

УДК 551.77



В.А. Друщиц



Т.А. Садчикова



Т.С. Сколотнева

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

Предпосылки образования и накопления гидратов газа на суше и шельфе Арктики в квартере

*Друщиц Валентина Александровна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, отдел тектоники, лаборатория тектоники океанов и приокеанических зон, Геологический Институт РАН
E-mail: drouchits@ginras.ru

**Садчикова Тамара Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория седиментологии и геохимии осадочных бассейнов, Геологический Институт РАН
E-mail: tamara-sadchikova@yandex.ru

***Сколотнева Татьяна Сергеевна, магистр геологических наук, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
E-mail: skolotneva@gmail.com

Одним из отличительных признаков четвертичного периода (квартера) стало формирование мощной криолитозоны – области широкого распространения многолетнемерзлых пород, обладающих специфическими физическими и литологическими свойствами и образующих особые формы рельефа. С этим явлением связана ещё одна яркая черта квартера – образование гидратов газа в континентальных условиях.

Ключевые слова: газовые гидраты; многолетнемерзлые породы; шельф; квартер; Арктика.

Условия образования и распространения континентальных газовых гидратов

Известные и широко распространенные субаквальные гидраты газа образовались и образуются в настоящее время в морях и океанах, в областях континентального склона, материкового подножья и глубоководья. В северных широтах проявление 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. Проявление газогидратов найдены во многих местах к востоку от Урала, начиная с глубины 2 м¹. Современные полярные шельфы, представляющие собой продолжение арктической суши, имеют криолитозону, которая наиболее активно формировалась в периоды их осушения в четвертичное время. Известно, что мощная толща многолетнемерзлых пород создает стабильные условия для существования гидратной 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 (CH₄, C₂H₆, CO₂, N₂ и др.). Известные залежи и проявления гидратов газа обычно представлены гидратами метана с незначительным содержанием гидратов других газов. Помимо достаточного количества газа и воды необходимо наличие коллекторов и покрышек, и путей поступления газа 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 зоне известны крупные скопления гидратов газа на севере Западной Сибири и на побережье моря Бофорта (север Аляски и район дельты р. Маккензи). Изученные залежи газогидратов 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, и образовывались газовые гидраты. Зная характер расположения газовых гидратов в разрезе месторождений, можно проводить экстраполяцию данных в область современного шельфа, кристаллогидраты которого сейчас находятся в субаквальных условиях.

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

В северных широтах поздний кайнозой, точнее поздний миоцен, стал постепенным переходом от тёплого влажного

¹ Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А., Чувилин Е.М., Козлова Е.В. Газовые гидраты в отложениях материков и островов // Российский химический журнал. 2003. Т. 47. № 3. С. 80–90.

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 океана¹. В позднем плиоцене формируется устойчивая криолитозона (более 3 млн лет назад), об этом свидетельствует наличие сингенетических ледяных жил в разрезах осадков этого возраста². 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 газовых гидратов³. На территории Западной Якутии и Колымо-Индибирской 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)⁴.

Опытным путем были выявлены условия, при которых возможно образование и существование газовых гидратов, отличающиеся 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 стабильного существования гидрата в данной среде, либо графическим методом, предложенным Ю.Ф. Макогоном в 1966 г. Помимо такой характеристики существования гидратов газа как зона стабильности, была установлена и определена зона метастабильности газовых гидратов – это часть разреза многолетнемерзлых пород, находящаяся выше кровли зоны стабильности, в которой температурный режим соответствует условиям, необходимым для проявления эффекта самоконсервации газовых гидратов при отрицательных температурах. Газовые гидраты вне зоны стабильности не могут образовываться, но могут существовать в законсервированном состоянии длительное время при условии сохранения в разрезе льда, который препятствует разложению газогидратов при отрицательных температурах⁵. Известные крупные скопления клатратной формы газа образовались в районах нефтегазовых месторождений. Гидраты газа состоят главным образом из катагенного газа с обязательной примесью биогенного. Проявления и незначительные скопления газа часто полностью состоят из биогенного метана. Гидраты газа заполняют поры в осадках, образуют прожилки, жилы, пропласты и слои. Проявления газогидратов обычно сосредоточены в зоне метастабильности (рис. 1).

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 метастабильности⁶.

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 гидраты, определяется геологической историей района. Изучение геологических разрезов с гидратами газа позволяет заметить, что они

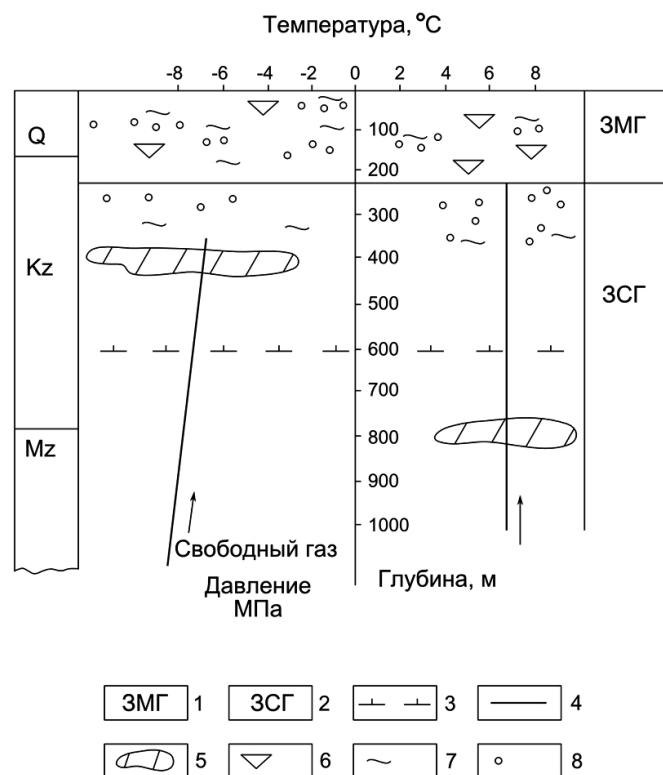


Рис. 1. Аккумуляция гидратной формы газа в зависимости от термобарических и природных условий. 1 – зона метастабильности гидратов газа; 2 – зона стабильности гидратов газа; 3 – подошва криолитозоны; 4 – тектонические нарушения; 5 – крупные скопления гидратов газа; 6 – реликтовые гидраты газа; 7 – проявления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

¹ Шельфы Евразии в мезозое и кайнозое: Атлас палеогеографических карт / Гл. ред. М.Н. Алексеев. Лландидно: Робертсон Групп, 1991. Т. 2. 129 л.; Гусев Е.А., Мусатов Е.Е., Рекант П.В. Рудой А.С., Рязанова М.В. Кайнозойский этап развития шельфа моря Лаптевых // Геология морей и океанов: Материалы XII Международной научной конференции (школы) по морской геологии. Т. 2. М.: ГЕОС, 1999. С. 27–30.

² Лаврушин В.А., Алексеев В.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; 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.

³ Черский Н.В., Царев В.П. Перспективы разработки газогидратных залежей // Исследования и рекомендации по усовершенствованию добычи полезных ископаемых в северных и восточных регионах СССР: Ч. 1 / Под ред. Н.В. Черского. Якутск, 1973. С. 54–60.

⁴ Ривкина Е.М., Самаркина В.А., Гиличинский Д.А. Метан в многолетнемерзлых породах Колымо-Индибирской низменности // ДАН. 1993. Т. 323. № 2. С. 559–562.

⁵ Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А., Чувилин Е.М., Козлова Е.В. Указ. соч.

⁶ Там же.

встречаются, как правило, в дельтовых, авандельтовых (относящихся к подводной части дельты реки) и прибрежно-морских песчаниках, алевролитах, конгломератах и угольных толщах (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики распространения скоплений гидратов газа

| Район | Возраст | Глубина залегания (м) | Обстановка осадконакопления |
|--|------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Северная Аляска (площадь Тарн и Эйлин) ¹ | Поздний мел – кайнозой | 210–950 | Прибрежно-дельтовая равнина |
| Канада, дельта р. Маккензи ² | Олигоцен | 890–1100 | Дельта и продельта, мелководный шельф |
| Западная Сибирь, (Западно-Мессояхская и Восточно-Мессояхская площади) ³ | Поздний мел (турон) | 700–730 | Морской бассейн |
| Ямбургское месторождение ⁴ | Ранний–средний неоплейстоцен | 70–120 | Пляжево-прибрежная зона |
| Море Бофорта, восточная часть ⁵ | Плиоцен – голоцен | 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, то есть с высокой проницаемостью и пористостью. В море Бофорта мощности мел-кайнозойских отложений достигают 16 км. Они представлены чередованием песков, алевролитов, глин флювиального происхождения⁶. Зафиксирована поздне-миоценовая регрессия, ее поверхность служит региональным несогласием для моря Бофорта. И также является точкой отсчёта 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 отложений⁷.

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 газогидратов расположены на приподнятом межрифтовом блоке с высокой тектонической активностью⁸. Море Бофорта является самой активной акваторией Американо-Тихоокеанского бассейна. Облик этой области формировался в конце мезозоя и связан с раскрытием Канадского бассейна. Область палеоспрединга упирается в устье р. Маккензи. Полоса современной активной сейсмичности приурочена к долине и дельте р. Маккензи и протягивается на северо-запад к северному побережью Аляски⁹.

Современный этап геологического развития моря Бофорта может быть сопоставлен с проявлением современных геодинамических процессов в море Лаптевых. Море Лаптевых – тектонически активный регион, здесь проходит граница Американо-Тихоокеанского и Евразийского бассейнов. Зоны эпицентров землетрясений (Лено-Таймырская, Новосибирских островов и продолжения хребта Гаккеля) фиксируют на шельфе моря Лаптевы контуры Западного и Восточного блоков, которые расположены на разных плитах (Евразийской и Американо-Тихоокеанской). Континентальным сегментом этого пояса является Хараулахская сеймотектоническая зона, которая приурочена к серии субмеридионально ориентированных рифтогенных впадин: Кенгдейской, Кунгинской, Согинской, Быковской протоки и др.¹⁰. Принимая во внимание то, что море Лаптевых есть субмаринная криолитозона, можно ожидать распространение газовых гидратов в этой акватории.

С помощью математического моделирования удалось установить сложную ситуацию развития многолетнемерзлых пород и предположительно связанных с ними зон стабильности газовых гидратов на шельфе моря Лаптевых. В крупных рифтах с высокими значениями теплового потока образуются сквозные эндогенные талики, в которых в межледниковье не сразу, а с некоторым запаздыванием во 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 рас-

¹ 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, 2005.* Thronheim, 2005, volume 1, pp. 371–378.

² Ibid.

³ Агалаков С.Е. Газовые гидраты в туронских отложения на севере Западной Сибири // Геология нефти и газа. 1997. № 3. С. 16–21.

⁴ Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А., Чувилин Е.М., Козлова Е.В. Указ. соч.

⁵ Majorowicz J.A., Hanningen P.K. "Natural Gas Hydrates in the Offshore Beafort-Mackenzie Basin – Study of Feasible Energy Source II." *Natural Resources Research* 9.3 (2000): 201–214.

⁶ 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* 912 (2000): 1021–1033.

⁷ Друшиц 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.

⁸ 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. 27–30; 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.

⁹ Аветисов Г.П. Гипоцентрация землетрясений моря Бофорта и его обрамления // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб.: ВНИИОГ. 1996. Вып. 1. С. 127–131.

¹⁰ Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М., Маккей К., Фуджита У. Сеймотектоника шельфа моря Лаптевых и северного сегмента Верхоянской складчатой зоны // Строение и история развития литосферы. М.: Paulsen. 2010. С. 243–251.

пространению крупных скоплений гидратов газа. Проявления же клатратов газа видимо могут встречаться часто. Эти выводы подтверждаются результатами исследований, проведенных на суше. Осадки кайнозой рифтогенных впадин Северного Верхоянья представлены чередованием песков, глин, алевроитов, песчаников с прослоями галечников и бурьих углей, лигнитов. Скопления гидратов газа по данным бурения в этих впадинах нет, несмотря на наличие криолитозоны.

Четвертичная толща континентальной окраины Арктики содержит прослой торфа, растительные остатки различной степени разложения. Исследования содержания метана в многолетнемерзлых породах показали¹, что в отложениях приморских низменностей от дельты Лены до устья Колымы присутствует значительное количество метана биогенного происхождения, который может образовываться как в холодные, так и в теплые эпохи. Более того, метан может находиться в клатратной форме. Формирование гидратов метана вне расчетных термобарических условий может определяться избыточным внутрипоровым давлением, возникающим при эпигенетическом промерзании замкнутых массивов, которое компенсирует недостаточное геостатическое давление². Кристаллогидраты, генерированные из газа, растворенного в воде промерзающих отложений, находятся в толще многолетнемерзлых пород³. Такой вывод подтверждается экспериментальными данными⁴. Эти исследования подтверждают находки проявлений клатратов газа на небольших глубинах. Можно предположить, что процесс гидратообразования в области криолитозоны встречается достаточно часто, что выражается в заполнении гидратами порового пространства, образовании тонких прослоек, прожилок. Проявления кристаллогидратов быстро исчезают при резком изменении термобарических условий территории их аккумуляции.

Сравнение карт перспектив нефтегазоносности, карт газогидратоносности и потенциальных газогидратоносных акваторий, карт субмаринной криолитозоны и тектонических карт Атласа "Геология и полезные ископаемые шельфа России"⁵ 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 полуострова Таймыр.

Современная среда как образец межледниковых условий для существования и проявлений газовых гидратов

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 и проявлений газовых гидратов 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 формирования 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 потока⁶. Относительно некрупные реки (Хатанга, Оленек, Хрома, Омлой) не создают сквозных таликов. В их бассейнах есть условия для сохранения гидратов газа⁷. К этой же категории относятся реки, в бассейнах которых обнаружены кристаллогидраты: Мессояха, Купарук, Колвилл. В бассейнах нижнего течения этих рек расположена масса небольших озер. Ещё 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 образовываться. Река Маккензи по своим гидрологическим параметрам (длина, площадь бассейна, годовой сток, средний годовой расход) выделяется из выше описанного ряда. По размерам р. Маккензи принадлежит к категории крупных рек. Её гидрологические характеристики превышают такие показатели для рек Яна и Индигирка, отложения долин которых по расчётным данным не должны содержать гидраты газа. Однако и в самой дельте р. Маккензи, и на ее взморье обнаружены скопления и проявления гидратов газа.

Оценивая современность как межледниковье, можно определить возможность 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 газа, вероятно, имело место в позднем плиоцене. К этому времени в арктическом регионе формируется устойчивая криолитозона⁸. На северо-востоке Евразии это событие связано с кутуяхским временем (верхний плиоцен, 5–1,65 млн лет

¹ Ривкина Е., Краев Г., Кривушин К., Лаврунавичус К., Федоров-Давыдов Д., Холодов А., Шербакова В., Гиличинский Д. Метан в вечномерзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли. 2006. 3. Т. 10. С. 23–41.

² Там же

³ Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. 199 с.

⁴ 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. Proceedings of Joint International Conference*. Moscow: All-Russian Scientific and Research Institute of Oceanic Geology, 2010, pp. 107–108.

⁵ Геология и полезные ископаемые шельфа России: Атлас / Гл. ред. М.Н. Алексеев. М.: Научный Мир, 2004. 96 л.

⁶ Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В., Гаврилов А.В., Елисеева А.А., Типенко Г.С., Холодов А.Л., Романовский В.Е. Эволюция мерзлых толщ и зоны стабильности гидратов газов в среднем плейстоцене-голоцене на шельфе восточной части Евразийской Арктики // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 4. С. 51–64; Романовский Н.Н., Елисеева А.А., Гаврилов А.В., Типенко Г.С., Хуббертен Х.В. Многолетняя динамика толщ мерзлых пород и зоны стабильности газовых гидратов в рифтовых структурах Арктического шельфа Восточной Сибири (Сообщение 2). Результаты численного моделирования // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 1. С. 29–38.

⁷ Там же.

⁸ Лаврушин В.А., Алексеев В.Н. Указ. соч.; Фрадкина А.Ф., Гриненко О.В., Лаухин С.А., Нечаев В.П., Андреев А.А., Климанов В.А. Северо-Восток Азии // Изменение климата и ландшафтов за последние 65 млн лет (кайнозой от палеоцена до голоцена) / Ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС, 1999. С. 128–145; Андреев А.А., Меллес М., Венник Ф., Брайхам-Гретте Ю. Климат в позднем плиоцене/раннем плиоцене на северо-востоке сибирской Арктики по данным пыльцевых исследований отложений

назад). К началу четвертичного периода возможно широкое распространение и проявлений гидратов газа на этих территориях. Вопрос об исчезновении газовых гидратов, видимо, является дискуссионным в свете современных натуральных и 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 газа¹.

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 формироваться на глубинах более 40 м². Эти данные подтверждены экспериментами. Основные параметры этого процесса – увеличение давления в мерзлых породах за счет водной толщи и расширение зоны стабильности газовых гидратов. Зона гидратообразования ограничивается изобатами 50–60 м³.

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 гидратов метана, основным источником является метан биохимического генезиса⁴. 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 Якутии⁵. Предполагается, что развитие таких ландшафтов имело место как в каргинское время, так и в казанцевское⁶. Аласы и сопутствующие им озера являются генераторами биогенного метана⁷. 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 газогидратов. В морях Западной Арктики чувствовалось и чувствуется в большей мере влияние Атлантического океана. Побережье северо-востока Европы – область несплошного распространения многолетнемерзлых пород. Наблюдается газонасыщение осадков и мощные выбросы газовых струй от дна до почти поверхности воды в областях мелководий Печорского и Карского шельфов. Эти явления связаны с составом осадков (наличие органики) и строением четвертичного чехла шельфа в этой области⁸. С помощью бурения удалось установить, что кровля многолетнемерзлых пород залегает в нескольких десятках метров от поверхности дна, мощность их 20–40 м. Наиболее часто мерзлотные 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 понижается и таяние замедляется⁹.

Угленосные толщи, находящиеся в зоне стабильности гидратов газа, содержат их прослои. 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 умеренного 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 старичными озерами и болотами. Они формировались из гумусового вещества, в спокойных условиях малоподвижного мелководья¹⁰. Математическое моделирование процесса деградации многолетнемерзлых пород в условиях Анабаро-Хатангского района (шельф, глубина 2–40 м) Ленского угленосного бассейна показало¹¹ существенное возрастание скорости деградации многолетнемерзлых пород в зоне кровли моноклинально залегающих угольных пластов, выходящих в зону оттаявших осадков. В результате интенсивного протаивания в кровле угольного пласта формируется талик. В данных условиях процесс деградации многолетнемерзлых пород сопровождается выделением в водный слой и в область талика метана, сорбированного углем. 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 структурах – от 415–450 до 640 м. В аласном пространстве (то есть в пониженных областях рельефа, где происходило вытаивание вечной мерзлоты) мощность мерзлых отложений меняется от 200–300 м на приозерном уровне до 300–400 м на высоких террасах. В районе Новосибирских островов общая мощ-

озера Эльгыгытгын // Квартер во всем его разнообразии... Т. 1. С. 33–36.

¹ Конищев В.Н. Указ. соч.; 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. Физикохимия, теплофизика и механика мерзлых грунтов. М.: МГУ, 2005. С. 300–307.

² 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.

³ Chuvilin E.M., Lupachek M. *Op. cit.*

⁴ Конищев В.Н. Указ. соч.; Чувилин Е.М., Козлова Е.В., Сколотнева Т.С., Ткачев Е.И. Указ. соч.

⁵ Конищев В.Н. Указ. соч.

⁶ Каплина Т.Н. Аласные комплексы Северной Якутии // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 3–17; Она же. Древние аласные комплексы Якутии (сообщение 2) // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 3. С. 20–30.

⁷ Walter K.M., Smith L.S., Chaplin F.S. "III Methane Building From Northern Lakes Present And Future Contribution To Global Methane Budget." *Phil. Trans. R. Soc.* 365 (2007): 1657–1676.

⁸ 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 разнообразии... Т. 2. С. 178–180.

⁹ Садчикова Т.А., Друшиц В.А. Палеогеография проявлений каустобиолитов на континентальной окраине Восточной Арктики // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 2. М.: ГЕОС, 2010. С. 147–160.

¹⁰ Бузов 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.

¹¹ Рокос С.И., Тарасов Г.А. Указ. соч.; Рокос С.И. Указ. соч.

ность многолетнемерзлых и охлажденных пород может достигать 1 км¹. Эти цифры говорят о том, что в субаквальных обстановках – более благоприятные условия для консервации газовых гидратов. По некоторым палеодолинам (Оленек, Хатанга–Анабар) в начале голоцена происходила морская трансгрессия на территорию моря Лаптевых. Этот процесс происходил с катастрофической скоростью². 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 газа³. В тоже время на шельфе Восточной Арктики выделены участки с повышенной концентрацией метана в осадках и придонном слое воды: северо-восточная 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. Новая Сибирь⁴. Эмиссия метана, видимо, связана с деградацией многолетнемерзлых пород, что может вызвать 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 Евразии⁵. 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. Побежье 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 временем позднемиоценовой регрессии. Изучение керна глубоководной скважины, пробуренной в озере Эльгыгытгын на Чукотке, позволило составить непрерывную летопись изменений природных условий в полярных широтах северо-востока Азии с уровня 3,5 млн лет⁶, 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 изменений природных условий должна сохраняться даже в таком крупном регионе. На основании палинологических данных уже в позднем плейстоцене 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 осадков озера Эльгыгытгын, фиксирующий изменение природной среды за последние 350 тыс. лет⁷. Имеются сведения по строению и составу осадков о. Большой Ляховский⁸ и обобщенные данные по наиболее ярким событиям квартала для арктических регионов и северо-востока Евразии в целом⁹.

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 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, регрессивный уровень моря. Количественная оценка продолжительности выделенных выше холодных сухих этапов показывает, что наиболее благоприятными с позиции формирования криолитозоны и сопутствующей ей зоны стабильности газовых гидратов были обстановки в конце плейстоцена, в конце эоплейстоцена, во второй половине раннего неоплейстоцена. Следует обратить внимание на то, что периоды сухих холодных 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 Ляховский¹⁰.

Валдайское время (от 70 до 11 тыс. лет назад) также можно определить как наиболее значимое для формирования и наращивания криолитозоны и зоны стабильности газогидратов на арктической континентальной окраине. Каргинский интерстадиал (средний валдай, период 58–25 тысяч лет назад) отличался весьма низкими температурами, и признаков деградации многолетнемерзлых пород в это время пока не обнаружено¹¹.

¹ Гаврилов А.В. Криолитозона арктического шельфа Восточной Сибири (современное состояние и история развития в среднем плейстоцене-голоцене). Автореф. дисс. ... д. г.-м. н. М.: МГУ. 2008. 42 с.

² Лаврушин Ю.А. Динамика позднечетвертичных океанических событий Западной Арктики и их отражение в природной среде Европейской России // Строение и история развития литосферы. М.: Paulsen. 2010. С. 403–431.

³ Majorowicz J.A., Hanningen P.K. *Op. cit.*

⁴ Кошелева В.А., Яшин Д.С. Донные осадки Арктических морей России. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1999. 286 с.

⁵ Нечаев В.П. Субарктическая криолитозона // Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и сценарии. Атлас-монография. Вып. III / Под ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС, 2010. С. 128–141.

⁶ Андреев А.А., Меллес М., Венрик Ф., Брайхам-Гретте Ю. Указ. соч.

⁷ Матросова Т.В. Климат и растительность анадырского плоскогорья за последние 350 тыс. лет (палинологическая характеристика осадков озера Эльгыгытгын). Автореф. дисс. ... к. геогр. н. М.: МГУ, 2009. 22 с.

⁸ Meyer H., Dereviagin A., Siegert Ch., Schirrmeister L., Hubberten H.-W. "Palaeoclimate Reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia – Hydrogen and Oxygen Isotopes in Ice Wedges." *Permafrost and Periglacial Processes* 13 (2002): 91–105.

⁹ Лаврушин В.А., Алексеев В.Н. Указ. соч.; Фрадкина А.Ф., Гриненко О.В., Лаухин С.А., Нечаев В.П., Андреев А.А., Климанов В.А. Указ. соч.

¹⁰ Meyer H., Dereviagin A., Siegert Ch., Schirrmeister L., Hubberten H.-W. *Op. cit.*

¹¹ 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. А.А. Величко. Вып. II. М.: ГЕОС, 2002. С. 38–55.

Ранний (71–58 тысяч лет назад) и поздний (25–10,3 тысяч лет назад) валдай отвечали ледниковым и перигляциальным условиям.

В летописи осадков озера Эльгыгьттын 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 встречается 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 условия¹.

Межледниковые эпохи имели место также 550 и 450–385 тыс. лет назад².

Хорошо определяется также по палинологическим данным (распространение лесотундры, лиственнично-березовых лесов) потепление в среднем неоплейстоцене (334–301 тыс. лет назад)³.

Наиболее хорошо изученное казанцевское межледниковье (127–114 тыс. лет), особенно в свой оптимум, характеризовалось летними и зимними температурами выше средних. 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 тундры⁴. Эти выводы подтверждаются результатами моделирования состояния криолитозоны для условий казанцевского межледниковья⁵. Можно также рассмотреть изменение природных обстановок в голоцене, но из-за краткости его временных подразделений, видимо эти изменения 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 газовых гидратов, 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 потока⁶. Прогнозируется, что при изменении температуры от -1°C до -15°C в период падения уровня моря, формирование зоны стабильности газовых гидратов 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°C до -1°C разрушение зоны стабильности газогидратов при постепенном потеплении климата может занимать от 2 000 до 14 000 лет⁷. Приведенные выше сценарии видимо нуждаются в привлечении в их построение большего числа 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 присутствуют⁸. Эти материалы дают возможность предполагать, что зона стабильности газовых гидратов, генетически связанная с криолитозоной, при учете эффекта самоконсервации сможет существовать продолжительное время.

Заключение

Гидраты газа сейчас оцениваются как один из будущих источников энергоресурсов. С другой стороны, образование континентальных гидратосодержащих отложений – это природный процесс, связанный с определенными природными обстановками. Этот процесс неотделим от формирования криолитозоны. Следует разделять наличие гидратов газа по количественному признаку. Скопления (залежи) кристаллогидратов встречаются 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 необходимо, 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 невозможно также в областях крупных речных долин и рифтогенных впадин. Проявления сохраняются в зоне метастабильности газовых гидратов и распространяются гораздо шире. Они могут образовываться в современных условиях параллельно с формированием криолитозоны, заполняя поровые пространства незначительной мощности. Видимо разрушение проявлений кристаллогидратов вносит свой вклад в эмиссию метана на акваториях 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 воз-

¹ Алексеев М.Н., Архангелов А.А., Иванова Н.М. Моря Лаптевых и Восточно-Сибирское. Кайнозой // Шельфы Евразии в мезозое и кайнозое: Атлас палеогеографических карт. 1991. Т. 1. С. 1-14–1-22.

² Лаврушин В.А., Алексеев В.Н. Арктические районы.

³ Матросова Т.В. Указ. соч.

⁴ Величко А.А., Нечаев В.П., Баулин В.В., Данилова Н.С. Указ. соч.

⁵ Нечаев В.П. Указ. соч.

⁶ MacDonald G.J. "Role of Methane Clathrates in Past and Future Climates." *Climatic Change* 16 (1990): 247–281.; Соловьев В.А. Условия газогидратоносности и газогидратоносных акваторий морей России // Геология и полезные ископаемые шельфов России / Гл. ред. М.Н. Алексеев. М.: ГЕОС, 2002. С. 179–184.

⁷ MacDonald G.J. *Op. cit.*

⁸ Meyer H., Dereviagin A., Siebert Ch., Schirrmeyer L. Hubberten H.-W. *Op. cit.*

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 зоплейстоцена (1,6 до 0,8 млн лет назад) и раннего неоплейстоцена (730–460 тыс. лет назад). Начиная со среднего неоплейстоцена (427–126 тыс. лет назад), зона стабильности газовых гидратов достигла таких размеров, что она не исчезнет, но может в какой-то степени протаивать. Особое значение приобретают холодные (ледниковые и межледниковые) этапы, если за ними следует интерстадиальное время. В это время отложения, содержащие кристаллогидраты, хорошо сохраняются и на севере региона, а толща многолетнемерзлых пород, содержащая гидраты, может продолжать расти. 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 то же время существуют области, где такие процессы невозможны.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Аветисов Г.П. Гипоцентрация землетрясений моря Бофорта и его обрамления // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Вып. 1. СПб.: ВНИИОГ, 1996. С. 127–131.
2. Агалаков С.Е. Газовые гидраты в туронских отложениях на севере Западной Сибири // Геология нефти и газа. 1997. № 3. С. 16–21.
3. Алексеев М.Н., Архангелов А.А., Иванова Н.М. Моря Лаптевых и Восточно-Сибирское. Кайнозой // Шельфы Евразии в мезозое и кайнозое: Атлас палеогеографических карт. Лландидно: Робертсон Групп, 1991. Т. 1. С. 1-14-1-22.
4. Андреев А.А., Меллес М., Венрик 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 разнообразии. Фундаментальные проблемы, итоги изучения и направления дальнейших исследований: Материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Апатиты, 12–17 сентября 2011 г.). Т. 1. Апатиты, СПб.: Геологический ин-т КНЦ РАН, 2011. С. 33–36.
5. Геология и полезные ископаемые шельфа России: Атлас / Гл. ред. Алексеев М.Н. М.: Научный Мир, 2004. 96 л.
6. Шельфы Евразии в мезозое и кайнозое: Атлас палеогеографических карт / Гл. ред. Алексеев М.Н. Лландидно: Робертсон Групп.. 1991. Т. 2. 129 л.
7. 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.
8. 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. А.А. Величко. Вып. II. М.: ГЕОС, 2002. С. 38–55.
9. Гаврилов А.В. Криолитозона арктического шельфа Восточной Сибири (современное состояние и история развития в среднем плейстоцене-голоцене). Автореф. дисс. ... д. г.-м. н. М.: МГУ. 2008. 42 с.
10. Гинсбург Г.Д. Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. 199 с.
11. Гусев Е.А., Мусатов Е.Е., Рекант П.В. Рудой А.С., Рязанова М.В. Кайнозойский этап развития шельфа моря Лаптевых // Геология морей и океанов: Материалы XII Международной научной конференции (школы) по морской геологии. Т. 2. М.: ГЕОС, 1999. С. 27–30.
12. 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. 27–30.
13. Друшиц 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.
14. 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.
15. Каплина Т.Н. Аласные комплексы Северной Якутии // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 3–17.
16. Каплина Т.Н. Древние аласные комплексы Якутии (сообщение 2) // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 3. С. 20–30.
17. Конищев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Квартер во всем его разнообразии. 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. Апатиты, СПб.: Геологический ин-т КНЦ РАН, 2011. С. 288–290.
18. Кошелева В.А., Яшин Д.С. Донные осадки Арктических морей России / СПб.: ВНИИОкеангеология, 1999. 286 с.
19. Лаврушин В.А., Алексеев В.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.
20. Лаврушин Ю.А. Динамика позднечетвертичных океанических событий Западной Арктики и их отражение в природной среде Европейской России // Строение и история развития литосферы. М.: Paulsen. 2010. С. 403–431.
21. Матросова Т.В. Климат и растительность анадырского плоскогорья за последние 350 тыс. лет (палинологическая характеристика осадков озера Эльгыгытгын). Автореф. дисс. ... к. геогр. н. М.: МГУ, 2009. 22 с.

22. Нечаев В.П. Субарктическая криолитозона // Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и сценарии. Атлас-монография. Вып.к III / Под ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС, 2010. С. 128–141.
23. Ривкина Е., Краев Г., Кривушин К., Лауринавичюс К., Федоров-Давыдов Д., Холодов А., Щербакова В., Гиличинский Д. Метан в вечномёрзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли. 2006. 3. Т. 10. С. 23–41.
24. Ривкина Е.М., Самаркина В.А., Гиличинский Д.А. Метан в многолетнемерзлых породах Колымо-Индибирской низменности // ДАН. 1993. Т. 323. № 2. С. 559–562.
25. 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.
26. Рокос С.И. Многолетнемерзлые отложения шельфа Печорского и Карского морей // Квартер во всем его разнообразии. Фундаментальные проблемы, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Апатиты, 12–13 сентября 2011 г.) Апатиты, СПб. Т. 2. Апатиты, СПб.: Геологический ин-т КНЦ РАН, 2011. С. 178–180.
27. Рокос С.И., Тарасов Г.А. Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 67. М.: ГЕОС. 2007. С. 66–75.
28. Романовский Н.Н., Елисеева А.А., Гаврилов А.В., Типенко Г.С., Хуббертен Х.В. Многолетняя динамика толщ мерзлых пород и зоны стабильности газовых гидратов в рифтовых структурах Арктического шельфа Восточной Сибири (Сообщение 2). Результаты численного моделирования // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 1. С. 29–38.
29. Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В., Гаврилов А.В., Елисеева А.А., Типенко Г.С., Холодов А.Л., Романовский В.Е. Эволюция мерзлых толщ и зоны стабильности гидратов газов в среднем плейстоцене-голоцене на шельфе восточной части Евразийской Арктики // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 4. С. 51–64.
30. Садчикова Т.А., Друшиц В.А. Палеогеография проявлений каустобиолитов на континентальной окраине Восточной Арктики // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 2. М.: ГЕОС, 2010. С. 147–160.
31. 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.
32. Соловьев В.А. Условия газогидратоносности и газогидратоносных акваторий морей России // Геология и полезные ископаемые шельфов России / Гл. ред. М.Н. Алексеев. М.: ГЕОС, 2002. С. 179–184.
33. Фрадкина А.Ф., Гриненко О.В., Лаухин С.А., Нечаев В.П., Андреев А.А., Климанов В.А. Северо-Восток Азии // Изменение климата и ландшафтов за последние 65 млн лет (кайнозой от палеоцена до голоцена) / Ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС, 1999. С. 128–145.
34. Черский Н.В., Царев В.П. Перспективы разработки газогидратных залежей // Исследования и рекомендации по усовершенствованию добычи полезных ископаемых в северных и восточных регионах СССР: Ч. 1 / Под ред. Н.В. Черского. Якутск, 1973. С. 54–60.
35. 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. Физикохимия, теплофизика и механика мерзлых грунтов. М.: МГУ, 2005. С. 300–307.
36. 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.
37. Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А., Чувилин Е.М., Козлова Е.В. Газовые гидраты в отложениях материков и островов // Российский химический журнал. 2003. Т. 47. № 3. С. 80–90.
38. 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. Proceedings of Joint International Conference*. Moscow: All-Russian Scientific and Research Institute of Ocean Geology, 2010, pp. 107–108. (In Russian and in English).
39. 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, volume 1, pp. 371–378.
40. MacDonald G.J. "Role of Methane Clathrates in Past and Future Climates." *Climatic Change* 16 (1990): 247–281.
41. Majorowicz J.A., Hanningen P.K. "Natural Gas Hydrates in the Offshore Beaufort-Mackenzie Basin – Study of Feasible Energy Source II." *Natural Resources Research* 9.3 (2000): 201–214.
42. Meyer H., Dereviagin A., Siebert Ch., Schirmeister L., Hubberten H.-W. "Palaeoclimate Reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia – Hydrogen and Oxygen Isotopes in Ice Wedges." *Permafrost and Periglacial Processes* 13 (2002): 91–105.
43. 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* 912 (2000): 1021–1033.
44. Walter K.M., Smith L.S., Chaplin F.S. "III Methane Building from Northern Lakes Present and Future Contribution to Global Methane Budget" *Phil. Trans. R. Soc.* 365 (2007): 1657–1676.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Друшиц, В. А., Садчикова, Т. А., Сколотнева, Т. С. Предпосылки образования и накопления гидратов газа на суше и шельфе Арктики в квартере / В.А. Друшиц, Т.А. Садчикова, Т.С. Сколотнева // *Пространство и Время*. — 2015. — № 1—2(19—20). — С. 318—26. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271prov_r_st1_2-19_20.2015.95.