НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 62–68 http://www.izdatgeo.ru

ГИДРАТООБРАЗОВАНИЕ

УДК 550.361

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В КРИОЛИТОЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А.Д. Дучков, Л.С. Соколова, Д.Е. Аюнов, М.Е. Пермяков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, DuchkovAD@ipgg.nsc.ru

Рассмотрен вопрос о возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири. С использованием в основном геотермических данных построена серия карт, характеризующих параметры криолитозоны и сопровождающих ее зон стабильности гидратов углекислого газа и метана. Показано, что захоронение CO_2 в мерзлотных разрезах возможно, причем закачку газа целесообразно производить в коллекторы, расположенные глубже соответствующей зоны стабильности. В этом случае экраном для углекислого газа будут служить глинистые слои, зона стабильности гидратов CO_2, и наконец, слой мерзлых пород.

Криолитозона Западной Сибири, захоронение углекислого газа, зоны стабильности гидратов углекислого газа и метана

ASSESMENT OF POTENTIAL OF WEST SIBERIAN PERMAFROST FOR THE CARBON DIOXIDE STORAGE

A.D. Duchkov, L.S. Sokolova, D.E. Ayunov, M.E. Permyakov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, av. Acad. Koptug, 3, Russia, DuchkovAD@ipgg.nsc.ru

A feasibility of carbon dioxide storage in the West Siberian permafrost has been studied. Using mainly geothermic data, the authors have made up a set of maps characterizing the parameters of permafrost and the stable zones of carbon dioxide and methane hydrates. It has been shown that the storage of CO_2 in the sections with permafrost is possible and that the gas has to be pumped into the collectors located below the zone of hydrate stability. In this case, the clay layers, the stability zone of CO_2 hydrates and, after all, the frozen rocks layer will serve as a screen for carbon dioxide.

West Siberian permafrost, storage of carbon dioxide, zones of stability of carbon dioxide and methane hydrates

ВВЕДЕНИЕ

Мировое сообщество озабочено проблемой потепления климата, которое связывают главным образом с быстрым ростом содержания парниковых газов (в основном CO_2 и CH_4) в атмосфере. Предполагается, например, что к 2030 г. концентрация CO_2 может возрасти более чем в два раза по сравнению с 1990 г. Киотским соглашением (декабрь 1997 г.) для стабилизации обстановки был предложен комплекс мер, который в течение последующих 50 лет должен привести к снижению до 60 % поступлений парниковых газов в атмосферу [*Николаев, 2008*]. Свои обязательства в этом плане имеет и Россия, подписавшая это соглашение. Комплекс мер включает не только внедрение новых технологических схем, переход на новые источники энергии, но и извлечение CO_2 из атмосферы и захоронение его в подземных формациях. Нефтяная индустрия уже практикует захоронение CO_2 в нефтегазовых коллекторах. В качестве подходящих геологических объектов рассматриваются также глубоко залегающие отработанные угольные пласты, соляные шахты, а также коллекторы, перекрытые сплошным слоем многолетнемерзлых пород [*Advances..., 2006; Chuvilin et al., 2007*].

В настоящей работе рассматривается принципиальная возможность захоронения CO_2 (в газообразном или жидком состоянии) в криолитозоне Западной Сибири. Именно в этом регионе сосредоточены наиболее мощные в Сибири источники CO_2, связанные с месторождениями нефти и газа,

© А.Д. Дучков, Л.С. Соколова, Д.Е. Аюнов, М.Е. Пермяков, 2009

нефтеперерабатывающими заводами, тепловыми электростанциями. В перспективе проблема сокращения содержания CO_2 в атмосфере здесь неизбежно станет актуальной, и наличие криолитозоны, а также обычно сопутствующей ей зоны стабильности гидратов углекислого газа (ЗСГУ), могло бы помочь в ее решении. Для оценки экранирующих возможностей указанных объектов была построена серия генерализованных карт, характеризующих в общих чертах параметры криолитозоны и зоны стабильности гидратов CO_2. Так как при захоронении углекислый газ неизбежно будет смешиваться и вступать во взаимодействие с обычно содержащимся в коллекторах метаном, то охарактеризована также зона стабильности гидратов метана (ЗСГМ).

МЕТОДИКА

Известно, что в большинстве случаев мерзлые льдонасыщенные породы не проницаемы для воды и газа [*Melnikov, Drozdov, 2006*], и, следовательно, сама мерзлота не может рассматриваться в качестве природного резервуара для закачки газа или жидкостей (нет достаточных свободных объемов). Подходящим объектом для захоронения CO_2 могут служить подмерзлотные коллекторы, а мерзлота в этом случае будет экраном, препятствующим выходу газа из расположенных ниже ловушек. Очевидно также, что экранирующие свойства мерзлоты должна усиливать ЗСГУ, которая сформировалась одновременно с мерзлотой при похолодании климата в плейстоцене. В этой связи нами определено расположение верхней и нижней границ криолитозоны Западной Сибири (нулевые изотермы) и зон стабильности гидратов углекислого газа и метана. Все оценки выполнены по данным о температурном поле осадочного чехла Западной Сибири, собранным большим коллективом исследователей при подготовке электронного “Геотермического атласа Сибири” [*Дучков, Соколова, 2003*]. База данных включает результаты измерений температуры примерно по 500 скважинам глубиной от 100 до 4000 м, расположенным на 380 участках. На ее основе и с учетом материалов работ [*Балобаев, 1991; Дучков и др., 1995; Duchkov, 2006; Melnikov, Drozdov, 2006*] построены в программе Arc-View карты расположения в разрезе изотерм 0 °С, достаточно точно определяющих верхнюю (над погребенной мерзлотой) и нижнюю границы мерзлого слоя. Развитие зон стабильности газогидратов (ЗСГ) на континентах, их образование и распад в целом повторяют эволюцию мерзлоты. При изменении контура мерзлого слоя изменяются и параметры ЗСГ. Эти зоны не имеют четких литологических или фазовых границ. Они выделяют часть разреза, в котором существуют в данное время благоприятные условия (низкие температуры и высокие давления) для формирования газовых гидратов [*Истомин, Якушев, 1992*]. В отличие от мерзлоты границы ЗСГ определяются не только температурой, но и давлением, которое при расчетах принималось равным гидростатическому. Для построения карт современных границ зон стабильности гидратов углекислого газа и метана кроме геотермической информации использовались также фазовые диаграммы систем $H_2O–CO_2$ и $H_2O–CH_4$ [*Истомин, Якушев, 1992; Jadhawar et al., 2006*], которые приведены на рис. 1. Термограмма каждой из скважин сравнивалась с диаграммой для CO_2 или CH_4 и фиксировались точки их пересечения (глубины верхней и нижней границ), по которым строились соответствующие карты. В данной статье представлены и анализируются только карты нижних границ мерзлоты и зон стабильности газовых гидратов, что достаточно для обсуждения проблемы захоронения CO_2. Перейдем к рассмотрению полученных результатов.

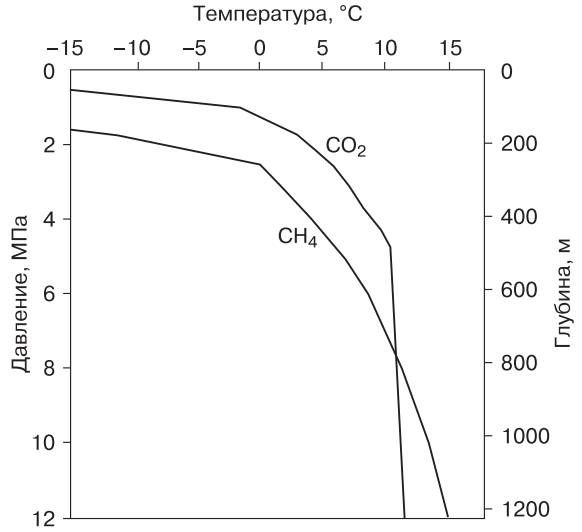

Рис. 1. Фазовые диаграммы для систем $H_2O–CO_2$ и $H_2O–CH_4$ [*Истомин, Якушев, 1992; Jadhawar et al., 2006*].

КРИОЛИТОЗОНА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Многолетнемерзлые породы присутствуют в верхней части осадочного чехла Западно-Сибирской плиты вплоть до широтного течения Оби (до 60–61° с.ш.). Геокриологи выделяют в Западной Сибири несколько типов криолитозоны, из которых для нас здесь важно отметить лишь непрерывную (сплошную, сливную), начинающуюся практически с поверхности, и погребенную мерзлоту. Непрерывная мерзлота занимает всю северную часть региона, заканчиваясь на западе примерно

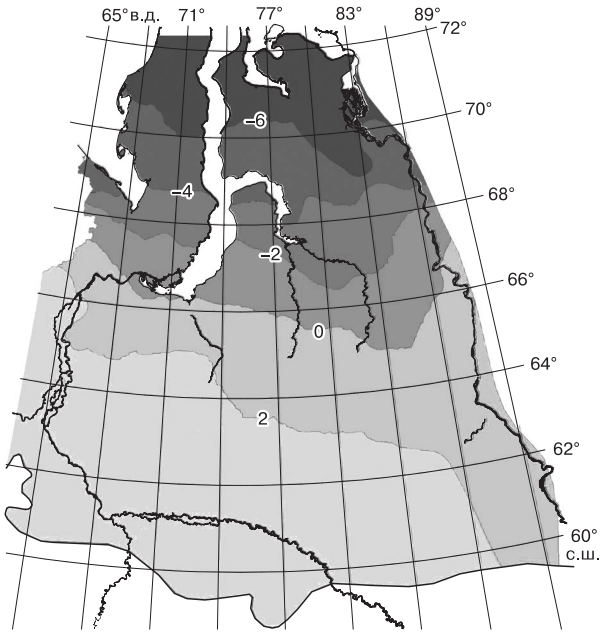

Рис. 2. Распределение температуры ($T_п$, °С) земной поверхности (температура горных пород на глубине 15–20 м) в Западной Сибири.

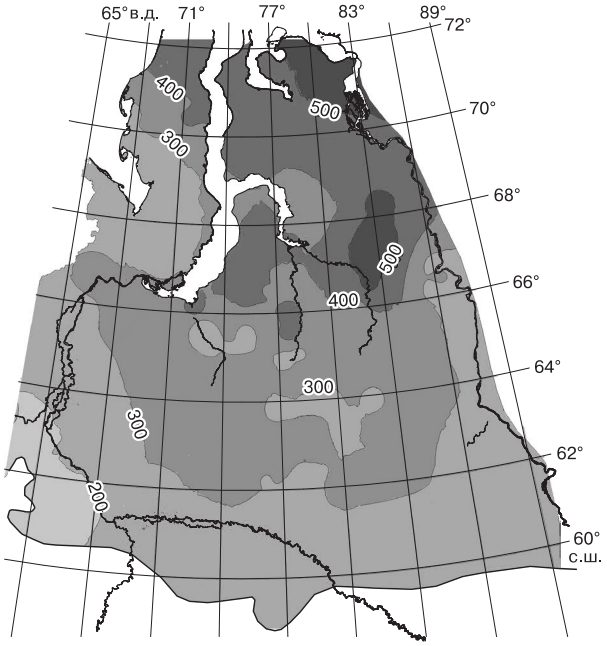

Рис. 3. Глубина расположения нижней границы криолитозоны в Западной Сибири (глубина от земной поверхности, м).

на широте Полярного круга (66°30′ с.ш.), а на востоке – на 65° с.ш. Южнее она постепенно оттаивает с поверхности и перекрывается слоем талых пород, превращаясь в погребенную мерзлоту. Мощность слоя талых пород определяется положением нулевой изотермы, которая соответствует верхней границе криолитозоны. Глубина залегания верхней границы определяется в основном поверхностной температурой ($T_п$). При решении теплофизических задач она принимается равной среднегодовой температуре пород на глубине подошвы слоя годовых колебаний (15–20 м). В Западной Сибири $T_п$ примерно на 3–5 °С (в зависимости от широты) превышает среднегодовую температуру воздуха [*Дучков и др., 1995*].

Распределение $T_п$ на территории Западной Сибири приведено на рис. 2. Непрерывная (сливная, сплошная) мерзлота формируется и сохраняется в тех районах, где $T_п < 0$. При $T_п > 0$ начинает формироваться погребенная мерзлота, верхняя граница которой располагается на глубине от десятков метров на 66–65° с.ш. до 120–140 м на 62° с.ш. Положение нижней границы криолитозоны (рис. 3) определяется температурными условиями холодных эпох в верхнем плейстоцене и внутриземным тепловым потоком, ограничивающим распространение холодной климатической волны. Наиболее глубоко (до 500–600 м) мерзлота опускается на Крайнем Севере. Южнее 66–65° с.ш. (в зависимости от долготы) монолит многолетнемерзлых пород разбивается таликами на отдельные блоки. Количество таликов увеличивается к югу. При этом нижняя граница мерзлоты постепенно поднимается до 300 м на широтах 64–62° и южнее смыкается с верхней границей. Мерзлота полностью деградирует при $T_п > 3–4$ °С.

Как отмечалось выше, наиболее подходящим объектом для захоронения CO_2 являются подмерзлотные коллекторы и в первую очередь в области распространения непрерывной мерзлоты. Только в этом случае можно быть уверенным в надежности экранирующих свойств мерзлоты. Перемещение вверх вследствие потепления климата нижней границы сплошной мерзлоты происходит крайне медленно, поэтому стабильная сплошная мерзлота, которая практически является идеальным экраном для удержания закачиваемого в нижерасположенные резервуары углекислого газа, будет сохраняться здесь многие сотни лет. Погребенная мерзлота (южнее 66–65° с.ш.), разбитая таликами на отдельные блоки, уже не является монолитным телом и, соответственно, не может быть рекомендована в качестве экрана при захоронении CO_2 из-за возможности активного водо- или газообмена между сравнительно глубокими горизонтами и поверхностью. Сделанные выводы могут быть уточнены при учете экранирующих свойств зоны стабильности гидратов CO_2.

ЗОНА СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

На Крайнем Севере кровля зоны стабильности гидратов CO_2 располагается на глубинах 90–100 м. Южнее (на широтах 64–62°) она погружается до 140–150 м в связи с образованием над мерзлотой слоя талых пород с положительной температурой. Нижняя граница ЗСГУ (рис. 4) в целом повторяет очертания подошвы криолитозоны, но располагается ниже последней. Максимальная мощность зоны стабильности CO_2 наблюдается в северо-восточной части плиты, здесь ее нижняя граница опускается до 700–800 м. К югу и особенно к юго-западу мощность ЗСГУ уменьшается, а нижняя граница поднимается, хотя и не быстро. Так, на широте 62° с.ш. она располагается все еще на уровне 500–600 м, что объясняется охлаждающим влиянием достаточно глубоко расположенной погребенной мерзлоты, вокруг которой температура близка к 0 °С. Лишь после полного исчезновения мерзлоты и прогревания пород (уже за пределами обозначенной на рис. 4 площади) нижняя граница ЗСГУ резко поднимается и смыкается с верхней.

Таким образом, характеризуя структуру зоны стабильности гидрата CO_2, отметим, что ее нижняя граница повсеместно располагается глубже мерзлого слоя, а сама ЗСГУ занимает огромный объем как мерзлых, так и талых осадочных пород не только в пределах распространения сплошной мерзлоты, но и на юге, где сохраняется погребенная мерзлота. При попадании газообразного или жидкого CO_2 в водонасыщенную талую часть ЗСГУ определенные порции газа могут перейти в гидратную форму, увеличивая тем самым эффективную емкость коллектора (в каждом объеме гидрата содержится 160–170 объемов газа) и обеспечивая бóльшую стабильность захороненного объема CO_2. Важно отметить, что экранирующий эффект зоны стабильности гидратов сохраняется и в области распространения погребенной мерзлоты при незначительных размерах таликовых зон. В этом случае они, скорее всего, не будут нарушать общие контуры ЗСГУ, определяемые сплошной или погребенной мерзлотой. В то же время весьма вероятно, что при закачке углекислого газа в расположенный в пределах ЗСГУ коллектор могут возникнуть технические проблемы, связанные с быстрым формированием вокруг скважины гидратной пробки, препятствующей дальнейшему продвижению газа. Подобные технологические вопросы требуют специального теоретического и экспериментального изучения и от их успешного решения зависит перспективность захоронения углекислого газа непосредственно в талую часть ЗСГУ.

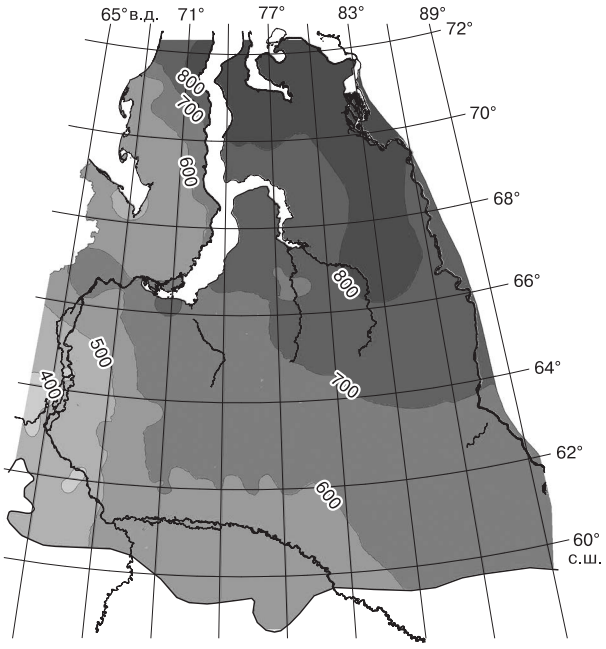

Рис. 4. Глубина расположения нижней границы зоны стабильности гидратов углекислого газа в Западной Сибири (глубина от земной поверхности, м).

Проведенные исследования позволили получить самые общие представления о потенциальных возможностях захоронения CO_2 в криолитозоне Западной Сибири. Анализ результатов показывает, что наиболее целесообразно закачивать CO_2 в коллекторы, расположенные ниже ЗСГУ (сеноманские или более глубоко расположенные отложения). В этом случае выход CO_2 из ловушек будет сдерживаться сначала глинистыми покрышками коллекторов, а затем зоной стабильности, где газ, войдя в контакт с водой, может перейти в гидратную форму. Это не только позволит закрепить газ, но и создаст новое препятствие (непроницаемый слой осадочных пород, сцементированных гидратом) на пути его следующих порций. Наконец, последним экраном на пути газа будет непосредственно слой мерзлых пород, особенно в его монолитной части. Представляется, что столь мощный заслон обеспечит надежное и длительное захоронение излишков углекислого газа. Однако для более конкретных выводов по данной проблеме (вплоть до выделения перспективных для захоронения структур) необходимо проведение специальных исследований на территории развития криолитозоны Западной Сибири.

ЗОНА СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ МЕТАНА

Как отмечалось выше, углекислый газ при захоронении может смешиваться с метаном, который обычно содержится в коллекторах. Это является одной из причин рассмотрения в данной работе расположения зоны стабильности гидратов метана. Фазовые диаграммы смесей этих газов будут располагаться между графиками, приведенными на рис. 1 [*Jadhawar et al., 2006*]. Соответственно, зоны стабильности гидратов смешанных газов будут находиться между ЗСГУ и ЗСГМ. Таким образом, имея контуры зон стабильности гидратов CO_2 и CH_4, можно судить о расположении зоны стабильности смеси этих газов. В то же время ЗСГМ представляет интерес и как часть разреза, в котором могут формироваться залежи гидратов метана, содержащие значительные запасы природного газа.

Согласно расчетам, верхняя граница зоны стабильности гидратов метана располагается примерно на 100 м глубже, чем кровля ЗСГУ. В северной части региона она залегает на глубине 200 м, погружаясь южнее до 230–250 м. Пространственные изменения нижней границы ЗСГМ более значительны (рис. 5). Повсеместно она опускается ниже подошвы криолитозоны. Наибольшую мощность ЗСГМ имеет в северо-восточной части плиты, с нижней границей на глубинах 700–900 м (т. е. примерно совпадает с нижней границей ЗСГУ). К юго-западу и югу нижняя граница поднимается до 300 м и постепенно смыкается с верхней. В целом параметры зон стабильности гидратов метана и углекислого газа имеют много общего. Различия (в частности, несовпадения верхних границ, а также нижних границ в южной части территории) связаны с особенностями фазовых диаграмм (см. рис. 1). В ЗСГМ входят в основном отложения палеогена и частично верхнего мела. На севере региона в непосредственной близости от подошвы ЗСГМ находятся газовые залежи сеноманского горизонта.

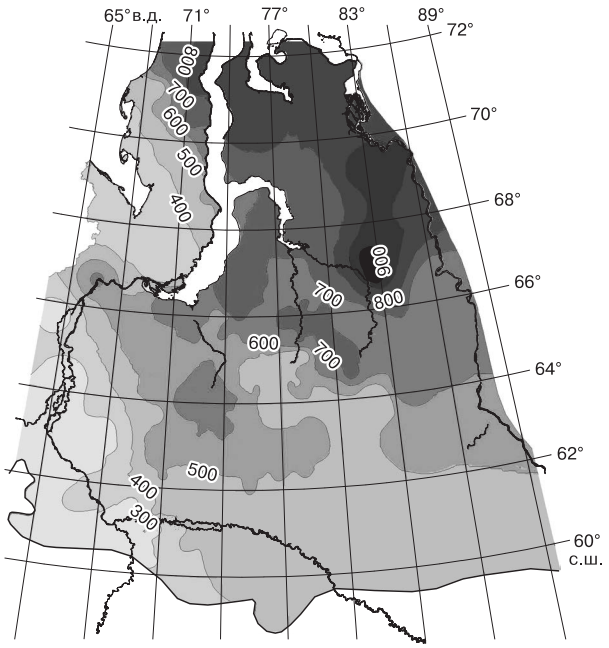

Рис. 5. Глубина расположения нижней границы зоны стабильности гидратов метана в Западной Сибири (глубина от земной поверхности, м).

В течение длительного времени перспективы обнаружения в Западной Сибири скоплений гидратов метана оцениваются весьма высоко [*Истомин, Якушев, 1992*]. Так, уже более 40 лет считается, что гидраты метана присутствуют в верхней части (входящей в ЗСГМ) залежи Мессояхского газового месторождения, залегающего в породах сеноманского яруса. В то же время высказываются и достаточно обоснованные сомнения на этот счет [*Гинсбург и др., 2000*]. Есть основания полагать, что более благоприятные условия для формирования скоплений гидратов метана существуют в коллекторах туронского яруса, залегающих выше сеноманских отложений, например, в пределах Восточно-Мессояхской площади [*Агалаков и др., 2001*]. Однако приходится констатировать, что на севере Сибири (в том числе в Западной Сибири) до сих пор природные газовые гидраты в керне скважин не поднимались, несмотря на значительные объемы бурения и косвенные признаки их возможного присутствия. На наш взгляд, в значительной степени прояснить ситуацию могло бы проведение в Западной Сибири специального бурения, ориентированного на поиски газовых гидратов в перспективных районах. Хотя возможно, есть и объективные причины отсутствия прогресса при поисках скоплений гидратов метана в Западной Сибири.

Наиболее часто обсуждаются два механизма формирования скоплений газогидратов в районах распространения многолетнемерзлых пород [*Истомин, Якушев, 1992*]. Во-первых, формирование гидратов возможно при вхождении в плейстоцене ранее образовавшихся газовых месторождений в зону стабильности гидратов метана (предполагается, что именно это и произошло с залежью Мессояхского месторождения). Однако в Западной Сибири основной газовый потенциал связан с сеноманскими отложениями, которые размещены в целом глубже ЗСГМ, и пока не разведано значительных скоплений газа в вышерасположенных отложениях. Во-вторых, гидратная залежь может образоваться при поступлении природно-

го газа из более глубоких горизонтов в зону стабильности. Последний механизм может быть реализован только в процессе формирования ЗСГМ (опускания ее нижней границы) в пределах водонасыщенного коллектора при одновременном поступлении в этот коллектор достаточного количества метана. Именно такие условия сложились в плейстоцене в осадках над газовым месторождением Маллик в дельте р. Маккензи (арктическое побережье Канады). Это и привело к формированию здесь на глубине 890–1100 м (нижняя часть ЗСГМ) в грубозернистых песках олигоцена мощной залежи гидратов метана (при бурении поднято порядка 110 м гидратсодержащих осадков) [*Scientific..., 2005*]. Образованию залежи способствовало и наличие в этой части Североамериканского континента мощной толщи кайнозойских отложений (в том числе высокопористых) – порядка 2 км. Установлено, что газ при формировании гидратов поступал в кайнозойские отложения по разломной зоне с глубины 4–5 км. Судя по этим данным, на севере Западной Сибири имеются все перечисленные условия, необходимые для реализации второго механизма, кроме одного и, возможно, основного: здесь нет подходящих для накопления гидратов коллекторов, так как в отличие от Северной Америки на севере Западной Сибири кайнозойские отложения практически не развиты – в Ямало-Тазовском и Енисейском районах мощность отложений неогена не превышает 200 м, а палеогена – 300–400 м [*Волкова и др., 2002*].

ВЫВОДЫ

Данные о температуре осадочного чехла Западно-Сибирской плиты использованы для изучения структуры слоя многолетней мерзлоты и зон стабильности гидратов основных парниковых газов: углекислого газа и метана. Анализ результатов (карты верхних и нижних границ, мощностей) показал, что мерзлота и зоны стабильности имеют общие очертания, но существенно различаются по мощности. Нижние границы зон стабильности располагаются на 200–300 м глубже подошвы мерзлоты. Следовательно, в зоны стабильности входят огромные объемы незамерзших водонасыщенных осадочных пород, в которых могут формироваться скопления гидратов углекислого газа и метана. Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что потенциальные возможности криолитозоны Западной Сибири для захоронения излишков CO_2 практически неограниченны. Наиболее подходящими для захоронения структурами являются коллекторы, расположенные глубже зоны стабильности гидратов углекислого газа (т. е. на глубинах более 600–1000 м – в зависимости от широты). В этом случае захороненный газ будет надежно прикрыт несколькими экранами: глинистыми породами, зоной стабильности гидратов углекислого газа, и наконец, слоем мерзлых пород. Определение конкретных разрезов, благоприятных для захоронения CO_2, потребует более детального изучения характерных особенностей мерзлоты и ЗСГУ в пределах Западной Сибири, а также расположенных ниже геологических разрезов. Помимо этого необходимы специальные исследования механизмов формирования гидратов CO_2, CH_4 и их смесей, так как, несмотря на огромные потенциальные возможности для формирования скоплений гидратов метана и большие объемы бурения, в Западной Сибири до сих пор не удалось поднять гидратсодержащий керн. Возможно, это связано с тем, что целенаправленные поиски скоплений метангидратов, требующие специального бурового оборудования, здесь так и не были проведены. Следует подчеркнуть, что только применение специальной техники позволило поднять гидратсодержащие породы из олигоценовых отложений дельты р. Маккензи (Северная Канада) и впервые открыть под мерзлотой крупную залежь гидратов метана [*Scientific..., 2005*]. Отсутствие аналогичных результатов в северных районах Западной Сибири может быть также связано с объективными причинами, в частности с малой мощностью здесь кайнозойских отложений [*Волкова и др., 2002*]. В заключение следует отметить, что показанная в результате данного исследования потенциальная возможность использования мерзлоты и ЗСГУ для захоронения излишков углекислого газа является еще одним криогенным ресурсом в Западной Сибири.

Авторы благодарят Яна Клеркса, Л.К. Алтунину, М.Б. Букаты, М.Н. Железняка и С.Л. Шварцева за помощь в исследованиях, обсуждение и доброжелательную критику результатов.

Работа выполнена при поддержке ИНТАС (грант № 06-1000025-9220), РФФИ (грант № 08-05-00804), в рамках интеграционного проекта ОНЗ РАН № 7.1 “Мерзлотно-геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока” и Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 62 “Фундаментальные вопросы физической химии газовых гидратов – исследования в интересах практического использования”.

Литература

Агалаков С.Е., Курчиков А.Р., Бабурин А.Н. Геолого-геофизические предпосылки существования газогидратов в туронских отложениях Восточно-Мессояхского месторождения // Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 11–12, с. 1785–1791.

Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 194 с.

Волкова В.С., Архипов С.А., Бабушкин А.Е. и др. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кайнозой Западной Сибири. Новосибирск, Изд-во СО РАН, фил. “Гео”, 2002, 246 с.

Гинсбург Г.Д., Новожилов А.А., Дучков А.Д. и др. Присутствуют ли природные газовые гидраты в сеноманской залежи Мессояхского газового месторождения? // Геология и геофизика, 2000, т. 41, № 8, с. 1165–1177.

Дучков А.Д., Балобаев В.Т., Девяткин В.Н. и др. Геотермическая модель криолитозоны Западной Сибири // Геология и геофизика, 1995, т. 36, № 8, с. 32–142.

Дучков А.Д., Соколова Л.С. Геотермический атлас Сибири: Закономерности строения и эволюции геосфер / Отв. ред. А.И. Ханчук. Хабаровск, Изд-во ДВО РАН, 2003, с. 45–56.

Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М., Недра, 1992, 235 с.

Николаев С. КИОТО: 10 лет спустя // Энергия, 2008, № 5, с. 42–48.

Advances in the geological storage of carbon dioxide. NATO Sci. Ser. / Ed. by S. Lombardi, L.K. Altunina, S.E. Beaubien. Berlin, Springer Publ., 2006, 362 p.

Chuvilin E.M., Petrakova S.Yu., Gureva O.M., Istomin V.A. Formation of carbon dioxide gas hydrates in freezing sediments and decomposition kinetics the hydrates formed // Physics and Chemistry of Ice: Proc. of the 11th Intern. Conf. England, Roy. Soc. Chemistry, 2007, p. 147–154.

Duchkov A.D. Characteristics of permafrost in Siberia // Advances in the geological storage of carbon dioxide. Berlin, Springer Publ., 2006, p. 81–92.

Jadhawar P., Mohammadi A.H., Yang J., Tohidi B. Subsurface carbon dioxide storage through clathrate hydrate formation // Ibid., p. 111–126.

Melnikov V.P., Drozdov D.S. Distribution of permafrost in Russia // Ibid., p. 69–80.

Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northern Territories, Canada / Ed. by S.R. Dallimore, T.S. Collett. Ottawa, Geol. Surv. Canada, 2005, Bull. 585, 140 p.

Поступила в редакцию
22 апреля 2009 г.