



SPE SPE-166925

Реликтовые газовые гидраты и возможность их существования в мёрзлых толщах в пределах Южно-Тамбейского газового месторождения

Е.М. Чувилин, МГУ; В.Е. Тумской, МГУ; Г.С. Типенко, Институт Геоэкологии РАН; А.В. Гаврилов, МГУ; Б.А. Буханов, МГУ; Е.В. Ткачева, МГУ; А. Аудиберт-Хайет, Тоталь; Э.Каукил, Тоталь

Авторское право 2013 г., Общество инженеров нефтегазовой промышленности

Этот доклад был подготовлен для презентации на Конференции SPE по разработке месторождений в осложненных условиях и Арктике 15-17 октября 2013 года в Москве, Россия.

Данный доклад был выбран для проведения презентации Программным комитетом SPE по результатам экспертизы информации, содержащейся в представленном авторами реферате. Экспертиза содержания доклада Обществом инженеров нефтегазовой промышленности не выполнялась, и внесение исправлений и изменений является обязанностью авторов. Материал в том виде, в котором он представлен, не обязательно отражает точку зрения SPE, его должностных лиц или участников. Электронное копирование, распространение или хранение любой части данного доклада без предварительного письменного согласия SPE запрещается. Разрешение на воспроизведение в печатном виде распространяется только на реферат объемом не более 300 слов; при этом копировать иллюстрации не разрешается. Реферат должен содержать явно выраженную ссылку на авторское право SPE.

Резюме

Одной из возможных причин газопроявлений при бурении и эксплуатации промысловых скважин на ряде газовых месторождений Ямала, в том числе в пределах Южно-Тамбейского газового месторождения, могут быть реликтовые внутримёрзлотные газовые гидраты. Для оценки возможности образования и существования реликтовых газогидратов на территории Южно-Тамбейского газового месторождения были проведены математическое и экспериментальное моделирование. Результаты математического моделирования позволили выявить этапы геологической истории, в течение которых зона стабильности газовых гидратов начиналась от земной поверхности, располагаясь в пределах мёрзлых толщ. Впоследствии мёрзлые толщи полностью не протаивали. Была показана высокая сохранность поровых газогидратов в мерзлых образцах при заданных неравновесных условиях, близким к пластовым. На основании результатов математического и экспериментального моделирования сделан вывод о возможности существования реликтовых газовых гидратов на территории Южно-Тамбейского ГМ на глубинах менее 200 м в толщах мерзлых пород благодаря геологическому проявлению эффекта самоконсервации газовых гидратов.

Введение

Внутримёрзлотный газ и газогидратные образования в толщах мёрзлых пород представляют серьёзную геологическую опасность при освоении нефтяных и газовых месторождений (Арэ, 1998; Yakushev, Chuvilin, 2000; Dallimore et al., 2001). Особую опасность представляют крупные газовые скопления, приуроченные к песчаным и супесчаным горизонтам и залегающие в мёрзлых толщах на глубине до 200 метров. Они известны на ряде газовых месторождений Ямала, в том числе в пределах Южно-Тамбейского газового месторождения (ЮТГМ). По ряду косвенных признаков эти скопления могут представлять собой реликтовые газогидраты, образовавшиеся ранее в благоприятных для гидратонакопления условиях (Chuvilin et al., 1998; Якушев 2009). До настоящего времени они могли сохраниться в мёрзлых толщах благодаря геологическому проявлению эффекта самоконсервации газогидратов при отрицательных температурах. Эти газогидратные образования, залегающие выше современной зоны стабильности газогидратов (ЗСГГ), находятся в метастабильном состоянии и очень чувствительны к различным техногенным воздействиям. При бурении и эксплуатации промысловых скважин в районах распространения реликтовых газогидратов возможны различные технические осложнения вплоть до аварий.

Причины возникновения газогидратов в криолитозоне на небольших глубинах

Известно, что зона стабильности природных газовых гидратов в областях распространения многолетнемёрзлых пород находится в настоящее время на глубинах 250-300 метров (Истомин, Якушев,

1992; Collett, Dallimore, 2000). При повышенном содержании более тяжелых гомологов метана она может уменьшаться до 200-150 метров. Однако в процессе эпигенетического промерзания горных пород необходимые условия для гидратообразования могут возникать и на меньших глубинах за счет кристаллизации поровой воды в замкнутых объемах и криогенного концентрирования газа в песчаных линзах и горизонтах.

Другой возможной причиной формирования газовых гидратов в неглубоких слоях криолитозоны является барический фактор, вызванный оледенением или трансгрессией арктического моря (Романовский, 1993; Трофимук и др., 1986; Романовский, Хуббертен, 2006). В результате этого внутримерзлотные газовые скопления на относительно небольших глубинах могли попадать в ЗСГГ и переходить в газогидратное состояние (Chuvilin et al., 1998; Якушев, 2009; Chuvilin, Lupachik, 2011). После регрессии моря или отступления ледника сформированные гидратосодержащие отложения могли оказаться выше кровли ЗСГГ. При этом газогидраты могли законсервироваться за счет проявления эффекта самоконсервации и перейти в реликтовое состояние при условии отсутствия оттаивания пород с поверхности.

В данной работе возможность образования и существования реликтовых газогидратов в верхних горизонтах мёрзлых толщ рассматривается применительно к территории Южно-Тамбейского газового месторождения. Эти исследования базируются на математическом и экспериментальном моделировании, которые проводились для исследуемой территории.

Математическое моделирование мощности криолитозоны и ЗСГГ

Целью математического моделирования было выяснение возможности существования ЗСГГ на небольших глубинах и сохранения их в метастабильном состоянии до настоящего времени. Для этого использовался ретроспективный подход, разработанный применительно к восточно-сибирскому шельфу (Романовский, Тумской, 2011). Основой математической модели служила энтальпийная формулировка задачи Стефана, предложенная в работе А.А. Самарского (Самарский, Моисеенко, 1965). Обобщённое решение задачи Стефана является решением квазилинейного уравнения теплопроводности, выражающего закон сохранения энергии с учетом фазовых превращений. В модели предполагается, что разложение газогидратов происходит в масштабе тысяч лет, система является открытой и поэтому давление предполагается установившимся и равным гидростатическому. Таким образом, мы предполагаем, что скорости изменения отклонения поля давления от гидростатического несравнимо выше скоростей изменения температур для процессов гидратообразования. При сделанных предположениях равновесная кривая для гидратов является функцией глубины. Верхняя граница расчетной области соответствует поверхности земли, на ней задается краевое условие первого рода, т.е. температура. На нижней границе задается температурный градиент, который с учетом теплопроводности пород отражает величину теплового потока из недр Земли. В качестве входных параметров использовались данные, заложенные в геологическую и палеогеографическую модели. Геологическая модель представляла собой обобщенный геологический разрез из нескольких слоев до глубины 5 км, для каждого из которых задавались пористость отложений, их влажность, теплофизические характеристики, температура начала замерзания и т.д. (Кондаков и др., 2011). В связи с крайней скудностью фактических данных о свойствах пород в пределах ЮТГМ использовались данные о сходных отложениях из других районов п-ова Ямал. Палеогеографическая модель являлась основой для задания верхних граничных условий. В ней в первую очередь учитывались климатические изменения, колебания уровня моря и существование покровного оледенения с изменяющейся во времени мощностью. Палеогеографическая модель развития природных условий в пределах ЮТГМ и вообще севера Западной Сибири является наименее определенным элементом в ходе моделирования. До настоящего времени не существует общепризнанной теории развития природной среды в этом регионе. С учетом многочисленных палеогеографических реконструкций различных исследователей и собственных представлений авторов была создана модель, в которой учитывалось существование как оледенения, так и связанных с ним гляциоэвстатических колебаний уровня моря в пределах Ямала (Рис.1).

С учетом предыдущего опыта математического моделирования (Romanovsky et al., 2004 и др.) период моделирования охватывал последние 230 тысяч лет, т.е. с конца среднего плейстоцена до настоящего времени. За этот период при моделировании рассматривалось три оледенения: 200-140, 90-80 и 70-57 тыс. л.н. В остальное время на территории были либо морские, либо субаэральные условия.

Математическое моделирование заключалось в расчете температурного поля до глубины 5 км для последних 230 тысяч лет на основании геологической и палеогеографической моделей. В ходе моделирования отдельные параметры (например, теплопроводность пород, величина теплового потока снизу) варьировались для выяснения чувствительности модели к их значениям.

При моделировании эволюции мощности криолитозоны и ЗСГГ использовались равновесные кривые как для газа природного состава, характерного для продуктивных горизонтов, так и для чистого метана, который хорошо описывает фазовые равновесия для газовых скоплений в верхних горизонтах мёрзлых пород, представленных преимущественно биогенным метаном (Рис.2).

Методика экспериментального моделирования

Методика экспериментального моделирования самоконсервации поровых газогидратов в термобарических условиях, характерных для мёрзлых толщ Южно-Тамбейского газового месторождения, состояла из несколько этапов. Она включала:

- искусственное гидратонасыщение образцов пород, отобранных из мёрзлых горизонтов;
- исследование кинетики диссоциации газогидратов в мёрзлых породах при снижении газового давления ниже линии трехфазового равновесия (газообразная фаза – газовый гидрат – лед);
- оценку эффекта самоконсервации газогидратных образований в мёрзлых породах при неравновесных условиях.

Физическое моделирование самоконсервации газовых гидратов в поровом пространстве пород проводилось на оригинальной экспериментальной установке (Чувиллин, Козлова, 2005; Чувиллин, Гурьева, 2009). Она использовалась для получения мёрзлых гидратонасыщенных образцов пород и для исследования кинетики диссоциации газовых гидратов при отрицательной температуре и пластовых давлениях, характерных для газосодержащих горизонтов. Экспериментальная установка состояла из барокамеры, объемом около 419 см³, рассчитанной на давление до 20 МПа, криотермостата для поддержания температурного режима барокамеры, устройства для преобразования электрических сигналов датчиков в цифровые и компьютера. Точность измерения температуры в барокамере составляла 0,05°С, а давления - 0,005 МПа.

В качестве газа-гидратообразователя использовался метан, поскольку именно его гидраты наиболее распространены в криолитозоне. Фактическая объемная доля метана составляла 99,98% (Чувиллин, Козлова, 2005).

Объектами исследования были природные образцы песка и супеси, отобранные из мёрзлых горизонтов на полуострове Ямал. Характеристика грунтов представлена в таблице 1.

Для создания благоприятных условий для гидратонасыщения в экспериментах использовались образцы с неполной степенью заполнения пор влагой. Их весовая влажность составляла около 17%. Образцы, приготовленные к эксперименту, имели диаметр 4,6 см и высоту 10 см. В барокамере образец грунта замораживался и насыщался охлажденным метаном до давления 5 МПа. Накопление газогидрата в поровом пространстве образцов происходило при отрицательных температурах. Для повышения гидратонакопления в поровом пространстве осуществлялось циклическое промерзание – оттаивание грунтового образца при давлениях выше равновесного. По изменению термобарических условий в ходе экспериментов с использованием PVT метода с учётом сжимаемости проводился расчёт перехода метана в гидратную форму (Чувиллин, Козлова, 2005). При этом рассчитывались основные параметры гидратонакопления: объёмное гидратосодержание (H_v , %), гидратонасыщенность (Sh , %) и коэффициент гидратности (K_h , д.ед.) – доля поровой воды, перешедшей в гидрат, от общего количества воды в образце. Для расчетов параметров гидратосодержания грунтов, содержащих гидрат CH_4 , использовалось гидратное число 5,9.

Насыщенные газогидратом в барокамере образцы грунтов с известными показателями гидратосодержания в дальнейшем использовались для исследования кинетики диссоциации поровых газогидратных образований при снижении равновесного давления. Сброс давления в барокамере проводился до значений 1,3-0,6 МПа при постоянной отрицательной температуре около $-5,2^{\circ}C$, что позволяло проследить кинетику диссоциации газогидратов при термобарических условиях, соответствующих пластовым в интервалах интенсивного газопроявления.

После затухания процесса диссоциации газогидратов в образце мерзлого грунта определялось остаточное гидратосодержание. Полученные в ходе экспериментов по диссоциации поровых газогидратов параметры гидратосодержания использовались для количественной оценки метастабильности газогидратных образований в мёрзлых породах. В качестве параметров, характеризующих метастабильность газогидратов в мёрзлых породах при неравновесных условиях, использовались характеристики остаточного гидратонасыщения пород после затухания диссоциации поровых газогидратов. При этом рассчитывался коэффициент самоконсервации (K_{sc}), представляющий отношение остаточного гидратосодержания мерзлого образца к величине исходного гидратосодержания (в равновесных условиях).

Результаты математического моделирования

Результатами расчетов являлись два типа графиков, отражающих изменение температурных полей в горных породах во времени. Первый тип графиков (Рис. 3) представляет собой собственно изменение температурного поля. Второй тип графиков (Рис. 4) отражает динамику ЗСГГ и представляет собой разность модельного температурного поля и равновесной температуры гидрата газа при соответствующем давлении. Области с отрицательными значениями соответствуют ЗСГГ.

Результаты моделирования показали, что мощная криолитозона формировалась в эпохи оледенений. На рис. 3 показан наиболее достоверный вариант расчетов с учётом принятых допущений. Верификация его

произведена путем сравнения результатов моделирования и современных фактических данных. Согласно опубликованным сведениям (Кондаков и др., 2011) современная мощность криолитозоны составляет в районе ЮТГМ 500-550 м, а температура пород на глубине около 2 км – около 50°C (Скоробогатов и др., 2003). Согласно результатам моделирования, мощности криолитозоны достигали 600 м и более, а мощности мёрзлых толщ были меньше за счет засоленности отложений. Во время морских трансгрессий, обычно следовавших после оледенений, мощность криолитозоны уменьшалась, преимущественно за счёт протаивания снизу. Наиболее мощная ЗСГГ формировалась под ледниками за счет низких температур и дополнительного давления, и в это время она могла достигать глубин 1 км и более (Рис. 4). В эпохи потеплений ЗСГГ частично деградировала. При этом во время морских трансгрессий её деградация происходила медленнее, чем на субазальных этапах, т.к. сохранялось дополнительное давление от морской воды. Сравнение рисунков 4А и 4Б показывает, насколько отличаются зоны стабильности для газов с разным составом. Если эволюция нижней границы ЗСГГ более соответствует приведенной на рис. 4А, то для небольших глубин, где присутствует преимущественно чистый биогенный метан, эволюция кровли ЗСГГ будет ближе к приведенной на рис. 4Б. В эпоху оледенения около 60 тыс. л.н. зона стабильности газогидратов метана достигала поверхности, а впоследствии деградировала. В настоящее время она располагается на глубинах не менее 150 м. На основании этого предполагается, что крупные газопроявления на меньших глубинах могут быть обусловлены, в частности, реликтивными метановыми гидратами в метастабильном состоянии.

Результаты экспериментального моделирования

В ходе искусственного гидратонасыщения в барокамере были получены мерзлые образцы с высоким гидратосодержанием. В равновесных условиях (до снижения давления) насыщенность порового пространства гидратами ($S_{h,in}$, %) в песке достигала 54%, а супеси - около 34% (Рис. 5). При этом около 50% поровой влаги в образцах находилось в гидратной форме. В дальнейшем мёрзлые гидратонасыщенные образцы подвергались испытаниям при неравновесных условиях. Для этого газовое давление в барокамере с образцом при отрицательных температурах, близких к пластовым температурам газовыделяющих горизонтов (-5,2°C), снижалось для песка до 1,3 МПа, а для супеси до 0,6 МПа. Продолжительность экспериментов по изучению кинетики диссоциации газовых гидратов в мёрзлых породах составляла не менее 10 суток. Результаты исследования самоконсервации поровых газовых гидратов в мёрзлых гидратонасыщенных образцах при неравновесных условиях представлены на рис. 5 и в таблице 2.

Анализ кинетики диссоциации поровых газогидратных образований в мёрзлых породах при давлении ниже равновесного показывает, что в первый момент после сброса давления происходит достаточно интенсивное разложение порового гидрата. Со временем интенсивность разложения падает, а в дальнейшем практически затухает (Рис. 5). Это обусловлено проявлением эффекта самоконсервации газогидратов. Суть его заключается в формировании вокруг частиц разлагающегося газогидрата ледяной пленки, которая образуется из водной фазы, возникающей при поверхностном разложении газогидрата в условиях отрицательных температур (Ершов и др., 1991; Истомин и др., 2006). Сравнение кинетики диссоциации порового гидрата в песке и супеси показывает, что супеси в начальный момент диссоциация была более интенсивной, чем в песке, однако и затухание процесса диссоциации в ней происходило быстрее. На проявление самоконсервации порового газогидрата оказывает влияние много факторов: величина давления, при котором происходит изучение, проницаемость образца, а также структурно-текстурные особенности порового гидрата (Chuvilin et al., 2011). В результате проявления эффекта самоконсервации оставшаяся часть неразложившегося порового гидрата может находиться в метастабильном состоянии достаточно длительное время (Ершов и др., 1991, Chuvilin et al., 1998). На момент окончания эксперимента остаточная гидратонасыщенность исследованных образцов составляла 9-15% (Табл. 2). Эксперименты показали, что коэффициент самоконсервации, характеризующий долю сохранившегося газогидрата метана при снижении давления, достигал 0,26-0,27. Расчеты, проведенные на основе экспериментальных данных, свидетельствуют, что объём метана, который может выделиться при оттаивании из остаточного (законсервированного) порового гидрата в пересчете на 1 м³ мёрзлой породы, может достигать 12-17 м³.

Учитывая высокую влажность (льдистость) пород в природных условиях, а также значительно более низкую газопроницаемость пород в массиве, можно ожидать, что сохранность порового гидрата при неравновесных условиях в мёрзлых породах будет выше.

В целом проведенные экспериментальные исследования позволяют говорить о возможности самоконсервации газогидратных образований в толще мёрзлых пород в пределах Южно-Тамбейского газового месторождения и существования там реликтовых газогидратов.

Обсуждение

Результаты математического моделирования показывают, что в геологическом прошлом были периоды, когда ЗСГГ начиналась от земной поверхности (рис. 4). Последний раз это происходило в эпоху оледенений в середине позднего плейстоцена. Впоследствии ЗСГГ частично деградировала совместно с криолитозоной, однако последняя полностью не исчезала. Максимальное заглубление кровли ЗСГГ до 200 м происходило, согласно расчетам, около 50-40 тыс. л.н. Вероятно, часть газовых гидратов могла сохраниться в метастабильном состоянии. В конце позднего плейстоцена они вновь попадали в зону стабильности, которая доходила почти до поверхности земли. Лишь в голоцене кровля ЗСГГ опять опустилась на глубины порядка 150 м. Опускание кровли ЗСГГ в толще мёрзлых пород, как показывают экспериментальные исследования, не должно сопровождаться быстрым разложением внутримёрзлотных газогидратов. Вследствие проявления эффекта самоконсервации газовых гидратов при отрицательных температурах имеет место затухание процессов диссоциации поровых газогидратов и формирование в мёрзлых породах метастабильных (реликтовых) газогидратов. По термодинамическим расчетам, выполненным японскими специалистами (Uchida et al., 2011), период полураспада замороженных газогидратных образований при неравновесных условиях (давление 0,1 МПа) сильно зависит от размера газогидратных частиц. Так, при увеличении размера газогидратных частиц от 10 микрон до 1 мм время полураспада газогидрата увеличивается в 10000 раз.

По нашим оценкам, при благоприятных мерзлотно-геологических условиях (высокая льдистость мёрзлых пород, низкие отрицательные температуры, отсутствии процессов оттаивания и массопереноса) реликтовые газогидраты в верхних горизонтах мёрзлых толщ могут сохраняться многие сотни и тысячи лет.

Заключение

Проведенные исследования позволяют предполагать, что в настоящее время в толщах мёрзлых пород в пределах Южно-Тамбейского газового месторождения возможно существование реликтовых метановых газовых гидратов на глубинах до 150-200 м, а глубже, в пределах зоны стабильности – внутримёрзлотных и подмерзлотных газовых гидратов более сложного состава. Реликтовые газогидратные образования в мёрзлых породах отличаются большой чувствительностью к тепловым и химическим воздействиям. Повышение температуры и оттаивание гидратосодержащих мёрзлых пород, находящихся в метастабильном состоянии вследствие самоконсервации, будет сопровождаться активной диссоциацией газовых гидратов и эмиссией метана. Это может быть вызвано и различными химическими процессами при бурении скважин (например, воздействием промывочных жидкостей). Также возможно нарушение метастабильности газогидратных образований за счет изменения условий существования криопэггов. Все эти процессы и явления необходимо учитывать при проведении работ на месторождении в целях недопущения аварийных ситуаций. Математическое и экспериментальное моделирование было выполнено для полуострова Ямал с параметрами для Южно-Тамбейского газового месторождения. Но эта ситуация, с неглубоко залегающим внутримёрзлотным газом не является спецификой Ямала. Другие арктические районы, которые имели сходные ледниково-эвстатические и PVT изменения также могут содержать реликтовые газогидраты в верхних горизонтах мёрзлых толщ.

Благодарности

Эта работа выполнена в сотрудничестве между ГОИН, МГУ и Тоталь. Авторы выражают благодарность различным организациям за разрешение публикации. Они также выражают благодарность С.А. Огородову, М.Сакле, С. Чаннелири, П. Латтесу, Дж-Б. Гелдорфу за плодотворную дискуссию.

Литература

1. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли, 1998, т. II, №4, с. 42-50.
2. Даллиморе С.П., Чувилин Е.М., Якушев В.С. Природный газ в вечной мерзлоте Северной Канады и России: генезис и формы существования. Материалы четвертой конференции геокриологов России. т.3, 2001, М, МГУ, с. 295-300.
3. Ершов Э.Д., Лебеденко Ю.П., Чувилин Е.М., Истомин В.А., Якушев В.С. Особенности существования газовых гидратов в криолитозоне // Доклады АН СССР. 1991. Т. 321. №4. с.788-791.
4. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 235 с.
5. Истомин В.А., Якушев В.С., Махонина Н.А., Квон В. Г., Чувилин Е. М. Самоконсервация газовых гидратов // Газовая промышленность. Спец.выпуск: Газовые гидраты. 2006. с.36-46.
6. Кондаков В.В., Кусова О.Ф., Кондаков М.В. Геокриологические условия северо-восточной части полуострова Ямал. Материалы четвертой конференции геокриологов России. М. Университетская книга, 2011, с.89-94.
7. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1993, 336 с.
8. Романовский Н.Н., Тумской В.Е. Ретроспективный подход к оценке современного распространения и строения шельфовой криолитозоны Восточной Арктики // Криосфера Земли, 2011, т. XV, №1, с. 3-14.
9. Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В. Криолитозона и зона стабильности гидратов газов на шельфе моря Лаптевых (основные результаты десяти лет российско-германских исследований) // Криосфера Земли, 2006, т. X, №3, с. 61-68.
10. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичные схемы сквозного счета в многомерной задаче Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. №5, с. 816-827.

11. Скоробогатов В.А., Строганов Л.В., Копеев В.Д. Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. М.: Недра, 2003. 351 с.
12. Трофимук А.А., Макогон Ю.Ф., Якушев В.С. Влияние динамики зон гидратообразования на температурный режим пород в области распространения криолитозоны // Геология и геофизика. 1986. №11. с. 3-10.
13. Чувиллин Е.М., Козлова Е.В. Исследования формирования мёрзлых гидратосодержащих пород // Криосфера Земли, т. 9, №1, 2005, с. 73-80.
14. Чувиллин Е.М., Гурьева О.М. Экспериментальное изучение образования гидратов CO₂ в поровом пространстве промерзающих и мёрзлых пород // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, №3, с.70-79.
15. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.
16. Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. Gas and gas hydrates in the permafrost of Bovanenkovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia. 1998. Polarforschung 68, (erschienen 2000): 215-219.
17. Chuvilin E.M., Lupachik M.V. Investigation of gas hydrate formation in frozen and thawing gas saturated sediments / Proceeding of the 7th International conference on Gas Hydrates, Edinburgh, United Kingdom, 2011, <http://www.pet.hw.ac.uk/icgh7/papers/icgh2011Final00289.pdf>
18. Chuvilin E.M., Buhanov B.A., Guryeva O.M., Istomin V.A., Takeya S., Hachikubo A. Experimental study of self-preservation mechanisms during gas hydrate decomposition in frozen sediments. / Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates, Edinburgh, United Kingdom, 2011, <http://www.pet.hw.ac.uk/icgh7/papers/icgh2011Final00103.pdf>
19. Collett T.S, Dallimore S.R. Permafrost-Associated Gas Hydrate. In: Max M, editor. Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments. Kluwer Academic Publishers, 2000. p. 43-60.
20. Romanovsky N.N., Hubberten H.-W., Gavrillov A.V. Permafrost of the East Siberian shelf and coastal lowlands // Quaternary Science Review. 2004. Vol. 23. №11-13, pp. 1359-1369.
21. Uchida T., Sakurai T., Hondoh T. Ice-shielding for self-preservation of gas hydrates during temperature ramping test at atmospheric pressure. Physics and Chemistry of Ice. Edited by Y.Furukawa, G. Sasaki, T.Uchida, N.Watanabe.- Hokkaido University Press, 2011. Pp. 283-291.
22. Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Natural gas and hydrate accumulation within permafrost in Russia. // Cold Regions Science and Technology, 2000, №31, pp.189 – 197.

Таблица 1. Характеристика грунтов

Тип грунта	Содержание частиц в каждой фракции, %			Минеральный состав, %	Засоленность, %
	1-0.05 мм	0.05 - 0.005 мм	<0.005 мм		
Песок	89,9	6,1	4,0	Кварц - 93,7	0,068
Супесь	59,9	28,9	11,2	Кварц - 59,5 Альбит - 22,0 Микроклин -13,6	0,178

Таблица 2. Основные характеристики метастабильности гидрата метана в исследуемых образцах

Образец грунта	Условия диссоциации		Характеристики гидратосодержания				K _{sp} , д.ед.
			Начальные (до опыта)		Конечные (после опыта)		
	P _d , МПа	T _d , °C	S _{h,in} , %	K _{h,in} , д.ед.	S _{h,f} , %	K _{h,f} , д.ед.	
Песок, W=17%	1,3	-5,2	54	0,51	15	0,14	0,27
Супесь, W=17%	0,6	-5,2	34	0,47	9	0,12	0,26

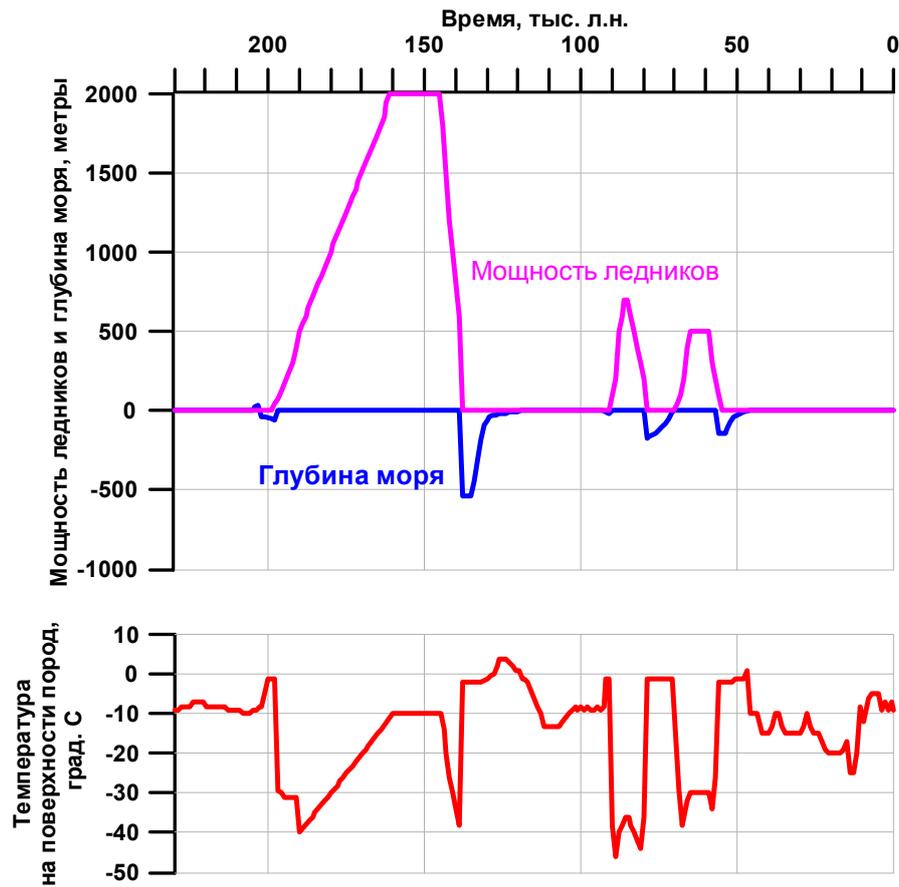


Рис. 1. Изменения основных природных характеристик, принятые при моделировании.

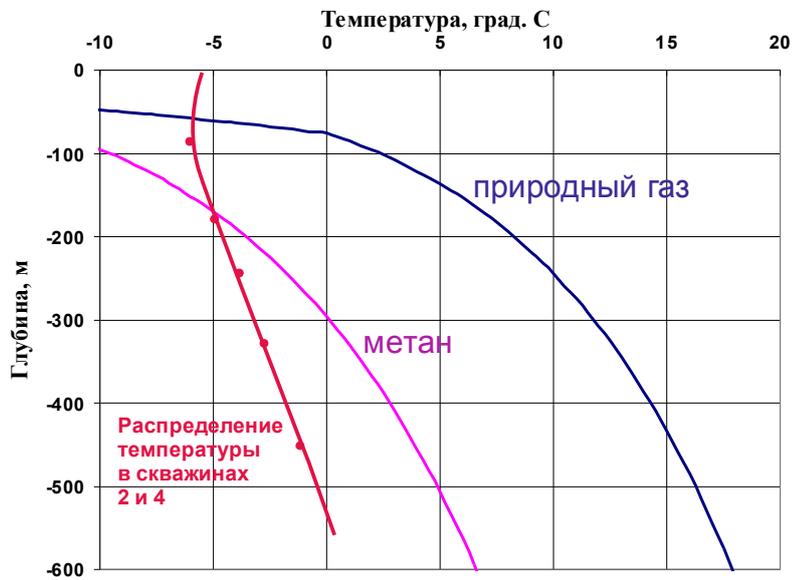


Рис. 2. Равновесные кривые для газа природного состава и чистого метана. Современное распределение температур пород по глубине в пределах ЮТГМ показано по данным В.В. Кондакова и соавторов (2011).

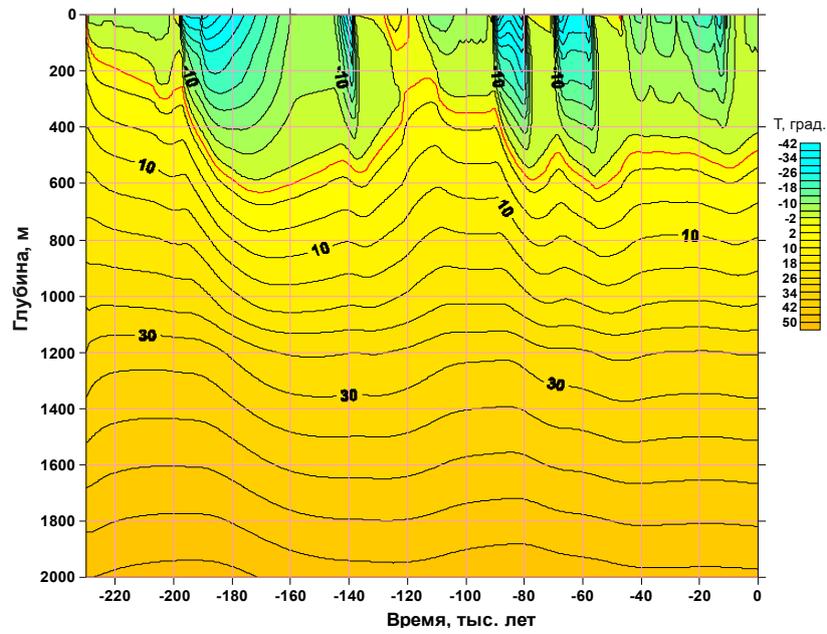
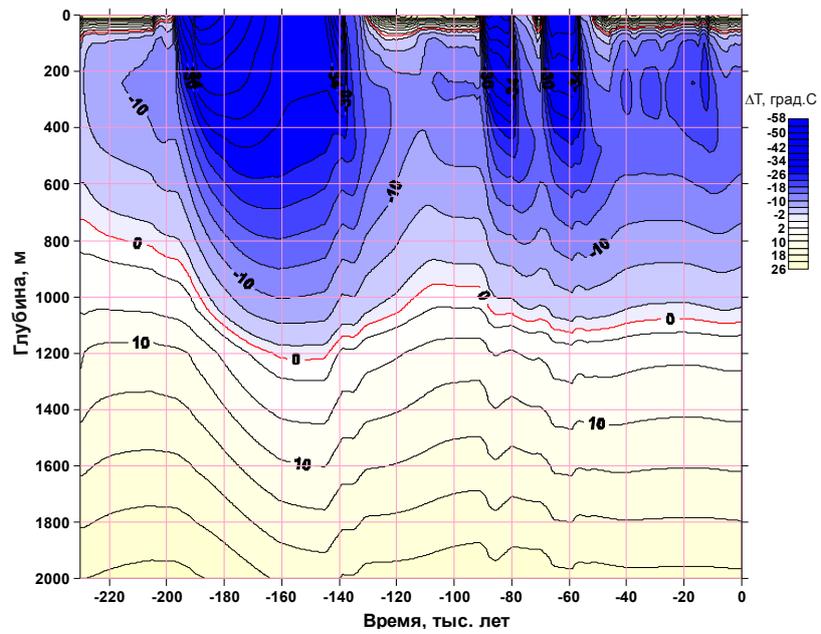
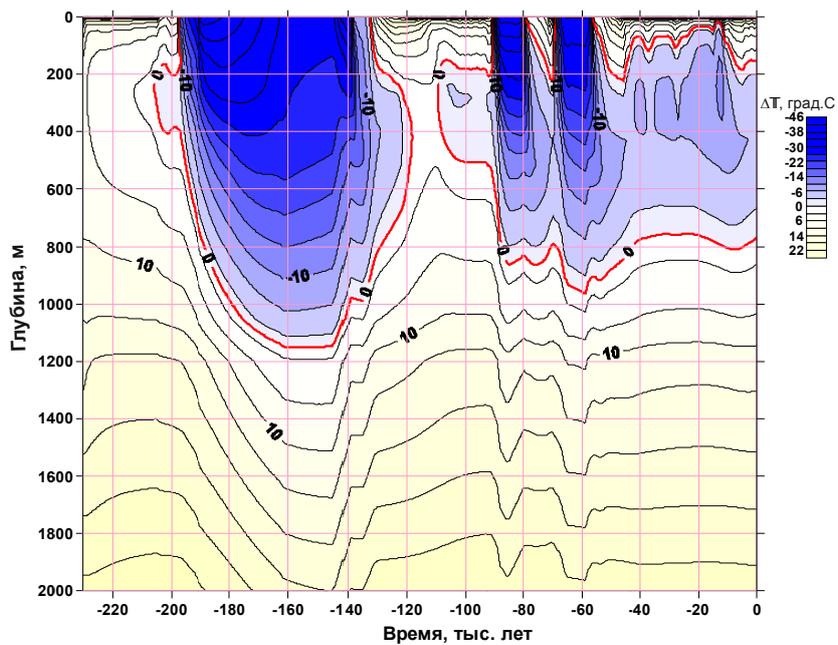


Рис. 3. Изменение мощности криолитозоны за последние 230 тыс. лет.



A



Б

Рис. 4. Динамика зоны стабильности гидратов газов во времени: А – при использовании равновесной кривой для природного газа, Б - при использовании равновесной кривой для чистого метана.

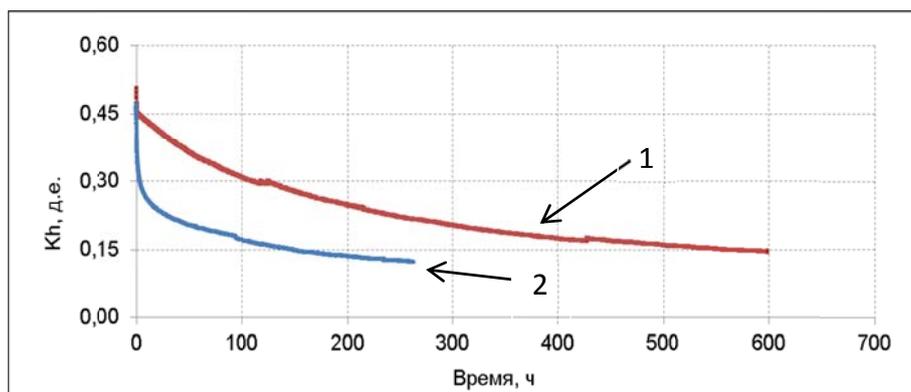


Рис. 5. Кинетика диссоциации гидрата метана в искусственно гидратонасыщенных образцах мёрзлых пород при снижении давления в песке до 1,3 МПа (1), супеси до 0,6 МПа (2) при температуре $-5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.