

О.С. Сизов (компания «Совзонд»)

В 2005 г. окончил Алтайский государственный университет по специальности «эколог-природопользователь». В настоящее время — старший инженер направления тематической обработки данных ДЗЗ компании «Совзонд». С мая 2012 г. (по совместительству) — научный сотрудник Института криосферы Земли СО РАН. Кандидат географических наук.

Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные в последние 20 лет исследования [1–5] показали, что многолетнемерзлые породы (ММП) на севере Западной Сибири являются природным резервуаром, вмещающим большое количество углеводородных газов (УВГ), в том числе и метана. Так, в надсеноманских отложениях Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения повсеместно наблюдаются газопроявления различной интенсивности и продолжительности. При испытании мерзлотно-параметрических скважин в течение первых часов отработки газонасыщенных песчаных горизонтов первоначальные дебиты УВГ колебались в пределах 50–14 000 куб. м/сут., затем снижались до 3000 куб. м/сут. и менее в зависимости от толщины и размера песчаных пластов. По составу газ на 99% состоял из метана с незначительной примесью азота, диоксида углерода и ТУ (этан, пропан, бутан) [6].

Установлено [6, 7], что в ММП газы могут находиться в сорбированном, водорастворенном и свободном состояниях, а также в виде газогидратов. Этому способствует

строение криогенной толщи, которая, по сути, представляет собой многослойную систему, состоящую из мерзлых (с наличием льда), морозных (без льдистых включений) и охлажденных (водонасыщенных при отрицательных температурах) пород. Эта система обладает различными емкостными и фильтрационными свойствами: в ней есть горизонты и линзы с хорошими коллекторскими свойствами и слабопроницаемые экранирующие горизонты. Поэтому газы могут либо частично мигрировать в коллекторские горизонты ММП и преобразовываться там в твердую газогидратную форму, либо частично накапливаться в линзообразных телах и оставаться запечатанными как в газовой фазе, так и в виде гидратов.

Актуальность исследования газопроявлений можно определить как на глобальном, так и на региональном уровне.

В глобальном отношении изучение газосодержания мерзлых толщ является важным в связи с увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере и угрозой глобального потепления. При этом повышение среднегодовой температуры

пород в северных широтах вызывает увеличение глубины сезонного оттаивания и дополнительное выделение в атмосферу метана.

Региональная значимость исследований объясняется тем, что выбросы газа могут существенно осложнять строительство и эксплуатацию объектов инфраструктуры и сопровождаться аварийными ситуациями. В частности, одно из резонансных событий произошло на полуострове Ямал в начале 2014 года, когда внезапный выброс газа привел к образованию крупной характерной формы рельефа — воронки диаметром около 40 м [8].

В данной работе рассматриваются методические вопросы выявления следов поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири на основе разновременных космических снимков среднего и сверхвысокого пространственного разрешения.

МЕХАНИЗМЫ, ПРИЗНАКИ И ПОСЛЕДСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГАЗОПРЯВЛЕНИЙ

Методы дешифрирования поверхностных газопроявлений основаны на понимании механизма просачивания газа на поверхность. В процессе просачивания происходит изменение существующих природных объектов, либо образуются новые специфические объекты позволяющие достоверно идентифицировать газоактивные участки.

К основным свойствам пород, влияющим на процессы образования метана в тундровых сообществах, можно отнести уровень грунтовых вод, влажность грунтов и их температуру, тип грунта, растительность, а также присутствие органического углерода в грунтах. Поэтому наиболее благоприятные условия для продуцирования и выделения газа в атмосферу существуют на участках, сложенных грунтами, насыщенными органикой, с низким окислительно-восстановительным потенциалом. Как

правило, это гидроморфные участки: хасыреи, термокарстовые котловины, ложбины стока, подозерные и подрусовые талики и т. п., где окисление метана в сезонно-талом слое происходит медленнее, чем поступление его из оттаивающих мерзлых пород [9].

Например, на севере Якутии повышенное содержание метана (до 15 мг/кг) отмечается для аласных отложений Быковского полуострова [10]. Исследования на Бованенковском ГКМ показывают, что внутримерзлотные скопления газа и очаги его разгрузки приурочены к понижениям рельефа и водоемам, где мощность криолитозоны сокращается [5]. Наибольшее содержание метана характерно для краевых участков озерных котловин, хасыреев, подозерных таликов (до 22,5 мл/кг). Причем генезис газа этих скоплений может быть как биохимический, так и катагенетический, угольный или смешанный. Общая схема миграции и аккумуляции природного газа представлена на рис. 1.

Одним из основных индикационных признаков повышенного содержания метана в воде и донных отложениях озер является

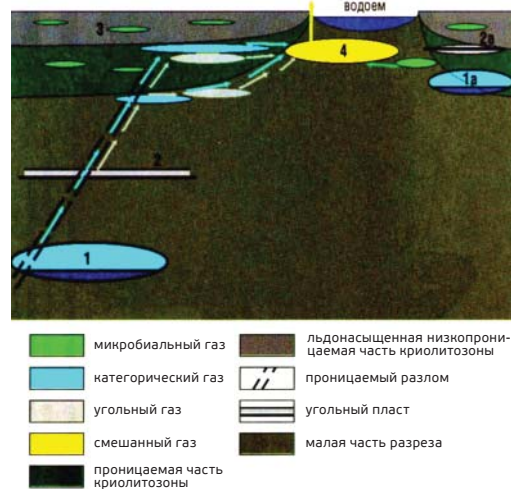


Рис. 1. Схема миграции и аккумуляции природного газа в криолитозоне

цвет воды в летний период. Так, в работах И. Л. Кузина и др. [11–14] неоднократно указывалось на различие в цвете озер на севере Западной Сибири в теплое время года при обработке данных аэрофотосъемки. Учеными был введен отдельный поисковый признак на нижележащие залежи — «голубые озера», цвет которых отличается от обычных, темных. Эта голубизна может объясняться просачиванием или прорывами глубинного газа сквозь подошвенные талики и изменением геохимической обстановки в водной толще.

Характерный пример озера с признаками дегазации представлен на рис. 2–4.

Стоит отметить, что выделение газа на дне озер может происходить как постепенно (просачивание), так и в виде кратковременных выбросов (фонтанирование). В первом случае на поверхности озера формируется шлейф растворенного газа, во втором — на дне озера образуется характерная воронка, представляющая собой конусовидное углубление, окруженное аккумулятивными валиками выброшенного грунта. Размеры воронок, обнаруженные И. Л. Кузиным [13] в ряде озер севера Западной Сибири, достигают 5–10 м и более. Внезапный выброс газа и образование воронки могут являться причиной быстрого спуска озера и образования хасырея.

Наряду с котловинами озер в некоторых случаях газ в гидратной форме может формироваться при промерзании замкнутых таликов в условиях низких отрицательных температур грунта (-10°C) и высокого давления (не менее 1,6 мПа) [10]. Подобные условия складываются, в частности, под ледяным ядром крупных бугров пучения (булгунняхх).

Булгунняххи встречаются в местах осушения озер, на террасах и междуречных равнинах, поймах и долинах рек. Большие скопления булгунняххов описаны и закартированы на Ямале (в том числе в пределах Бованенковского месторождения),



Рис. 2. Термонарстовое озеро с признаками дегазации (фото В. И. Бозоявленского)



Рис. 3. Озеро Сякото (п-ов Ямал) с признаками дегазации, снимок WorldView-2, 08.07.2010 г. ©DigitalGlobe



Рис. 4. Озеро Сякото (п-ов Ямал) с признаками дегазации, снимок Landsat 21.07.2013 г.: а) RGB-синтез; б) CIR-синтез

Тазовском полуострове, в бассейнах Надыма, Ямсовея, Евояхи, Табъяхи и Хадуттэ [15–18]. Высота бугров варьирует от 4–5 до 15–20 м, диаметр основания увеличивается от десятков до первых сотен метров (рис. 5).

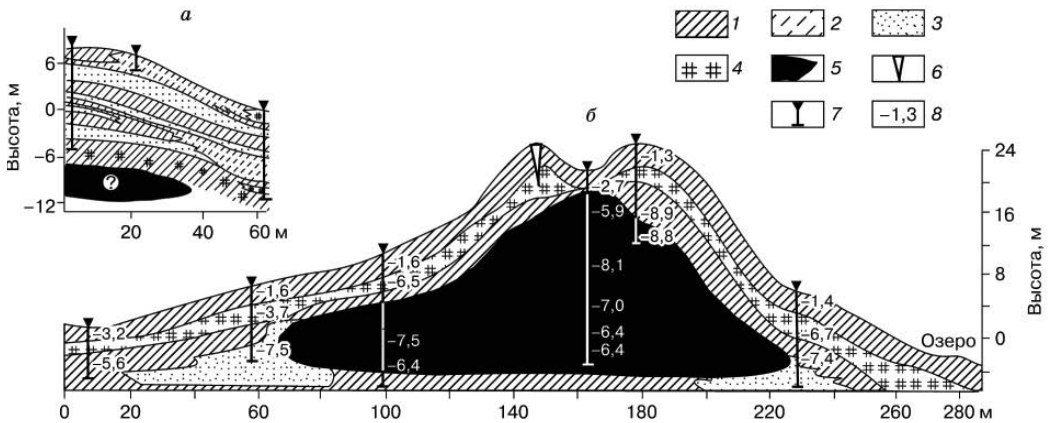


Рис. 5. Геокриологические разрезы булгунняхов на севере Западной Сибири: а) на пойме р. Ерьяха, Восточный Ямал [18]; б) на междуречье верховьев рек Юпаяха и Верхняя Пендома [19]. 1 — суслинок, 2 — супесь, 3 — песок, 4 — торф, 5 — лед ядра бугра, 6 — повторно-жильный лед, 7 — скважины, 8 — температурные замеры по скважинам

Скопление газа под большим давлением обнаружено в разрезе булгунняхов полевыми исследованиями на Быковском полуострове (дельта реки Лены) [10]. Также пульсирующий бугор пучения был обнаружен в дельте Маккензи, близ поселка Тактоятак. Здесь при бурении 15–25 июня 1976 г. после прохождения льдонасыщенных пород, с глубины 23 м была получена струя воды с большим количеством песка. Фонтанирование продолжалось в течение трех дней, при этом температура воды была почти постоянной (около 0,2 °С) [20].

После достижения критических значений давления в закрытой криогидрогеологической системе возможен взрыв центральной части булгунняхов и выброс значительного объема грунта с образованием воронки круглой формы [21–23]. По всей видимости, последствия подобного взрыва были обнаружены в июле 2014 г. на полуострове Ямал к югу от Бованенковского месторождения (рис. 6).

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГАЗОПРояВЛЕНИЙ

В данной работе для выявления поверхностных газопроявлений были выбраны три характерных участка на севере Западной Сибири (рис. 7):

- участок №1 — центральная часть п-ова Ямал, южнее Бованенковского месторождения;
- участок №2 — юго-западное побережье Енисейского залива, севернее Дерябинского месторождения;
- участок №3 — южная и центральная части Гыданского п-ова, район Гыданского и Солетского-Ханавейского месторождений.



Рис. 6. Воронка на полуострове Ямал. Вид с вертолета (фото пресс-службы Правительства ЯНАО)



Рис. 7. Обзорная карта расположения модельных участков

Участок №1 примечателен многообразием поверхностных газопроявлений, большим количеством котловин спущенных озер и озер с растворенным в воде газом, а также наличием следов одномоментных прорывов газа (газовых воронок).

Одна из таких воронок была обнаружена в июле 2014 г. в 30 км к югу от границы Бованенковского месторождения (рис. 6). Результаты полевых замеров показали, что глубина воронки по внешнему краю составляет около 37 м, по внутреннему — не больше 25 м, а глубина от края бруствера до уровня воды — 35 м и около 40–42 м до дна. Объем внутреннего пространства воронки до поверхности земли составляет 18–19 тыс. куб. м. Содержание метана, углекислого газа, сероводорода и кислорода, замеренное снаружи и на разных уровнях внутри воронки, не превышает фонового [8].

В архивах основных операторов космических аппаратов (КА), ведущих съемку со сверхвысоким пространственным разрешением, кондиционные снимки 2014 г., к сожалению, отсутствуют. Наиболее

актуальная съемка датируется июлем 2010 г. Поэтому индикационные признаки дешифрирования последствий газопроявления основаны на фотоматериалах аэровизуальных облетов. В то же время за 1998–2014 гг. доступен достаточно обширный архив снимков Landsat со средним разрешением (до 15 м/пикс.).

В целом анализ разновременных снимков позволяет выделить следующие интересные особенности:

- образовавшаяся воронка и скопление выброшенного грунта хорошо читаются на снимках Landsat-8 за 2014 г., несмотря на малые размеры (2–4 пикс.);
- воронка сформировалась на месте небольшого (не более 35 м в диаметре) бугра пучения (рис. 8). Бугор хорошо различим на зимних снимках Landsat по повышенному отражению и характерной форме тени (рис. 9б);
- разрушение булгуньяха и образование воронки произошли в период с 21 февраля по 3 апреля 2014 г. (рис. 9в), при этом в течение апреля фиксируется незначитель-



Рис. 8. Место образования воронки газового взрыва, бугор пучения обозначен красным цветом, снимок WorldView-2, 08.07.2010 г. ©DigitalGlobe

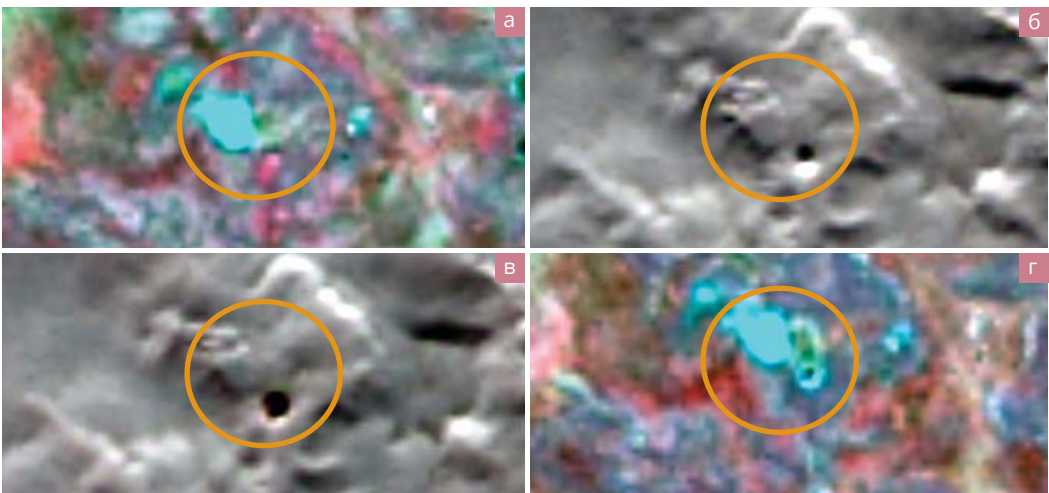


Рис. 9. Снимки Landsat района образования воронки на участке №1 (обозначен оранжевым цветом): а) 21.07.2013 г.; б) 21.02.2014 г.; в) 03.04.2014 г.; г) 22.07.2014 г.

ное увеличение внешнего диаметра объекта (на 15–20 м);

- воронка находится немного ниже по склону от небольшого (110x100 м) озера (на расстоянии 60–70 м). Озеро с северной и южной сторон имеет следы активной

термоабразии берегов и криогенного оползания склонов;

- по состоянию на июль 2013 г. озеро имело неестественный ярко-бирюзовый цвет (в инфракрасном синтезе), что может свидетельствовать о процессе выделения

газа из донных отложений. Изменение цвета воды произошло в период с 2006 по 2009 г. (рис. 10);

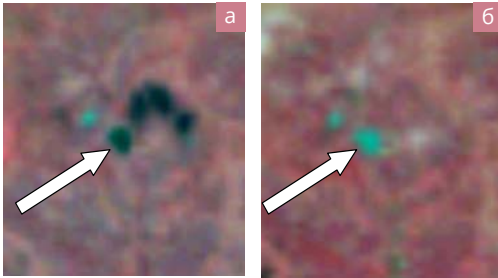


Рис. 10. Изменение цвета воды в озере вблизи места образования воронки (озеро показано стрелкой), снимки Landsat: а) 18.07.2006 г.; б) 17.07.2009 г.

- на расстоянии 75 и 650 м к западу и востоку от основного озера находятся два водоема также с водой неестественно светлого оттенка;

- склон в целом имеет следы крупного криогенного оползания в прошлом, также на склоне выделяются несколько небольших современных оползней и просадочных озер.

В пределах участка №1 к западу от озера Нюдимдато (1,2 км) обнаружено еще одно поверхностное газопроявление [24].

Выход газа произошел также на эрозионном склоне на месте небольшого (40–45 м в диаметре) бугра пучения, подпитываемого сезонно-талыми грунтовыми водами (рис. 11). По всей видимости, в данном случае газовыделение не сопровождалось мгновенным мощным выбросом, а происходило в ходе постепенного разрушения ледяного ядра и расширения термоэрозионного углубления устойчивым некоторое время потоком газа. О таком механизме говорит отсутствие явно выраженной воронки, полное заполнение водой образовавшейся полости (малая глубина) и отсутствие брусвера из выброшенной породы по периферии. Дополнительным признаком могут служить

следы протаивания, хорошо различимые по границе бугра пучения на снимке 2009 г. Это свидетельствует о проницаемости для восходящих потоков газа экраняющей толщи ММП.

Судя по разновременным данным Landsat (рис. 12), разрушение бугра пучения началось не позднее 2 мая 2013 г. На снимке



Рис. 11. Газопроявление вблизи оз. Нюдимдато: а) снимок QuickBird, 04.07.2009 г.; б) снимок WorldView-2, 21.07.2013 г. ©DigitalGlobe

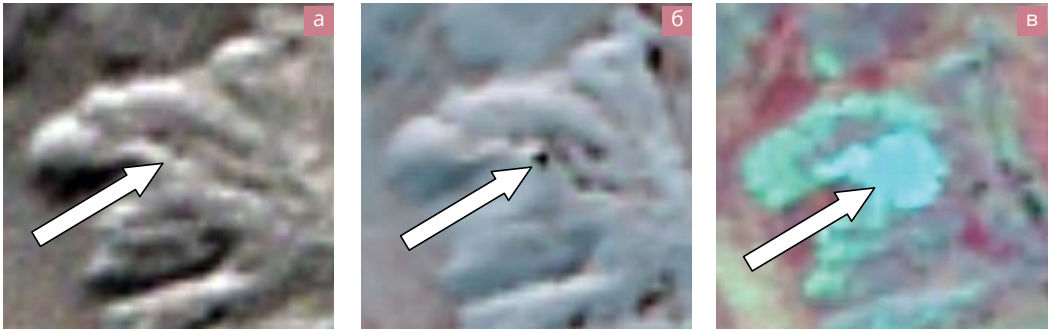


Рис. 12. Снимки Landsat участка газопроявления (показано стрелкой): а) 17.03.2000 г.; б) 02.05.2013 г.; в) 22.07.2014 г.

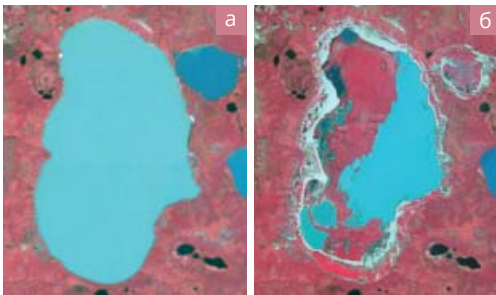


Рис. 13. Изменение уровня воды озера Халэвто, снимки Landsat: а) август 1999 г.; б) июль 2013 г.



Рис. 14. Воронка на левом берегу р. Монгоче (Таймыр), 12.04.2013 г. (фото С. В. Яптунэ)

за эту дату на месте булгуньяха уже фиксируется небольшое углубление, которое к 21 июля расширяется до размеров небольшого водоема (170x100 м). К лету 2014 г. размеры водоема незначительно сокращаются (120x80 м). Цвет воды — светло-бирюзовый (в инфракрасном синтезе), что не характерно для естественных термокарстовых водоемов.

Еще одна отличительная особенность данного участка — наличие большого количества «голубых озер», в том числе довольно крупных по площади (Харангангото, Сидя-Надоварто, Сякото и др.), и котловин спущенных озер (Томбойто, Итяторавэйто, Нюдимдато и др.). По берегам водоемов нередко встречаются следы криогенного оползания и термоабразии. Примечательно,

что с 1999 по 2013 г. происходит частичный спуск самого крупного «голубого озера» — Халэвто (рис. 13). Имея в 1999 г. размеры 5,2x2,8 км, к 2013 г. в результате снижения уровня воды озеро распадается на несколько водоемов, размеры самого большого из которых 3,2x1,4 км.

Участок №2, расположенный на юго-западном побережье Енисейского залива, имеет сходные черты с участком №1 — здесь также обнаружена воронка газового выброса, встречаются озера со следами газопроявлений и участки периодического выхода газа на эрозионных склонах.

Воронка была обнаружена 12 апреля 2013 г. оленеводом Таймырского района С. В. Яптунэ (рис. 14). По описаниям

она находится на левом берегу реки Монгоче, в 10–15 км от устья, в 110 км по прямой от поселка Носок [25]. На момент полевого обследования (лето 2014 г.) экспедицией В. А. Епифанова (Новосибирск) диаметр котлована составлял примерно 70 м (рис. 15), глубина – от 12 до 18 м [25]. Воронка расположена вблизи небольшого озера. Его глубина составляет не более 1,5 м в центральной части и около 5 м у берега, обращенного к воронке. Озеро и котлован разделяются валом — перемычкой из оттаивающих и осыпающихся пород. Данных о содержании метана в районе воронки нет.



Рис. 15. Воронка на левом берегу р. Монгоче (Таймыр), лето 2014 г. (фото В. А. Епифанова)

Дистанционный анализ основан на архиве данных Landsat 1997–2015 гг. и снимке QuickBird от 19.07.2013 г. (рис. 16, 17).

Можно выделить следующие особенности:

- выброс газа произошел не дальше 10 м от берега небольшого озера в период с 30 июня 2012 г. по 12 апреля 2013 г. Судя по внешнему виду обломков (отсутствие следов термического разрушения), выброс произошел в период отрицательных температур;
- воронка имеет правильную круглую форму, по периферии хорошо читается вал выброшенной породы светлого цвета,

к востоку выделяется шлейф мелких обломков, дно заполнено водой (рис. 17);

- размеры воронки по состоянию на июль 2013 г.: 35 м по внешней границе и 20 м — по внутренней;
- на месте воронки по архивным снимкам явно выделяется бугор пучения диаметром 20–25 м. На противоположном берегу озера на фотографии (рис. 15) и снимке (рис. 16а) заметен как минимум еще один бугор пучения со сходными параметрами;
- цвет воды в озере после образования воронки изменился с темно-синего на светло-синий (рис. 16в);
- одновременно с образованием воронки на поверхности озера в апреле 2013 г. фиксируется небольшой (до 50 м) талый участок со следами выброса воды или донных отложений в восточном направлении (рис. 16б);

• к концу февраля 2015 г. воронка хорошо выделяется на снимке Landsat, наблюдается ее незначительное расширение к северу, перемычка с озером сохраняется (рис. 16г). Можно согласиться с предположением В. А. Епифанова [25], что со временем грунтовая перемычка разрушится и полость воронки будет заполнена водой. В результате образуется озеро сложной конфигурации, что может являться косвенным признаком газопроявлений в других местах.

В пределах данного участка встречается большое количество небольших безымянных озер с признаками газопроявлений. По берегам таких озер зачастую наблюдается активное развитие эрозионных процессов. Хасыреи менее распространены и тяготеют к прибрежным районам Енисейского залива.

Участок №3, охватывающий центральную и южную части Гыданского п-ова, по видам поверхностных газопроявлений аналогичен первым двум участкам. Здесь неоднократно обнаруживались воронки газовых выбросов, широко распространены «голубые озера»

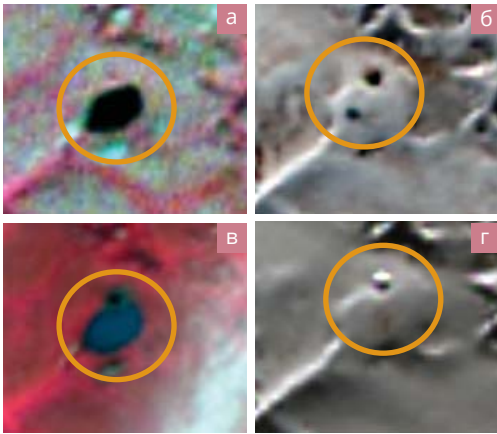


Рис. 16. Снимки Landsat района образования воронки на участке №2 (обозначен оранжевым цветом): а) 12.08.2001 г.; б) 24.04.2013 г.; в) 27.07.2013 г.; з) 20.02.2014 г.

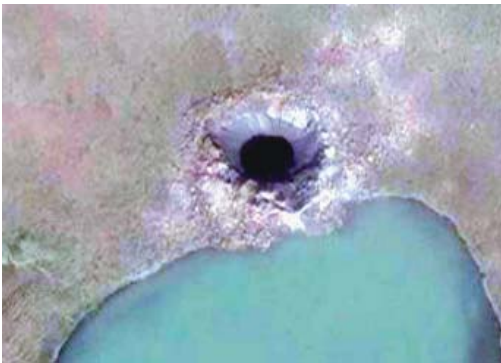


Рис. 17. Воронка газового выброса на участке №2, снимок QuickBird, 19.07.2013 г. ©DigitalGlobe

и котловины спущенных озер со следами газовых выбросов.

Один из примеров внезапных прорывов — обнаруженная оленеводами 27 сентября 2013 г. воронка, расположенная в 90 км к северо-западу от поселка Антипаюта [26]. Морфологически она сходна с подобными объектами, описанными выше: правильная округлая форма, вал выброшенного грунта по периферии, отвесные стены (рис. 18). Отличия заключаются в меньших размерах



Рис. 18. Воронка газового выброса на участке №3 (фото М. П. Лапсуй)



Рис. 19. Предполагаемые воронки на участке №2 (показаны стрелками), снимок WorldView-2, 19.06.2012 г. ©DigitalGlobe

(диаметр 15 м) и отсутствии близлежащего озера — выброс произошел в верховьях термоэрозионной балки.

Малые размеры объекта (1 пикс. снимка Landsat) и отсутствие кондиционной съемки сверхвысокого разрешения не позволяют установить период образования и определить, был ли на месте выброса бугор пучения. Тем не менее в ходе детального изучения космических снимков в пределах участка обнаружено несколько характерных объектов, которые расположены вблизи небольшого (340x370 м) озера со следами газопроявлений и активно разрушающимися берегами (рис. 19). Предполагаемые

воронки имеют диаметр около 10 м (каждая) и полностью заполнены водой.

В ходе дистанционного изучения участка внимание привлекла котловина спущенного двойного озера на левом берегу реки Юрибей в 4 км к югу от озера Меркуто. На снимке высокого разрешения в центре озера (рис. 20) явно выделяется объект, напоминающий воронку газового выброса, диаметром 45 м. Вокруг воронки хорошо различимы валики выброшенной породы. Превышение высоты образовавшихся валиков над дном котловины подтверждает зимний снимок Landsat 2015 г. (за счет длинных теней возвышающихся объектов) (рис. 21в). Архивные данные (август

2001 г.) показывают, что, во-первых, озеро в это время было наполнено водой, а во-вторых, что в центре водоема существовала крупная воронка (рис. 21а). Выброс газа, видимо, происходил не одновременно, а постепенно в виде устойчивого восходящего потока. Протаивание донных отложений в результате теплового воздействия привело в итоге к полному опустошению озера к 2013 г. (рис. 21б). В пользу данной версии говорит также отсутствие явных следов спуска озера по причине возможного вытаивания ледяных жил в русле вытекающего из озера ручья (резкий эрозионный врез русла и конус выноса в нижележащем озере).

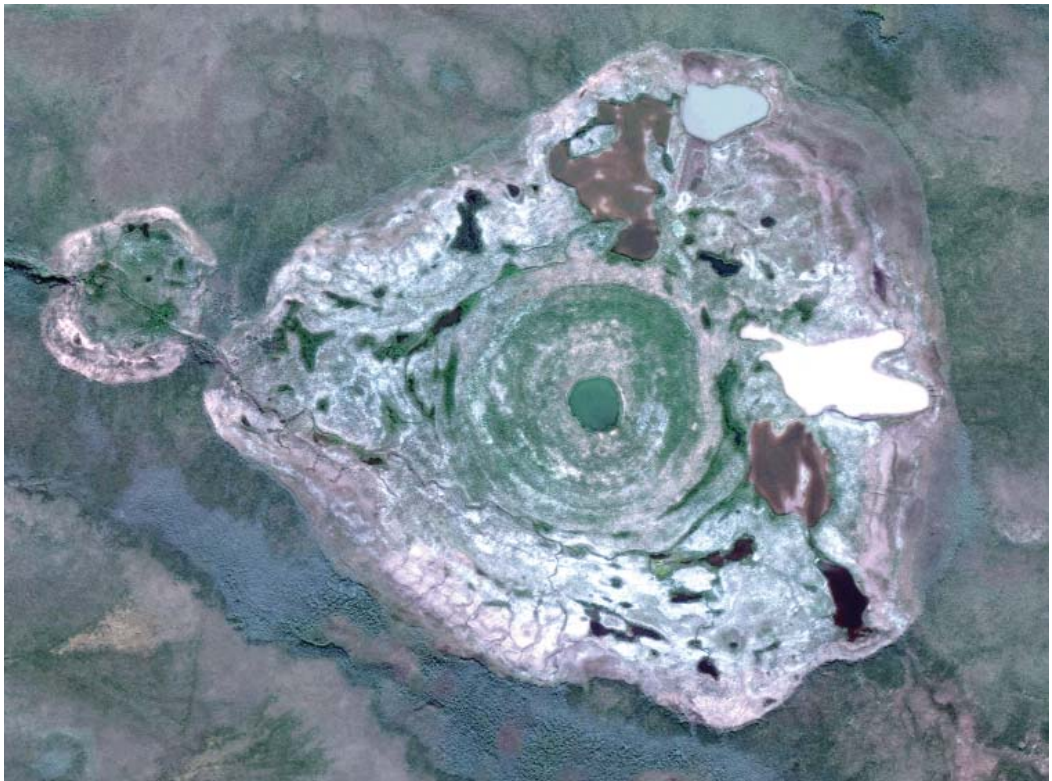


Рис. 20. Котловина спущенного озера с воронкой газового выброса в центре, снимок WorldView-2, 17.07.2013 г. ©DigitalGlobe



Рис. 21. Разновременные снимки Landsat котловины спущенного озера: а) 08.08.2001 г.; б) 25.07.2013 г.; в) 15.02.2015 г.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Лучше всего загазованность верхней части разреза (ВЧР) изучена в районе Бованенковского месторождения. Она связана с особенностями формирования толщи многолетней мерзлоты, наличием крупных сквозных таликов под озерными ваннами и их последующим осушением и промерзанием (образованием ловушек для УВГ) [27].

Натурные измерения потоков метана с поверхности различных ландшафтов, проведенные на Западном Ямале (с интервалом 0,5, 1 и 1,5 ч от начала измерений), показали, что наибольшие значения наблюдаются в термокарстовых понижениях, на поверхности террас и в ложбинах стока, составляя в среднем 8–50 мл/кв. м в час [2]. Абсолютный максимум эмиссии метана зафиксирован разовыми замерами в русловой части рек с постоянным стоком. К примеру, величина потока метана из подруслового участка реки Нгурияха достигала 1200 мл/кв. м в час [2].

Одним из важных источников круглогодичного поступления метана в атмосферу являются донные отложения озер. При этом наиболее интенсивна эмиссия в период, когда в более глубоких слоях осадков наблюдается термический годовой

максимум (с октября по январь). Самые интенсивные потоки метана зафиксированы в береговой зоне [1, 28]. Кроме того, под некоторыми глубокими озерами сохраняются сквозные талики, через которые также возможно поступление газа.

Как уже отмечалось выше, мигрирующий вверх по разрезу газ способен скапливаться под ледяным ядром бугра пучения. В этом случае промерзание сильно насыщенного в теплый период несквозного талика приводит к существенному возрастанию давления в нем. Увеличению давления в этот период может способствовать также постоянный приток газа из нижележащих горизонтов. Поскольку формирование бугра пучения завершается к марту/апрелю после прохождения пика промерзания, можно говорить о том, что именно в этот период при сочетании благоприятных условий наиболее высока вероятность внезапных выбросов воды, газа, льда и вышележащих пород на поверхность. Разгрузка давления и выброс материала происходят, видимо, в результате морозобойного растрескивания и нарушения целостности слоев выше ядра. Результаты определений периодов возникновения газовых выбросов по разновременным космическим снимкам, описанные выше, хорошо согласуются с данными полевых наблюдений за годовой

динамикой эмиссии метана и развитием бугров пучения.

Заслуживает внимания предположение В. И. Богоявленского [24] о сейсмических возмущениях, которые могут возникать в результате внезапных выбросов газа. Но для подтверждения этого необходима организация мониторинга слабой сейсмической активности в регионе, поскольку существующая сеть не охватывает в полной мере север Западной Сибири. В частности, норвежская сеть мониторинга слабых землетрясений NORSAR и Геофизическая служба (ГС) РАН за 2014 г. не зафиксировали ни одного сейсмического события на Ямале [29, 30].

По результатам исследований можно выделить три типа поверхностных газопроявлений:

1. Постепенные — происходят в течение длительного времени из донных отложений озер и русловой части рек с постоянным стоком.

2. Активные — возникают на эрозионных склонах с нарушенным верхним слоем, проявляются в виде образования небольших озер с активными оползневыми берегами. Активные газопроявления могут происходить также в русловой части рек и на дне озер, что в отдельных случаях может привести к их осушению и образованию хасыреев.

3. Внезапные — происходят в основном при критическом росте давления в ядре бугров пучения и выражаются в виде небольших конических воронок правильной формы с крутыми стенками и валом выброшенного наружу грунта по периферии.

Наиболее высока вероятность внезапных разрушений булгунняхов, располагающихся вблизи озер с признаками газопроявлений. К таким признакам относится неестественный светлый оттенок водной поверхности на снимках среднего разрешения («голубые

озера»), а также цвет и шлейфы замутненных потоков — видны на снимках высокого разрешения.

Практически для всех озер с признаками газопроявлений можно отметить активное разрушение берегов. Это может быть связано как с изменением температуры воды в озере в результате газоотделения (нередко на зимних снимках встречаются незамерзающие «окна»), так и с тепловым воздействием непосредственно газового потока, наиболее активного в прибрежной зоне.

Обнаружение следов газопроявлений на склонах, подверженных эрозии (солифлюкция, криогенное оползание), вызывает очевидное предположение, что эмиссия метана может оказывать влияние не только на озера, но и на любые участки склонов, где присутствуют первичные нарушения целостности ММП. Нарушения могут быть связаны с термокарстом, термоэрозией, антропогенным воздействием и т. п. В этом отношении эрозионные процессы в высоких широтах являются следствием взаимодействия как экзогенных (температура, влажность, глубина протаивания СТС и т. п.), так и экзогенных (тепловое воздействие эмитирующего метана) факторов.

С учетом активизации эрозионных процессов, в частности на п-ове Ямал, сложно переоценить необходимость и важность разработки и внедрения системы инструментального мониторинга поверхностной эмиссии УВГ.

Применимость дистанционных методов в вопросе мониторинга и прогнозирования газопроявлений оправдана по трем направлениям:

1. Выявление и мониторинг озер с признаками растворения газа в воде.

2. Выявление эрозионных участков склонов (криогенное оползание, небольшие водоемы с разрушающимися берегами).

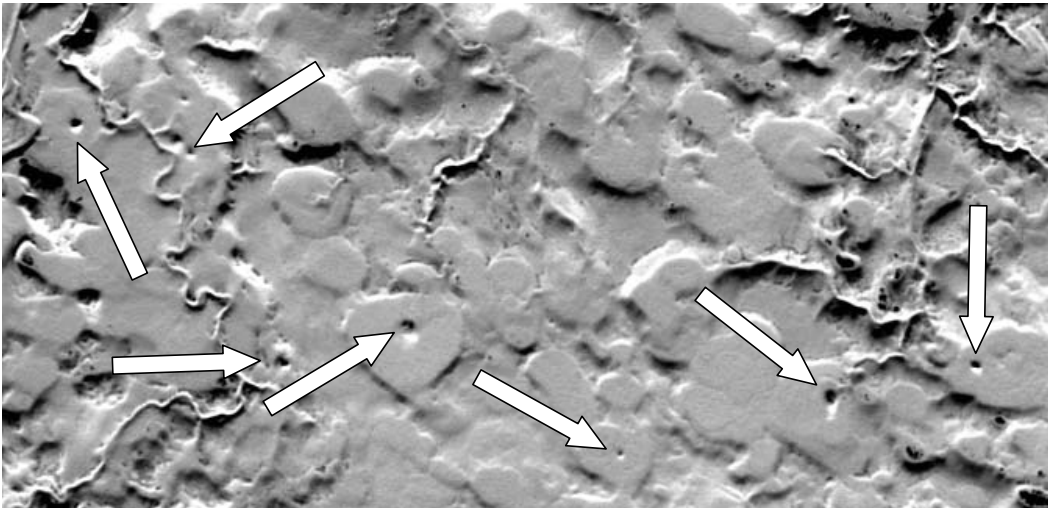


Рис. 22. Центральная часть Гыданского п-ова, снимок Landsat, 15.02.2015 г., бугры пучения обозначены стрелками

3. Инвентаризация и мониторинг крупных и средних бугров пучения, особенно вблизи «голубых озер».

Существуют различные методические подходы к организации системы дистанционного мониторинга. Для обзорных региональных исследований могут использоваться данные среднего разрешения, для детального изучения обстановок вблизи критически важных объектов рекомендуется использование снимков с высоким и сверхвысоким разрешением совместно с созданием производных продуктов (ЦМР, классификаций и т. д.). Так, для обзорной инвентаризации бугров пучения на больших территориях хорошо подходят безоблачные зимние снимки Landsat (рис. 22). В это время за счет малой высоты Солнца над горизонтом у объектов образуются длинные тени, что в отсутствие в тундре древесной растительности создает эффект теневой отмывки рельефа. На таком изображении хорошо проявляются границы котловин озер, овраги, балки, а также крупные и средние бугры пучения, неразличимые на летних

снимках. Кроме того, в зимний период заметны незамерзающие участки озер, что может служить дополнительным признаком температурных аномалий воды, возникающих в результате выделения газа из донных отложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поверхностные газопроявления являются распространенным явлением на севере Западной Сибири. Эмиссия газа (преимущественно метана) может происходить как постепенно, так и внезапно, что подтверждается многочисленными полевыми исследованиями [2, 3, 22, 23] и результатами данной работы. В каждом случае существуют характерные индикационные признаки, на основе которых мониторинг газопроявлений возможен с помощью дистанционных методов. К таким признакам можно отнести цвет воды в озерах, специфические формы рельефа (воронки, бугры пучения) и в отдельных случаях проявления термоэрозии берегов и склонов.

Необходимость мониторинга поверхностных газопроявлений обусловлена двумя факторами: глобальным потеплением и увеличением техногенной нагрузки. В результате действия этих факторов наблюдается нарушение теплового баланса ММП, что, в свою очередь, неизбежно приведет к увеличению интенсивности поступления газа на поверхность. Поэтому контроль эмиссии УВГ необходим для оценки вклада северных регионов в глобальные климатические изменения, а также для принятия своевременных мер по инженерной защите промышленной и жилой инфраструктуры.

Методические вопросы применимости дистанционных методов мониторинга поверхностных газопроявлений требуют дальнейшего изучения. Однако для получения более детальной информации и прогнозирования очевидна необходимость создания интегральной системы мониторинга газопроявлений, учитывающей, помимо космических снимков, также климатические показатели, сейсмонаблюдения, полевой анализ эмиссии метана в различных ландшафтных условиях, результаты инженерно-геологических изысканий и другие данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zimov S. A., Voropaev Y. V., Semiletov I. P., Davidov S. P., Prosiannikov S. F., Chapin F. S., Chapin M. C., Trumbore S., Tyler S. North Siberian lakes: a methane source fueled by Pleistocene carbon // *Science*. — 1997, Vol. 277. — P. 800–802.
2. Ривкин Ф. М. Метан в мерзлых породах и прогноз его выделения при потеплении климата и техногенных нарушениях поверхности // *Известия РАН. Серия географическая. Научный журнал*. - 1998, № 2. — С. 64–75.
3. Ривкин Ф. М. Газосодержание в верхних горизонтах мерзлых пород // *Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштерновского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал)*. — М.: ГЕОС, 2003. — С. 133–146.
4. Якушев В. С., Перлова Е. В., Чувилин Е. М., Кондаков В. В. Многолетнемерзлые по роды как коллектор газовых и газогидратных скоплений // *Газовая промышленность*. — 2003, № 3. — С. 36–40.
5. Якушев В. С. *Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне*. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.
6. Бондарев В. Л., Миротворский М. Ю., Зверева В. Б., Гудзенко В. Т., Облеков Г. И., Шайдуллин Р. М. Газогеохимическая характеристика надсеноманских отложений полуострова Ямал // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. — 2008, № 5. — С. 22–34.
7. Мельников П. И., Мельников П. В., Царев В. П. и др. О генерации углеводородов в толщах многолетнемерзлых пород // *Изв. АН СССР*. — 1989. — № 2.
8. Божоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 2 // *Бурение и нефть*. — 2014, №10. — С. 4–8.
9. Wagner D., Kobabe S., Pfeiffer E.M., Hubberten H.W. Microbial controls on methane fluxes from polygonal tundra of the Lena Delta // *Permafrost and periglacial processes*. — 2003, Vol. 14. — P. 173–185.
10. Kholodov A. L., Rivkina E. M., Snytin P. S., Borisov R. R. Frozen Quaternary deposits of Laptev Sea coast as a source of organic matter and biogenic gases // *Rep. on Polar Res.*, 2004, vol. 482, p. 117–124.
11. Кругликов Н. М., Кузин И. Л. Выходы глубинного газа на Уренгойском месторождении // *Структурная геоморфология и неотектоника Западной Сибири в связи с ее нефтегазоносностью: Тр. ин-та ЗапСибНИГНИ*. — Тюмень, 1973. — Вып. 73. — С. 96–106.
12. 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.
13. Кузин И. Л. О природе аномальных озер — показателей скоплений углеводородов в глыбах горизонтов осадочного чехла // Проблемы оценки новых зон нефтегазоаккумуляции в основных продуктивных толщах Западной Сибири. — СПб: ВНИГРИ, 1992. — С. 129–137.
14. Кузин И. Л. Масштабы эмиссии природных газов в Западной Сибири // Известия РГО. — 1999. — Т. 131. — Вып. 5. — С. 24–35.
15. Минаев А. Н. Крупные гидролакколиты в Западно-Сибирской низменности // Многолетнемерзлые горные породы различных районов СССР. — М., Изд-во АН СССР, 1963, — С. 120–125.
16. Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции. — Новосибирск, Наука, 1983. — 199 с.
17. Бердников Н. М. Бугры пучения в различных ландшафтах бассейна реки Надым // Криосфера Земли. 2012, Том XVI, №3, — С. 81–86.
18. Васильчук Ю. К., Буданцева Н. А., Васильчук А. К., Йошикава К., Подборный Е. Е., Чижова Ю. Н. Изотопный состав ледяного ядра позднеголоценового булгуньяха на месторождении Песцовое в долине реки Евояха на юге Тазовского полуострова // Криосфера Земли. — 2014. — Т. 18, № 4. — С. 47–58.
19. Анисимова Н. П., Карпов Е. Г. Химический состав инъекционного льда // Геокриологические и гидрогеологические исследования Якутии. — Якутск, Кн. изд-во, 1978. — С. 125–137.
20. Mackay J. R. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, Western Arctic coast, Canada: a long-term field study // *Geographie Physique et Quaternaire*, 1998, vol. 52, No. 3, p. 271–323.
21. Mackay J. R. Gas-domed mounds in permafrost, Kendall Island, N.W.T. // *Geographical Bulletin* 7 (2), 1965. — p.105–115.
22. Пехович А. И., Разговорова Е. Л. Физика взрывов бугров пучения // *Труды координационных совещаний по гидротехнике*. Вып. 101. Гидротехническое строительство в районах Крайнего Севера. Л.: Энергия, 1975. — С. 143–147
23. Геворкян С. Г., Корейша М. М. Взрывы бугров пучения // *Материалы гляциологических исследований*. — 1993, Вып. 77. — С. 120–130
24. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 1 // *Бурение и нефть*. 2014. №9. — С. 13–18.
25. Аплеснева И. Когда земля просыпается // «Красноярский рабочий». – 18 сентября 2014 г. – [Электронный ресурс] Режим доступа http://www.krasrab.com/archive/2014/09/18/34/view_article (свободный)
26. Кашубара И. Ямальские аномалии: или откуда в тундре черные дыры? // «Советское Заполярье» — №13 (8493) от 19.02.2015 — [Электронный ресурс] режим доступа <http://www.sov-zap.ru/?module=actual&action=view&id=2052> (свободный).
27. Галактионов Б. В., Ханнанов З. Д., Аверина Г. Ф. Уточнение геолого-промыслового строения Бованенковского месторождения в связи с подготовкой корректив к проекту разработки «Дать анализ результатов аварийного фонтанирования скв. 118 Бованенковского месторождения»: Отчет по договору 210-89.90. — Тюмень, 1989.
28. Семилетов И. П., Зимов С. А., Воропаев Ю. В., Давыдов С. П., Барков Н. А., Гусев А. М., Липенков В. Я. Атмосферный метан в прошлом и настоящем // *Доклады Академии Наук*. — 1994, т. 339. № 2. — С. 253–256.
29. NORSAR Reviewed Regional Seismic Bulletin - [Электронный ресурс] <http://www.norsardata.no/NDC/bulletins/regional/>
30. Геофизическая служба РАН. Данные о последних 50 землетрясениях, зарегистрированных в ССД в регионе lon=68.4 lat=70 - [Электронный ресурс] http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/xy_cool.pl?yy=70&xx=68.4&num=50&rad=500.