

УДК 552.578.1::551.462.32(98)

Газовые гидраты полуострова Ямал и прилегающего шельфа Карского моря как осложняющий фактор освоения региона

Е.В. Перлова^{1*}, Е.С. Микляева¹, С.А. Леонов¹, 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

Тезисы. Природные газогидраты – это перспективные нетрадиционные газовые ресурсы, аккумулирующие на Земле гигантское количество углеводородов. Через 20–30 лет в России как в северной стране с многочисленными глубоководными внешними и внутренними морями этот широко распространенный вид нетрадиционных газовых ресурсов может внести существенный вклад в развитие минерально-сырьевой базы газодобывающей отрасли. Сегодня, когда производители газа в России располагают значительными запасами традиционных газовых ресурсов, природные газогидраты (особенно в зоне распространения многолетнемерзлых пород) рассматриваются скорее как серьезный осложняющий фактор при освоении месторождений в северных широтах.

В настоящее время идет активное освоение месторождений Ямальского региона, будущего форпоста газодобычи в России. Исследования, выполненные на п-ове Ямал и прилегающем шельфе Карского моря, позволили авторам проанализировать особенности распространения гидратонасыщенных отложений в регионе, их виды и геолого-геохимические закономерности залегания, а также составить прогноз газоопасности разреза криолитозоны вследствие техногенных воздействий на многолетнемерзлый гидратонасыщенный массив при освоении месторождений Ямальского региона на фоне потепления климата в Арктике.

Ключевые слова: газогидраты, гидратонасыщенные многолетнемерзлые породы, криолитозона, техногенное воздействие, Ямальский регион.

Гидраты природных газов могут образовываться при определенных для каждого газа-гидратообразователя термобарических условиях внутри зоны стабильности газогидратов (ЗСГ). В настоящей работе речь пойдет о природных гидратах метана. Внутри ЗСГ газогидраты могут образовываться и аккумулироваться геологически длительное время, пока существуют необходимые для их образования геохимические условия. Именно к этой части разреза приурочены промышленно значимые скопления газогидратов – перспективных нетрадиционных газовых ресурсов будущего.

В 90-х годах прошлого века, после открытия эффекта самоконсервации газовых гидратов, экспериментально была показана возможность их сохранности при отрицательных температурах в неравновесных условиях, что подтвердило вероятное нахождение газовых гидратов в разрезе льдонасыщенных многолетнемерзлых пород (ММП) выше современной кровли ЗСГ.

При освоении территорий в различных районах Западной и Восточной Сибири неоднократно фиксировались газопроявления из верхних горизонтов криолитозоны (КЛЗ) – выше кровли ЗСГ, специфика которых указывала на газогидратную форму нахождения газа в разрезе [1–3]. Это так называемые реликтовые метастабильные газогидраты, которые были образованы ранее в палеозонах стабильности (при других геолого-тектонических и климатических условиях) и сохранились в разрезе вследствие эффекта самоконсервации. Реликтовые газогидраты не могут образовываться в современное время, но могут существовать в законсервированном состоянии при условии сохранения льда в разрезе в так называемой зоне метастабильности газовых гидратов (ЗМГ).

Метастабильные газогидраты, залегающие близко к поверхности, крайне чувствительны к температурным, барическим и химическим техногенным воздействиям. Кроме того, естественное потепление климата в арктических регионах за последние 10–20 лет снижает степень «переохлаждения» реликтовых газогидратов и, следовательно, увеличивает их газоопасность. Все это является одним из основных источников техногенных проблем при освоении месторождений в северных широтах, в том числе в Ямальском

регионе. Газогидраты могут разлагаться многие годы и даже десятилетия по мере продвижения тепловой волны от инженерного сооружения (например, от ствола эксплуатационной скважины) или при потеплении климата от поверхности вглубь мерзлого массива. Гидратонасыщенные горизонты имеют региональный масштаб распространения, что обусловлено генетической спецификой их формирования.

Специфика природных газовых гидратов на территории п-ова Ямал и прилегающего шельфа Карского моря

Формирование гидратонасыщенных отложений в Ямальском регионе как в прошлом, так и в современное время связано с эволюцией КЛЗ и, как следствие этого, с эволюцией ЗСГ. КЛЗ Ямала изучают с 1970-х гг., когда на полуострове началась разведка месторождений природного газа. В 1970–1990 гг. в ходе инженерно-геокриологических изысканий достаточно полно изучено строение верхних 20–50 м ММП основных районов освоения полуострова. С 1990-х гг. начался период детальных геокриологических исследований разреза КЛЗ (на полную мощность) для проектирования и обустройства площадок кустов газовых скважин Бованенковского нефтегазоконденсатного (НГКМ) и Харасавэйского газоконденсатного (ГКМ) месторождений. В связи с этим в 1990–2000-х гг. под эгидой ОАО «Газпром» (ныне – ПАО «Газпром») на территориях названных месторождений проведено специальное мерзлотно-параметрическое бурение глубиной 150–550 м (более 70 скважин на Бованенковском НГКМ и более 20 скважин на Харасавэйском ГКМ). Бурение сопровождалось полным отбором керна; комплексом исследований в скважинах – геофизическими исследованиями ММП, гидродинамическими и газодинамическими испытаниями внутримерзлотных флюидов (газа и рассолов), термометрией; комплексом лабораторных исследований состава и свойств мерзлых грунтов и внутримерзлотных флюидов [3].

Обобщение геокриологических исследований в регионе за последние 40–50 лет, сравнительный анализ различных тематических карт, а также собственные разработки позволили авторам составить карту распространения и мощностей КЛЗ и ММП п-ова Ямал и шельфа Карского моря в обзорном масштабе 1:2000000 (рис. 1). Карта содержит информацию о мощности КЛЗ (положении нулевой изотермы),

мощности ММП (содержащих лед) и охлажденных (отрицательно температурных не содержащих лед) пород, современной температуре и строению мерзлой толщи.

В пределах суши развиты ММП сплошного распространения. Разрез осложняется прослоями и линзами засоленных напорных вод – криопэггов, а также горизонтами реликтовых газовых гидратов [3]. Толща ММП практически повсеместно подстилается мощными охлажденными породами. К осевой, наиболее геоморфологически поднятой части полуострова приурочены максимальные мощности ММП и КЛЗ – до 500 м. По мере перехода к более низким геоморфологическим уровням мощность ММП в целом уменьшается, в нижней части разреза увеличивается мощность горизонта охлажденных пород. В пределах самых низких уровней – на поймах крупных рек, на лайдах и низких островах в Карском море – мощность ММП сокращается до 140 м. Среднегодовые температуры ММП на суше Ямала составляют от –5 до –8 °С на высоких геоморфологических уровнях и от –2 до –4,5 °С на низких уровнях.

На шельфе характеристики КЛЗ определяются батиметрическими условиями. Максимальными мощностями ММП (до 150 м) характеризуется мелководная часть шельфа до изобаты 10–20 м, окружающая п-ов Ямал. До изобаты 100–120 м могут существовать ММП островного распространения мощностью до 50 м; в глубоководной части шельфа (изобаты 200–400 м) – редкие острова ММП мощностью не более 25 м.

Возникновение современных ЗСГ и ЗМГ метана связано с современными термобарическими условиями разреза и геологической историей развития региона. На протяжении плейстоцена и голоцена на п-ове Ямал климатические условия были суровыми, обусловившими промерзание пород. Как показало компьютерное моделирование эволюции КЛЗ Ямальского региона за последние 130 тыс. лет, в термический оптимум голоцена мерзлые толщи не протаивали с поверхности. Моделирование позволило выявить территории, где в указанный период возникла палеозона стабильности гидратов (ПЗСГ). При сопоставлении полученного районирования ПЗСГ с палеотемпературными полями показано, что если в областях существования ПЗСГ (и образования в ней газогидратов, которые сейчас называют реликтовыми) оттаивания пород не происходило, газогидраты могли

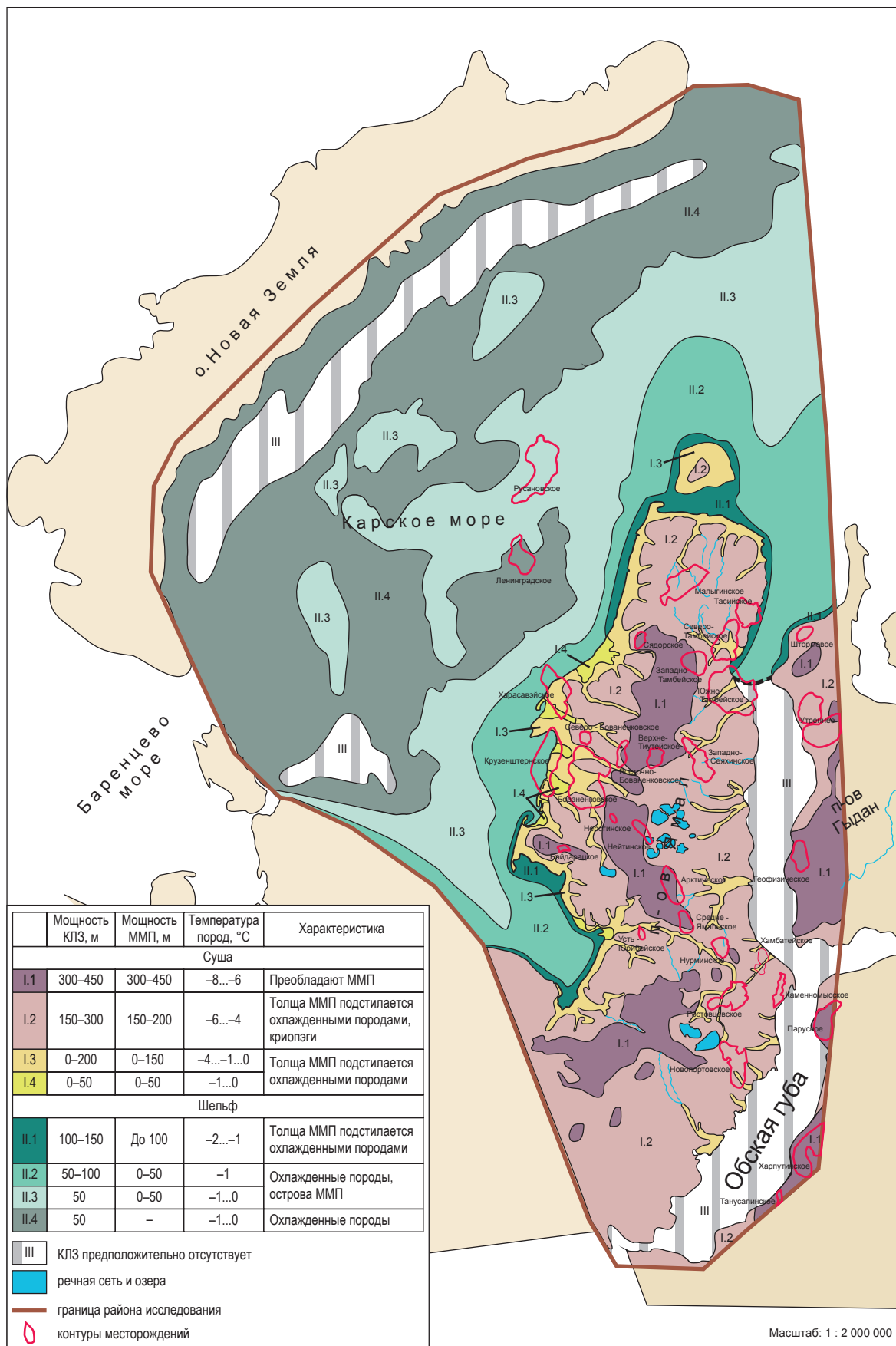


Рис. 1. Карта распространения и мощности КЛЗ и ММП на территории Ямальной нефтегазоносной области (НГО) – п-ов Ямал, шельф Карского моря

сохраниться в разрезе благодаря эффекту самоконсервации.

На основе результатов перечисленных исследований авторами составлена карта газоопасности КЛЗ Ямальской НГО обзорного масштаба 1:2000000 (рис. 2) и построен региональный криогидратный профиль Ямальской НГО по линии Русановское – Харасавэйское – Бованенковское – Среднеямальское – Арктическое – Ямбургское месторождения (рис. 3).

Повсеместное распространение ММП в верхней части разреза п-ова Ямал и существование островной мерзлоты на шельфе обуславливают широкое развитие ЗМГ, что в значительной мере определяет газоопасность гидратонасыщенного разреза при техногенном освоении территории на фоне естественно-климатических изменений.

На суше Ямальского региона современная ЗСГ формируется в районах развития наибольших мощностей КЛЗ и приурочена к осевой части полуострова. Близкие мощности ЗСГ характерны для высоких поверхностей западного побережья п-ова Гыдан, где мощность ММП достигает 450–500 м.

В пределах шельфа существование современной ЗСГ определяется глубиной водоема. В Ямальском регионе выделяются два участка распространения современной ЗСГ в субаквальных условиях – Восточно-Новоземельский желоб и локальный участок южнее о. Войгач. Мощность современной ЗСГ тут достигает 500 м (см. рис. 2, 3). Возможность существования ЗСГ метана здесь определяется также температурой морской воды и ее соленостью. Водные массы Карского моря сильно выхоложены и расслоены, большую часть их толщи составляют воды с температурой ниже $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Реликтовые газогидраты Ямальского региона как причина техногенных осложнений при освоении месторождений

Как показали проведенные исследования, на п-ове Ямал реликтовые (метастабильные) газогидраты в КЛЗ имеют практически повсеместное распространение. Многочисленные газопроявления при бурении инженерно-геологических, мерзлотно-параметрических, разведочных и эксплуатационных скважин показывают высокую газоопасность КЛЗ п-ова Ямал. На шельфе Карского моря опасность газовых выбросов при нарушении термобарического режима ММП также высока,

выбросы газа фиксировались при инженерно-геокриологическом бурении.

Риск возникновения неблагоприятных ситуаций, связанных с разложением пластовых газогидратов, особенно велик для реликтовых гидратов в метастабильном состоянии. Они крайне чувствительны к изменению термических параметров разреза под воздействием техногенных и естественно-климатических факторов, а также к химическим техногенным воздействиям (например, воздействию буровых растворов и пр.). Так, при проведении мерзлотно-параметрического бурения на Бованенковском и Харасавэйском месторождениях газопроявления фиксировались по всей их площади на глубинах от 10 до 210 м от поверхности. Более $\frac{2}{3}$ газопоявлений приурочены к выдержанному по площади горизонту в интервале глубин 60–120 м. В пределах этого горизонта дебиты гидратного газа имеют максимальные значения по отношению ко всей толще и достигают 10–15 тыс. м³/сут [3].

Помимо прямых методов (газогидратных включений в кернах ММП) на гидратную форму газа указывает динамика газопоявлений. Начальные дебиты, которые составляли тысячи метров кубических в сутки, через 24–48 ч резко падали на один-два порядка, газопоявления постепенно затухали по мере вымерзания высвободившейся гидратной влаги в отрицательно температурном поле окружающего околоскважинного пространства КЛЗ. Это значит, что на определенном расстоянии от скважины возникает вторичный эффект самоконсервации газогидратов, когда теплового импульса уже не достаточно для разложения газогидратов в этих условиях и изолирующая пленка льда образуется быстрее.

Наиболее масштабные начальные газовые выбросы с дебитами до 10–15 тыс. м³/сут при средних значениях порядка 800–1000 м³/сут характерны для гидратонасыщенных горизонтов, подстилаемых засоленными мерзлыми грунтами или охлажденными криопэгмами. Это связано с поступлением в образовавшееся после разложения газогидратов свободное поровое пространство соляных растворов, интенсифицирующих процесс диссоциации газогидратов. В целом увеличение концентрации солей ниже опресненных (по сравнению с фоновыми значениями) гидратонасыщенных интервалов – это типичная ситуация для ММП п-ова Ямал, которая объясняется спецификой

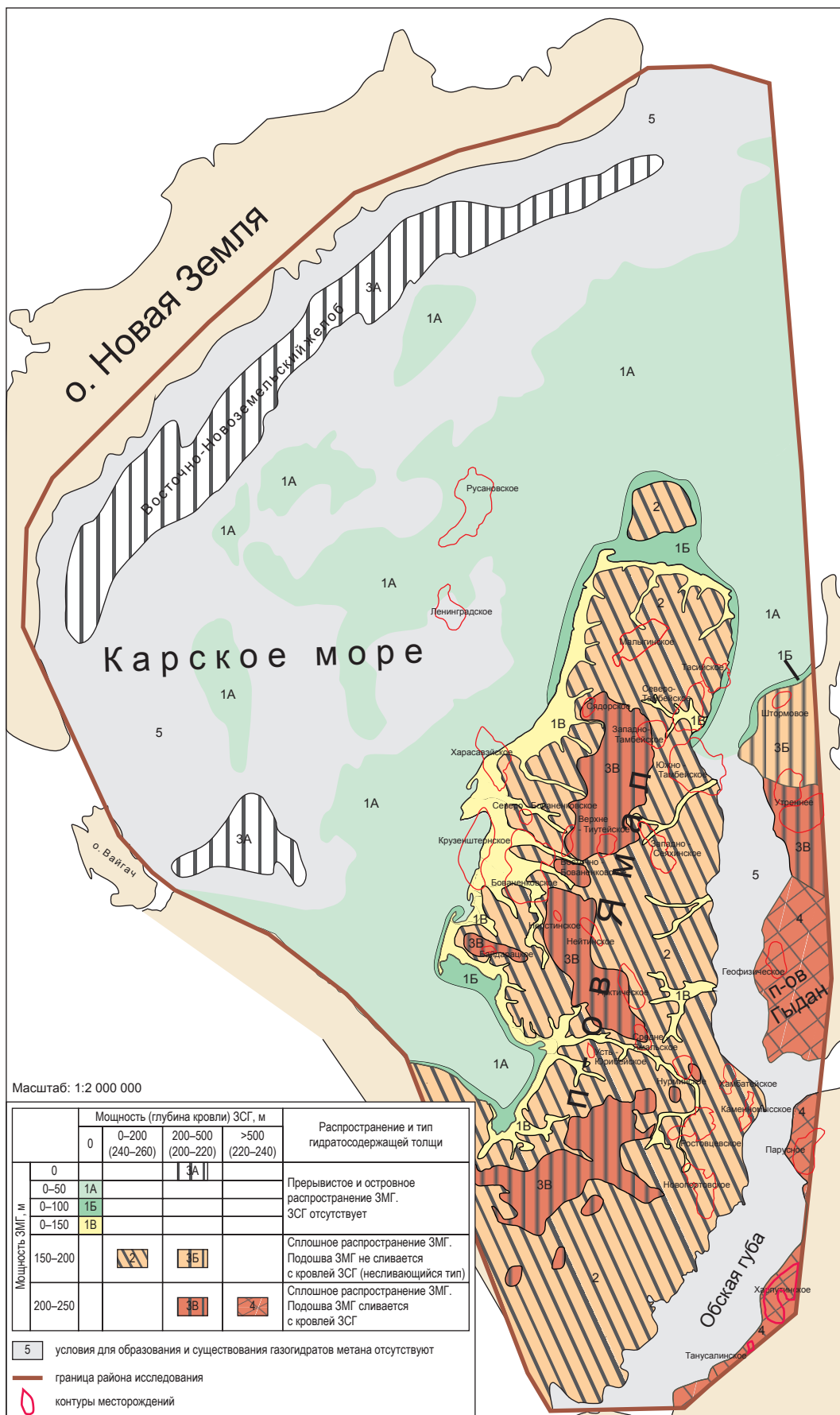


Рис. 2. Карта газоопасности Ямальной НГО

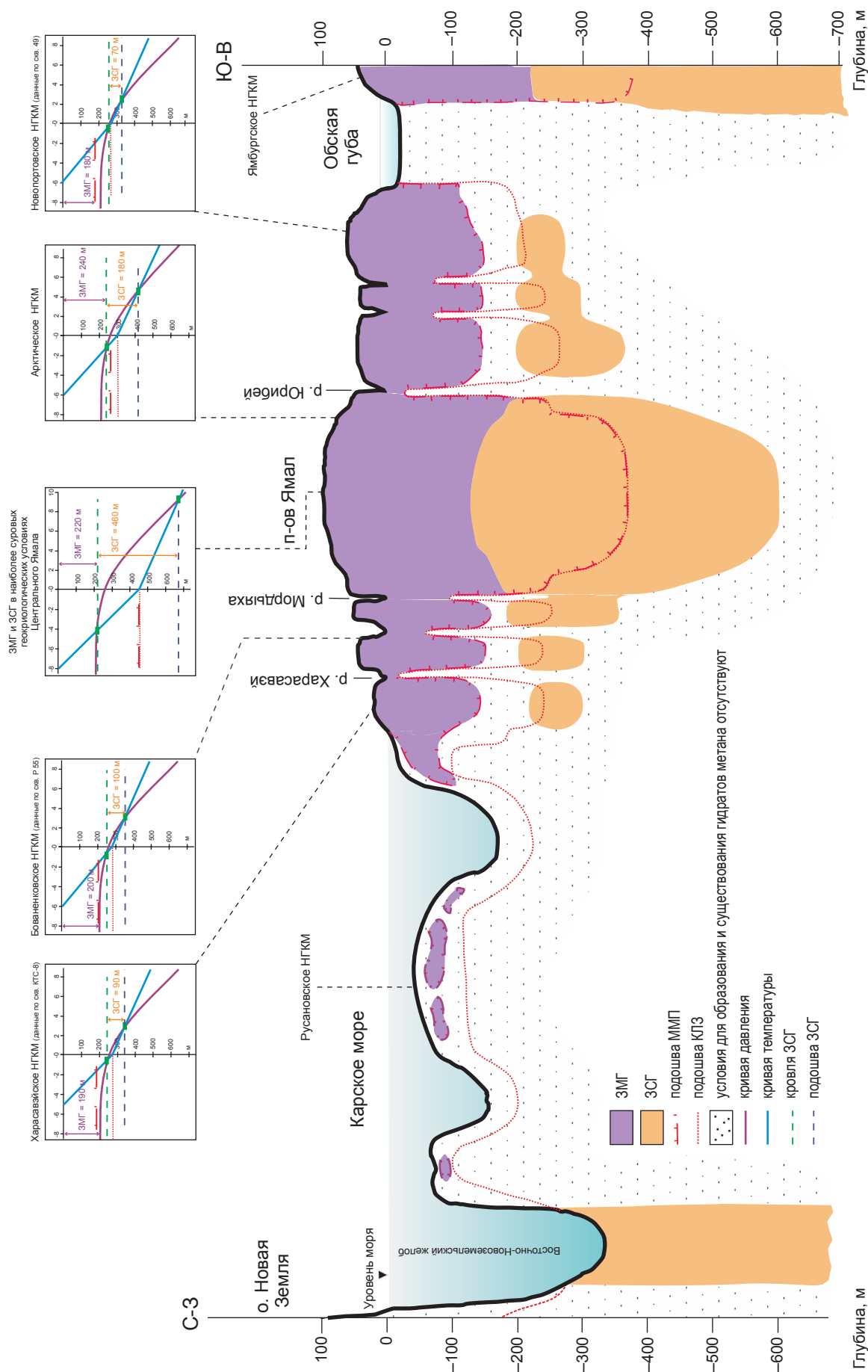


Рис. 3. Региональный криогидратный профиль Ямалского региона, направление С-3 – Ю-В (Русановское, Харасавэйское, Бованенковское, Среднеямальское, Арктическое, Ямбургское месторождения)

перераспределения солей и газов при многолетнем промерзании отложений [3].

В случае свободной формы газа газопоявления, как правило, менее интенсивны, поскольку перепад давлений невелик (речь идет о глубинах 250–300 м); микрозалежь газа выработывается с относительно постоянным дебитом (который естественным образом связан с глубиной залегания «газового кармана») в течение времени, прямо пропорционального размеру микрозалежи.

Регионально выдержанный интервал гидратонасыщенных отложений Ямальского региона находится выше современной термобарической ЗСГ; это метастабильные реликтовые газогидраты.

При техногенных воздействиях на толщу гидратонасыщенных ММП, особенно при бурении и эксплуатации скважин, формирование ореолов оттаивания сопровождается разложением реликтовых газовых гидратов и, как правило, интенсивными газопоявлениями. При этом высвобождаются большие количества пресной гидратной влаги в засоленном в целом разрезе, что приводит к изменению теплофизических свойств и фазового равновесия пород [4].

Газогидратосодержащие интервалы реагируют на начальный импульс изменения термобарических условий толщи при бурении интенсивными газовыми выбросами. Масштаб газопоявлений различен и зависит от гидратонасыщенности того или иного интервала, усиливается в случае близости засоленных горизонтов и особенно криопэгов.

Следует отметить, что процесс разложения газогидратов при бурении скважины может также резко интенсифицироваться при химическом воздействии агрессивных (особенно засоленных) буровых растворов, приводя к аварийным выбросам газа и бурового раствора.

Не менее опасны и более затратны с точки зрения ликвидации негативные процессы в гидратонасыщенных ММП во время эксплуатации скважины: постоянный поток теплого газа вызывает постепенное многолетнее оттаивание околоскважинных ММП и разложение пластовых газогидратов. Смежные грунты насыщаются газом, который мигрирует по проницаемым пластам и трещинам, образуя заколонные перетоки и грифоны в приустьевой зоне. При условии большой газонасыщенности разреза возможны фонтанирующие выбросы газа и его возгорание в процессе работы

скважины. В случае временной остановки работы или консервации скважины высвободившаяся при разложении гидратов пресная влага повышает опасность обратного промерзания пород (пучение пород может привести к нарушениям ствола скважины и другим негативным последствиям).

Таким образом, техногенное воздействие эксплуатационной скважины на гидратонасыщенный разрез в течение ее полного жизненного цикла может привести к нежелательному поступлению газа в межколонное и заколонное пространство, существенному ухудшению свойств насыщенного газом бурового раствора, газопоявлениям на устье скважины, сезонному образованию газовых грифонов в приустьевых зонах добывающей скважины и т.д. При поступлении большого объема газа возможно возникновение аварийных ситуаций: выбросов бурового раствора, газа, нередко с его возгоранием, заколонных перетоков газа между соседними скважинами в кусте и т.д. [4].

В заключение следует отметить, что освоение Ямальского региона происходит на фоне естественно-климатических изменений – устойчивого многолетнего потепления климата в Арктике. За 50–60-летний период эксплуатации месторождений температура гидратонасыщенных ММП может повыситься на 0,5–3 °С (в зависимости от геолого-геохимических особенностей и геоморфологического положения). Это может привести к резкой интенсификации перечисленных негативных процессов. Примером быстротечной (мгновенной) реакции гидратонасыщенной КЛЗ на климатические изменения служит образование так называемого «ямальского кратера» – криогенной шахты глубиной около 40 м и диаметром около 45 м – в 39 км к югу от Бованенковского НГКМ и в 4 км от магистрального газопровода Бованенково – Ухта.

Эффективный учет специфики строения гидратонасыщенной КЛЗ Ямальского региона при проектировании и эксплуатации объектов добычи и транспорта газа во многом будет определять устойчивость развития газодобывающей отрасли. Необходимо тщательно изучать динамично меняющуюся температурную среду на фоне потепления климата в Арктике и учитывать в проектных решениях возможность наступления других, отличных от современных, более опасных условий эксплуатации гидратонасыщенной КЛЗ через 30–50 лет после начала освоения региона.

Список литературы

1. Якушев В.С. Газовые гидраты в отложениях материков и островов / В.С. Якушев, Е.В. Перлова, Н.А. Махонина и др. // Российский химический журнал. – 2003. – Т. XLVII. – № 3. – С. 80–90.
2. Якушев В.С. Метастабильные (реликтовые) газогидраты – распространение, ресурсы, перспективы освоения / В.С. Якушев, Е.В. Перлова, Н.А. Махонина // Криосфера Земли. – 2005. – Т. IX. – № 1. – С. 68–72.
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.
4. Перлова Е.В. Взаимодействие эксплуатационных скважин с гидратонасыщенной криолитозонной на примере Ямальского региона / Е.В. Перлова, Е.С. Микляева, С.А. Леонов и др. // Газовая промышленность. – 2013. – Спецвыпуск № 696: Добыча УВ: геология, геофизика, разработка месторождений. – С. 105–108.

Gas hydrates within the Yamal Peninsular and adjoining Kara Sea continental shelf as a negative factor of the Yamal region exploration

Ye.V. Perlova^{*}, Ye.S. Miklyayeva¹, S.A. Leonov¹, 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. Natural gas hydrates are the promising alternative gas resources, which accumulate gigantic amount of hydrocarbons all over the Earth. In 20–30 years, in Russia, which is a northern country with many deep external and internal seas, this widespread type of uncommon gas resources could become a serious contribution to the mineral base of industrial gas production. Today, when Russian gas producers have rather big reserves of common gas resources, the gas hydrates (especially within a zone of permafrost formations) are rated mostly as a serious complicating factor for development of hydrocarbon fields at northern latitudes.

Nowadays, fields are being actively developed in the Yamal region, which is a future outpost of gas production in Russia. Scientific studies done at the Yamal Peninsular and the adjoining Kara Sea continental shelf let the authors analyze features of regional hydrate-saturated sediments: their locations, types and geological-geochemical patterns. Also the gas hazard coming from a cryolitic zone column due to the man-made impact to a permafrost hydrate-saturated body during development of Yamal region in conditions of warming in the Arctic is forecasted.

Keywords: gas hydrates, hydrate-saturated permafrost formations, cryolitic zone, man-caused influence, Yamal region.

References

1. YAKUSHEV, V.S., Ye.V. PERLOVA, N.A. MAKHONINA et al. Gas hydrates in the sediments at mainlands and islands [Gazovyye gidraty v otlozheniyakh materikov i ostrovov]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2003, vol. XLVII, no. 3, pp. 80–90. ISSN 1024-6215. (Russ.).
2. YAKUSHEV, V.S., Ye.V. PERLOVA and N.A. MAKHONINA. Metastable (relict) gas hydrates: expansion, resources, outlooks for exploration [Metastabilnyye (reliktovyye) gazogidraty – rasprostraneniye, resursy, perspektivy osvoyeniya]. *Kriosfera Zemli*. 2005, vol. IX, no. 1, pp. 68–72. ISSN 1560-7496. (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.).
4. PERLOVA, Ye.V., Ye.S. MIKLYAYEVA, S.A. LEONOV et al. Communication of production wells and hydrate-saturated cryolitic zone, on example of Yamal region [Vzaimodeystviye ekspluatatsionnykh skvazhin s gidratonasyshchennoy kriolitozonoy na primere Yamalskogo regiona]. *Gazovaya promyshlennost'*. 2013, spec. iss. no. 696: Production of hydrocarbons: geology, geophysics, field development [Dobycha UV: geologiya, geo fizika, razrabotka mestorozhdeniy], pp. 105–108. ISSN 0016-5581. (Russ.).