

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И РЕСУРСЫ МЕТАНА ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

А.Н. Дмитриевский, Б.М. Валяев
Институт проблем нефти и газа РАН, e-mail: a.dmitrievsky@ipng.ru

Последние двадцать лет характеризовались нарастанием интенсивности исследований по газогидратной тематике, включая ее ресурсный аспект. Основные усилия были сосредоточены на поисково-оценочных работах в Мировом океане, поскольку по предварительным прогнозам в приповерхностных осадках дна океана сосредоточены основные глобальные ресурсы газогидратов – 98 % [1]. Дальнейший прогресс в изучении природных газогидратов (ГГ) в океане был связан, прежде всего, с результатами глубоководного бурения, а также с использованием новых геофизических технологий и более сложных способов интерпретации получаемых данных. Выполненные исследования принесли колоссальный объем новых данных. Однако и их недостаточно для однозначных построений и ответов на вопросы, связанные с глобальными и региональными ресурсами метана в газогидратах. Помимо разнобоя в современных оценках глобальных ресурсов, достигающего двух порядков величин ($2 \cdot 10^{14} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$), прослеживается и тенденция к последовательному уменьшению величины этих оценок ($7,6 \cdot 10^{18} \div 2 \cdot 10^{16} \div 2 \cdot 10^{14} \text{ м}^3$) по мере поступления новых, более детальных данных [2, 3].

Представляется, что возникшая неоднозначность в оценке глобальных ресурсов метана может быть сокращена. Для этого необходимо преодолеть расхождения между результатами интерпретации геологических данных, с одной стороны, и изотопно-геохимических, с другой [4]. При анализе материалов газогидратных исследований в Мировом океане продолжается, в основном, использование нефтегеологических построений и концепций, сформулированных по результатам изучения осадочных палеобассейнов современных континентов. Данные методические подходы нуждаются в пересмотре, обусловленном прежде всего тем, что нефтегазообразование и нефтегазонакопление на дне океанов связаны со специфическими геодинамическими процессами [5, 6]. При таком пересмотре раскрываются масштабы вклада в формирование скоплений газогидратов глубинного метана разного генезиса (зон субдукции, процессов серпентинизации, других абиогенных синтезов). Выявляется необходимость дальнейших специальных исследований роли глубинных процессов и структур в формировании локализованных потоков глубинных углеводородов, которые вносят, видимо, существенный вклад в образование скоплений природных газогидратов [7].

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГАЗОГИДРАТОВ В РАЗРЕЗЕ ОСАДКОВ ДНА МИРОВОГО ОКЕАНА

Первые прогнозы гидратоносности осадков и пород базировались на предположениях о решающем вкладе в образование ГГ биохимического метана. Предполагалось почти повсеместное распространение газогидратов в Мировом океане при глубине дна более 300–600 м. Но уже десять лет назад было установлено не сплошное, а спорадическое, зонально-пятнистое распространение газогидратов (подошвы их залегания – bottom simulating reflector (BSR), трассируемой по результатам сейсмоакустических работ). Данные глубоководного бурения подтвердили результаты геофизических исследований о спорадическом и неравномерном насыщении газогидратами разреза верхних слоев осадков дна океана, обособляемых по термодинамическим параметрам (T , P) в качестве зоны стабильности газогидратов (ЗСГ). Последующие детальные геофизические исследования и новые данные глубоководного бурения принесли дальнейшие свидетельства высокой неравномерности заполнения порового пространства осадков газогидратами.

В практическом отношении выявление и прослеживание характера гидратонасыщенности осадков выходят на первый план. Остановимся на анализе некоторых наиболее важных аспектов, способных серьезно повлиять на оценку ресурсов метана в ГГ в пределах отдельных регионов и крупных скоплений.

Результаты бурения нескольких десятков глубоководных скважин, в кернах которых обнаружены газогидраты или признаки их нахождения, сами по себе добавляют не много данных о пространственном распространении ГГ. Однако эталонирование данных каротажа скважин расширяет возможности интерпретаций геофизических исследований. Основной вклад в изучение площадного распространения ГГ в океанах до сих пор вносят сейсмоакустические исследования. Именно их результаты позволяют выделять в разрезе осадков специфическую отражающую границу BSR, отождествляемую с подошвой газогидратонасыщенных осадков в подошве ЗСГ. Скачок (инверсия) скоростей на разделе BSR объясняется резким снижением скоростей (на сотни метров в секунду) при переходе сверху вниз от интервала (в подошве ЗСГ), насыщенного газогидратами, к нижележащему интервалу разреза осадков, заполненному свободным газом. Предполагалось, что ниже раздела BSR, под крышкой из газогидратов во многих случаях могут присутствовать залежи газа (free gas). Степень контрастности границы BSR связывалась с увеличением

высоты залежи газов. Однако данные глубоководного бурения в ряде регионов (хребет Блейк Аутер на Атлантическом склоне США, Гвинейский залив и др.) показали, что резко выраженный раздел BSR возникает и в случае присутствия в поровом пространстве всего нескольких процентов свободного газа и при низкой (2–3 %) гидратонасыщенности порового пространства осадков над разделом BSR [8, 9]. По данным глубоководного бурения оказалось, что непосредственно выше раздела BSR – в низах разреза ЗСГ – прослой осадков, существенно обогащенные газогидратами (десятки процентов), встречаются редко. По всей видимости, это объясняется минимальным уровнем термодинамических параметров для образования и сохранности газогидратов вблизи подошвы ЗСГ. Возникающая в связи с этим миграция метана (углеводородов) вверх может приводить к смещению вверх и раздела BSR, появлению вблизи подошвы ЗСГ сдвоенных разделов BSR [10, 11].

Как известно, значительная часть водной толщи над дном океана теоретически входит в состав верхней части ЗСГ. В этой связи придонная часть разреза осадков в ЗСГ по термодинамическим условиям является наиболее благоприятной для образования и сохранности газогидратов. Однако в разрезах глубоководных скважин до глубин 70–150 м от дна газогидраты обнаруживаются редко. Эта ситуация, на первый взгляд, кажется удивительной, поскольку в колонках донных отложений, отобранных трубками, включения газогидратов многочисленны. Но эти включения приурочены лишь к локальным участкам разгрузок углеводородных газов на дне Мирового океана, как к сравнительно небольшим (seepages), так и к наиболее интенсивным – грязевым вулканам. Наибольшая же обогащенность газогидратами кернов глубоководных скважин, а также наибольшая гидратонасыщенность порового пространства морских осадков по геофизическим данным приурочена к средней части разреза ЗСГ. Так, по данным каротажа глубоководной скважины 995 на хребте Блейк Аутер, по изменениям скорости сейсмических волн и росту сопротивления фиксируется высокая изменчивость гидратонасыщенности осадков в средней части разреза ЗСГ и обособляются горизонты с высокой гидратонасыщенностью [12]. Исследования, выполненные по хребту Блейк Аутер, показали четкую приуроченность высоких содержаний газогидратов в поровом пространстве к более грубозернистым прослоям [13]. Верхняя часть интервала ЗСГ здесь, до глубины 195 м от дна, не содержит газогидратов.

По данным каротажа глубоководных скважин [14], пробуренных на Газогидратном хребте (континентальная окраина Каскадия у Тихоокеанского побережья Канады), гидратонасыщенность ЗСГ зафиксирована на глубинах 125–225 м ниже дна. Геофизические и геохимические данные фиксировали и ранее гидратонасыщенность интервала ЗСГ. Она нашла подтверждение в результатах отбора керна с газогидратами или следами их разложения в соответствующих интервалах разреза. По данным [15], ЗСГ пронизана целым рядом сквозных каналов разгрузки водно-газовых флюидов и мощные истечения (plumes) метана (аномалии) зафиксированы в океанической воде на расстоянии более 100 м от дна с горизонтальной протяженностью более 1 км [16]. В донных осадках, в местах разгрузки метана, отмечены многочисленные и разнообразные включения газогидратов, однако в разрезах глубоководных скважин, не попавших в каналы разгрузки, в верхней части разреза ЗСГ до глубины 125 м от дна газогидраты не обнаружены. Аналогичный характер гидратонасыщенности отмечен и в желобе Нансей, с обособлением нескольких высоконасыщенных газогидратами прослоев в низах средней части ЗСГ при отсутствии их вверху.

Совершенно иная картина газогидратонасыщенности была установлена по большому комплексу сейсмоакустических исследований для глубоководной (3,7–4 км) части Берингова моря (Алеутская котловина). «Пятна» гидратосодержащих пород здесь выявлены только в пределах (внутри) своеобразных вертикальных цилиндрических структур диаметром 1,5–2 км, сейсмические отражения в пределах которых характеризуются аномалиями скоростей (V) и амплитуд (AMP) волн (VAMP). Ниже подошвы ЗСГ по снижению скоростей сейсмических волн предполагается газонасыщенность осадков, а выше подошвы ЗСГ по аномальному росту скоростей в пределах VAMP ожидается заполнение порового пространства осадков газогидратами [17]. В глубоководной части Берингова моря уже обнаружено свыше 12 000 VAMP. С учетом сейсмической информации о мощности гидратосодержащих пород и степени их гидратонасыщенности подсчитаны запасы метана в газогидратах для крупных VAMP. Они составили около 8 млрд м³ на одну структуру, а в общем свыше 26 трлн м³. Следует отметить, что гидратонасыщенность осадков в пределах VAMP увеличивается вниз по разрезу и у подошвы ЗСГ в некоторых VAMP достигает 45–55 %, что предполагает образование массивных скоплений газогидратов. При этом в пределах ареала распространения VAMP в этом регионе специфических границ BSR в подошве ЗСГ не зафиксировано. Структуры типа VAMP, но в

ограниченном количестве и меньшего диаметра, встречаются во многих других гидратоносных провинциях океана. Эти структуры контролируют вертикальные перетоки углеводородных и углеводородно-водных флюидов, но они не столь интенсивны. Во всяком случае, с ними в разрезе осадков не ассоциируются диапировые и грязевулканические структуры. Исследования последнего десятилетия принесли большой объем новых данных о проявлении грязевулканических процессов в Мировом океане. Как и на суше, грязевые вулканы оказались специфическими структурами, контролирующими наиболее интенсивные разгрузки (потоки) УВ. В рамках тематики данной статьи важен еще один аспект: выявление ассоциации скоплений ГГ с кратерами (выходами) каналов грязевых вулканов на дне глубоководных участков Мирового океана.

ИСТОЧНИКИ МЕТАНА В ГАЗОГИДРАТНЫХ СКОПЛЕНИЯХ

Первые обнаружения газогидратов в кратерах грязевых вулканов Каспия [2], хотя и были ожидаемыми, но в то же время оказались сенсационными. К настоящему времени грязевулканическая деятельность на дне морей и океанов известна уже в пределах более 30 провинций. При глубинах морского дна более 500 м в кратерах грязевых вулканов многих провинций выявлено или предполагается распространение газогидратов [18]. Крупнейшая грязевулканическая провинция на дне океана, связанная с аккреционной призмой Барбадос в Центральной Атлантике, во много раз превосходит по площади и числу грязевых вулканов грязевулканический регион Восточного Азербайджана, считавшийся ранее самым крупным на Земле. Как выяснилось по данным геофизических исследований и глубоководного бурения, корни грязевых вулканов призмы Барбадос пронизывают насквозь ее осадочный разрез, достигая зон субгоризонтальных срывов (деколлемента и протодеколлемента) в океанической коре [19]. Связанные с этими срывами грязевые вулканы прослеживаются с запада на восток при уменьшении толщины осадочного разреза от 4–7 км до нескольких сотен метров. Для таких участков возникают затруднения с нахождением источника флюидов (углеводородных газов), задействованных в грязевулканической деятельности. Маломощный разрез молодых рыхлых осадков и осадочных пород недостаточен для массовой генерации УВ. Гранитно-метаморфический слой в разрезе земной коры здесь отсутствует, и бывшие осадочные породы не могут генерировать дополнительные количества углеводородов. Приходится допускать их латеральную миграцию по деколlementу из зон его погружения до 15 км и более [20].

Аналогичная ситуация характерна для аккреционных призм глубоководных желобов в Тихом океане. В работе [21] отдано предпочтение коровому, а возможно, и мантийному генезису флюидов, разгружающихся по зонам деколлемента, особенно в желобах Японии. К краям аккреционных призм, в наибольшей мере пронизанных разгрузками глубинных флюидов, приурочены проявления вторжения мантийных серпентинитовых диапиров. В данном случае имеется выбор из двух вариантов генезиса углеводородных флюидов, участвующих в грязевулканической деятельности и формировании скоплений газогидратов. Возможна генерация УВ из органического вещества осадочных пород, затягиваемых на мантийные глубины в зоне субдукции. С другой стороны, в последние годы появляется все больше публикаций, в которых разрабатываются механизмы абиогенного синтеза метана в связи с процессами серпентинизации ультрабазитов на дне океана [5, 6]. Получили подтверждение и построения [22] о глубинной природе метана, выносимого грязевыми вулканами Восточного Азербайджана, включая впадину Южного Каспия. Сейсморазведочные работы, выполненные в Южно-Каспийской впадине, показали приуроченность грязевых вулканов к супердиапирам. Субвертикальные геологические тела пронизывают насквозь весь осадочный разрез толщиной более 20 км [23]. С недрами этих грязевых вулканов связаны крупнейшие морские газоконденсатные месторождения Азербайджана, а к донным осадкам в кратерах грязевых вулканов приурочены обнаружения газогидратов, выходы нефти и углеводородных газов.

Специфика грязевулканических регионов – чрезвычайно высокая интенсивность разгрузок углеводородно-водных флюидов и высокая доля глинистых пород в их осадочном разрезе. В связи с этим при возникновении аномально высоких пластовых давлений в перетоки вовлекаются не только флюиды, но и флюидизированные осадки и породы с формированием разного рода диапировых структур. Каналы разгрузки флюидов при этом цементируются, а сами разгрузки становятся сосредоточенными, сфокусированными [24], часто сквозными. При этом при отсутствии в разрезе хороших коллекторов и ловушек залежи нефти и газа в пределах диапировых структур могут и отсутствовать. Сквозные разгрузки через грязевулканические аппараты также не являются оптимальным вариантом для формирования газогидратных скоплений. Температура воды, участвующей в перетоках, может достигать 15–20 °С, что резко ухудшает термодинамическую обстановку для образования газогидратов вблизи грязевулканических каналов. В

этом отношении менее интенсивные разгрузки и перетоки УВ, типа VAMP, «газовых труб» (chimneys), благоприятнее для формирования углеводородных скоплений, включая скопления газогидратов.

Даже из приведенного краткого обзора можно увидеть, что гидратоносные провинции в Мировом океане отличаются по степени и характеру гидратонасыщенности порового пространства осадков в разрезе ЗСГ. Высокая насыщенность ГГ пористого пространства ($> 50 \%$) достигается лишь в отдельных грубозернистых прослоях и горизонтах, которые подпитываются интенсивными подтоками углеводородов по разного рода каналам. Однако образование и сохранность газогидратов в осадках в ЗСГ зависит от целого ряда факторов [25], помимо термодинамических условий. Формирование же крупных скоплений газогидратов возможно только при подтоке огромных количеств метана по системам каналов, контролирующим локализованные потоки УВ [7, 26].

Это заключение можно с большей детальностью проиллюстрировать на примере лучше изученных (разбуренных) скоплений газогидратов в приполярных регионах на суше. Одно из таких крупных месторождений ГГ выявлено на северном побережье Аляски (США). Здесь при изучении разреза 445 скважин в 50 из них предполагается нахождение газогидратов в шести горизонтах песчаников и конгломератов, залегающих на глубинах 300–700 м. Прогнозная территория распространения горизонтов с газогидратами находится между нефтяными месторождениями Купарук Ривер и Прадхо Бей. Ниже по разрезу выявлены также две крупные залежи свободного газа, причем верхняя непосредственно подстилает нижний горизонт с газогидратами и их контакт маркирует уровень термической неустойчивости газогидратов — подошву ЗСГ. Площадь распространения отдельных горизонтов ГГ 3–404 км², а пористость вмещающих отложений 37–42 %. Средняя гидратонасыщенность пористого пространства 85 %, а их запасы 1–1,2 трлн м³. Гидратонасыщенность отдельных горизонтов подтверждена изучением газогидратов в герметично отобранных кернах скважин. Эти результаты позволили сделать более прецизионными данные каротажа скважин, скоррелировать их с результатами сейсмических исследований 3D.

В юго-западной части газогидратного скопления (Купарук Ривер) верхние пласты с газогидратами расположены уже в пределах толщи многолетнемерзлых пород, а нижние — у подошвы ЗСГ. На северо-восточном погружении нижние газогидратные пласты переходят в газоносные (free gas), а верхние располагаются ниже подошвы многолетне-

мерзлых пород. Эти особенности во многом определяются тем, что формирование скоплений газогидратов произошло за счет УВ, мигрировавших из группы Sadlerochit (перм-триас), в которой размещаются гигантские нефтяные залежи Прадхо-Бей и Купарук Ривер [27]. Подтверждение этого заключения состоит в том, что сброс Эйлин контролирует не только размещение газогидратов в формации Sagavanirktok, но и подгидратных скоплений свободного газа, а также залежи тяжелой нефти в низах этой формации. По всей видимости, залежь тяжелой нефти в приповерхностных отложениях формации Sagavanirktok образовалась за счет жидких углеводородов, выпавших из восходящего потока углеводородных флюидов в процессе формирования скоплений газогидратов.

Таким образом, и по материалам исследований газогидратного скопления Купарук Ривер — Прадхо-Бей оказалось, что основным источником его газогидратного метана были катагенетические или еще более глубинные УВ. Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$ от -37 до -80 ‰) и водорода (δD от -260 до -150 ‰) не укладывается в диапазоны, которые в традиционных представлениях соответствуют биохимическому метану. Для такого метана, генерированного из ОВ, характерен экстремально изотопно-легкий состав либо по углероду (до -110 ‰), либо по водороду (до -350 ‰). Газогидратный метан характеризуется большей изотопной утяжеленностью, и, как нами было ранее показано [28], метан с изотопно-легким составом углерода и водорода может быть генерирован в глубинных процессах или сформирован при трансформации химического состава углеводородных флюидов в процессе восходящей миграции через осадочный разрез, в том числе с участием бактериальных воздействий. Но основное подтверждение глубинной природы метана в ГГ приносит комплекс данных по геологическим условиям формирования и нахождения газогидратных скоплений. Более подробно они рассмотрены в работах [7, 26, 29, 30].

Газогидратный резервуар углерода метана ($1 \cdot 10^{19}$ г) оказался сопоставим с резервуарами углерода в биосфере ($5 \cdot 10^{18}$ г) и гидросфере ($4 \cdot 10^{19}$ г). По изменениям концентрации метана в атмосфере Земли в прошлом (по кернам льдов Антарктиды и Гренландии) и другим критериям, восполнение газогидратного резервуара при вариациях климата и эндогенной активности происходило со скоростью более $1 \cdot 10^{12}$ г/год. С учетом процессов потребления, рассеивания и окисления метана в водах и осадках темпы поступления метана к подошве ЗСГ были на один-два порядка величин больше (10^{13} – 10^{14} г/год). По данным мониторинга атмосферы, с учетом изотопного состава углерода (^{13}C ,

^{14}C) современный сброс глубинного метана в атмосферу составляет от $2 \cdot 10^{14}$ до $5 \cdot 10^{14}$ г/год. Скорость глобальной генерации метана в осадочной оболочке, по оценкам В.А. Успенского, составляет $n \cdot 10^{11}$ г/год (в рассеянном состоянии по всему объему осадочных пород). Как видно, количество метана, генерированного из ОВ осадочных пород в катагенезе, в сотни раз уступает количеству УВ в локализованных потоках, участвующих в формировании скоплений газогидратов. Как и в случае с грязевыми вулканами, для объяснения формирования скоплений газогидратов приходится привлекать глубинные источники и механизмы генерации углеводородов.

ПРОГНОЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКОВ СКОПЛЕНИЙ ГАЗОГИДРАТОВ

За последние годы многое прояснилось в отношении глобального распространения газогидратов и в оценке их ресурсов метана. Неповсеместность распространения ГГ на участках океанов с глубинами более 600 м, отсутствие однозначной связи в их распространении с мощностью и обогащенностью осадков органическим веществом означает, что биохимический метан не вносит большого вклада в формирование скоплений газогидратов. Как выяснилось, при формировании скоплений газогидратов в осадках дна Мирового океана основным источником метана были глубинные углеводороды разного генезиса. От дальнейшего прогресса в познании механизмов генерации этих углеводородов и контролирующих их глубинных структур в значительной мере зависит совершенствование региональных оценок углеводородных ресурсов в газогидратах.

Возвращаясь к разбросу глобальных оценок ресурсов метана в газогидратах, отметим, что в значительной мере этот разброс обусловлен неоднозначностью используемой разными авторами методологии и терминологии. Вряд ли термин «залежь» применим к газогидратному ареалу в акватории Австралии с площадью 80 тыс. км², а ориентировочные оценки ресурсов газа в газогидратном состоянии 20200 трлн м³ стоит называть «запасами» [1]. Столь большие ножницы в оценках ресурсов (а не запасов) метана можно понять в приложении к пока еще недостаточно исследованной газогидратной зоне, но никак не к залежи.

С другой стороны, изученность дна Мирового океана в газогидратном направлении методами сейсмоакустики и глубоководным бурением остается недостаточной даже в глобально-рекогносцировочном аспекте. Контрастность раздела BSR не имеет прямых корреляций со степенью гидратонасыщенности вышележащего разреза осадков ЗСГ. В случае согласного (параллельного) залегания осадочных слоев с поверхностью дна

выделение раздела BSR по результатам сейсмоакустических работ вызывает затруднение. А обнаружение в ряде случаев при глубоководном бурении гидратонасыщенности осадков на участках, где сейсмоакустические исследования не выявили раздела BSR, ставит под сомнение отводимую этому разделу роль абсолютного критерия гидратонасыщенности ЗСГ. С учетом этого обстоятельства, площадь потенциально гидратоносных участков дна в Мировом океане может существенно возрасти, что будет сопровождаться увеличением оценок углеводородных ресурсов газогидратов в Мировом океане. Учет вклада глубинных углеводородов разного генезиса также может привести к увеличению площади потенциально гидратоносных акваторий и, тем самым, увеличению региональных и глобальных оценок углеводородного потенциала газогидратов. В связи с этим можно ожидать, что обозначившаяся ранее тенденция уменьшения величин оценок глобальных ресурсов метана в ГГ близка к исчерпанию.

В пределах гидратоносных регионов и отдельных скоплений насыщенность газогидратами порового пространства осадков в разрезе ЗСГ изменчива. Во многом она контролируется литологической изменчивостью разреза, например на хребте Блейк Аутер [13]. В других регионах (дельта р. Маккензи на севере Канады) даже в однообразном по литологии и значениям пористости разрезе осадочных пород степень их гидратонасыщенности изменчива [31]. В газогидратных скоплениях обычно обособляется несколько горизонтов, обогащенных ГГ, но и в их пределах гидратонасыщенность не постоянна. Это привносит дополнительные сложности в оценку ресурсов метана конкретных гидратоносных регионов и отдельных скоплений газогидратов.

Вероятно, со временем при совершенствовании технологий геофизических исследований удастся получить однозначные результаты о границах газогидратных «тел» и степени гидратонасыщенности порового пространства осадков. Пока же детальность и дифференциация газогидратных залежей даже по результатам сейсмических 3D-исследований представляется недостаточной [1]. Несомненно, при будущих исследованиях больше внимания будет уделяться изучению каналов подтоков и перетоков УВ, по которым катагенетический и более глубинный метан поступает в верхнюю часть осадочного разреза, в ЗСГ, где формируются скопления газогидратов. Уже существующие технологии геофизических исследований позволяют не просто трассировать каналы вторжения глубинных УВ, но и дифференцировать их по флюидодинамическим показателям — степени активности [32].

Хотя основные ресурсы метана в газогидратах и приурочены к Мировому океану, газогидраты приполярных побережий и шельфа представляют особый интерес. На севере Канады в дельте р. Маккензи — море Бофорта выполнен большой объем поискового бурения по выявлению газогидратов. По данным каротажа скважин на побережье, газогидраты выявлены в 25 скважинах из 146 исследованных, а на шельфе — в 36 скважинах из 55 исследованных. По данным каротажа скважины Маллик Л-38, газогидраты выявлены в интервале 820–1103 м, в котором содержится около 100 м (по мощности) песчаников с повышенным содержанием газогидратов [33]. В пробуренной позднее скважине-дублере Маллик 2Л-38, по данным каротажа, выявлено четыре богатых газогидратами интервала на глубинах 895–1110 м. Верхний интервал 897–922 м охарактеризован почти сплошным отбором керна. По каротажу гидратонасыщенность колеблется от 0 до 80 % [34]. По результатам изучения керна выявлены газогидратные прослой толщиной 10 см – 1,5 м при пористости песчаников 25–35 %. Гидратонасыщенность порового пространства по керну в большей части интервала превышает 70 %, местами достигая 100 % [35], что подтверждает достоверность каротажных данных. Эти результаты, вместе с данными по газогидратному скоплению на севере Аляски (США), позволяют с оптимизмом рассматривать возможные перспективы обнаружения крупных скоплений газогидратов на севере Западной Сибири и шельфе Карского моря. Особый интерес могут представлять верхние горизонты осадочного разреза гигантских газовых месторождений. В результате исследований [36, 37] на ряде уникальных месторождений севера Западной Сибири (Ямбургское, Бованенковское и др.) в нижней части криолитозоны выявлены реликтовые газогидраты. Это, конечно, увеличивает оценку потенциальных ресурсов метана в газогидратах северных территорий России. Важно и то, что, как и на Аляске, в Западной Сибири газогидратные скопления оказываются пространственно совмещенными с гигантскими скоплениями газа в традиционных залежах. В ближайшие годы это может облегчить поисковые работы на газогидраты, а в будущем — возможную утилизацию их метана.

Необходимость интенсификации газогидратных исследований на севере Западной Сибири связана еще и с обнаружением значительных скоплений обычного газа в многолетнемерзлых породах [36, 37]. Результаты подобных работ представляют ценность и для других направлений. Они позволяют учесть вероятные проявления аномальных давлений в мерзлотных и подмерзлотных скоплениях газа, что, в свою очередь, снизит

аварийность проходки поисковых и добывающих газ скважин при предстоящем вовлечении в разработку газовых месторождений Ямала [38].

ВЫВОДЫ

1. Основные усилия в исследованиях газогидратов как возможного источника углеводородных ресурсов направлены на выявление факторов, обуславливающих неравномерное насыщение гидратами порового пространства осадков пород в ЗСГ и связанный с этим разброс оценок глобальных и региональных ресурсов метана в газогидратах.

2. В результате исследований последних лет открыты крупные скопления газогидратов на суше и зоны гидратонакопления в Мировом океане. Пространственные неравномерности распространения газогидратов во многом контролируются локализованными потоками углеводородных и углеводородно-водных флюидов.

3. По данным о гигантских масштабах ресурсов метана в газогидратах, высоких темпах формирования и переформирования их скоплений выявляется существенная недооценка масштабов генерации глубинных углеводородов.

4. Нефтегазообразование и нефтегазонакопление в Мировом океане связаны со специфическими геодинамическими процессами и глубинными структурами, контролирующими локализованные потоки углеводородов и пространственное распределение газогидратных скоплений.

5. Необходимы дальнейшие исследования приповерхностных и глубинных источников метана и уточнение их роли в формировании газогидратов. На этом пути возможно уточнение оценок глобальных и региональных ресурсов метана в газогидратах, совершенствование прогнозов гидратоносности акваторий океанов и приполярных регионов суши, включая территорию России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели формирования, ресурсы // Рос. хим. журн. 2003. Т.47, № 3. С. 70-79.
2. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. СПб.: ВНИИ-Океангеология, 1994. 199 с.
3. Соловьев В.А. Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое. Газовые гидраты // Рос. хим. журн. 2003. Т. 47, № 3. С. 59-69.

4. Валяев Б.М. Потоки углеводородных флюидов через дно Мирового океана (закономерности проявления, природа, значимость) // Флюидные потоки в земной коре и мантии: Материалы всерос. симпоз. (26–28 февр. 2002 г.). М.: ИГЕМ РАН, 2002. С. 149-153.
5. Дмитриевский А.Н., Каракин А.В., Баланюк И.Е., Матвеев В.В. Гидротермальный механизм формирования газогидратов на срединно-океанических хребтах (на примере Баренцева и Норвежского морей) // Геология нефти и газа. 1997. № 8. С. 4-16.
6. Дмитриев Л.В., Базылев Б.А., Борисов М.В. и др. Образование водорода и метана в процессе серпентинизации мантийных ультрабазитов в океане и генезис нефти // Рос. журн. наук о Земле. 2000. Т. 1, № 1. С. 1-16.
7. Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. Углеводородная дегазация через дно океана: локализованные проявления, масштабы, значимость // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2002. С. 7-36.
8. Hovland M., Gallagher J.W., Clennell M.B. et al. Gas hydrate and free gas volumes in marine sediments: example from the Niger Delta front // Mar. Petrol. Geol. 1997. Vol. 14, № 3. P. 245-255.
9. Davie M.K., Buffet B.A. Sources of methane for marine gas hydrates: inference from a comparison of observation and numerical models // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. Vol. 206, № 1-2. P. 51-63.
10. Haibin Song, Osamu Matsubayashi, Shin'ichi Kuramoto. Velocity structure of a double gas-hydrate related bottom simulating reflector within the Eastern Nankai accretionary prism from a full wave form inversion // Proc. Fourth Intern. conf. of gas hydrates. Yokohama, 2002. P. 58-162.
11. Nouze H., Noble M., Foucher J.P. et al. Seismic imaging of a double BSR area on the Nankai slope // Ibid. P. 163-168.
12. Paull C.K., Ussier W., Borowski W.S., Spiees F.N. Methane-rich plumes on the Carolina continental rise: associations with gas hydrates // Geology. 1995. Vol. 23. P. 89-92.
13. Матвеева Т.В., Соловьев В.А. Геологический контроль скоплений газовых гидратов на хребте Блейк Аутер, Северная Атлантика (по материалам глубоководного бурения) // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 7: Спец. вып. Тр. VI междунар. конф. «Газы в морских осадках». С. 662-671.

14. Spence G.D., Hyndman R.D., Chapman N.R. et al. Cascadia margin, Northeast Pacific Ocean: hydrate distribution from geophysical investigations // Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments / Ed. M. Max. Boston, 2000. P. 183-198.
15. Goldberg D.S., Collett T.S., Hyndman R.D. Ground truth: in situ properties of hydrate // Ibid. P. 295-310.
16. Suess E., Torres M.E., Bohrmann G. et al. Gas hydrate distribution: enhanced dewatering, benthic material turnover and large methane plumes at the Cascadia convergent margin // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. Vol. 170, № 1-2. P. 1-15.
17. Sholl D.W., Hart P.E. Velocity and amplitude structure on seismic — reflection profiles — possible massive gas hydrate deposits and underlying gas accumulation in the Bering sea basin // Future of energy gases. Wash. (D.C.), 1993. P. 331-351. (US Geological Survey Professional Paper; N 1570).
18. Milkov A.V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates // Mar. Geol. 2000. Vol. 167. P. 29-42.
19. Westbrook G.K. Geophysical evidence for the role of fluids in accretionary wedge tectonics // Philos. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. 1991. Vol. 335. P. 227-242.
20. Stevenson A.J. Generation, migration and resource potential for hydrocarbons in accretionary systems — a large, unconventional hydrocarbon resource? // Future of energy gases. Wash. (D.C.), 1993. P. 353-363. (US Geological Survey Professional Paper; № 1570).
21. Taira A., Pickering K.T. Sediments deformation and fluid activity in the Nankai, Izu-Bonin and Japan forearc slopes and trenches // Philos. Trans. Roy. Soc. London. 1991. Vol. 335. P. 289-314.
22. Кропоткин П.Н., Валяев Б.М. Геодинамика грязевулканической деятельности (в связи с нефтегазоносностью) // Геологические и геохимические основы поисков нефти и газа. Киев: Наукова думка, 1981. С. 148-178.
23. Мамедов П.З., Гулиев И.С. Субвертикальные геологические тела в осадочном чехле Южно-Каспийской впадины // Изв. АН Азербайджана. Наука о земле. 2003. № 3. С. 139-146.
24. Иванов М.К. Потоки углеводородных флюидов на глубоководных окраинах Европы и связанные с ними явления // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. 2000. № 5. С. 31-44.
25. Валяев Б.М. О факторах, контролирующих формирование и разрушение скоплений газогидратов в осадочном разрезе дна Мирового океана // Геология морей и

океанов: Тез. Докл. XV Междунар. школы мор. геологии. М.: ГЕОС, 2003. Т. 1. С. 148-149.

26. Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. Природные ресурсы и значимость гидратов природного газа // Газовая пром-сть. 2002. № 11. С. 22-25.

27. Collet T. Natural gas production from Arctic gas hydrates // The future of energy gases. Wash. (D.C.), 1993. P. 299-311. (US geological survey professional paper; № 1570).

28. Валяев Б.М., Титков Г.А., Чудецкий М.Ю. О генезисе изотопно-легкого метана ($\delta^{13}\text{C}$, δD) нефтегазовых месторождений // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2002. С. 108-134.

29. Dmitrievsky A.N., Valyaev B.M. New data of the gas hydrates in the World ocean and the prospects of their exploration // Proc. Indo-Russian Joint Workshop on gas hydrates under ILTP / Department of ocean development Government of India. New Delhi, 2001. P. 127-134.

30. Dmitrievsky A.N., Valyaev B.M. Gas hydrates and hydrocarbon discharges of the World Ocean as a new clue to a better understanding of the processes of oil-gas accumulation // VI Intern. conf. «Gas in Marine Sediments»: Abstr. book. St.Petersburg, 2000. P. 25-26.

31. Winters W.I., Dallimore S.R., Collett T.S. et al. Physical properties of sediments from the JADEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well // Bull. Geol. Surv. Canada. 1999. N 554. P. 95-100.

32. Ligtenberg J.H. Unravelling the petroleum system by enhancing fluid migration paths in seismic data using a neural network based pattern recognition technique // Geofluids. 2003. Vol. 3, № 4. P. 255-261.

33. Collett T.S., Dallimore S.R. Permafrost-associated gas hydrate // Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments / Ed. M. Max. Boston, 2000. P. 43-60.

34. Guerin G., Goldberg D. Sonic waveform attenuation in gas hydrate-bearing sediments, from The Mallik 2L-38 gas hydrate research well, Mackenzie Delta, Canada // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107, № B5. P. 1-12.

35. Uchida Takashi, Dallimore S.R., Lu Hailong, Collett T.S. Occurrences of natural gas hydrates beneath the permafrost in the Mackenzie Delta area with compared to recently obtained natural gas hydrates // Proc. Fourth Intern. conf. gas hydrates. Yokohama, 2002. P. 228-232.

36. Якушев В.С., Истомин В.А., Перлова Е.В. Ресурсы и перспективы нетрадиционных источников газа в России. М.: ООО «ВНИИгаз», 2002. 87 с.

37. Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А. и др. Газовые гидраты в отложениях материков и островов // Рос. хим. журн. 2003. Т. 47. № 3. С. 80-90.
38. Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А. и др. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 7: Спец. вып. Тр. VI междунар. конф. «Газы в морских осадках». С. 587-598.
39. Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. Распространение и ресурсы метана газовых гидратов // Наука и техника в газовой пром-сти. 2004. № 1/2. С. 5-13