

УДК 548.562+542.7:330.15

Газовые гидраты Охотского моря: закономерности формирования и распространения

Т. В. Матвеева, В. А. Соловьёв

ТАТЬЯНА ВАЛЕРЬЕВНА МАТВЕЕВА — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геологии газовых гидратов Всероссийского научно-исследовательского института геологии и минеральных ресурсов Мирового океана (ВНИИОкеангеология). Область научных интересов: природные газовые гидраты, геохимические, флюидо-динамические условия их образования и распространения, геологические факторы контроля скоплений газовых гидратов.

190121 Санкт-Петербург, Английский просп., 1, ВНИИОкеангеология, тел. (812) 114-16-85, факс (812) 114-14-70, E-mail tv_matveeva@mail.ru

Результаты исследований по газогидратной тематике последних десятилетий показали, что газогидратоносность акватории Охотского моря, как и акваторий Мирового океана в целом, определяется наличием именно скоплений газовых гидратов, а не равномерным распределением в пределах термобарической зоны их стабильности [1]. В настоящее время в Охотском море известны два скопления газовых гидратов в приповерхностных отложениях в прибрежье островов Сахалин и Парамушир [2–5]. Эти скопления расположены вблизи дна в очагах разгрузки газосодержащих флюидов и контролируются флюидопроводниками (разломы, грязевые вулканы, диапиры).

В прибрежье о. Парамушир (глубина воды около 800 м) газовые гидраты были обнаружены и изучены экспедицией Института океанологии АН СССР в 1986 г. на научно-исследовательском судне «Академик Мстислав Келдыш» [2]. В 1991 г. в ходе последующих специальных экспедиционных исследований на судне «Геолог Петр Антропов» с участием сотрудников ВНИИОкеангеология и ПО «Дальморгеология» было обнаружено новое скопление газовых гидратов, приуроченное к одному из многочисленных очагов разгрузки газа на северо-восточном склоне о. Сахалин (на глубине около 700 м). В дальнейшем, с 1998 по 2002 гг. в рамках Российско-Германской программы КОМEX (Kurile-Okhotsk Marine EXperiment) с участием Тихоокеанского океанологического института Дальневосточного отделения РАН, Института океанологии РАН, Исследовательского центра геологии моря GEOMAR при университете Кристиана Альбрехта (Германия), ВНИИОкеангеология в Охотском море проводились комплексные исследования, направленные на изучение геологической истории развития региона, роли Охотского моря в формировании водных масс северо-восточной части Тихого океана и в

глобальном биогеохимическом цикле [6, 7]. Кроме того, изучались источники, состав и масштабы миграции газосодержащих флюидов, гидрогеохимические особенности гидратосодержащих отложений, а также проводился сезонный мониторинг метана в водной толще.

Результаты этих экспедиций послужили основой для выяснения природы и механизмов образования газовых гидратов и позволили оценить (качественно) газогидратоносность акватории Охотского моря в целом и выявить потенциально газогидратоносные районы моря.

Особенности газогидратопроявлений в очагах разгрузки флюидов в Охотском море

Одной из целей экспедиции Института океанологии АН СССР в 1986 г. было исследование предполагаемой гидротермы вблизи о. Парамушир, признаком которой считался газовый «факел» на эхолотных записях, неоднократно наблюдавшийся с 1982 г. Кроме того, повышенные содержания в морской воде в районе «факела» растворенных водорода, метана и кремниевой кислоты также рассматривались как признак гидротермальной разгрузки на морском дне [8]. В ходе экспедиционных исследований с применением подводных обитаемых аппаратов было установлено, что наблюдаемый на эхограмме «факел» не является результатом гидротермальной активности, а обусловлен выходами на дне пузырьков газа [2, 9].

В прибрежье о. Парамушир выходы газа оказались приурочены к вершине увала (глубина моря 768 м) шириной около 400 м, длиной 800 м и относительной высотой до 15 м. Морское дно в районе очага разгрузки характеризуется наличием ям и воронок, изрытностью грунта, особым составом донной фауны, а

также наличием массивных карбонатных корок, покрытых белым налетом, часто нависающих над ямами и образующих пластины неправильной формы и кавернозные желваки. Предполагается, что такие карбонатные корки образовались в результате насыщения воды углекислым газом, выделяющимся при окислении восходящих потоков метана [2]. Отметим, что к настоящему времени выявлено множество очагов субмаринной разгрузки газонасыщенных флюидов, где наблюдается аутигенное минералообразование. В частности, в Черном море [11], в прибрежье Флориды, Австралии и к западу от Ирландии [12, 13], в прибрежье Орегона [14], в районе плато Воринг в Норвежском море [15] отложения в очагах разгрузки флюидов включают многочисленные карбонатные образования (корки, желваки, карбонизированные раковины и др.) часто в сочетании с бактериальными матами (сообщества метанотрофных организмов), сходными по внешнему виду с белым налетом, обнаруженным на карбонатных корках в прибрежье о. Парамушир.

В экспедиции 1986 г. образцы газовых гидратов были подняты на двух станциях. На одной из станций газовые гидраты были обнаружены на поддонной глубине 185 см — в наконечнике грунтовой трубки находился слой сплошного снежно-белого гидрата толщиной 2 см. Предполагается, что поднятый агрегат гидрата был оторван трубкой от более мощного гидратного тела. Выше газогидратного слоя наблюдался слой разрыхленного (рассыпающегося) ила толщиной около 10 см, в нижней части которого были обнаружены быстро разлагающиеся линзочки (миллиметровые) газовых гидратов. На другой станции слой с тонкими мелкими линзами гидратов был обнаружен в призабойном интервале глубин 220—240 см, а выше располагался метровый слой разрыхленного ила. Газогидратомещающие отложения представляют собой черные,

кремнистые диатомово-вулканокластические алевроитовые илы с тонкими прослоями (до 1—2 см) алевроита; отложения имеют сильный запах сероводорода. Химический анализ состава гидратного газа показал, что на 97,8% он состоит из метана и содержит $4,5 \cdot 10^{-2}\%$ этана, $1 \cdot 10^{-4}\%$ пропана, $8,96 \cdot 10^{-2}\%$ диоксида углерода [17]. Углерод метана оказался сравнительно «легок» по изотопному составу: значение $\delta^{13}\text{C}$ составило $-54,6$ PDB (PDB — *Belemnite Americana* из формации Пиди мелового возраста в Южной Каролине — общепринятый стандарт изотопного состава углерода) [10].

Газогидратопроявления в прибрежье о. Парамушир исследовались также в экспедиции ВНИИОкеангеология в 1991 г. Газовый «факел» был пересечен пятью промерными профилями и пятнадцатью профилями с пробобором и геотермическими измерениями, что позволило уточнить его местоположение (рис. 1Б). Диаметр «факела» вблизи морского дна, по данным эхолотных пересечений, составляет 350—400 м. Газовые гидраты были обнаружены на двух станциях, расположенных вблизи западной окраины «факела», причем одна из них оказалась за его пределами. На ряде других станций были выявлены косвенные признаки гидратов (пониженная концентрация хлорид-ионов в поровой воде, повышенное газосодержание и обводнение осадков, запах сероводорода, карбонизация отложений). Газовые гидраты в виде уплощенных обломков неправильной формы (размером от нескольких миллиметров до 7 см по длинной оси) были обнаружены на поддонной глубине 10—40 см в глинисто-алевритовых отложениях с многочисленными включениями карбонатных корок, стяжений, карбонизированных раковин двусторчатых моллюсков и их обломков [3, 5]. Данные газовой хроматографии подтвердили преобладание метана в составе гидратного газа, тогда как значение $\delta^{13}\text{C}$ углерода метана оказалось существенно

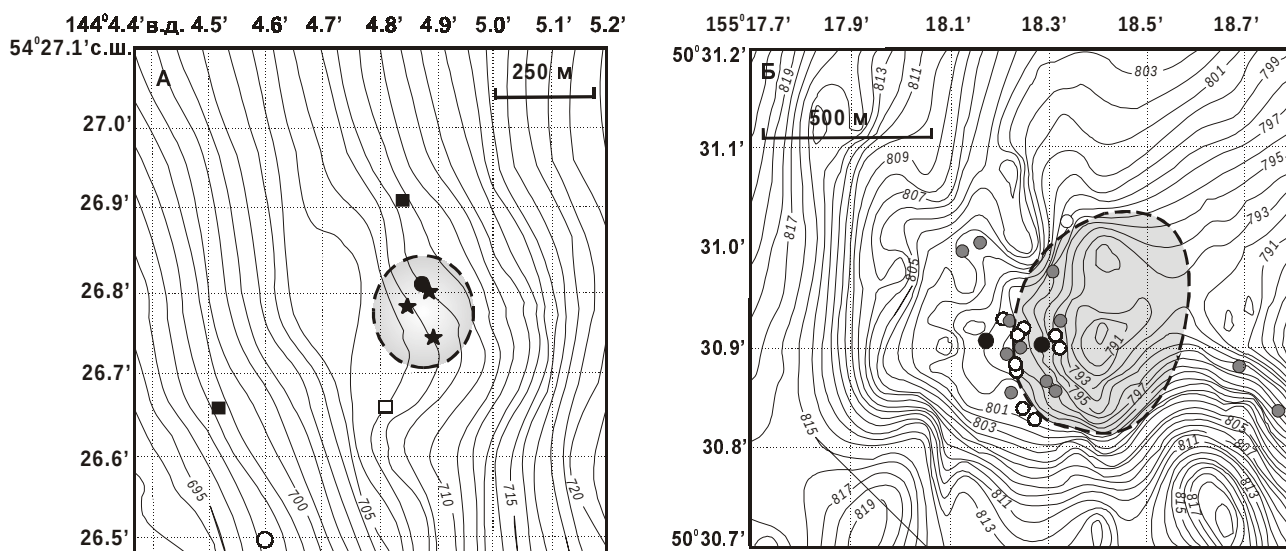


Рис. 1. Батиметрические карты районов субмаринной разгрузки газа, ассоциирующихся со скоплениями газовых гидратов вблизи о. Сахалин (А) и о. Парамушир (Б).

Карты составлены по [3, 6, 7, 9]. Границы «факелов» показаны пунктирными линиями, изобаты — в метрах. Черные значки — керны, вскрывшие газовые гидраты, белые значки — керны, обнаружившие косвенные признаки присутствия газовых гидратов, серым цветом выделены станции грунтового пробобора, не выявившие признаков присутствия газогидратов

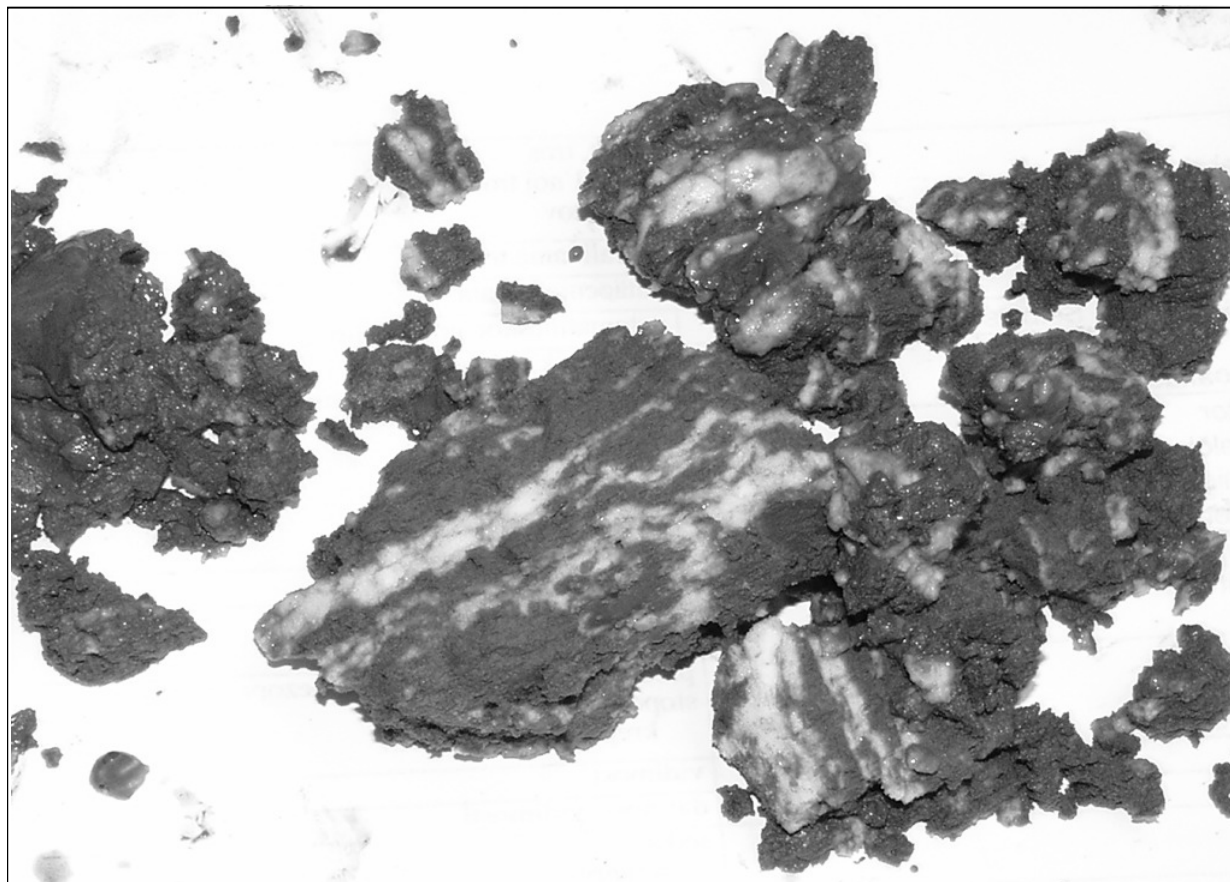


Рис. 2. Линзовидно-слоистая текстура керна, обусловленная формированием газовых гидратов.
Охотское море, скопление гидратов в прибрежье о. Сахалин

ниже, чем полученное для гидратного газа в экспедиции 1986 г., и составило $-67,3\%$ [9].

В прибрежье о. Сахалин проводился грунтовый пробоотбор на трех полях субмаринной разгрузки газа. Наиболее интересные результаты получены в районе одного из полей, где газовые гидраты были обнаружены на пяти грунтовых станциях [3, 5] (рис. 1А). Вмещающие газовые гидраты алевропелиты были представлены преимущественно диатомовыми илами с незначительной примесью терригенного материала. Глубина залегания кровли газогидратосодержащих отложений варьировала от 0,3 до 1,2 м, а их вскрытая мощность составила от 0,1 до 1 м. На всех станциях газовые гидраты прослеживались вплоть до забоя.

В кернах, отобранных на некоторых станциях, газовые гидраты имели линзовидно-слоистую текстуру, напоминающую криогенную [3, 4, 5, 18]. Слои и линзы газогидратов толщиной от 0,5 до 7 мм располагались параллельно морскому дну (рис. 2). Слоистость, обусловленная гидратами, наблюдалась во всех газогидратоносных интервалах; иной слоистости, в частности седиментационной, обнаружено не было. Часто два соседних субгоризонтальных прослоя гидратов соединялись третьим — наклонным. Реже газовые

гидраты наблюдались в виде субвертикальных, близких к цилиндрическим, выделений диаметром до 0,5 см и длиной до 5 см. Предполагается, что это заполненные газовыми гидратами трубочки полихет (класс морских червей). Не исключается также, что газовые гидраты находятся между прослоями и линзами в виде микровключений в порах. Максимальное газогидратосодержание в гидратоносных интервалах составило, по визуальным оценкам, 30–40% от объема породы. При этом никакой закономерности в вариациях формы, размеров и количества гидратных образований по глубине не наблюдалось. В одном из гидратосодержащих кернов были отмечены многочисленные карбонатные конкреции и наросты карбоната кальция на раковинах моллюсков.

Таким образом, скопления газовых гидратов у о. Сахалин характеризуются гидратопоявлениями трех типов: 1) гидраты, формирующие субгоризонтальную линзовидно-слоистую текстуру отложений [4]; 2) изометричные включения гидратов, обуславливающие порфировидную текстуру отложений [9]; 3) гидраты, представляющие собой микроскопические включения в поровом пространстве отложений, в большинстве случаев диагностируемые только по кос-

венным признакам (поскольку при подъеме кернов они быстро разлагаются) [3].

В качестве косвенных признаков присутствия газовых гидратов в отложениях принимались во внимание следующие показатели: уменьшение содержания хлорид-ионов в поровой воде с увеличением поддонной глубины и отдельные отрицательные аномалии хлорности, вызванные разложением газовых гидратов в кернах; аномально высокая газонасыщенность отложений; разжижение и повышенная обводненность осадков. Вместе с тем в некоторых кернах было зафиксировано повышение содержания хлорид-иона с увеличением поддонной глубины, что интерпретировалось как результат концентрирования солей в поровой воде интервалов осадочного разреза, смежных с гидратосодержащими осадками, поскольку при образовании гидратов, аналогично льдообразованию, лишь пресная вода вовлекается в их кристаллическую структуру [9]. Визуальные оценки содержания газогидратов в кернах хорошо коррелировались с концентрацией хлорид-ионов в поровой воде.

Основным газом, выделяющимся при разложении гидратов, является метан [18]. Согласно данным изотопного анализа углерода метана, выделившегося из гидратов при их спонтанной дегазации (значения $\delta^{13}\text{C}$ изменяются в интервале от $-59,6\text{‰}$ до -67‰ [9, 19]), гидратный газ может иметь как биохимическую, так и катагенетическую природу, и, вероятно, представляет собой полигенетическую смесь.

Исследования газовых гидратов в скоплении вблизи о. Сахалин, выполненные двумя экспедициями по программе КОМЕХ, позволили выявить ряд интересных особенностей. Вскрытые гидраты формировали линзовидно-слоистые текстуры, субпараллельные дну моря, описанные ранее в работах [4, 9]. Обращает на себя внимание наблюдавшиеся изменения во времени поддонной глубины, на которой обнаруживаются гидратосодержащие отложения. В частности, в ходе экспедиции 1999 г. на судне «Маршал Геловани», газогидратосодержащие интервалы были обнаружены на поддонных глубинах 3–3,2 м [7, 20], а спустя два года в том же районе образцы газовых гидратов были подняты с поддонной глубины 4–4,2 м. Эти факты могут свидетельствовать о значительном увеличении поддонной глубины нахождения газовых гидратов за последние 10 лет.

Результаты изотопного анализа кислорода и водорода поровой и гидратной воды позволили оценить состав исходного газогидратообразующего флюида в рассматриваемом скоплении. При гидратообразовании, наряду с опреснением происходит накопление тяжелых изотопов как кислорода, так и водорода воды в результате изотопного фракционирования [21]. Например, коэффициент разделения $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ для гидратов составляет 1,003 [22], что определяет разницу между изотопным составом исходной и гидратной воды в 3‰. Хорошая корреляция концентрации хлорид-ионов с изотопным составом воды позволила сделать вывод, что газовые гидраты рассматриваемого скопления образовались из поровой воды с содержанием хлорид-ионов от 530 до 570 ммоль/л и изотопным составом воды: кислорода от $-1,4\text{‰}$ до $-1,8\text{‰}$ и водорода от -13‰ до -18‰ относительно SMOW (Standart Mean Ocean Water — стандарт средней океанической

воды). Флюид с таким составом, вероятнее всего, представляет собой смесь морской воды и фильтрующей снизу воды, обогащенной солями.

Другой особенностью, выявленной в результате гидрогеохимических исследований в рейсах 1999–2002 гг., является линейное увеличение хлорности поровой воды вниз по осадочному разрезу. Характер связи элементного состава поровой воды с содержанием хлорид-ионов в керне, отобранном на одной из станций, позволил предположить, что в прибрежье о. Сахалин наряду с разгрузкой свободного газа имеет место и восходящая миграция воды с повышенным содержанием ионов хлора и калия. Данные по изотопному составу кислорода и водорода поровой воды и воды из гидратосодержащего образца, полученного из этого же керна, не выявили увеличения значения δD и $\delta^{18}\text{O}$. Вместе с тем, в одном из кернах, отобранном на некотором удалении от газового «факела» и вскрывшем аномально газонасыщенные отложения, выявляются значительные вариации хлорности поровой воды по разрезу. Понижение содержания хлорид-иона, сопровождающееся «утяжелением» изотопного состава кислорода и водорода в поровой воде из некоторых интервалов вскрытого осадочного разреза, можно интерпретировать как следствие нахождения в поровом пространстве микровключений гидратов, разложившихся при подъеме керна на поверхность. Повышение концентраций ионов хлора в смежных интервалах является свидетельством сегрегационного механизма гидратообразования.

Механизмы формирования газовых гидратов в Охотском море

Приуроченность известных скоплений газовых гидратов в Охотском море к очагам разгрузки газа не вызывает сомнений. Скопления такого типа имеют ряд особенностей. Рассмотрим их в рамках геологической модели газогидратообразования в очагах разгрузки, предложенной в работах [4, 9, 18], с учетом некоторых других опубликованных данных [6, 19, 20] и новых материалов, имеющих в распоряжении авторов.

Газовые гидраты в рассматриваемых скоплениях образуются на очень малых поддонных глубинах, в частности, в прибрежье о. Сахалин они были обнаружены в интервале поддонных глубин от 0,3 до 1,2 м. Существование газа в гидратной фазе в непосредственной близости от морского дна возможно только в условиях постоянного его притока снизу. Об этом же свидетельствует и отмечаемое в ряде случаев значительное содержание газовых гидратов в отложениях (до 40%). Глубина моря вблизи о. Сахалин и о. Парамушир составляет от 600 до 1000 м, гидростатическое давление варьирует от 6 до 10 МПа, а придонная температура изменяется в интервалах $2,2\text{--}2,3\text{ °C}$ и $1,7\text{--}2,2\text{ °C}$, соответственно. Зона стабильности гидратов метана при таких значениях температуры и давления на дне может простираться до поддонных глубин, достигающих по крайней мере 100 м. Положение нижней границы этой зоны определяется величиной геотермического градиента, тогда как глубина залегания гидратосодержащих отложений зависит в первую очередь от интенсивности восходящего потока газа. Чем интенсивнее поток газа, тем на меньшей поддон-

ной глубине могут образовываться газовые гидраты [4]. Обнаруженное в ходе недавних экспедиций увеличение глубины залегания кровли гидратосодержащих отложений возможно является свидетельством уменьшения интенсивности восходящего потока газа со временем. Вместе с тем разница в поддонной глубине нахождения газогидратосодержащих отложений может быть результатом неоднородности распределения агрегатов газовых гидратов по разрезу в пределах одного скопления, ограниченного областью разгрузки газонасыщенного флюида. Гидрогеохимические данные, полученные в рамках программы КОМЕХ, свидетельствуют о современном и достаточно быстром процессе газогидратообразования в очаге разгрузки флюидов у о. Сахалин.

Другой особенностью скоплений газовых гидратов, формирующихся в очагах разгрузки газонасыщенных флюидов, являются специфические текстуры гидратосодержащих отложений. Гидратообусловленная линзовидно-слоистая текстура отложений, определяемая субпараллельными шлирами, чередующимися с более или менее выдержанными прослойками гидратов, аналогична криогенной текстуре, формирующейся при промерзании тонкозернистых отложений [9]. Такие гидратные текстуры обнаружены в скоплениях гидратов в Мексиканском заливе, в прибрежьях Северной Калифорнии и штата Орегон. В субмаринной обстановке газовые гидраты могут образовываться только при перенасыщении газом поровой воды. В условиях разгрузки свободного газа насыщение им поровой воды за пределами собственно газовой струи должно происходить путем диффузии. При этом газовые гидраты могут образовываться только в пределах диффузионного ореола рассеяния. Линзовидно-слоистая текстура формируется при связывании поровой воды диффундирующим газом. Недостаток воды, способной образовывать гидраты, в месте начала процесса гидратообразования восполняется за счет миграции поровой воды из близлежащих отложений к фронту гидратообразования (рис. 3). Такой процесс образования гидратов был назван сегрегационным [4].

Существенная роль в формировании скоплений газовых гидратов в рассматриваемом очаге разгрузки принадлежит не только процессам диффузии газа, но также и фильтрации газонасыщенной воды в направлении дна, о чем свидетельствуют данные гидрогеохимических исследований, описанных выше. Наличие восходящего потока фильтрующегося флюида весьма важно для осуществления процесса гидратообразования на некотором расстоянии от очага разгрузки. Мигрирующая снизу вода становится переносчиком тепла в направлении дна. Этим определяется температурный градиент между центром очага разгрузки флюида (характеризующегося максимальными температурами) и его периферией (где температура понижается). Пониженные температуры создают благоприятные термобарические условия для образования гидратов на некотором расстоянии от центра очага разгрузки газа (т.е. за пределами собственно газовой струи, где насыщение поровой воды газом значительно меньше). Таким образом, процесс гидратообразования может идти одновременно как в месте наиболее интенсивного потока газа, так и на некотором удалении от него. Диффузия растворенного в воде газа в этом случае является

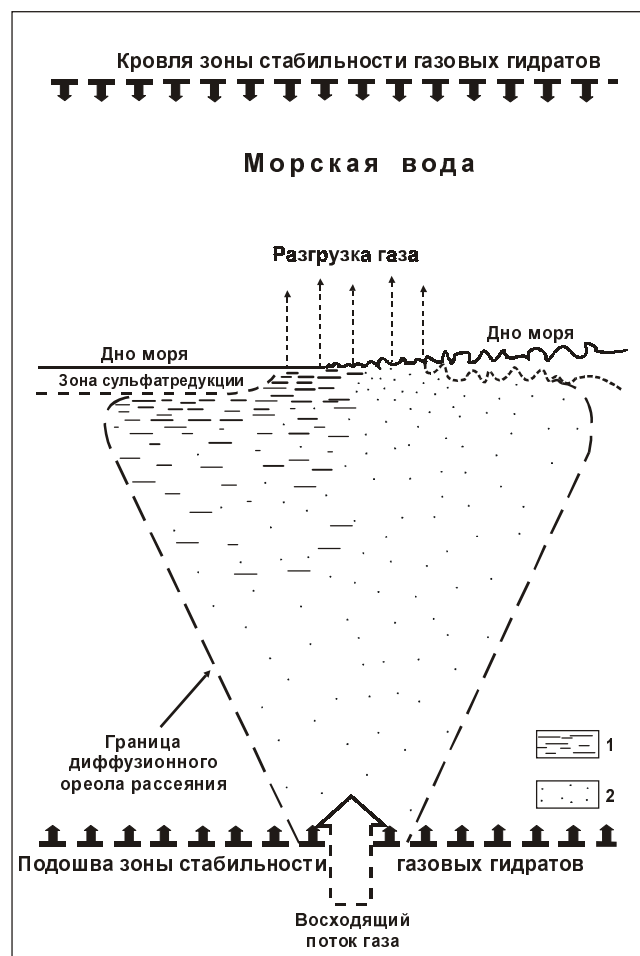


Рис. 3. Геологическая модель формирования скопления газовых гидратов в очаге разгрузки газа в Охотском море [18]:

1 — гидратообусловленные линзовидно-слоистые текстуры газогидратосодержащих осадков; 2 — порфировидные текстуры

основным механизмом, ответственным за гидратообразование, как и отмечалось ранее в работах [4, 9]. С понижением температуры равновесное давление гидратообразования (и, как следствие, растворимость газа в воде) также понижается, инициируя тем самым процесс образования газовых гидратов.

Сосуществование газовых гидратов и различных образований аутигенных карбонатов (конкреции, корки и т.п.) в зоне разгрузки свободного газа, вероятно всего, связано с окислением метана, ведущим к насыщению воды углекислым газом и последующему выпадению из растворов карбонатов, о чем свидетельствуют данные, приведенные в [2, 10, 23].

В заключение отметим особенности распределения влажности по вскрытому грунтовым пробоотбором разрезу в рассматриваемых очагах разгрузки флюидов. Поскольку гидратосодержащие отложения вблизи раздела вода—дно представляют собой очень однородные тонкозернистые осадки, то очевидно, что в процесс образования гидратов могла вовлекаться не только поровая вода из интервала гидратообразования, но и поровая вода из близлежащих к гидратосодержащему слою интервалов, а

также придонная морская вода. Так, на одной из грунтовых станций, расположенной в границах скопления гидратов у о. Сахалин, по данным [18], влажность отложений в слоях, прилежащих к гидратосодержащим, не достигала и 45%(масс.), тогда как в гидратоносных интервалах она увеличивалась до 65—66% [3]. Если бы гидраты образовывались только из местной поровой воды, влажность однородных отложений оставалась бы одинаковой и в гидратных, и в безгидратных интервалах. Отмеченная разница в значениях влажности до 20%(масс.), безусловно, свидетельствует о миграции воды при гидратообразовании.

Геологическая обстановка в районах скопления газовых гидратов

Как отмечалось выше, места предполагаемых гидратопоявлений [2, 3, 9] в Охотском море были определены по данным эхолотирования и сейсмоакустического профилирования, а наличие газовых гидратов подтверждено грунтовым пробоотбором. Оба скопления газовых гидратов в прибрежье о. Сахалин и о. Парамушир оказались приурочены к очагам субмаринной разгрузки газа, проявляющимся на эхограммах в виде аномалий типа «факел» в водной толще [3, 24].

Район газогидратопоявления вблизи о. Парамушир расположен в пределах молодой Прикурильской зоны прогибания земной коры, мощность кайнозойских отложений в которой достигает 5 км [25]. Характерной особенностью района являются магматические диапиры, застывшие в толще осадочных пород, либо достигшие дна, которые, по предположению Л.П. Зоненшайна с соавт. [2], могли внедриться в толщу пород, содержащих гидраты газа и вызвать их разложение под воздействием тепла и, как следствие, инициировать выход газа на дне. Мы считаем, что в таком сценарии не учитывается природа самих газовых гидратов; вероятнее всего, в данном случае гидраты не разрушаются, а образуются. Источником газа, который обуславливает эхолотный «факел» над скоплением газовых гидратов, является газовая залежь. Судя по имеющимся сейсморазведочным данным [26], газовая залежь в районе газогидратопоявления возможно располагается уже на глубине около 200 м ниже дна моря.

Кроме этого, на основании данных одноканального сейсмопрофилирования методом отраженных волн общей глубинной точки в районе выходов газа на дне можно полагать, что газовые факелы в водной толще приурочены к поднятиям акустического фундамента (сейсмический горизонт, ниже которого не прослеживаются отражения, вызванные осадочной слоистостью) и связаны с наличием газонасыщенных отложений под ними. Это проявляется в исчезновении корреляции сейсмических сигналов и прогибании отражающих горизонтов за счет снижения скорости сейсмических волн в газонасыщенных отложениях [9]. Сейсмограммы, записанные при сейсмопрофилировании, проведенном в районе Курильской дуги, показали амплитудно-скоростные аномалии (VAMP's — velocity-amplitude anomalies), которые были объяснены присутствием восходящих потоков свободного газа, экранируемых скоплениями газовых гидратов [27].

Мощность осадочного чехла в районе Курильской гряды составляет порядка 1—1,5 км.

На северо-восточном склоне о. Сахалин в пределах западного борта впадины Дерюгина в рейсе судна «Геолог Петр Антропов» эхолотированием было выявлено 10 полей субмаринной разгрузки газа, зафиксированных по газовым «факелам» в водной толще [9]. Они были обнаружены в интервале глубин моря от 620 до 1040 м, в относительно узкой зоне шириной менее 20 км, вытянутой с севера на юг почти на 130 км. Установлено, что некоторые поля разгрузки газа расположены на расстоянии 0,5—1 км одно от другого. Возможно, они имеют общий глубинный источник газа. Позже при исследованиях по программе КОМЕХ в прибрежье о. Сахалин было обнаружено до 150 очагов разгрузки газа, фиксируемых по данным эхолотирования [6, 7]. Район исследований располагается вблизи нефтегазоносных площадей Сахалина и примыкающего к нему шельфа. Эти месторождения рассматриваются как источники газа, мигрирующего в зону стабильности газовых гидратов, часть которого трансформируется в гидратную фазу, а другая часть разружается на дне моря.

В этом районе осадочный чехол мощностью до 5—6 км представлен главным образом кайнозойскими толщами [28]. По данным среднечастотного сейсмопрофилирования, в этой зоне предполагается наличие многочисленных субмеридиональных разломов, которые пересекают слабонаклоненные или субгоризонтально залегающие отложения, образуя области нарушений шириной порядка нескольких сотен метров [3, 9]. Вероятно, эти области служат путями миграции газа снизу, поскольку здесь отмечаются сейсмические признаки газосодержащих отложений.

Интенсивные геофизические работы, проводившиеся в ходе 26-го рейса судна «Профессор Гагаринский» по программе КОМЕХ, показали, что пространственное расположение очагов разгрузки газа, обнаруженных на континентальном склоне в прибрежье северо-восточной окраины о. Сахалин, очевидно, контролируется тектоническим режимом региона [6]. Было установлено, что все известные к настоящему моменту очаги разгрузки газа в этом районе расположены вдоль взбросов, инициированных процессами сжатия в северо-западном и юго-восточном направлениях. Предполагается также, что компрессионный режим преобладает в этом районе и в настоящее время [7]. Приведенные данные свидетельствуют о том, что геологические условия в указанном районе являются вполне благоприятными для процессов миграции флюидов в направлении морского дна, и как следствие, для образования скопления газовых гидратов.

Следует также отметить, что в ходе сейсморазведочных работ в Охотском море, особенно в районе впадины Дерюгина, неоднократно был обнаружен такой геофизический признак присутствия газовых гидратов, как BSR (Bottom Simulating Reflector) — отражающий сейсмический горизонт, имитирующий дно. Японские исследователи при проведении сейсмического профилирования в японской экономической зоне Охотского моря в прибрежье о. Хоккайдо также обнаружили области распространения BSR [29]. Таким

образом, сейсмические данные доказывают широкое распространение в Охотском море отражающего сейсмического горизонта, маркирующего положение нижней границы зоны стабильности газовых гидратов.

Потенциально газогидратоносные акватории Охотского моря

Исходя из вышесказанного и принимая во внимание широкое распространение очагов разгрузки газонасыщенных флюидов, создающих благоприятные условия для образования газовых гидратов, а также подходящие термобарические условия, можно заключить, что в пределах Охотского моря велика вероятность существования и других скоплений газовых гидратов.

Для выявления потенциальных районов распространения газовых гидратов была построена прогнозная карта условий гидратоносности Охотского моря в масштабе 1:7500000 (рис. 4 и 5). Карта явилась результатом региональной оценки (в значительной мере качественной) потенциальной гидратоносности акватории Охотского моря. На картах выделены области, где возможно присутствие скоплений газовых гидратов различного генетического типа [9], оценены мощности термобарической зоны стабильности газовых гидратов и определены акватории, в пределах которых газовые гидраты не могут существовать из-за отсутствия либо необходимых термобарических условий, либо достаточного для образования гидратов количества газа.

Для выделения акваторий с достаточными (или недостаточными) для гидратообразования термобарическими условиями и оценки мощности зоны стабильности газовых гидратов использовались следующие параметры: давление (глубина воды), температура дна (придонного слоя воды), геотермический градиент в пределах первых сотен метров осадочного разреза, а также равновесные значения температуры и давления для системы «гидрат—вода + газ». При составлении карты была использована программа расчета поддонной глубины подошвы зоны стабильности газовых гидратов, образованных из чистого метана и пресной воды [30]. Надежность получаемых результатов существенно зависит от точности используемой величины геотермического градиента — ее неопределенность порядка $\pm 0,1$ °C/км дает погрешность оценки общей глубины подошвы зоны стабильности (глубина воды плюс поддонная глубина) около $\pm 1\%$. По результатам расчетов были построены номограммы для оценки поддонной глубины подошвы зоны стабильности гидрата метана при температуре дна (2—2,2 °C) и геотермическом градиенте (от 2 до 7 °C/100 м) для глубин моря от 0 до 1000 м и от 500 до 5000 м. Номограммы позволили методом интерполяции получить искомую величину для любых значений температуры и геотермического градиента в указанных пределах, а также учесть соленость воды, участвующей в гидратообразовании. Например, вода с соленостью, близкой к морской, образует гидраты при более низкой температуре по

сравнению с пресной (разница температур при этом составляет порядка 2 °C) и, следовательно, для учета солености морской воды достаточно принять температуру дна на 2 °C больше реальной. Поскольку сведений о геотермическом градиенте, а тем более о его вариациях, в пределах акватории Охотского моря относительно мало, основным материалом для оценки вариаций геотермического градиента служили результаты измерения теплового потока зондовым методом [31]. Геотермический градиент оценивался по этим данным с учетом средних значений теплопроводности. Дополнительные оценки вариаций геотермического градиента сделаны на основе материалов сейсморазведки по глубине наблюдения отражающего сейсмического горизонта BSR, маркирующего подошву зоны стабильности газовых гидратов. Был использован метод, впервые предложенный в [32].

Мощность зоны стабильности газовых гидратов (см. рис. 5) рассчитывалась в точках, распределенных по равномерной сети, и путем интерполяции строились изолинии с интервалом 100 м. Нулевая изолиния, согласованная с сеткой изобат, является границей распространения термобарической зоны стабильности гидратов метана.

Как известно, необходимым условием гидратообразования в недрах является значительное содержание органического вещества в отложениях при относительно высокой скорости его седиментации, что обеспечивает генерацию биохимического метана в верхней части разреза, а при большой мощности осадочных толщ обуславливает возможность образования катагенетического газа. Исходя из этих представлений, к негидратоносным были отнесены те акватории Охотского моря, где нет достаточного для образования гидратов количества газа, т.е. отсутствуют условия для его генерации и сохранения. Это те районы, в пределах которых мощность отложений не превышает 500 м, поскольку примерно до такой поддонной глубины может простирается зона сульфатредукции, препятствующая метаногенерации. Все остальные районы Охотского моря, где термобарические условия благоприятны для гидратообразования, должны рассматриваться как потенциально гидратоносные. Если мощность отложений не превышает 2 км, то в случае достаточного количества органического вещества, способного произвести столько газа, сколько необходимо для насыщения им поровой воды, источником для гидратообразования является только биохимический газ. Однако фактические данные [33] свидетельствуют о том, что в районах с мощностью осадочного чехла менее 2 км в большинстве случаев содержание органического вещества в отложениях недостаточно для образования газа. При мощности осадочных толщ более 2 км гидраты могут образовываться как биохимическим, так и катагенетическим газом. Таким образом, изопакхита (линии, соединяющие на карте или плане одинаковые мощности разновозрастных отложений) осадочного чехла 2 км ограничивает наиболее вероятные потенциально газогидратоносные акватории.

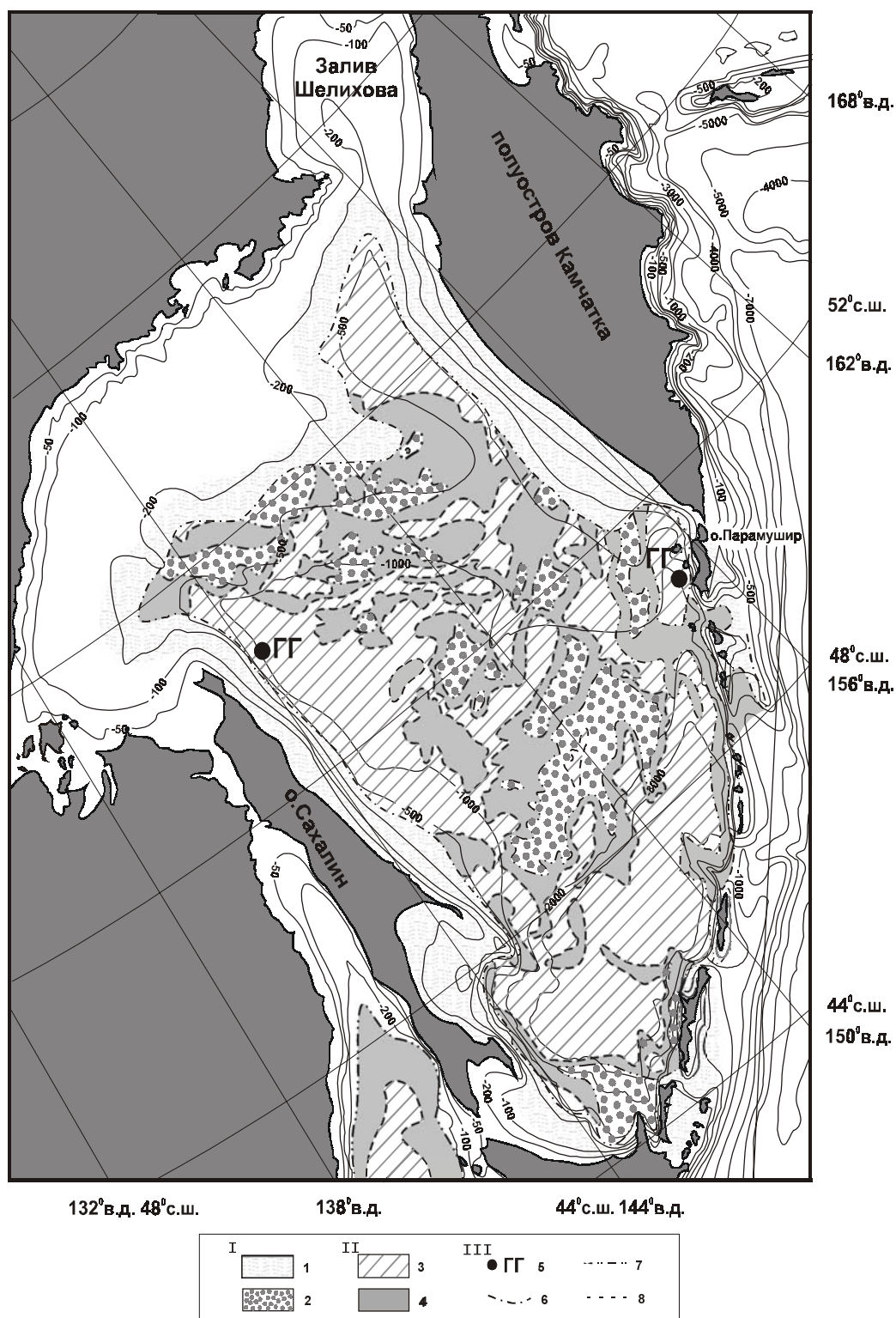


Рис. 4. Прогнозная карта условий гидратоносности Охотского моря:

I — области, в которых гидраты углеводородных газов не могут существовать из-за отсутствия необходимых термобарических условий (1) и достаточного количества газа (2); II — области, где возможно образование скоплений газовых гидратов фильтрогенного типа преимущественно из катагенетического газа (3) и фильтрогенного типа преимущественно из биохимического газа (4). III — прочие обозначения: 5 — визуальные наблюдения газовых гидратов; 6 — граница термобарической зоны стабильности гидратов метана; 7 — граница областей с отсутствием достаточного для гидратообразования количества газа; 8 — граница между областями распространения различных типов скоплений газовых гидратов. Изобаты — в метрах

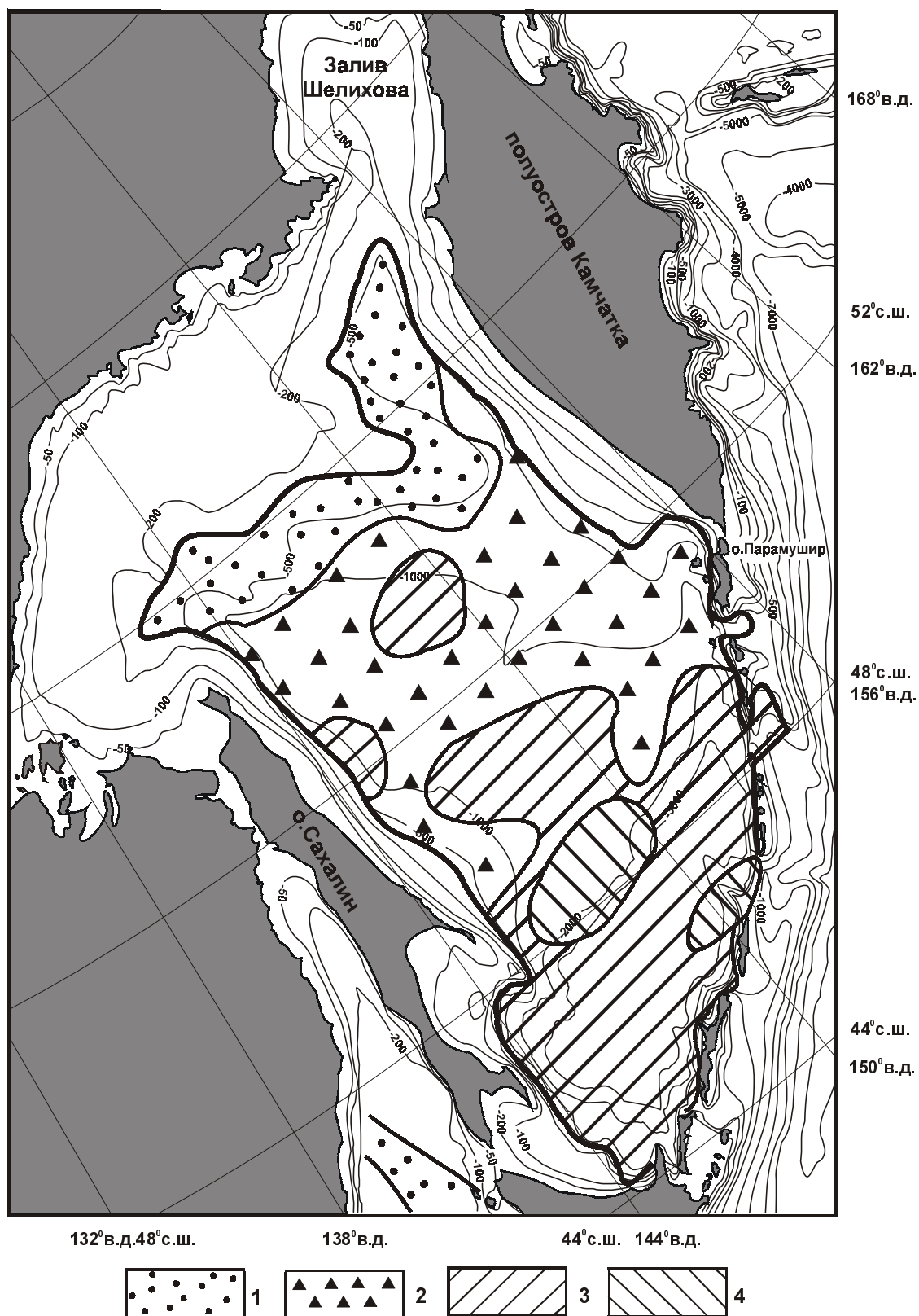


Рис. 5. Площади распространения и мощности зоны стабильности газовых гидратов (жирная линия) в Охотском море:
1 — менее 100 м; 2 — от 100 до 200 м; 3 — от 200 до 300 м; 4 — от 300 до 400 м

Оценка негидратоносных и потенциально газогидратоносных площадей в Охотском море

Негидратоносные акватории

Площадь, тыс. км ²	Отсутствие <i>pT</i> -условий		Недостаточное количество газа	
	площадь, тыс. км ²	% от площади моря	площадь, тыс. км ²	% от площади моря
1603	753	47,0	130	8,1

Потенциально газогидратоносные акватории

Площадь, тыс. км ²	% от площади моря	% от площади <i>pT</i> -условий	Средняя мощность зоны стабильности, км	Максимальный объем зоны стабильности, тыс. км ³
720	44,9	84,7	до 0,2	144

Оценки потенциально газогидратоносных и негидратоносных площадей в Охотском море (см. таблицу) показывают, что относительно ограниченное распространение потенциально гидратоносных площадей в Охотском море (менее 50%) связано с большими площадями, где отсутствуют необходимые термобарические условия (обширные шельфы).

Что касается прогнозов запасов газа в скоплениях газовых гидратов Охотского моря, то в работе [34] можно найти оценку количества метана, сосредоточенного в скоплении газовых гидратов, приуроченного к очагу разгрузки флюидов в побережье о. Сахалин. В соответствии с этой оценкой в данном скоплении должно быть сконцентрировано $8 \cdot 10^8$ м³/км² газа. Для такой оценки за основу принималась геологическая модель образования гидратов, опубликованная ранее в работе [18]. Суммарное же количество метана в газовых гидратах Охотского моря, по данным [35], оценивается величиной порядка $2 \cdot 10^{12}$ м³.

Заключение

Результатом проведенных в последнее десятилетие исследований явилась разработка геологической модели газогидратообразования в очагах разгрузки флюидов Охотского моря. В частности, установлено, что газовые гидраты в этом регионе образуются по двум моделям: из фильтрующейся газонасыщенной воды и в ходе сегрегации воды мигрирующим газом. Обе эти модели имеют принципиальное значение для понимания процессов газогидратообразования в очагах разгрузки газосодержащих флюидов.

Имеющиеся на данный момент геологические, гидрогеохимические, геотермические и геофизические материалы по газовым гидратам Охотского моря позволили перейти к качественным региональным оценкам объемов газа, сосредоточенного в газовых гидратах, и к прогнозированию потенциально гидратонос-

ных акваторий. Эти проблемы составляют часть фундаментальных исследований по гидратной тематике — выяснение роли газовых гидратов в ряду прочих горючих полезных ископаемых. Надо сказать, что многие принципиальные вопросы в рамках этих проблем все еще далеки от решения и требуют проведения многоплановых работ в данном направлении. Такие работы должны включать как экспериментальные и экспедиционные исследования, так и разработку новых технологий и методов, направленных на изучение природных газовых гидратов.

* * *

Авторы выражают благодарности сотрудникам лаборатории геологии газовых гидратов ВНИИОкеангеология Л.Л. Мазуренко и В.В. Каулио, а также участникам и организаторам экспедиции 2002 г. на научно-исследовательском судне «Академик Лаврентьев» по программе КОМEX.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 02-05-64346 и № 02-05-06321.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинсбург Г.Д., Соловьёв В.А. Литология и полезные ископаемые, 1990, № 2, с. 76—87.
2. Зоненшайн Л.П., Мурдмаа И.О., Баранов Б.В. и др. Океанология, 1987, т. 27, с. 795—800.
3. Соловьёв В.А., Гинсбург Г.Д., Дуглас В.К. и др. Отечественная геология, 1994, № 2, с. 10—17.
4. Соловьёв В.А., Гинсбург Г.Д. Докл. РАН, 1996, т. 349, № 5, с. 654—657.
5. Ginsburg G.D., Soloviev V.A., Cranston R.E., Lorenson T.D., Kvenvolden K.A. Geo-Marine Letters, 1993, № 13, p. 41—48.

6. Cruise Report KOMEX I and II: RV Professor Gagarinsky Cruise 22, RV Akademik Lavrentyev Cruise 28. Eds. N. Biebow, E. Hutten. GEOMAR Report 82. 1999, 188 p.
7. Cruise Report KOMEX V and VI: RV Professor Gagarinsky Cruise 26, MV Marshal Gelovany Cruise 1. Eds. N. Biebow, T. Ludmann, B. Karp, R. Kulinich. GEOMAR Report 88. 2000, 296 p.
8. Авдейко Г.П., Гавриленко Г.М., Чертова Л.В. и др. Вулканология и сейсмология, 1984, № 6, с. 66—81.
9. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. СПб: ВНИИОкеангеология, 1994, 199 с.
10. Лейн А.Ю., Гальченко В.Ф., Покровский Б.Г. и др. Геохимия, 1989, № 10, с. 1396—1406.
11. Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.Ф., Кутний В.А. Литология и полезные ископаемые, 1995, № 5, с. 451—461.
12. Paull C.K., Chanton J.P., Neumann A.C., Coston J.A., Martens C.S. PALAIOS, 1992, v. 7, p. 361—375.
13. Hovland M., Croker P.F., Martin M. Mar. and Petrol. Geol., 1994, v. 11, № 2, p. 232—246.
14. Kulm L.D., Suess E. J. Geophys. Res., 1990, v. 95, № B6, p. 8899—8915.
15. Belenkaia I. Abstr. of 6th Int. Conf. Gas in Marine Sediments, St. Petersburg, Shallow Gas Group/VNIIОкеангеология, 2000.
16. Отчет о работах в 11-А рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (Охотское море) 20.06—14.07 1986 года. М.: ИО АН СССР, 1986, 427 с.
17. Чертова Л.В., Биличенко А.А., Стунжас П.А. Тез. докл. III съезда советских океанологов. Секция геология, геофизика и геохимия океана. Л.: Гидрометеиздат, 1987, с. 172—173.
18. Soloviev V.A., Ginsburg G.D. Mar. Geol., 1997, № 137, p. 59—68.
19. Cranston R.E., Ginsburg G.D., Soloviev V.A., Lorenson T.D. Bull. Geol. Soc. Den., 1994, v. 41, № 1, p. 80—85.
20. Wallmann K., Bolhwerk S., Kolevica A., Shulga Y. In: Cruise Report KOMEX V and VI: RV Professor Gagarinsky Cruise 26, MV Marshal Gelovany Cruise 1. Eds. N. Biebow, T. Ludmann, B. Karp, R. Kulinich. GEOMAR Report 88, 2000, p. 180—181.
21. Hesse R., Harrison W. Earth and Planet. Sci. Lett., 1981, № 55, p. 453—462.
22. Maekawa T., Imai N. In: Gas hydrates — challenges for the future. Ann. N. Y. Acad. Sci., 2000, v. 912, p. 452—459.
23. Brooks Y.M., Cox H.B., Bryant W.R. e. a. Org. Geochem., 1986, v. 10, p. 221—234.
24. Obzhirov A.I. Alaska Geology, 1992, v. 21, № 7, p. 1—7.
25. Григоренко Ю.Н. и др. В: Тектоника и нефтегазоносность Востока СССР. Тр. ВНИГРИ, 1972, вып. 309, с. 30—47.
26. Бондаренко В.И., Надежный А.М. Вулканология и сейсмология, 1987, № 2, с. 100—104.
27. Scholl D.W., Cooper A.K. AAPG Bull., 1978, v. 62, p. 2481—2488.
28. Геологическая карта Дальнего Востока СССР и прилегающих акваторий, м-б 1:1500000. Ред. Л.И. Красный, В.К. Путинцев, Б.И. Васильев, 1986.
29. Сато и др. Сб. докл. 52-й конф. технического общества нефтяной промышленности Японии, 1987, т. 52, с. 343.
30. JOIDES Journal, 1992, v. 18, № 7, p. 21—22.
31. Каталог значений теплового потока по Мировому океану. Мировой центр данных, Б2, М., 1986.
32. Yamano M., Ueda S., Aoki Y. e. a. Geology, 1982, v. 10, № 7, p. 339—343.
33. Троцюк В.Я. Прогноз нефтегазоносности акваторий. М.: Недра, 1982, 201 с.
34. Соловьев В.А. Геология и геофизика, 2002, т. 43, № 7, с. 648—661.
35. Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д., Каулио В.В., Матвеева Т.В. Метан в газовых гидратах Мирового океана. Отчет по теме 343. С-Пб.: ВНИИОкеангеология, 1998.