

## ГИДРАТЫ ГАЗА НА СУШЕ И ШЕЛЬФЕ АРКТИКИ И ИЗМЕНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ В КВАРТЕРЕ

*В.А. Друщиц, Т.А. Садчикова, Т.С. Сколотнева*

### Введение

Одним из отличительных признаков четвертичного периода стало формирование мощной криолитозоны - широкого распространения многолетнемерзлых пород, обладающих специфическими физическими и литологическими свойствами и образующих особые формы рельефа. С этим явлением тесно связана еще одна яркая черта квартера - образование гидратов газа в континентальных условиях. Известные и широко распространенные субаквальные гидраты газа образовывались и образуются в настоящее время в морях и океанах, в областях континентального склона, материкового подножия и глубоководья. В северных широтах проявления субаквальных газогидратов обнаруживаются на глубинах, начиная с 300 м, а в южных - с 600 м. Данная работа посвящена только гидратам газа, сформированным в криолитозоне в континентальных условиях арктического региона в позднем кайнозое. Проявления гидратов газа найдены во многих местах к востоку от Урала, начиная с глубины 2 м [*Якушев и др., 2003*]. Современные полярные шельфы, представляющие собой продолжение арктической суши, имеют криолитозону, которая наиболее активно формировалась в периоды его осушения в четвертичное время. Мощная толща многолетнемерзлых пород создает стабильные условия для существования клатратной формы газа, как на суше, так и на шельфе.

Газовые гидраты - это льдоподобные кристаллические соединения, которые образуются при определенных температурах и давлениях из молекул воды и низкомолекулярного газа ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и др.). Известные залежи и проявления гидратов газа обычно представлены метаном с незначительными примесями кристаллов других газов. Помимо достаточного количества газа и воды необходимы наличие коллекторов и покрышек, и путей поступления газа и воды к коллектору. Эти условия ставят газовые гидраты в один ряд с другими углеводородами, которые являются полезными ископаемыми. В арктических областях роль покрышек играют многолетнемерзлые породы.

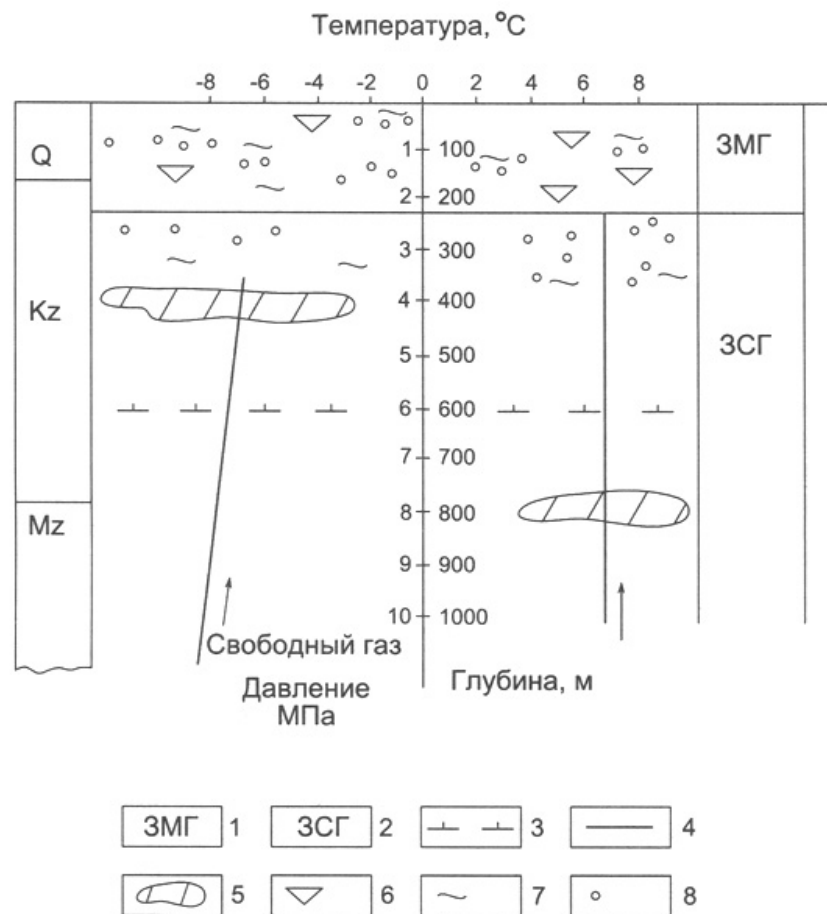
К настоящему времени в арктической континентальной области известны крупные скопления гидратов газа на севере Западной Сибири и на побережье моря Бофорта (север Аляски и район дельты р. Маккензи). Изученные залежи кристаллогидратов этих областей ассоциируются с эксплуатируемыми месторождениями нефти и газа. Шельф, прилегающий к этим районам, в периоды регрессий находился в субаэральных условиях, и в его пределах формировалась криолитозона, образовывались гидраты газа. Зная характер распространения гидратов газа в разрезе месторождений, можно проводить экстраполяцию полученных данных в область современного шельфа, кристаллогидраты которого сейчас находятся в субаквальных условиях.

В результате исследований континентальной клатратной формы газов, которая формировалась, главным образом, в квартере, возникает проблема оценки продолжительности существования этого образования.

## Условия образования и распространения континентальных гидратов газа

В северных широтах поздний кайнозой, точнее поздний миоцен, стал постепенным переходом от теплого влажного климата палеогена к суровым обстановкам квартера. В позднем миоцене (мессинский кризис) произошла значительная регрессия, сравнимая с масштабами последнего ледникового максимума. Уровень моря опустился до -300 м по сравнению с его современным положением. Это событие сопровождалось понижением температур, установлением ледового режима в акватории Северного Ледовитого океана [Атлас..., 1991; Гусев и др., 1999]. В позднем плиоцене формируется устойчивая криолитозона (более 3 млн лет назад), об этом свидетельствует наличие сингенетических ледяных жил в разрезах осадков этого возраста [Лаврушин, Алексеев, 1999; Розенбаум, Шполянская, 2002]. Вероятно, к этому времени должно быть отнесено начало образования клатратов газа в континентальных условиях.

Первые признаки возможных гидратных скоплений были обнаружены в начале 50-х годов в Средней Сибири в устье р. Оленек в процессе буровых и разведочных работ. В описании керна были отмечены газопроявления, характерные для присутствия газогидратов [Черский, Царев, 1973]. На территории Западной Якутии и Колымо-Индигорской низменности были описаны газовые гидраты, о наличии которых свидетельствовали обильные газопроявления. Они располагаются в пределах глубин от 2 до почти 600 м (в интервалах 60-80, 20-120, 140-190 и глубже) [Порохняк, 1988; Ривкина и др., 1993; Якушев и др., 2003].



**Рисунок.** Аккумуляция гидратной формы газа в зависимости от термобарических и природных условий  
 1 – зона метастабильности гидратов газа; 2 – зона стабильности гидратов газа; 3 – подошва криолитозоны; 4 – тектонические нарушения; 5 – крупные скопления гидратов газа; 6 – реликтовые гидраты газа; 7 – проявления гидратов газа; 8 – биогенный газ

Опытным путем были выявлены условия, в которых возможно образование и существование гидратов газа, которые отличаются определенным соотношением температуры и давления. В дальнейшем зона образования и стабильности кристаллогидратов стала определяться либо математическим путем с помощью решения ряда уравнений по изменению термического градиента и уравнения равновесного стабильного существования гидрата в данной среде, либо графическим методом, предложенным Ю.Ф. Макагоном в 1966 г [Макагон, 2003]. Помимо такой характеристики существования гидратов газа как зона стабильности, была установлена и определена зона метастабильности гидратов. Зона метастабильности газогидратов - это часть разреза многолетнемерзлых пород, находящаяся выше кровли зоны стабильности гидратов, в которой температурный режим пород соответствует, условиям существования эффекта самоконсервации газовых гидратов при отрицательных температурах. Газовые гидраты внутри зоны метастабильности не могут образовываться, но могут существовать в законсервированном состоянии длительное время при условии сохранения льда в разрезе, который препятствует разложению гидратов при отрицательных температурах [Якушев и др., 2003]. Известные крупные скопления клатратной формы газов образовались в районах нефтегазовых месторождений. Гидраты газа состоят в большей степени из катагенного газа с обязательной примесью биогенного. Проявления и незначительные скопления гидратов газа часто полностью состоят из биогенного метана. Гидраты газа заполняют поры в осадках, образуют прожилки, жилы, пропластки и слои. Проявления газогидратов обычно сосредоточены в зоне метастабильности. Типичные примеры распространения гидратов газа показаны на упрощенной схеме, совмещающей характеристики термобарических и природных условий (рисунок).

Обычно, крупные скопления этих образований (залежи) находятся в зоне стабильности, а проявления приурочены к зоне метастабильности. Исключение представляет собой Ямбургское газоконденсатное месторождение, где гидраты газа располагаются в зоне метастабильности [Якушев и др., 2003].

Явление гидратообразования на арктической суше имеет четкую временную привязку поздний плиоцен - четвертичный период, и генетическую связь с распространением многолетнемерзлых пород. Однако строгой привязки к определенным стратиграфическим единицам не наблюдается. Возраст толщ, содержащих клатраты газа, определяется геологической историей района. Изучение геологических разрезов с гидратами газов, позволяет заметить, что они, как правило, накапливаются в дельтовых, авандельтовых и прибрежно-морских песчаниках, алевролитах, конгломератах и угольных толщах (таблица).

Таблица. Характеристики распространения скоплений гидратов газа (гг)

Район	Возраст отложений, содержащих гг	Мощность многолетнемерзлых пород (м)	Глубина залегающих гг (м)	Обстановка накопления отложений, содержащих гг
Западная Сибирь (Западно-Мессояхская и Восточно-Мессояхская площади) [Агалаков, 1997]	Турон	320–350	700–730	Морской бассейн
Ямбургское месторождение [Якушев и др., 2003]	Ранний–средний неоплейстоцен	350–400	70–120	Пляжево-прибрежная зона
Северная Аляска (площадь Тарн и Эйлин) [Lorenson et al., 2005]	Поздний мелкайнозой	600	210–950	Прибрежно-дельтовая равнина
Канада, дельта р. Маккензи [Usida et al., 2000]	Олигоцен	640	890–1190	Дельта и продельта, мелководный шельф
Море Бофорта, восточная часть [Majorowicz, Hannigen, 2000]	Плиоцен–голоцен	100–600	550–1450	Прибрежная зона и мелководье

Анализ геологической позиции мест обнаружения клатратной формы газа показывает, что они приурочены к тем же обстановкам, что и месторождения других

углеводородов данного региона. Все масштабные арктические находки гидратов газа сосредоточены в областях пассивных континентальных окраин, в отложениях с хорошими коллекторскими свойствами. В море Бофорта мощности мел-кайнозойских отложений достигают 16 км. Они представлены чередованием песков, алевроитов, глин флювиального происхождения [Ushida et al., 2000]. Зафиксирована позднемиоценовая регрессия, ее поверхность служит региональным несогласием для моря Бофорта. И также является точкой отсчета для формирования сухого холодного климата в этой области.

С этой точки зрения шельф российской Восточной Арктики, располагаясь в области развития многолетнемерзлых пород, является весьма перспективным для открытия залежей этой формы углеводородов. Эта область представляет собой огромную территорию аллювиально-озерных-дельтовых равнин с мощной толщей отложений позднего мела - кайнозоя (около 11 км), содержащих значительное количество органики, слои углесодержащих отложений [Друщиц, Садчикова, 2009; Садчикова, Друщиц, 2010].

Описание тектонического развития территорий, где обнаружены крупные скопления гидратов газа, выходит за рамки данной работы. Однако стоит отметить некоторые черты, характерные для неотектонического этапа (времени образования гидратов газа) геологической истории севера Западной Сибири и побережья моря Бофорта. На севере Западной Сибири в миоцене происходило постепенное воздымание с сохранением структурного плана мела и палеогена. В плиоцен-четвертичное время произошел резкий подъем всей территории. Залежи гидратов газа расположены на приподнятом межрифтовом блоке с высокой тектонической активностью [Гуськов, Беляев, 2009; Самохин, 2011]. Море Бофорта является самой активной акваторией Американо-Азиатского бассейна. Облик этой области формировался в конце мезозоя и связан с раскрытием Канадского бассейна. Область палео-спрединга упирается в устье р. Маккензи. Полоса современной активной сейсмичности приурочена к долине и дельте р. Маккензи и протягивается на северо-запад к северному побережью Аляски [Аветисов, 1996].

Современный этап геологического развития море Бофорта может быть сопоставлен с проявлением современных геодинамических процессов в море Лаптевых. Море Лаптевых - тектонически активный регион, здесь проходит граница Американо-Азиатского и Евразийского бассейнов. Зоны эпицентров землетрясений (Лено-Таймырская, Новосибирских островов и продолжения хребта Гаккеля) фиксируют на шельфе моря Лаптевых контуры западного и восточного блоков, которые расположены на разных плитах (Евразийской и Американо-Азиатской). Континентальным сегментом этого пояса является Хараулахская сеймотектоническая зона, которая приурочена к серии субмеридионально ориентированных (Кенгдейской, Кунгинской, Согинской, Быковской протоки и др.) рифтогенных впадин [Имаева и др., 2010]. Принимая во внимание то, что в море Лаптевых есть субмаринная криолитозона, можно ожидать распространение гидратов газа в этой акватории.

С помощью математического моделирования удалось установить [Романовский и др., 2009] сложную ситуацию развития многолетнемерзлых пород и предположительно связанных с ними зон стабильности гидратов газа на шельфе моря Лаптевых. В крупных рифтах с высокими значениями теплового потока образуются сквозные эндогенные талики, в которых в межледниковья не сразу, а с некоторым запаздыванием по времени и мерзлота и газовые гидраты деградируют. В холодные эпохи талики могут промерзнуть, а могут сохраняться за счет изменения соотношения температуры и давления (при регрессии исчезает давление водной толщи). Результаты проведенного моделирования дают возможность полагать, что море Лаптевых известное своей тектонической активностью и наличием рифтогенных впадин имеет значительные ограничения по распространению крупных скоплений гидратов газа. Проявления же клатратов газа видимо могут встречаться часто. Эти выводы подтверждаются результатами исследований, проведенных на суше. Осадки кайнозоя рифтогенных впадин северного Верхоянья представлены чередованием песков, глин алевроитов, песчаников с прослоями

галечников и бурых углей, лигнитов. Скоплений гидратов газа по данным бурения в этих впадинах нет, не смотря на наличие криолитозоны.

Четвертичная толща континентальной окраины Арктики содержит прослой торфа, растительные остатки различной степени разложения. Исследования содержания метана в многолетнемерзлых породах показали, что в отложениях приморских низменностей от дельты Лены до устья Колымы присутствуют значительные количества метана биогенного происхождения, который может образовываться как в холодные, так и в теплые эпохи. Более того, метан может находиться и в клатратной форме. Формирование гидратов метана вне расчетных термобарических условий может определяться избыточным внутривыводным давлением, возникающим при эпигенетическом промерзании замкнутых массивов, которое компенсирует недостаточное геостатическое давление [Ривкина и др., 2006]. Кристаллогидраты, генерированные из газа, растворенного в воде промерзающих отложений, находятся в толще многолетнемерзлых пород [Гинсбург, Соловьев, 1994]. Такой вывод подтверждается экспериментальными данными [Чувиллин и др., 2005; Chuvilin, Lupachik, 2010]. Эти исследования объясняют находки проявлений клатратов газа на небольших глубинах. Можно предположить, что процесс гидратообразования в области криолитозоны встречается достаточно часто, что выражается в заполнении клатратами порового пространства, образовании тонких прослоек, прожилок. Проявления кристаллогидратов быстро исчезают при резком изменении термобарических условий территории их аккумуляции.

Сравнение карт перспектив нефтегазоносности, карт условий газогидратоносности и потенциально газогидратоносных акваторий, карт субмариной криолитозоны и тектонических карт Атласа «Геология и полезные ископаемые шельфов России» [Атлас..., 2004] позволяет выделить наиболее перспективные районы, имеющие условия для аккумуляции гидратов газа. Скопления гидратов газа могут формироваться и консервироваться при наличии в одной области требуемых для образования гидратов термобарических условий, достаточного количества газа, многолетнемерзлых пород, активной тектоники. Это не относится к областям крупных рифтов, палеодолин крупных рек. С большой долей вероятности к перспективным относительно гидратов газа можно отнести область шельфа, к северо-востоку от Новосибирских островов, пролив Санникова, пролив Дм. Лаптева, взморье междуречья Индигирки и Колымы, Хатангский залив, шельф к западу от п-ова Таймыр.

### **Современная среда как образец межледниковых условий существования для проявлений гидратов газа**

Исследования проявлений клатратов газа обнаружили сложную ситуацию их существования: в едином временном отрезке они могут образовываться, консервироваться и деградировать, находясь в различных природных обстановках. В современных континентальных условиях места нахождения скоплений или проявлений гидратов газа располагаются в высоких широтах, на низменных приморских пространствах с хорошо развитыми не очень крупными речными системами, большим количеством озер различного размера и болот. Крупные реки (Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка) и их продолжение на шельфе оказывают значительное влияние на окружающую среду, и создают условия неблагоприятные для образования гидратов газа в их долинах. Такая же зависимость характерна и для крупных озер. Это связано с существованием сквозных таликов в этих областях, а также в рифтовых зонах за счет высоких значений теплового потока [Романовский и др., 2003; Романовский и др., 2009]. Относительно некрупные реки (Хатанга, Оленек, Хрома, Омолой) не создают сквозных таликов. В их бассейнах есть условия для сохранения гидратов газа [Романовский и др., 2003]. К этой же категории относятся реки, в бассейнах которых обнаружены залежи кристаллогидратов: Мессояха, Купарук, Колвилл. В бассейнах нижнего течения этих рек расположена масса небольших озер. Еще более благоприятные условия для газовых гидратов существуют в долинах



малых рек, которые промерзают до дна в зимний период. В короткий летний сезон сквозные талики не успевают образоваться. Река Маккензи по своим гидрологическим параметрам (длина, площадь бассейна, годовой сток, средний годовой расход) выделяется из вышеописанного ряда. По размерам р. Маккензи принадлежит к категории крупных рек. Ее гидрологические характеристики превышают такие показатели для рек Яна и Индигирка, отложения долин которых по расчетным данным не должны содержать клатраты газа. Однако и самой дельте р. Маккензи и на ее взморье обнаружены скопления и проявления гидратов газа.

Оценивая современность как межледниковье, можно определить возможности существования газогидратных образований в эпохи потеплений. Развитие гидратной формы газа складывается из двух этапов: образование и сохранение только после формирования значительных мощностей многолетнемерзлых пород (холодные эпохи) и деградация (на фоне процесса самоконсервации), и исчезновение (эпохи потепления). Появление значительных масс гидратов, вероятно, имело место в позднем плиоцене. К этому времени в арктическом регионе формируется устойчивая криолитозона [Лаврушин, Алексеев, 1999; Фрадкина и др., 1999; Андреев и др., 2011]. На северо-востоке Евразии это событие связано с кутуяхским временем. К началу четвертичного периода возможно широкое распространение скоплений и проявлений гидратов газа на этих территориях. Вопрос об исчезновении газовых гидратов, видимо, является дискуссионным в свете современных натуральных, экспериментальных исследований и моделирования.

Если гидраты газа существуют в настоящее время, значит, они могут сохраняться в эпохи потепления. Установлено, что существует эффект самоконсервации как многолетнемерзлых пород, так и клатратов газа [Конищев, 2011; Чувилин и др., 2005].

Кристаллогидраты могут образовываться в субаквальных условиях. Это положение подтверждается полевыми исследованиями. Мерзлые толщи субмаринного происхождения обнаружены на приморских равнинах практически для всего разреза неоплейстоцена. Предполагается, что они формировались как в ледниковые эпохи, так и в межледниковья. В настоящее время многолетнемерзлые породы могут образовываться на глубинах более 40 м [Шполянская и др., 2006]. Эти данные подтверждены экспериментами. Основные параметры этого процесса - увеличение давления в мерзлых породах за счет водной толщи и расширение зоны стабильности гидратов газа. Зона гидратообразования ограничивается изобатами 50-60м [Chuvilin, Lupachik, 2010].

Особый интерес представляют захороненные торфяники и болота, имеющие широкое распространение в отложениях современного шельфа и являющиеся поставщиками метана в атмосферу при субаэральном существовании. При захоронении в субаквальных условиях они могут продуцировать проявления клатратов газа за счет дополнительного давления водной толщи. Установлено, что для мелких скоплений гидрата метана основным источником является метан биохимического генезиса. Большие площади приморских низменностей заняты рельефом термокарстового происхождения - аласами и связанными с ними озерами и болотами. В настоящее время они занимают 75% площади приморских низменностей Северной Якутии [Конищев, 2011]. Предполагается, что развитие таких ландшафтов имело место как в каргинское время, так и в казанцевское [Каплина, 2009, 2011]. Аласы и сопутствующие им озера являются генераторами биогенного метана [Walter et al., 2007]. В субаквальных обстановках осадки аласного комплекса создают слоистую толщу, в которой находятся как источники воды, так и метана. Замерзая при избыточном давлении, насыщенная газом вода превращается в гидрат газа.

Естественные природные изменения накладывают свой неизгладимый отпечаток и на сохранение многолетнемерзлых пород и на сохранение связанных с ними кристаллогидратов. В морях Западной Арктики в большей мере чувствовалось и чувствуется влияние Атлантического океана. Побережье северо-востока Европы - область несплошного распространения многолетнемерзлых пород. Наблюдается газонасыщение осадков и мощные выбросы газовых струй от дна почти до поверхности воды в областях

мелководий Печорского и Карского шельфов. Эти явления связаны с составом осадков (наличие органики) и строением четвертичного чехла шельфа в этой области [Рокос и др., 2001; Рокос, Тарасов, 2007]. С помощью бурения удалось установить, что кровля многолетнемерзлых пород залегает в нескольких десятках метров от поверхности дна, мощность их 20-40 м. Наиболее часто мерзлые массивы встречаются на глубинах менее 20 м. Предполагается, что эти породы деградируют от своей кровли; наибольшая интенсивность протаивания связана с началом трансгрессии, когда при небольшой глубине толща воды интенсивно прогревается. В дальнейшем при увеличении глубины температура воды понижается, и таяние замедляется [Рокос, 2011].

Угленосные толщи, находящиеся в зоне стабильности гидратов газа, содержат их прослойки. Эти каустобиолиты приурочены к одним и тем же обстановкам осадконакопления. Угленосные отложения в восточном секторе российской Арктики формировались на протяжении всего кайнозоя. Этому способствовали условия теплого умеренно влажного климата и обстановки прибрежно-морских слабо осолоненных заболачивающихся озер и подводных дельт. Угли образовывались в узкой литоральной (сублиторальной) зоне, на приморской аллювиальной равнине со старинными озерами и болотами. Они формировались из гумусового вещества, в спокойных условиях малоподвижного мелководья [Садчикова, Друциц, 2010]. Математическое моделирование процесса деградации многолетнемерзлых пород в условиях Анабаро-Хатангского района (шельф, глубина 4-20 м) Ленского угленосного бассейна показало существенное возрастание скорости деградации многолетнемерзлых пород в зоне кровли моноклинально залегающих угольных пластов, выходящих в зону оттаявших осадков. В результате интенсивного протаивания по кровле угольного пласта формируется талик. В данных условиях процесс деградации многолетнемерзлых пород сопровождается выделением в водный слой и в область талика метана, сорбированного углем [Буров, Гресов, 2011]. Видимо проявления гидратов газа, сопровождающие угленосные толщи, могут разрушаться быстрее, чем сформированные в отсутствие угля.

В Восточной Сибири на территории низменностей мощность многолетнемерзлых пород в грабенах изменяется от 340 до 460 м, на положительных морфоструктурах - от 415-450 до 640 м. В аласном пространстве мощность мерзлых отложений меняется от 200-300 м на приозерном уровне до 300-400 м на высоких террасах. В районе Новосибирских островов общая мощность многолетнемерзлых и охлажденных пород может достигать 1 км [Гаврилов, 2008]. Эти цифры говорят о том, что в субаквальных обстановках - более благоприятные условия для консервации гидратов газа. По некоторым палеодолинам (Оленек, Хатанга-Анабар) в начале голоцена осуществлялось проникновение морских вод на территорию современного моря Лаптевых. Этот процесс происходил с катастрофической скоростью [Лаврушин, 2010]. Столь быстрое заполнение морскими водами палеодолин могло привести к эффекту самоконсервации криолитозоны и сохранить скопления гидратов газа в этих депрессиях, которые сейчас находятся в субаквальных условиях. Данные бурения в море Бофорта подтверждают это предположение: морские скважины чаще демонстрируют присутствие клатратов газа [Majorowitch, Hanningen, 2000]. В тоже время на шельфе Восточной Арктики выделены участки с повышенными концентрациями метана в осадках и придонном слое воды: северовосточная часть авандельты Лены с максимумом в заливе Буор-Хая, пролив Дм. Лаптева, западная и юго-восточная часть о. Большой Ляховский, авандельта р. Индигирки, южная оконечность о. Бельковский, южная оконечность о. Новая Сибирь [Кошелева, Яшин, 1999; Космач и др., 2008]. Эмиссия метана, видимо, связана с деградацией многолетнемерзлых пород, что может вызывать выделение газов из растаявших отложений (осадки болот, торфяники, углесодержащие толщи, кристаллогидраты).

Проведенные реконструкции развития криолитозоны при глобальном потеплении при различных температурных величинах позволили установить общую тенденцию в распространении и изменении криогенных процессов на территории Северной Евразии [Нечаев, 2010]. При устойчивом потеплении климата прогноз на основе нескольких

сценариев показывает сдвиг на север границы распространения несплошной криолитозоны. Значительная деградация сплошного распространения многолетнемерзлых пород возможна на крайнем северо-востоке Европы, на юге Ямала и Гыдана, на Тазовском п-ове. Эти данные позволяют предположить, что наибольшая степень уязвимости грозит залежам гидратов газа Западной Сибири. Особенно это касается гидратов газа Ямбургского месторождения, которое расположено в зоне метастабильности. Побережье морей Лаптевых и Восточно-Сибирского останется в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород даже при глобальном потеплении на 1,7°C, что обусловит дальнейшее сохранение проявлений гидратов газа.

### **Кристаллогидраты в четвертичное время**

Как указывалось выше, предпосылки образования криолитозоны начали появляться, со времени позднемиоценовой регрессии. Изучение керна глубокой скважины, пробуренной в озере Эльгыгытгын, позволило составить непрерывную летопись изменений природных условий в полярных широтах северо-востока Азии с уровня 3,5 млн лет [Андреев и др., 2011], практически с уровня возникновения многолетней мерзлоты. Видимо, экстраполяция данных разреза осадков озера Эльгыгытгын по всей континентальной окраине Восточной Арктики требует некоторых ограничений. Однако общая тенденция природных изменений должна сохраняться даже в таком крупном регионе. На основании палинологических данных уже в позднем плиоцене для Чукотки выделяются явно холодные сухие (тундровые и степные ландшафты) и относительно теплые и влажные (ландшафты хвойных и березовых лесов, лесотундра, кустарниковая тундра) обстановки. Изучен также разрез донных осадков озера Эльгыгытгын, фиксирующий изменение природной среды за последние 350 тыс. лет [Матросова, 2009]. Имеются сведения по строению и составу отложений о. Большой Ляховский [Meyer et al., 2002] и обобщенные данные по наиболее ярким событиям квартера для арктических регионов и северо-востока Евразии в целом [Лаврушин, Алексеев, 1999; Фрадкина и др., 1999].

На основании этих данных можно выделить этапы в развитии природных обстановок с позиции создания условий для образования клатратоносных отложений. С этой точки зрения в летописи природных изменений северо-востока Евразии могут быть выделены эпохи, с суровыми климатическими условиями, которые способствовали развитию и сохранению криолитозоны и приуроченных к ней проявлений гидратов газа. Периоды, с которыми может быть связано активное формирование проявлений гидратов газа (2,9-2,7 млн лет, 2,65-2,5 млн лет, 1,2-0,78 млн лет, 0,6-0,4 млн лет, 0,3-0,24 млн лет и 0,18-0,13 млн лет), характеризуются наличием признаков оледенения, изменением растительности в сторону холодоустойчивых (тундровых) видов, понижением уровня озера Эльгыгытгын, регрессией уровня моря. Количественная оценка продолжительности выделенных выше холодных сухих этапов показывает, что наиболее благоприятными с позиции формирования криолитозоны и сопутствующей ей зоны стабильности гидратов газа были обстановки в конце плиоцена, в конце эоплейстоцена, во второй половине раннего неоплейстоцена. Следует обратить внимание на то, что периоды холодных сухих природных обстановок (0,3-0,24 и 0,18-0,13 млн лет) среднего неоплейстоцена разделяются временем представляющим собой интерстадиал. В этот этап развития криолитозоны осадки, содержащие гидраты газа, видимо не только не протаивали, но и происходила их агградация. Это подтверждается данными по строению и геохронологии четвертичных разрезов о. Большой Ляховский [Meyer et al., 2002].

Валдайское время также можно определить как наиболее значимое для формирования и наращивания криолитозоны и зоны стабильности газогидратов на арктической континентальной окраине. Каргинский интерстадиал (средний валдай) отличался весьма низкими температурами и признаков деградации многолетнемерзлых



пород в это время пока не обнаружено [Величко и др., 2002]. Ранний и поздний валдай отвечали ледниковым и перигляциальным условиям.

В летописи осадков озера Эльгыгытгын естественно зафиксированы и периоды потепления климата. После начала распространения криолитозоны наиболее теплым можно считать отрезок времени 2,34-2,2 млн лет назад с лиственничными лесами, где встречаются каменная сосна, береза и кустарники. Также выделяется время формирования верхней части канарчакской свиты (начало эоплейстоцена). На основании текстурных особенностей и данных палинологического анализа этих отложений предполагается, что они формировались в условиях более теплых и влажных, чем современные климатические условия [Алексеев и др., 1991]. Межледниковые эпохи имели место также 550 и 450-385 тыс. лет назад [Лаврушин, Алексеев, 1999; по данным разрезов Новосибирских островов]. Хорошо определяется также по палинологическим данным (распространение лесотундры, лиственнично-березовых лесов) потепление в среднем неоплейстоцене (334-301 тыс. лет) [Матросова, 2009].

Наиболее хорошо изученное казанцевское межледниковье, особенно в свой оптимум, характеризовалось летними и зимними температурами выше современных. Трансгрессия этого времени имела уровень гораздо выше современного. Однако распределение мощностей многолетнемерзлых пород свидетельствует о том, что криолитозона не была полностью разрушена. Это касается, главным образом, Восточной Арктики, побережий как Западной так и Восточной Сибири, где в это время происходило сингенетическое промерзание отложений. В Западной Арктике за счет сильного влияния Атлантического океана многолетнемерзлые породы в некоторых зонах просто исчезли, оставались лишь отдельные их острова на востоке современной Большеземельской тундры [Величко и др., 2002]. Эти выводы подтверждаются результатами моделирования состояния криолитозоны для условий казанцевского межледниковья [Нечаев, 2010]. Можно также рассмотреть изменение природных обстановок в голоцене, но из-за краткости его временных подразделений, видимо эти климатические колебания не могли оказать существенного влияния на распространение криолитозоны и гидратов газа.

В межледниковое время потепление климата вызывает изменение температурного режима, что приводит к сокращению мощности и изменению конфигурации зон многолетнемерзлых пород. Вслед за этим, с некоторым опозданием, происходят нарушения в зоне стабильности гидратов газа, в результате чего часть гидратов обращается в свободный газ. Существует множество моделей, которые описывают развитие зоны стабильности гидратов газа в различных природных условиях. Они базируются в основном на расчетах, построенных при учете изменений среднегодовой температуры, литологии отложений, теплового потока [MacDonald, 1990; Соловьев, 2002; Романовский и др., 2009]. Прогнозируется, что при изменении температуры от  $-1^{\circ}\text{C}$  до  $-15^{\circ}\text{C}$  в период падения уровня моря, формирование зоны стабильности гидратов газа начинается через 2 000 лет после установления суровых природных условий, через 10 000 лет мощность зоны стабильности может составлять 230 м, а через 60 000 - уже 480 м. При изменении температуры от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $-1^{\circ}\text{C}$  разрушение зоны стабильности газогидратов при постепенном потеплении климата может занимать от 2 000 до 14 000 лет [MacDonald, 1990]. Приведенные выше сценарии видимо нуждаются в привлечении в их построение большего количества природных характеристик, поскольку они не соответствуют обстановкам, в которых находятся известные скопления клатратов газа. Основываясь на имеющихся данных по экспериментам и натурным наблюдениям можно заключить, что даже в эпохи межледниковья, сравнимые по показателям с казанцевским временем, существовали условия для сохранения сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Установлено, что на о. Большой Ляховский никогда не было таких теплых зим как сейчас, и при этом многолетнемерзлые породы присутствуют [Meyer et al., 2002]. Эти материалы дают возможность предполагать, что зона стабильности гидратов газа, генетически связанная с криолитозоной, при учете эффекта самоконсервации, сможет существовать продолжительное время.

## Заключение

Гидраты газа оцениваются сейчас как один из будущих источников энергоресурсов. С другой стороны образование континентальных гидратосодержащих отложений - это природный процесс, связанный с определенными природными обстановками. Этот процесс неотделим формирования криолитозоны. Следует разделять наличие гидратов газа по количественному признаку. Скопления (залежи) кристаллогидратов встречены сейчас только в областях газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождений. Проявления обнаружены гораздо чаще и на меньших глубинах. Для крупных скоплений клатратов газа, однако, наличие многолетнемерзлых пород необходимое, но недостаточное условие для формирования отложений, содержащих клатраты газа. Там, где нет определенных термобарических условий, достаточного количества газа, воды, отложений с хорошими коллекторскими свойствами, активной системы тектонических нарушений - клатраты газа не образуются. По данным моделирования их формирование не возможно также в областях крупных речных долин и рифтогенных впадин. Проявления сохраняются в зоне метастабильности гидратов газа и распространены гораздо шире. Они могут образовываться и в современных условиях параллельно с формированием криолитозоны, заполняя поровые пространства незначительной мощности. Видимо, разрушение проявлений кристаллогидратов вносит свой вклад в эмиссию метана на акватории шельфовых морей Восточной Арктики.

Материалы по палеогеографии позднего кайнозоя, особенно четвертичного периода, экспериментальные данные и данные моделирования по динамике криолитозоны и зоны стабильности гидратов газа позволили определить возможные условия существования кристаллогидратов в арктическом регионе. Криолитозона и сопутствующие ей проявления гидратов газа стали формироваться, начиная с позднего плиоцена. В дальнейшем их объемы могли сокращаться в эпохи потепления эоплейстоцена и раннего неоплейстоцена. Начиная со среднего неоплейстоцена, зона стабильности гидратов газа достигла таких размеров, что она не исчезает, но может в какой-то степени протаивать. Особое значение приобретают холодные (ледниковые и перигляциальные) этапы, если за ними следует интерстадиальное время. В интерстадиале отложения, содержащие кристаллогидраты, хорошо сохраняются и на севере региона могут и продолжать агградировать. Межледниковые этапы развития природы четвертичного периода арктического региона (как аналог современных климатических условий) характеризуются неоднозначными условиями для развития клатратоносных отложений. Даже в эпохи потепления в субаквальных условиях центрального и внешнего шельфа сохраняются условия для образования и наращивания криолитозоны и формирования проявлений гидратов газа. Но в тоже время существуют области, где такие процессы не возможны.

В целом же современную природную обстановку арктических районов нельзя назвать экстремальным потеплением. Вполне возможно, что известные залежи гидратов газа (Россия, США, Канада) будут существовать еще в масштабах геологического времени. Современные сценарии развития криолитозоны при устойчивом потеплении обеспечивают нас возможностью для исследований и разработки континентальных гидратоносных залежей до конца XXI века. И видимо на более долгий период - при открытии субаквальных, шельфовых, месторождений этих образований. Математические модели динамики зоны стабильности гидратов газа, исходя из натурных и экспериментальных данных, нуждаются в усовершенствовании, чтобы сделать более точные определения для сроков существования скоплений гидратов газа, которые изначально образовались в континентальных условиях.

Авторы выражают свою искреннюю признательность Ю.А. Лаврушину за конструктивные замечания и ценные советы, высказанные в ходе работы над рукописью.

## Литература

- Аветисов Г.П.* Гипоцентрия землетрясений моря Бофорта и его обрамления // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб: Из-во ВНИИОкеангеология. 1996. Вып. 1. С. 127-131.
- Агалаков С.Е.* Газовые гидраты в туронских отложениях на севере Западной Сибири // Геология нефти и газа. 1997, № 3. С. 16-21
- Алексеев М.Н., Архангелов А.А., Иванова Н.М. и др.* Моря Лаптевых и Восточно-Сибирское. Кайнозой // Атлас палеогеографических карт «Шельфы Евразии в мезозое и кайнозое» 1991. Т. 1 С. 1-14 - 1-22.
- Андреев А.А., Меллес М, Веннрик Ф., Брайхам-Гретте Ю.* Климат в позднем плиоцене/раннем плиоцене на северо-востоке сибирской Арктики по данным пылецевых исследований отложений озера Эльгыгытгын // Квартер во всем его многообразии. Фундаментальные проблемы, итоги изучения и направления дальнейших исследований: Материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Апатиты, 12-17 сентября 2011 г.) - Апатиты; СПб. 2011. Т. 1. С. 33-36.
- Атлас палеогеографических карт «Шельфы Евразии в мезозое и кайнозое»/ Гл. ред. Алексеев М.Н. Великобритания. Робертсон Групп. Лландидно, 1991. Т. 2. 129 листов
- Атлас «Геология и полезные ископаемые шельфов России» / Гл. редактор Алексеев М.Н. М.: Научный Мир. Москва. 2004. 96 лист.
- Буров Б.А., Гресов А.И.* Влияние залежей углей на процесс деградации многолетнемерзлых пород в шельфовой зоне арктических морей и выделение метана в водный слой // ДАН. 2011. Т. 440. № 2. С. 242-245.
- Величко А.А., Нечаев В.П., Баулин В.В., Данилова Н.С.* Криолитозона // Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 13000 лет (Гл. ред Величко А.А.). Вып. II. - М.: ГЕОС. 2002. С. 38-55.
- Гаврилов А.В.* Криолитозона арктического шельфа Восточной Сибири (современное состояние и история развития в среднем плейстоцене-голоцене). Авто-реф. докт. г.-м. наук. М.: изд-во МГУ. 2008. 42 с.
- Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А.* Субмаринные газовые гидраты / ВНИИОкеангеология. СПб. 1994 199 с.
- Гусев Е.А., Мусатов Е.Е., Рекант П.В. и др.* Кайнозойский этап развития шельфа моря Лаптевых // Геология морей и океанов: Материалы XIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. 2. М.: ГЕОС, 1999. С. 27-30.
- Гуськов С.А., Беляев С.Ю.* Неотектонический этап развития северной части Западно-Сибирского осадочного бассейна // Геология полярных областей Земли. Материалы Тектонического совещания. Т.1.-М.: ГЕОС, 2009. С. 172-176.
- Друщиц В.А., Садчикова Т.А.* Флювиальные комплексы на шельфе Восточной Арктики // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып.1. М.: ГЕОС, 2009. С. 173-190.
- Друщиц В.А., Садчикова Т.А.* Некоторые региональные закономерности размещения скоплений газогидратов в Арктике // Геология морей и океанов: Материалы XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. 1. - М.: ГЕОС, 2011. С. 44-48.
- Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М., Маккей К, Фуджита У.* Сейсмоструктура шельфа моря Лаптевых и северного сегмента Верхоянской складчатой зоны // Строение и история развития литосферы. М.: Paulsen. 2010. С. 243-251.
- Каплина Т.Н.* [Аласные комплексы Северной Якутии](#) // Криосфера Земли. 2009, т. XIII, № 4. С. 3-17.
- Каплина Т.Н.* [Древние аласные комплексы Якутии \(сообщение 2\)](#) // Криосфера Земли. 2011, т. XV, № 3. С. 20-30.
- Конищев В.Н.* Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Квартер во всем его многообразии. Фундаментальные проблемы, итоги изучения и основные направления

дальнейших исследований: Материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Апатиты, 12-13 сентября 2011 г.). Т. 1. С.288-290.

*Кошелева В.А., Яшин Д.С.* Донные осадки Арктических морей России / СПб., ВНИИОкеангеология, 1999. С. 286.

*Лаврушин Ю.А., Алексеев М.Н.* Арктические районы // Изменение климата и ландшафтов за последние 65 млн лет (кайнозой от палеоцена до голоцена). Ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС, 1999. С. 21-42.

*Лаврушин Ю.А.* Динамика позднечетвертичных океанских событий Западной Арктики и их отражение в природной среде Европейской России // Строение и история развития литосферы. - М.: Paulsen. 2010. С. 403-431.

*Макагон Ю.Ф.* Природные гидраты газа: распространение, модели образования, ресурсы // Российский хим. ж., 2003, т. XLVII, № 3. С. 70-79.

*Матросова Т.В.* Климат и растительность анадырского плоскогорья за последние 350 тыс. лет (палинологическая характеристика осадков озера Эльгыгытгын) // Автореф. канд. геогр. наук. М.: изд-во МГУ. 2009. 22 с.

*Нечаев В.П.* Субаэральная криолитозона // Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и сценарии. Атлас-монография. Выпуск III (Под ред. А.А. Величко). М.: ГЕОС. 2010. С. 128-141.

*Порохняк А.М.* Газогидраты криолитозоны в Западной Якутии. М.: Изд-во ЦНИИЦветмета, 1988, 84 с.

*Ривкина Е.М., Самаркина В.А., Гиличинский Д.А.* Метан в многолетнемерзлых породах Колымо-Индибирской низменности // ДАН. 1993. Т. 323. № 2. С. 559-562.

*Ривкина Е.М., Краев Г.Н., Кривушин К.В. и др.* [Метан в вечномерзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики](#) // Криосфера Земли. 2006, т. X, № 3. С. 23-41.

*Розенбаум Г.Э., Шполянская Н.А.* Позднекайнозойская история российской Арктики // Геология и полезные ископаемые шельфов России./Ред. М.Н. Алексеев,- М.: ГЕОС, 2002. С. 292-306.

*Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г.* [Свободный газ и многолетняя мерзлота в осадках верхней части разреза мелководных районов шельфа Печорского и Карского морей](#) // Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. 2001. С. 40-51.

*Рокос С.И., Тарасов Г.А.* [Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря](#) // Бюлл. Комиссии по изучению четвертичного периода. № 67. М.: ГЕОС. 2007. С. 66-75.

*Рокос С.И.* Многолетнемерзлые отложения шельфа Печорского и Карского морей // Квартер во всем его многообразии. Фундаментальные проблемы, итоги изучения и направления дальнейших исследований: Материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Апатиты, 12-17 сентября 2011 г.) - Апатиты; СПб. Т. 2. С.178-180.

*Садчикова Т.А., Друщиз В.А.* Палеогеография проявлений каустобиолитов на континентальной окраине Восточной Арктики // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Выпуск 2. М.: ГЕОС, 2010. С. 147-160.

*Самохин А.А.* [Ловушки сеноманских газовых залежей на севере Западной Сибири \(типы и прогноз размещения\)](#) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. № 2. С. 1-16.

*Соловьев В.А.* Условия газогидратоносности и потенциально газогидратоносных акваторий морей России // Геология и полезные ископаемые шельфов России /Гл. ред. М.Н. Алексеев. М.: ГЕОС, 2002. С. 179-184.

*Фрадкина А.Ф., Гриненко О.В., Лаухин С.А. и др.* Северо-Восток // Изменение климата и ландшафтов за последние 65 млн лет (кайнозой от палеоцена до голоцена). Ред. А.А. Величко М.: ГЕОС. 1999. С. 128-145.

*Черский Н.В., Царев В.П.* Перспективы разработки газогидратных залежей // Исследования и рекомендации по усовершенствованию добычи полезных ископаемых в



северных и восточных регионах СССР: Часть 1. Под редакцией Н.В.Черского и др. Якутск, 1973. С. 54-60.

*Чувилин Е.М., Козлова Е.В., Сколотнева Т.С., Ткачев Е.И.* Исследования гидратонакопления в промерзающих метанонасыщенных породах // Мат-лы 3 конференции геокриологов России. Т. 1. Физико-химия, теплофизика и механика мерзлых грунтов. М. 2005. С. 300-307.

*Шполянская Н.А., Стрелецкая И.Д., Сурков А.В.* [Криолитозона в пределах арктического шельфа \(современного и древнего\)](#) // Криосфера Земли. 2006. Т. X, № 3. С. 49-60.

*Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А. и др.* Газовые гидраты в отложениях материков и островов // Российский хим. ж., 2003, т. XLVII, № 3. С. 80-90.

*Chuvilin E.M., Lupachek M.* Investigation of gas hydrate formation in frozen and thawing gas saturated sediments // Minerals of the ocean-5 and deep-sea minerals and mining-2. Joint International Conference. (St.Petersburg 28 June- 01 July, 2010). Abstracts P.107-108.

*Lorenson Th., Collett T., Whiticar M.* Origin of hydrocarbon gases in gas hydrates from Alaska, USA // Proceedings of the fifth International Conference on gas hydrates. June 12-16. Thronheim. 2005. V. 1. P. 371-378.

*Uchida T., Dallimore S., Mikami. J.* Occurrences of natural gas hydrates beneath permafrost zone in Mackenzie delta: visual and X-ray imaginary // Annals of the New York Academy of Sciences. 2000. V. 912. P. 1021-1033.

*Mac Donald G.J.* [Role of Methane Clathrates in Past and Future Climates](#) // Climatic Change. 1990. V.16. P. 247-281.

*Majorowicz J.A., Hanningen P.K.* [Natural gas hydrates in the offshore Beafort-Mackezie Basin - study of feasible energy source II](#) // Natural Resources Research. 2000. V. 9, № 3. P. 201-214.

*Meyer H., Dereviagin A., Siegert Ch. et al.* [Palaeoclimate Recostrution on Big Lyakhovsky Island, North Siberia and Oxygen Isotopes in Ice Wedges](#) // Permafrost and Periglacial Processes. 2002. V. 13. P. 91-105.

*Walter K. M., Smith L.S., Chaplin F.S.* [Methane bubling from northern lakes present and future contribution to global methane budget](#) // PhiLTrans. R. Soc. 2007,365. P. 1657-1676

**Ссылка на статью:**



*Друщиц В.А., Садчикова Т.А., Сколотнева Т.С.* **Гидраты газа на суше и шельфе Арктики и изменение природной среды в квартере** // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2011. № 71. С. 124-134.