

УДК 552.578.1(571.121)

Ямальский кратер как пример быстроразвивающегося криогенного процесса в условиях потепления климата в Арктике

Е.В. Перлова^{1*}, Е.С. Микляева¹, Е.В. Ткачёва¹, Ю.А. Ухова¹

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

* E-mail: E_Perlova@vniigaz.gazprom.ru

Ключевые слова:
криогенные процессы
месторождения
п-ова Ямал,
потепление климата,
ямальский кратер.

Тезисы. Освоение месторождений в Арктике происходит на фоне устойчивого потепления климата, что оказывает значительное влияние на температуру гидратонасыщенных многолетнемерзлых пород (ММП). Согласно выполненному прогнозу глубина изменения температурного режима ММП на период эксплуатации месторождений на п-ове Ямал составит до 110 м и захватит самые льдистые горизонты и интервал регионально распространенного горизонта реликтовых газовых гидратов.

Последствия реакции криолитозоны на потепление климата наблюдаются уже сегодня: в 2014 г. в 39 км от Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения и в 4 км от магистрального газопровода Бованенково – Ухта впервые зафиксировано опасное криогенное явление – ямальский кратер, представляющий собой шахту глубиной 33 м и диаметром около 40 м со следами интенсивного выброса пород и льда. Исследования показывают, что кратер – проявление аномальной деградации бугров пучения, которая, по-видимому, связана с разложением реликтовых газовых гидратов в условиях повышения температуры ММП.

Существующие нормативные документы не дают достаточной методической основы для своевременного обнаружения и предотвращения быстроразвивающихся процессов – термоденудации по повторно-жильным и пластовым льдам, криогенных сплывов, ямальского кратера и др. Активизация этих процессов угрожает строящейся и уже существующей газодобывающей и транспортной инфраструктуре в районах освоения. Для повышения безопасности эксплуатации объектов добычи и транспорта газа ПАО «Газпром» в гидратонасыщенной криолитозоне необходимо разработать методы надежного прогноза, дезактивации и мониторинга опасных геокриологических процессов, в том числе аналогичных ямальскому кратеру.

Освоение месторождений в Арктике происходит на фоне потепления климата: в последние 30–40 лет наблюдалось устойчивое повышение среднегодовой температуры воздуха, несмотря на разнонаправленные тренды в отдельные годы. В целом для полярных регионов линейный рост среднегодовой температуры в период 1985–2015 гг. составил 0,66 °С за 10 лет (2013–2015 гг. были самыми теплыми на Северном полушарии Земли за историю регулярных метеорологических наблюдений [1]).

Анализ существующих климатических прогнозных моделей показывает, что в XXI столетии в Арктике ожидается дальнейшее потепление климата. Согласно выполненным авторами расчетам с использованием инерционно-трендовой модели, в Ямальском регионе до 2063 г. общий тренд повышения среднегодовой температуры воздуха будет составлять 0,4–0,7 °С за 10 лет. При этом общее повышение температуры воздуха к 2063 г. составит в 2–3,5 °С. Таким образом, в Ямальском регионе велика вероятность формирования в течение нескольких ближайших десятилетий таких климатических условий, которые не фиксировались за весь период инструментальных наблюдений.

Климатическое потепление оказывает значительное влияние на температуру гидратонасыщенных многолетнемерзлых пород (ММП) Ямальского региона. За прошедший период потепления (30–40 лет) среднегодовая температура ММП повысилась в некоторых областях полуострова на 1,5–2 °С.

С учетом тренда потепления климата выполнен прогноз изменения геотемпературных условий криолитозоны п-ова Ямал в зоне первоочередных объектов освоения (Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ), Харасавэйское газоконденсатное месторождение (ГКМ)) на период их эксплуатации (50 и более лет).

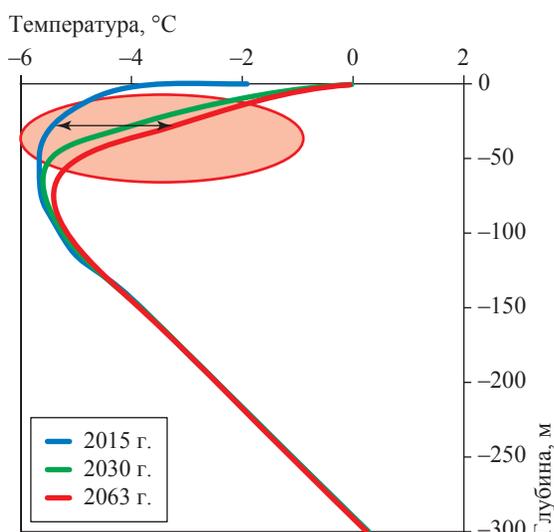


Рис. 1. Прогноз изменения температуры пород ММП Ямального региона (на примере Харасавэйского ГКМ) за период 2015–2065 гг. с учетом потепления климата в Арктике

Прогнозная модель учитывала фактический разрез многолетнемерзлой гидратонасыщенной толщи п-ова Ямал: суглинистый состав отложений, характерное распределение льдистости, засоленности, температуры начала замерзания пород, современный температурный режим пород на всю мощность криолитозоны.

Глубина проникновения теплой температурной волны составит от 30 до 110 м от поверхности, среднегодовая температура пород повысится на 0,7–3 °С (рис. 1) в зависимости от современных геотемпературных и поверхностных условий. Таким образом, изменение температурного режима захватит самые льдистые горизонты ММП и интервал регионально распространенного на п-ове Ямал горизонта реликтовых газовых гидратов. Учитывая

засоленность отложений, в наиболее теплых современных условиях ММП уже близки к зоне фазовых переходов. При повышении температуры пород большая часть разреза будет находиться в пластично-мерзлом, пограничном состоянии. Существенно увеличится глубина оттаивания (на 0,5 м и более).

Наибольшую опасность изменения геотемпературных условий представляют для поверхностей морских террас, сложенных высокольдистыми отложениями с пластовыми и повторно-жильными льдами.

Последствия реакции криолитозоны на потепление климата наблюдаются уже сегодня: это активизация опасных криогенных процессов, таких как термокарст, термоденудация, криогенные сплывы, пучение и др., и развитие новых, не описанных ранее, быстроразвивающихся процессов. На рис. 2 показано обнажение пластовых льдов в подмываемом обрыве III морской террасы на Бованенковском НГКМ, исследованное в 2014 г. и 2015 г. В 2014 г. в верхней части разреза вскрыты повторно-жильные льды, ниже – толща пластовых льдов и вмещающих пород сложного строения (см. рис. 2а). Мощность ледяных жил достигала 7 м, мощность верхней пачки пластовых льдов – ~2–3 м, вскрытая мощность нижней пачки пластовых льдов – 5 м. Скорость отступления разрушающегося мерзлого берега в 2014–2015 гг., по полученным данным, достигала 3 м в год (в некоторых местах до 5 м в год). Через год зафиксированы отступление края обрыва от кромки воды, полное вытаивание ледяных жил, общее понижение поверхности (см. рис. 2б).

В 2014 г. на п-ове Ямал впервые описано новое быстроразвивающееся опасное проявление криогенной активности – ямальский кратер, обнаруженный в 39 км от Бованенковского



Рис. 2. Обнажение № 2 пластового льда в подмываемом обрыве III морской террасы, Бованенковское НГКМ: а – август 2014 г.; б – август 2015 г.

НГКМ и в 4 км от магистрального газопровода Бованенково – Ухта (рис. 3). Непосредственно в районе обнаружения кратера техногенные нагрузки отсутствуют.

Группой специалистов ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН и др. при организационной поддержке ООО «Газпром добыча Надым» проведены полевые исследования в районе ямальского кратера непосредственно после его образования и обнаружения. Изучены геоморфологические условия, строение пород стенок и днища кратера, структура и состав грунтов, глубина сезонного оттаивания пород, геотермические условия и пр. В ходе работ установлено, что ямальский кратер представляет собой шахту с ярко выраженным бруствером высотой от 1 до 4 м и следами разброса грунта и льда по периметру на расстоянии 200 м. На момент исследования (сентябрь 2014 г.) глубина шахты составляла 33 м, диаметр – около 40 м.

Всю видимую вертикальную часть шахты слагают пластовые льды. Только в верхней части разреза (от дневной поверхности до глубины 2 м) залегают льдистые песчаные и глинистые грунты. В нижней части северо-восточного склона кратера, на границе уреза воды, зафиксирована крупная ниша вытаивания. Ниша расположена на глубине 16,5 м от дневной поверхности (рис. 4). Дно кратера было затоплено талой водой, глубина затопленной части составляла 9,6 м.

Анализ местоположения ямальского кратера по космическим снимкам территории на разные моменты времени выявил, что кратер образовался на месте крупного бугра пучения (булгуннях) [2]. Разброс грунта и льда и форма кратера свидетельствуют также о механизме его образования в результате формирования аномального давления жидкости или газа под ледяным ядром булгуннях: перекрывающие ледяные и ледогрунтовые отложения, субвертикальный канал, наличие бруствера и пр.

Анализ геоморфологической и геодинамической ситуации показывает, что ямальский кратер расположен в зоне пересечения разрывных нарушений и развития интенсивных криогенных процессов – активной солифлюкции и криогенных сплывов на бортах расположенного вблизи термокарстового озера (рис. 5, 6). Выявленные в районе кратера разрывные нарушения могли сыграть значительную роль как

в формировании бывшего бугра пучения, так и в обеспечении активного теплопереноса, потока жидкости и газа, что привело к его быстрому разрушению с выбросом пород. Возникает вопрос, что явилось причиной формирования столь крупной цилиндрической шахты и высокого давления в системе?

Вертикальный канал кратера образовался, по мнению авторов, не в результате взрыва (на что указывала бы форма «взрывной

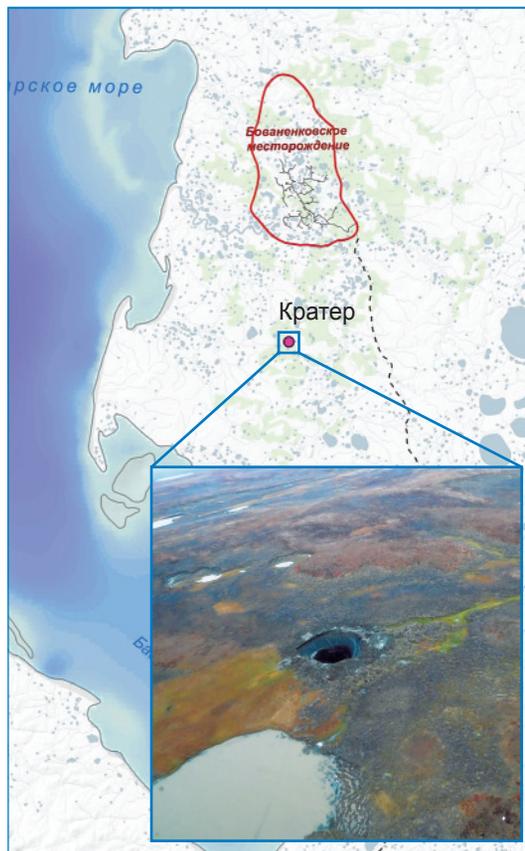


Рис. 3. Местоположение ямальского кратера



Рис. 4. Ямальский кратер (стенки шахты сложены льдом), 2014 г.



Рис. 5. Обнажение пластового льда в результате криогенного сплыва грунта берега озера



Рис. 6. Криогенный сплыв грунта подмываемого берега озера

камеры» внизу шахты), а является результатом размыва поверхностными и надмерзлотными водами подводного канала булгуньяха и развитием непровального термокарста с выносом пород по суффозионному принципу. Перекрытие сверху ледяным и ледогрунтовым слоем (ядром булгуньяха) обеспечивало относительно герметичную камеру, в которой накапливалось давление.

Возникновение критических давлений в нижней части ядра булгуньяха и в шахте связано, скорее всего, с разложением реликтовых газовых гидратов, выдержанный горизонт которых в разрезе ММП на севере п-ова Ямал фиксируется на глубине 60–80 м от поверхности [3]. Процесс разложения газогидратов сопровождается значительным и интенсивным выделением газа.

Вне зависимости от первоначальной причины образования вертикального канала под булгуньяхом, этот процесс обеспечил доступ вод к газогидратному горизонту и привел к быстрому разложению газогидратов, заполнению уже сформировавшейся шахты газом, нарушению целостности перекрывающих ледогрунтовых отложений и масштабному выбросу обломков пород и льда при достижении критического давления.

Образование воронки произошло в конце осени – начале зимы 2013 г., после аномально жаркого лета 2013 г. (температура воздуха в северных частях полуострова достигала 30–35 °С). Похолодание вызвало резкое промерзание грунтов сверху, увеличив давление внутри талика. Разложение газогидратов обеспечивало постоянное увеличение давления внутри

системы. Взрыв произошел или в результате достижения критического давления газа и воды в изолированной системе, или катализатором послужила подвижка по разрывному нарушению, вероятнее всего, по сбросо-сдвигу.

Стремительное (практически мгновенное) образование кратера подобных размеров, сопровождающееся мощными выбросами ледогрунтовых обломков на месте крупного бугра пучения – криогенного явления, широко распространенного на территориях деятельности ПАО «Газпром» на полуострове, ставит вопрос об обязательном проведении специализированных исследований, направленных на выявление и дезактивацию потенциально опасных образований вблизи объектов добычи и транспорта газа.

На рис. 7 показан бугор пучения, обнаруженный и описанный при полевых маршрутных исследованиях на севере Бованенковского НГКМ, ГП-3, недалеко от обнажения (см. рис. 2) и кустовой площадки. Размеры бугра пучения составляли на момент обследования 100 м в диаметре у основания и около 20 м в высоту. На поверхности бугра пучения зафиксированы признаки активного роста, возникшие из-за его распучивания и роста ледяного ядра.

Описанная в литературе деградация бугров пучения вследствие таяния ледяного ядра внутри булгуньяха проявляется в понижении поверхности, образовании крупных трещин и разрушении булгуньяха (рис. 8). В редких случаях фиксировались взрывы ледяного ядра без образования шахты крупных размеров.

Ямальский кратер – проявление аномальной деградации бугров пучения, по всем

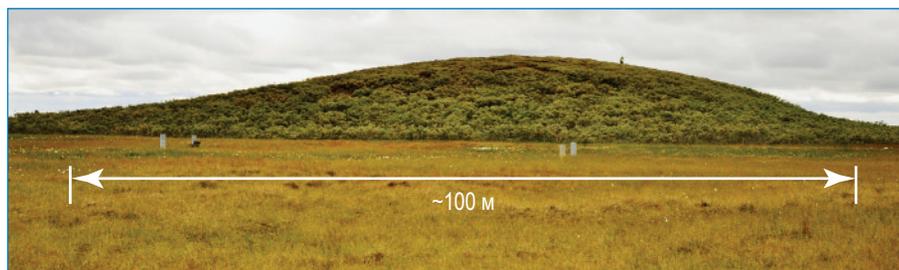


Рис. 7. Булгуннях № 1 в стадии роста ледяного ядра, Бованенковское НГКМ, ГП-3



Рис. 8. Булгуннях № 2 в стадии разрушения (оттаивания) ледяного ядра, Бованенковское НГКМ, ГП-3

признакам, связанной с современным потеплением климата. В результате дешифрирования космических снимков показано площадное распространение бугров пучения на Бованенковском НГКМ, которые являются потенциально опасными в условиях потепления климата и гидратонасыщенности криолитозоны. Бугры пучения расположены группами, всего выявлено четыре основных участка развития бугров пучения на территории месторождения. Необходимо отметить часто линейное расположение групп бугров пучения, что может указывать на их связь с разломными зонами. Направление линий расположения бугров пучения – с северо-запада на юго-восток. Вблизи скопления бугров пучения по результатам дешифрирования космических снимков фиксируются активные криогенные процессы склонового ряда: термоденудация по повторно-жильным льдам, криогенные сплывы по берегам озер, солифлюкция.

Активизация быстроразвивающихся криогенных процессов, связанная с климатическими изменениями и техногенными воздействиями, угрожает строящейся и уже существующей газодобывающей и транспортной

инфраструктуре в Ямальском регионе. Техногенное влияние на гидратонасыщенную криолитозону и активизацию криогенных процессов зависит от конструктивных решений, режимов эксплуатации сооружений, строения и температурного режима ММП, климатических изменений и находится в постоянной динамике.

Существующие нормативные документы не дают достаточной методической основы для оценки воздействия на объекты добычи и транспорта опасных быстроразвивающихся геокриологических процессов, таких как термоденудация по повторно-жильным и пластовым льдам, криогенные сплывы и пр., и своевременного предотвращения их активизации. Не отражены также вновь выявленные процессы, аналогичные ямальскому кратеру.

В связи с этим для повышения безопасности эксплуатации объектов добычи и транспорта газа ПАО «Газпром» в гидратонасыщенной криолитозоне Ямальского региона необходимо разработать методы надежного прогноза, дезактивации и мониторинга опасных геокриологических процессов, в том числе аналогичных ямальскому кратеру.

Список литературы

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год. – М.: Росгидромет, 2015. – 107 с. – <http://www.meteoinfo.ru/climate>.
2. Кожина Л.Ю. Опасные современные проявления криоактивности – основные результаты исследования Ямальского кратера / Л.Ю. Кожина, Е.С. Микляева, Е.В. Перлова и др. // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – Салехард, 2015. – № 1 (86). – С. 18–28.
3. Чувиллин Е.М. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения / Е.М. Чувиллин, Е.В. Перлова, Ю.Б. Баранов и др. – М.: ГЕОС, 2007. – 137 с.

Yamal crater as an example of a fast-moving cryogen process in conditions of climate warming in the Arctic Zone

Ye.V. Perlova^{1*}, Ye.S. Miklyayeva¹, Ye.V. Tkacheva¹, Yu.A. Ukhova¹

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Est. 15, Proyektiruemyy proezd # 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

* E-mail: E_Perlova@vniigaz.gazprom.ru

Abstract. The Arctic deposits are being developed in conditions of the stable climate warming, which noticeably affects the temperature of the hydrate-saturated permafrost soils. According to a made forecast, during a period of the Yamal Peninsular fields operation the temperature changes in permafrost will deepen down to 110 m and spread all over the most icy horizons including an interval of regional horizon of relict gas hydrates.

Aftereffects of the cryolitic zone's reaction to the warming of climate are being observed by now: in 2014, at a distance of 39 km from Bovanenkovo oil-gas-condensate field and of 4 km from a trunk Bovanenkovo-Ukhta gas pipeline for the first time a dangerous cryogenic phenomenon was registered. This phenomenon is called Yamal crater and represents a 33 m deep shaft of nearly 40 m in diameter having tracks of the intensive emission of rocks and ice. Explorations show that this crater is a manifestation of the abnormal degradation of frost blisters apparently due to decomposition of the relict gas hydrates in conditions of the permafrost temperature increase.

Legal technical regulations do not give a satisfactory methodical foundation for timely detection and prevention of such rapidly developing processes as thermal denudation along the repeated ice wedges and bedded ices, cryogenic slipouts, Yamal crater and others. Activation of these processes threatens the existent and future infrastructure of gas production and transportation within the regions being developed. To rise safety of the Gazprom PJSC gas production and transport facilities in the hydrate-saturated cryolitic zone, it is necessary to create methods for reliable forecasting, deactivating and monitoring of dangerous geocryolitic processes including the ones that are similar to Yamal crater.

Keywords: cryogenic processes at the Yamal peninsular field, warming of climate, Yamal crater.

References

1. ROSGIDROMET. *Report on climate peculiarities at the territory of Russian Federation in 2014* [Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2014 god] [online]. Moscow: Rosgidromet, 2015. Available from: <http://www.meteoinfo.ru/climate>. (Russ.)
2. KOZINA, L.Yu., Ye.S. MIKLYAYEVA, Ye.V. PERLOVA et al. Dangerous modern manifestations of cryoactivity – the main results of Yamal crater exploration [Opasnyye sovremennyye proyavleniya krioaktivnosti – osnovnyye rezultaty issledovaniya Yamalskogo kratera]. *Nauchnyy vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga*. Salekhard, 2015, no. 1(86), pp. 18–28. (Russ.)
3. CHUVILIN, Ye.M., Ye.V. PERLOVA, Yu.B. BARANOV et al. *Structure and behavior of rocks in the cryolitic zone at the southern part of Bovanenkovo gas-condensate field* [Stroyeniye i svoystva porod kriolitozony yuzhnoy chasti Bovanenkovskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya]. Moscow: Geos, 2007. (Russ.)