырей толщиной льда. Многие участки ячеистого ледового покрова по данным оптической съемки высокого разрешения уже были нами ранее установлены на ряде озер Ямала [1].

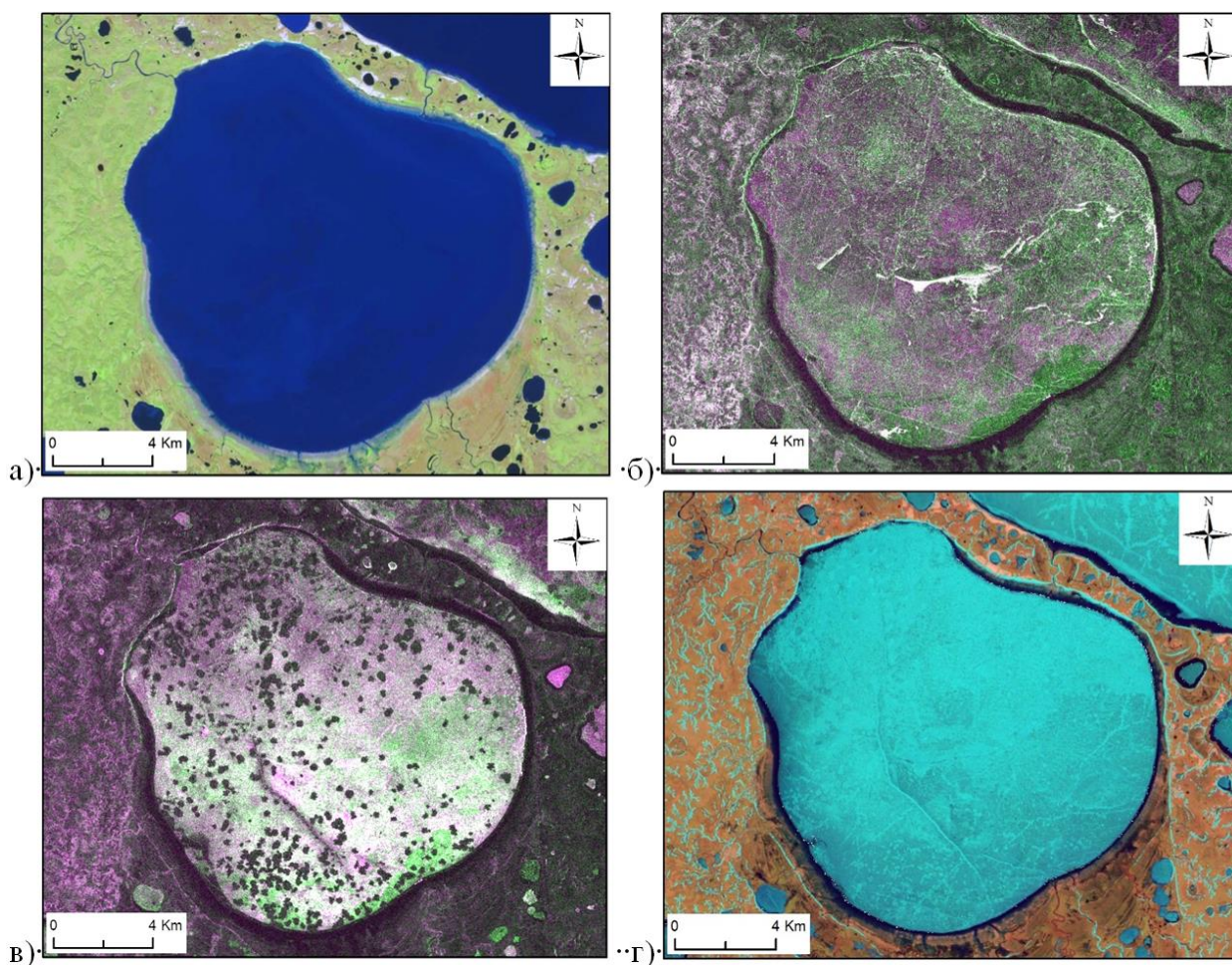


Рис. 4. Поверхностная газодинамика озера Нейто: а) оптический снимок Sentinel-2 12.08.2016, б) радарный снимок Sentinel-1 06.12.2016, в) радарный снимок Sentinel-1 23.05.2017, г) оптический снимок Sentinel-2 18.06.2017

Таким образом, совмещенный анализ разнородных данных ДЗЗ (оптические и радарные снимки) позволяет получить более детальные, своевременные и достоверные сведения о газодинамике в течение зимнего периода. Это позволяет планировать и рационально проводить экспедиционные исследования, ориентированные на взятие проб газа с целью определения его генезиса и положений каналов дегазации недр, включая кратеры выбросов газа.

Интересным и важным является факт, что на озере Нейто самая высокая плотность включений газа выявлена в южной и северо-западной частях (рис.4-в). Отметим, что под южной частью озера на глубине около 600 м и ниже частично расположены залежи газа Нейтинского газового месторождения, существенно разбитые разломами. Кроме того, на Нейтинско-Нерстинской площади существуют сильная аномалия теплового поля Земли [1]. Возможно, что и к северо-западной части озера Нейто также приурочена залежь газа или газовый карман (небольшая залежь газа в ВЧР). Кроме того, в некоторых направлениях наблюдаются цепочки включений газа, позволяющие предположить их приуроченность к зонам разломов (рис.4в). На соседних крупных озерах, расположенных восточнее и севернее озера Нейто, во льду практически нет подобных неоднородностей. Это свидетельствует, что в данной части Ямала именно озеро Нейто характеризуется наиболее активной газогидродинамикой.

Одним из объектов постоянного мониторинга в ИПНГ РАН является Антипаютинский кратер газового выброса (СЗ в ГИС «АМО») [1-4]. Он образовался при выбросе газа 27 сентября 2013 г. на Гыданском полуострове (дата зафиксирована населением поселка Антипаюта) в 3 км к западу от Солетского газового месторождения. 9 июля 2014 г. первыми на кратере СЗ побывали коренные жители М.П. Лапсуй, А.М. Лапсуй и Х.С. Окодетто, предоставившие авторам важную информацию, включая фотодокументы. Позднее в 2014-2016 гг. кратер СЗ был хорошо изучен А.И. Кизяковым, А.В. Хомутовым и др.

В 2017 г. при анализе ряда космоснимков по объекту СЗ на снимке WV-1 16 июля 2017 г. (рис. 4в) нами был выявлен новый объект размером у уреза воды 18×22 м [4]. Его поверхность разорвана в двух почти ортогональных направлениях (рис. 5в), что характерно для бугров пучения, а в центральной части выделяется некоторое подобие вытянутого жерла размером 4×9 м. С высокой вероятностью можно утверждать, что он соответствует сезонному бугру пучения, образовавшемуся при подъеме за счет газогидродинамики замерших донных отложений, ставших флюидоупором. Однако не исключается и возможность образования данного объекта за счет разрыва остаточной части ледового покрова выбросом газа или воды [4]. В любом случае это свидетельствует о продолжающихся активных газогидродинамических процессах в районе кратера СЗ. Ранее мы неоднократно прогнозировали, что выбросы газа «могут быть краткосрочными разовыми и многоразовыми (подобно механизмам грязевого вулканизма и гейзеров), а также непрерывными (струйными)» [4, с. 8]. Этот прогноз был дополнительно

подтвержден в ходе экспедиционных работ на Сеяхинском кратере (С11) в сентябре 2018 г.: на месте кратера в русле реки наблюдалась слабая эмиссия газа. Таким образом, ранее сделанный прогноз, теперь подтвержден фактами. Во всех кратерах выброса газа можно ожидать его повторные выбросы (выходы).

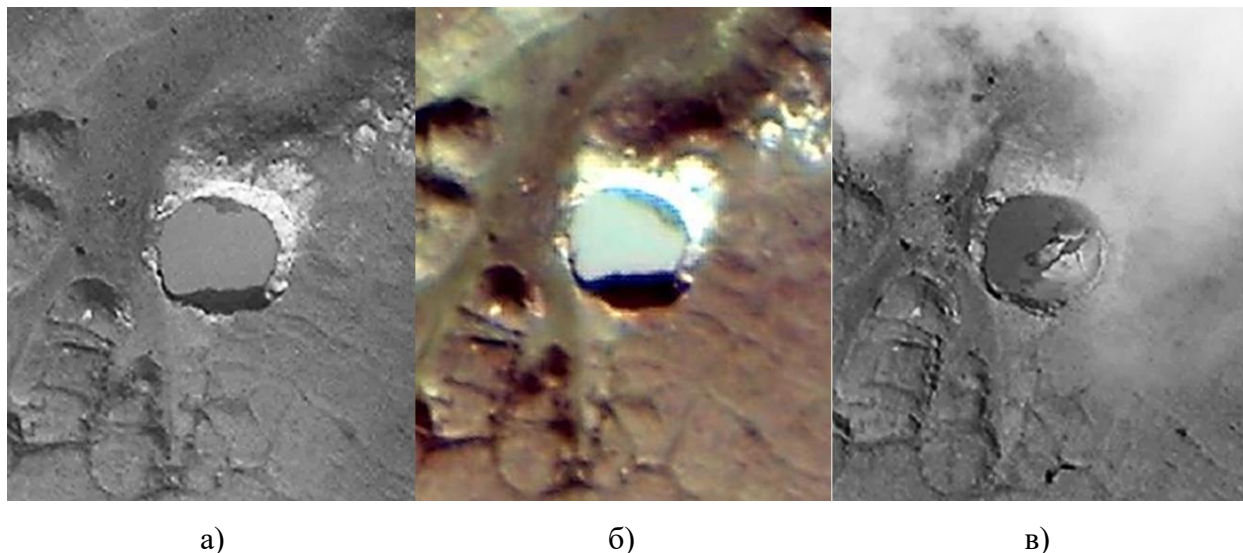


Рис. 5. Космоснимки объекта С3: WV-1 28.08.2015 (а), «Ресурс-П2» 31.08.2015 (б) и WV-1 16.07.2017 (в)

При анализе зимних космоснимков высокого разрешения, из которых предварительно было составлено мозаичное фото-полотно на весь полуостров Ямал, нами выявлено около 7 тысяч бугров, которые представляют интерес для дальнейших исследований с целью анализа их потенциальной газовзрывоопасности. Кроме того, по данным аэрокосмических наблюдений (вертолетный облет местности и космоснимки) обнаружено более 300 озер, на дне которых наблюдаются сотни и даже тысячи кратеров выброса газа [1-4, 8]. Все это свидетельствует о широкомасштабных процессах дегазации Земли в Арктике.

По данным ДЗЗ нам удалось доказать продолжающуюся эмиссию газа (в отдельных случаях и жидких УВ) в 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 месторождении их эмиссия продолжается более 30 лет [2, 4].

Очевидно, что заниматься единовременным 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, необходим мониторинг всех обнаруженных объектов активной дегазации недр и выявление закономерностей их размещения.

Заключение

Современные высокочастотные 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 и наличие характерных неоднородностей ледового покрова. Наличие озер с постоянными признаками притока газа, фиксируемое результатами сравнения разновременной съемки, может служить дополнительным индикационным признаком эндогенной активности в отдельных районах.

В целом, выявленные признаки с высокой степенью достоверности могут использоваться для детального картирования озер (в том числе кратерных) с видимыми газопроявлениями, а современные средства получения и обработки данных ДЗЗ позволяют масштабировать разрабатываемую технологию вплоть до границ распространения ММП.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. С. 4–15.
2. Богоявленский В.И., Перекалин С.О., Бойчук В.М., Богоявленский В.И., Каргина Т.Н. Катастрофа на Кумжинском газоконденсатном месторождении: причины, результаты, пути устранения последствий. // Арктика: экология и экономика, 2017. №1. С.32–46.
3. Богоявленский В.И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике. // Арктика: экология и экономика. 2018. №1 (29). С.48–55.

4. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В.* Природные и техногенные угрозы при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов в Арктике // Минеральные ресурсы, 2018, №2, с.60–70.
5. *Буданцева Н.А.* Газопроявления в мерзлых породах // Криосфера нефтегазокоденсатных месторождений полуострова Ямал. Том 1. Криосфера Харасавейского газоконденсатного месторождения. Изд-во: Недра, Тюмень–С.–Петербург, 2006. – С. 235–248.
6. *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.
7. *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.
8. *Сизов О.С.* Дистанционный анализ последствий поверхностных газопоявлений на севере Западной Сибири // Геоматика, 2015. № 1. С. 53–68.
9. *Якушев В.С.* Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М., ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.
10. *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. 419–426 pp.
11. *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.