

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ ГАЗОВО-ФЛЮИДНЫХ ЭМАНАЦИЙ НА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОМ СКЛОНЕ О-ВА САХАЛИН (ОХОТСКОЕ МОРЕ)

Н.А. Николаева, А.Н. Деркачев, А.И. Обжиров

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Поступила в редакцию 3 июня 2008 г.

В статье обобщены данные комплексных исследований на участках проявления газово-флюидных эманаций в водной толще, на поверхности морского дна и в верхней части осадочного разреза в пределах СВ склона о-ва Сахалин (Охотское море). Детально охарактеризованы признаки, типичные для метановых сипов: наличие акустических аномалий, повышенные концентрации метана в воде и в осадках, специфические черты осадочного разреза (структурно-текстурные особенности, характер минеральных включений и газогидратов, химический состав). Компонентный состав газов (в том числе и сопутствующих газогидратов), в котором практически отсутствуют тяжелые углеводородные гомологи метана, легкий изотопный состав углерода метана и карбонатных конкреций, низкие температуры придонной воды и осадков свидетельствуют о том, что проявления многочисленных метановых эманаций связаны с генерированием газа в верхней части осадочной толщи. Признаков глубинности очага формирования газов на исследованном участке дна не установлено. Также не были обнаружены типичные подводные грязевулканические структуры.

Ключевые слова: холодные сипы, газовые гидраты, потоки метана, карбонатные конкреции, Охотское море.

ВВЕДЕНИЕ

За последние 20 лет на дне Мирового океана в различных структурно-тектонических зонах на глубинах от десятков до нескольких тысяч метров были открыты и изучены многочисленные проявления холодных газово-флюидных эманаций (cold seeps) [5, 10–12, 16, 22, 24, 27, 63, 66, 71 и др.]. Они обычно сопровождаются специфической геохимической обстановкой придонных вод и поровых вод осадков, благоприятствующей процессам аутигенного минералообразования, главным образом карбонатов различной морфологии и состава. К ним также приурочены биологические сообщества с преобладанием симбиотрофных животных и газогидраты.

Холодные сипы (или очаги фокусированной и диффузной разгрузки газов и флюидов) на континентальных окраинах представляют интерес с точки зрения нефтегазоносности акваторий, определения их источников и связи с месторождениями нефти и газа, влияния на геологические, геохимические и биологические процессы на дне морских бассейнов. При этом пристальное внимание уделяется поискам и

изучению газовых гидратов [5, 18, 43 и мн. др.]. Это обусловлено не только потенциальной возможностью использовать их как энергетическое и химическое сырье, но и необходимостью учитывать их влияние на изменение экологического и климатического состояния Земли [45, 52, 58 и др.].

Проявления холодных газово-флюидных эманаций обнаружены на дне многих окраинных морей Востока Азии, при этом наиболее крупные структуры фокусированной газовой разгрузки и сопутствующих проявлений газовых гидратов были выявлены в Охотском море [5, 10, 16 и др.]. Большой объем работ по их исследованию был выполнен в рамках российско-германского (КОМЕХ, 1998–2004 гг.) и российско-японско-корейского (СНАОС, 2003, 2005–2007 гг.) международных проектов [30–37]. Были проведены комплексные исследования на северо-восточном склоне о-ва Сахалин: сейсмоакустическое профилирование, эхозондирование, съемка локатором бокового обзора, газогеохимические и геологические исследования. В результате были выявлены два крупных района разгрузки газов с отчетливым проявлением газовых аномалий (факелов) в водной толще и проявлениями газовых

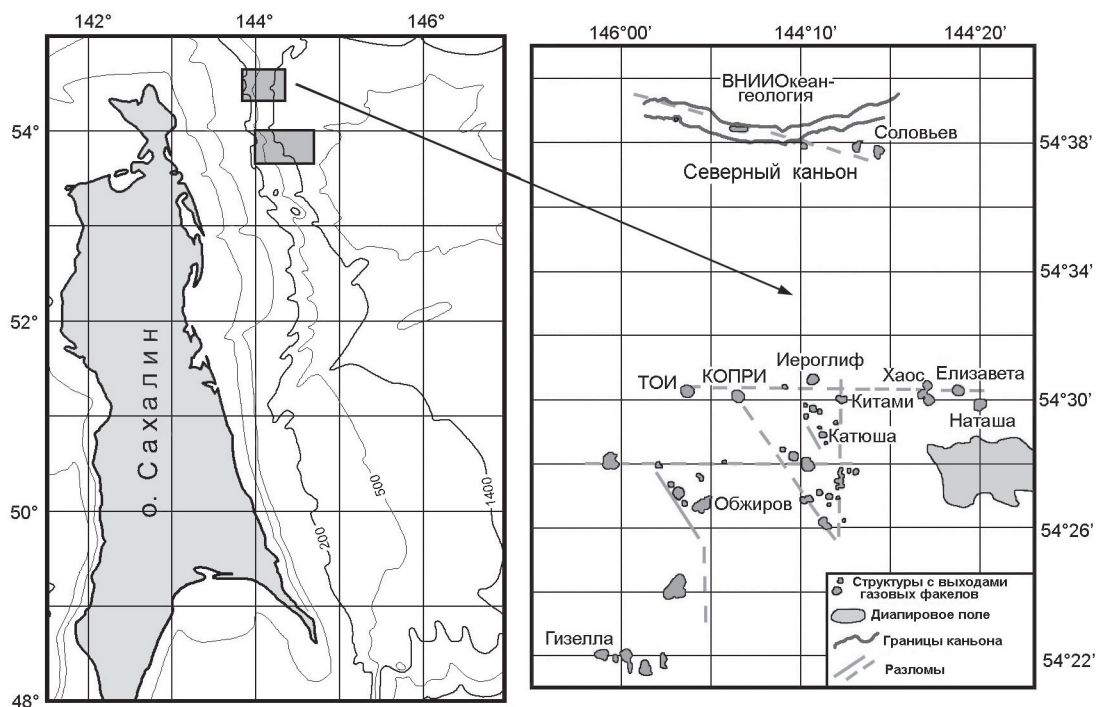


Рис. 1. Схема расположения структур газового просачивания на северо-восточном склоне о-ва Сахалин [37].

гидратов в донных осадках. Первый представляет собой обширное поле газового просачивания, расположенное в пределах широт $54^{\circ}20' - 54^{\circ}40'$, другой локализуется в 50 км южнее в пределах разлома Лаврентьева ($53^{\circ}40' - 54^{\circ}00'$) (рис. 1). В статье приведены обобщенные данные по особенностям проявления газово-флюидных эманаций в водной толще и в осадочном разрезе исследованного района.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основу работы положен обширный фактический материал, полученный в морских экспедициях в период 1998–2006 гг., в результате чего было обнаружено множество структур фокусированной газовой разгрузки, которые сопровождалась многочисленными колониями специфической симбиотрофной фауны моллюсков и карбонатными корками (по данным видеосъемки). Исследования проводились Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичева (ТОИ) ДВО РАН совместно с Институтом морских исследований им. Г. Лейбница (ИФМ-ГЕОМАР, г. Киль, Германия), Институтом полярных исследований (г. Сеул, Корея), Технологическим институтом (г. Китами, Япония), Институтом океанологии им. П.П. Ширшова (г. Москва) и ВНИИОкеангеологии (г. Санкт-Петербург). С помощью гравитационного и гидростатического пробоотборников было поднято и

изучено 77 колонок донных осадков длиной до 6 м, 27 из которых содержали горизонты, насыщенные газовыми гидратами. Комплексные литологические, минералогические и газогеохимические исследования были выполнены в ТОИ ДВО РАН при непосредственном участии авторов данного сообщения. Изотопный состав углерода и кислорода карбонатных образований был определен в лаборатории стабильных изотопов Дальневосточного геологического института (ДВГИ) ДВО РАН и в ГЕОМАРе (Германия, г. Киль) на масс-спектрометре Finnigan MAT-252 (точность определений – 0.03 ‰ для кислорода и 0.02 ‰ для углерода). Изотопный состав углерода гидратного метана исследовался в Университете г. Хоккайдо (Япония) на масс-спектрометре CF-IRMS (точность определения – 0.02 ‰). Элементный состав осадков определялся в лаборатории аналитической химии ДВГИ на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS (точность измерений – 0.1–1 ‰). Минеральный состав карбонатных образований изучался в ГЕОМАРе на рентгенофазовом дифрактометре (Philips X'Pert PRO MRD) с использованием корунда в виде внутреннего стандарта (точность определений – ± 5 вес. %).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Очаги фокусированной газовой разгрузки были обнаружены в основном в пределах островного скло-

на северо-восточного Сахалина. Склон подразделяется на три части: верхнюю (180–300 м), среднюю (300–600 м) и нижнюю (ниже 600 м), которые различаются морфологией дна и углом наклона. Заметные изменения в морфологии склона отмечаются в пределах широты 54°N. Южнее склон характеризуется значительной шириной и имеет выпуклый профиль, в северном же направлении он сужается и становится вогнутым. Подобные различия, вероятно, обусловлены тем, что на севере активно проявлены оползневые процессы, вызванные землетрясениями вдоль разломной зоны Инесса либо разложением газовых гидратов при понижении уровня моря [54, 77]. Тектонический режим этой части склона контролируется системой надвигов и взбросов, ориентированных в направлении СЗ-ЮВ. Системы разломов являются активными, морфологически они выражены на морском дне в виде уступов. Как показали исследования, все участки газового просачивания локализируются в пределах надвигов, образованных при СВ-ЮЗ сжатии, и разломы СВ простираются являются наиболее важными для просачивания газов и флюидов [31].

Акустические аномалии. В пределах района исследований в водной толще обнаружено большое количество (более 200) струйных выделений газа, называемых газовыми факелами. Впервые они были встречены здесь в 1988 г. [17]. Анализ данных акустического профилирования показал хорошую сопоставимость между обнаруженными гидроакустическими аномалиями и морфологическими особенностями склона. Найденные факелы располагаются на трех участках морского дна: вблизи бровки шельфа, в средней и нижней частях склона, при этом большая их часть концентрируется в пределах глубин 600–900 м [33, 36]. Наиболее распространенными являются факелы в виде удлиненных узких эллипсоидов, поднимающихся от морского дна в вертикальном направлении (рис. 2 а). Высота их варьирует от 90 до 500 м, ширина – до 300 м. Иногда факелы кажутся оторванными от дна и двигаются свободно в водной толще, но поддерживают свою форму и пространственную ориентацию. Менее распространены факелы сложной сноповидной формы, которые достигают высоты 400 м и ширины 600 м (рис. 2 б). Факелы в виде облаков встречаются, главным образом, над вершинами подводных холмов. Часто такие образования имеют горизонтально ориентированные слои, связывающие два смежных факела. Кроме того, встречаются целые поля факелов, вызванных незначительными газовыделениями и протягивающихся на расстояние до 10–12 км [31, 35].

В ходе проведенных исследований было описано несколько десятков структур фокусированной

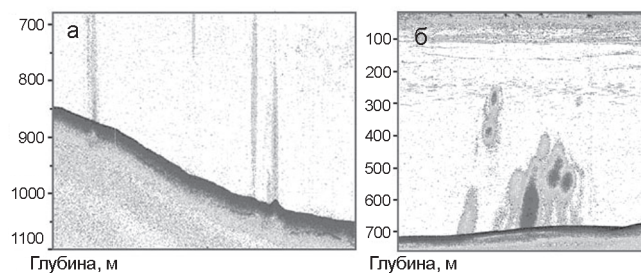


Рис. 2. Типы гидроакустических аномалий на северо-восточном склоне о-ва Сахалин [36, 37].

разгрузки метана, расположенных в основном в пределах нижней части островного склона (структуры “Китами”, “КОПРИ”, “ТОИ”, “Гизелла”, “Разлом Лаврентьева” и другие). Наиболее крупными из них являются структуры “Хаос” и “Обжиров” (рис. 3).

Исследования, выполненные на участках локализации газовых факелов и газогидратных проявлений, показали, что на структуре “Хаос” отмечаются значения геотермального градиента, типичные для холодных сипов (до 249 мК/м), в то время как на структуре “Обжиров” они значительно ниже (около 58 мК/м). По мнению Дж. Порты [35], это объясняется тем, что в первом случае просачивается газонасыщенный флюид, в то время как во втором случае отмечается выделение более чистого газа, менее способного к транспортировке тепла к поверхности.

Распределение метана в водной толще и в колонках осадков. Многолетние измерения концентраций метана в водной толще и колонках осадков района исследований позволили выявить некоторые закономерности его распределения. В пределах широт 48°–52° в придонном слое воды на глубине около 1000 м концентрация метана в основном находится в пределах фона – 20–30 нл/л, иногда увеличиваясь до 60–130 нл/л. Это свидетельствует о том, что на данном участке (от мыса Терпения до южной границы района исследований) отсутствуют значительные выделения метана из донных отложений. Однако в промежуточных слоях воды, особенно на глубине 700 м и иногда на глубинах 200–300 м, обнаружены повышенные концентрации метана (150–350 и 700–1000 нл/л, соответственно), что можно объяснить поступлением (внедрением) слоев воды, насыщенных метаном, с шельфа (рис. 4а).

На широтах 52°–54°36′ в пределах всей водной толщи зафиксированы аномальные концентрации метана, начиная с поверхности и до дна. Особенно они высоки на участке, где расположена структура “Разлом Лаврентьева”. На поверхности концентрация метана достигает 1650 нл/л, в придонном слое (380 м) –

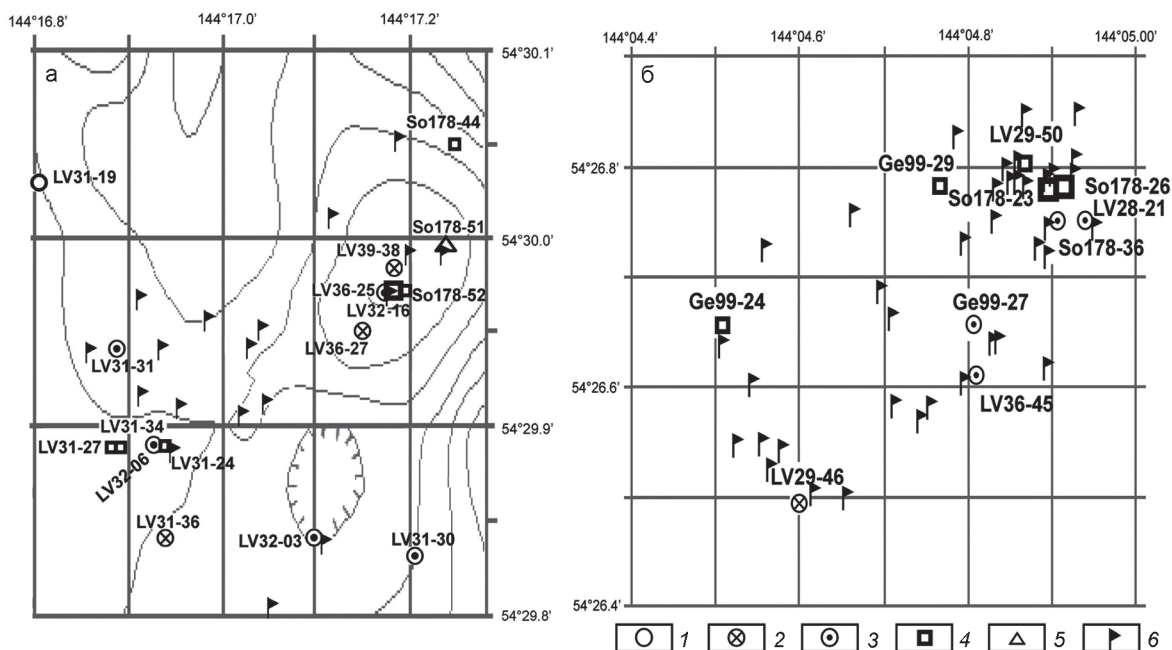


Рис. 3. Схема расположения литологических станций на структурах "Хаос" (а) и "Обжиров" (б).

1–4 – колонки осадков, содержащие: 1 – гидротроилит; 2 – раковины моллюсков, гидротроилит, признаки биотурбации и газонасыщенности; 3 – карбонатные конкреции, раковины моллюсков, гидротроилит, признаки биотурбации и газонасыщенности; 4 – газовые гидраты; 5 – телегрейфер; 6 – газовые факелы.

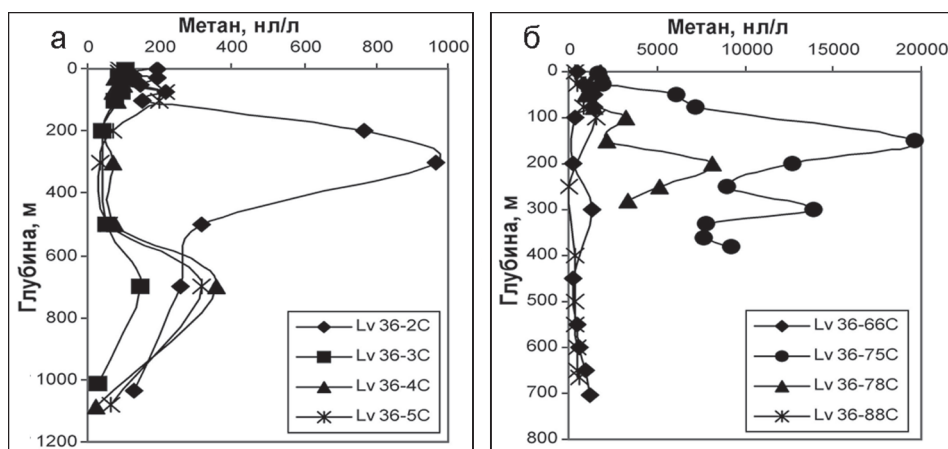


Рис. 4. Распределение метана в водной толще южной (48°–52°, а) и северо-восточной (52°–54°36', б) частях сахалинского склона.

9200 нл/л. В промежуточных слоях обнаружены еще большие концентрации – 19000 нл/л на глубине 150 м и 14000 нл/л на глубине 300 м. К северу и югу от этого участка концентрации метана снижаются, но остаются достаточно высокими – 500–5000 нл/л (рис. 4 б).

Аномалии метана здесь связаны с его потоками из донных осадков, содержащих газогидраты и свободный газ. Эти потоки обусловлены повышенной сейсмоструктурной активностью данного региона. Именно благодаря этому процессу в период с 1988 г. по настоящее время в пределах района исследований обнаружено более 200 газовых факелов и около 20

структур, где в осадках на разной поддонной глубине залегают газогидраты. Предварительные расчеты показали, что в районе исследований объем метана, поступающего из донных отложений в воду и из воды в атмосферу, составляет около 1 млн. тонн в год [18].

Изучение распределения метана в донных осадках показало, что его концентрации в поверхностном слое обычно не превышают 0.01–0.02 мл/л. Вниз по разрезу, начиная с горизонтов 100–200 см, они возрастают, достигая 0.2–0.8 мл/л (рис. 5а). Эта общая закономерность нарушается, если в осадках присутствуют газогидраты. В этом случае повышенные концентрации метана характерны для всего разреза

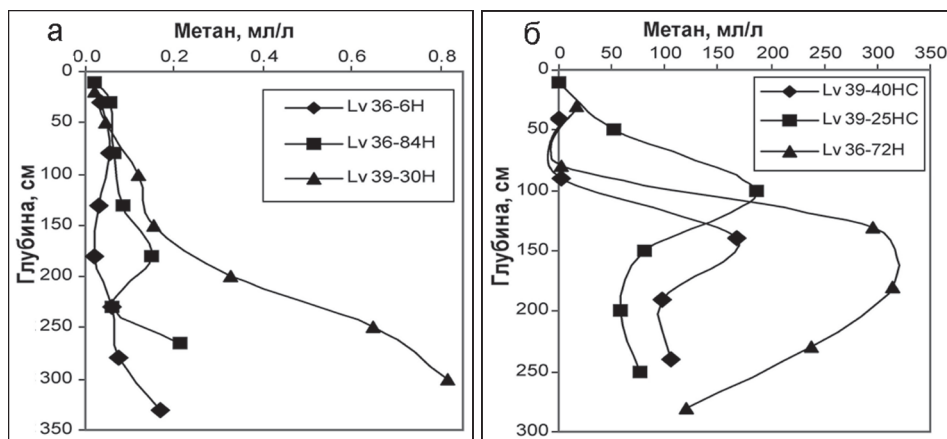


Рис. 5. Распределение метана в колонках осадков северо-восточного склона о-ва Сахалин.

а – фоновые станции, б – станции с газовыми гидратами.

осадков, при этом аномальные значения (до 300 мл/л и более) отмечаются на горизонтах, обогащенных газогидратами (рис. 5б).

Сезонные измерения показали, что осенью и весной на мелководном шельфе (глубины 20–80 м) на участках локализации потоков метана из донных отложений наблюдается выравнивание концентраций метана в водных колонках от дна до поверхности. Возможно, это связано с конвективным перемешиванием воды в эти сезоны, когда придонные воды, насыщенные метаном, поднимаясь к поверхности, формируют аномальные поля метана с концентрацией 1000–2000 нл/л и более. В эти сезоны происходит основной приток метана из воды в атмосферу. Летом на шельфе Сахалина формируется более теплый с меньшей соленостью поверхностный слой воды с почти равновесной с воздухом концентрацией метана (70–80 нл/л), при этом приток метана из воды в атмосферу ослабевает или прекращается.

Газовые гидраты. Детальные исследования показали, что в пределах северо-восточного склона о-ва Сахалин существуют не только многочисленные структуры разгрузки газовых потоков, но и осадки, содержащие газовые гидраты. Они были обнаружены на всех исследованных структурах в основном в нижней части склона на глубинах 665–960 м. На структурах “Гизелла” и “разлом Лаврентьева” (глубины 390 и 385 м) были обнаружены самые мелководные из известных проявлений газовых гидратов в Мировом океане [36].

В колонках осадков газовые гидраты представлены, главным образом, тонкими прослойками и линзами среди неслоистых осадков мощностью от 1 мм до 1–2 см, расположенными субгоризонтально или наклонно (рис. 6 а), реже отмечается необычная субвертикальная и волнистая текстура (рис. 6 б). В меньшем количестве встречаются обломки размером от 2–3 до 5–8 см (рис. 6 в). Лишь на структуре “КОП-

РИ” (ст. LV36-15 и LV36-39) обнаружены мощные прослой (14 и 34 см) массивных газовых гидратов (рис. 6 г).

Граница залегания гидратсодержащих осадков варьирует от поверхности дна до поддонной глубины 395 см. Какой-либо закономерности в ее расположении выявить не удалось. Например, на структуре “Обжиров” эта граница располагается на глубинах 17–45 см и 305–395 см ниже поверхности дна. Наибольший интерес представляют колонки, отобранные на структурах “Хаос” и “Китами”, – они были полностью заполнены газовыми гидратами (около 5 м на ст. LV32-16 и более 1 м на ст. LV32-11). Количество их было настолько велико, что при подъеме трубки наблюдалось интенсивное выделение газа, образовавшегося при дестабилизации газовых гидратов, и через несколько минут после помещения колонки в лабораторию весь осадок превратился в разжиженную пенистую массу (пульпу).

Выявлено, что в непосредственной близости друг от друга располагаются станции, вскрывшие осадки с газовыми гидратами, и станции, осадки которых несут лишь следы газонасыщенности, как, например, в пределах структуры “КОПРИ”. Это свидетельствует либо о локальности гидратопроявлений, либо о “нырянии” верхней границы залегания гидратсодержащих осадков на большие глубины, что может быть обусловлено уменьшением интенсивности газового потока [15]. Кроме того, необходимо отметить, что не всегда в зоне фокусированной газовой разгрузки, выявленной по наличию газового факела в водной толще, в осадках присутствуют газовые гидраты. В некоторых случаях отмечаются лишь признаки присутствия газа. Причин этому может быть несколько. Возможно, это связано с сублатеральной диффузией свободного газа в поровое пространство на некотором расстоянии от участков фокусированной разгрузки метана [19]. С другой стороны, это мо-

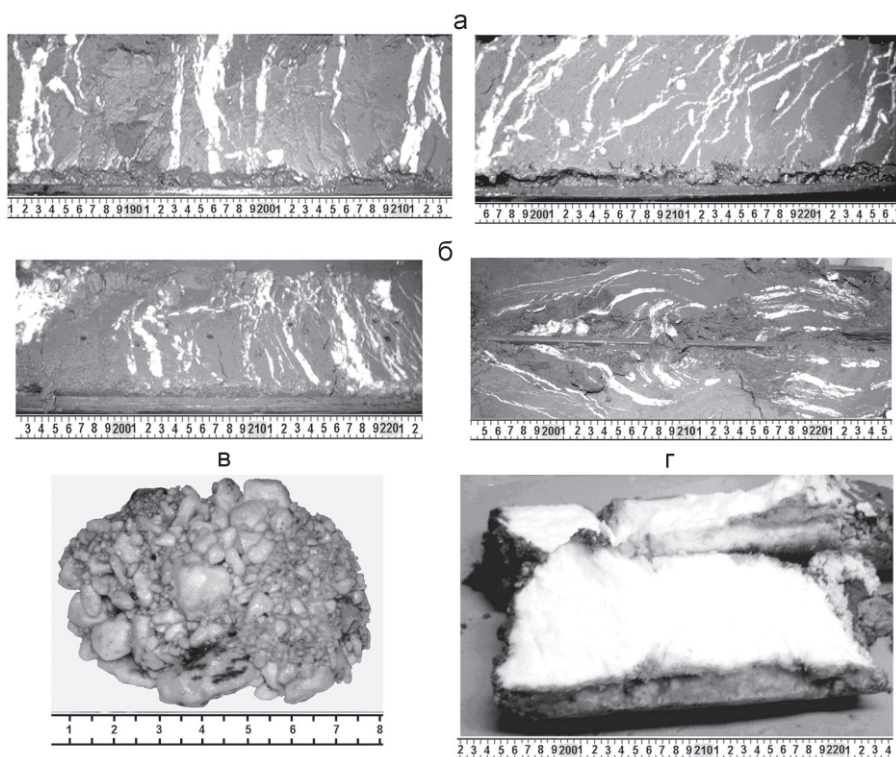


Рис. 6. Типы газогидратных образований в осадках западной части Охотского моря. Масштабные линейки – в см.

жет объясняться недонасыщенностью газом поровых вод, в условиях которой не происходит образования газовых гидратов [36], либо обусловлено температурой мигрирующего снизу флюида. Даже при незначительном повышении температуры в центре очага разгрузки газовые гидраты не могут образовываться, но они могут формироваться на периферии, где температура флюида понижается [15, 40].

Также необходимо отметить, что при ежегодных исследованиях на некоторых структурах в пределах одних и тех же участков не всегда удается поднять газовые гидраты. Например, на структуре “КОПРИ” в 2005 г. они были обнаружены на двух станциях. Повторные попытки поднять здесь газовые гидраты в 2006 г. не увенчались успехом, хотя газовые факелы были зафиксированы с помощью гидроакустической съемки. Более того, в районе структуры “ВНИИОкеангеология”, где в 2005 г. были подняты газовые гидраты в пределах крупных газовых факелов, в 2006 г. не удалось обнаружить даже самих газовых факелов. Все эти данные свидетельствуют о том, что активность газовых выходов не является постоянной, о чем говорит ее снижение на одних участках (вплоть до полного прекращения) и усиление на других [16, 31].

По имеющимся представлениям, одним из признаков присутствия в осадочной толще газовых гидратов является наличие отражающего сейсмического горизонта (BSR), который фиксируется на сейсмических профилях и маркирует основание зоны ста-

бильности газовых гидратов. Его появление обусловлено различными плотностными свойствами отложений, содержащих газы гидраты, и отложений, содержащих свободный газ, а глубина расположения зависит от давления и температуры, при которых газовые гидраты являются устойчивыми [47, 53, 76 и др.]. В пределах северо-восточного склона о-ва Сахалин BSR отчетливо выделяется на некоторых участках при сейсмических исследованиях. Схема распределения глубин залегания горизонта BSR в северо-западной части Охотского моря показывает, что наименьшие поддонные глубины, на которых этот горизонт был зафиксирован (100–200 м), отмечаются в пределах верхней и средней части северо-восточного склона о-ва Сахалин, при этом с увеличением глубины моря происходит увеличение глубины его залегания [55]. Учитывая, что ниже горизонта BSR находится зона свободного газа, можно предположить, что в северо-западной части Охотского моря выявлен неглубокий газовый резервуар, пространственно расположенный в пределах верхней и средней части северо-восточного склона о-ва Сахалин.

Вмещающие осадки. Несмотря на большое количество выявленных участков фокусированной газовой разгрузки, расположены они главным образом в нижней части склона и на незначительном расстоянии друг от друга, поэтому изученные в их пределах колонки осадков характеризуются близким вещественным составом. Преобладают характерные для

этой части Охотского моря терригенно-диатомовые алевриты пелитовые и пелиты алевритовые с незначительной примесью песчаных частиц. Большинство колонков осадков не вышли из голоценовой части разреза, что свидетельствует о высоких скоростях осадко-накопления в этой части Охотского моря [31, 32, 35].

Осадки в пределах полей газовой разгрузки имеют специфические особенности и отличаются от фоновых отложений рядом признаков. В них наблюдается определенная закономерность в изменении текстуры и цвета, степени проявления биотурбации и газонасыщенности, распределении аутигенных новообразований (преимущественно карбонатных конкреций) и газовых гидратов, а также включений раковин симбиотрофных моллюсков (*Calyptogena* / или *Conchocele*?). Эта закономерность отчетливо про-

является по мере приближения к центрам газовых эманацій на морском дне [7, 8, 35, 36, 59] (рис. 7).

В пределах структур “Гизелла”, “Разлом Лаврентьева” и “Северный каньон” были вскрыты более древние, предположительно верхнеплейстоценовые отложения, отличающиеся по вещественному составу от вышеописанных осадков. Мощность перекрывающего их голоценового слоя не превышает 60 см (структура “Гизелла”). Они представлены очень вязкими, плотными и умеренно-плотными глинистыми и алеврито-глинистыми отложениями темно-серого (почти стального) цвета с примесью песчаного материала (структура “Разлом Лаврентьева”) либо очень плотными темно-серыми заиленными мелкозернистыми песками (структура “Северный каньон”), по всей видимости, представляющими собой конус вы-



Рис. 7. Литологический разрез на участке газово-флюидных эманацій (структура “Обжиров”).

1–5 – гранулометрические типы осадков: 1 – миктит, 2 – алеврит песчаный, 3 – алеврит пелитовый с примесью песка, 4 – алеврит пелитовый, 5 – пелит алевритовый; 6–7 – текстурные особенности осадков: 6 – линзы и прослои гидротроилита, 7 – псевдобрекчиевидная текстура газонасыщенных осадков; 8–12 – включения: 8 – раковины моллюсков и их фрагменты, 9–11 – карбонатные конкреции: 9 – мягкие (начальная стадия образования), 10 – уплотненные, 11 – твердые; 12 – прослой чистых газовых гидратов; 13 – осадок, заполненный линзами и прослоями газовых гидратов.

носа р. Амур. Но независимо от возраста отложений, в них обнаружен весь вышеперечисленный набор признаков, характерных для участков газового высачивания.

Исследование химического состава осадков в пределах участков проявления газово-флюидных эманаций не выявило их существенных отличий от фоновых осадков. Большинство химических элементов имеют высокие положительные корреляционные связи друг с другом, что может свидетельствовать о едином источнике поставки осадочного материала. Несколько обособленно ведет себя группа кальцифильных элементов (Sr, Ca), связанных с процессом образования карбонатных конкреций (рис. 8), а также Mo, что вероятно отражает специфику диагенетических процессов на участках газово-флюидных эманаций.

Аутигенные минералы. Карбонаты в осадках северо-восточного склона о-ва Сахалин представлены, главным образом, конкрециями и корками различной формы и размера, количество которых увеличивается при приближении к центрам очагов газовой разгрузки. В изученных колонках осадков верхняя граница распространения карбонатных конкреций варьирует в широких пределах: от поверхности (структура “Обжиров”) до поддонной глубины 330 см (структура “Хаос”). Нижняя граница их распространения не установлена, в изученных колонках конкреции встречаются даже в самых нижних горизонтах (до 5.5 м). Данные подводной видеосъемки

показали, что на участках газовых эманаций среди скоплений симбиотрофных моллюсков встречается твердый неправильной формы субстрат, представленный карбонатными корками и покрытый местами мягкими осадками. Это свидетельствует о том, что конкреции встречаются не только в толще осадков, но имеют широкое площадное распространение на морском дне [34]. В большинстве колонок осадков, содержащих газовые гидраты, карбонатные конкреции обычно встречаются выше гидратсодержащего слоя [7, 31–33, 36].

Обнаруженные в осадках карбонатные конкреции представляют все стадии конкрециеобразования. Во многих колонках отмечаются мягкие либо слабо уплотненные линзы и пятна светлого зеленовато-серого цвета с нечеткими ограничениями, ясно выделяющиеся по цвету на фоне вмещающих осадков. Они встречаются главным образом в верхних горизонтах колонок осадков, состоят из диатомово-терригенного алевроито-глинистого материала, пропитанного карбонатным криптокристаллическим цементом, и представляют собой начальную стадию образования конкреций (рис. 9 а).

Вниз по колонке они уплотняются, обособляясь от вмещающего осадка, но остаются еще достаточно хрупкими (рис. 9 б). На некоторых участках конкреции прослеживаются в виде горизонтов переменной мощности с комковатой текстурой (структура “Хаос”). Конкреции последующей стадии образова-

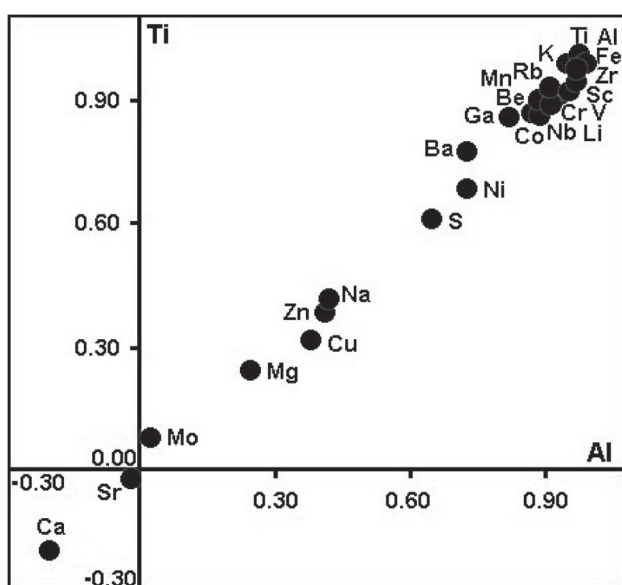


Рис. 8. Структура корреляционных связей химических элементов по отношению к Al и Ti в отложениях СВ склона о-ва Сахалин.

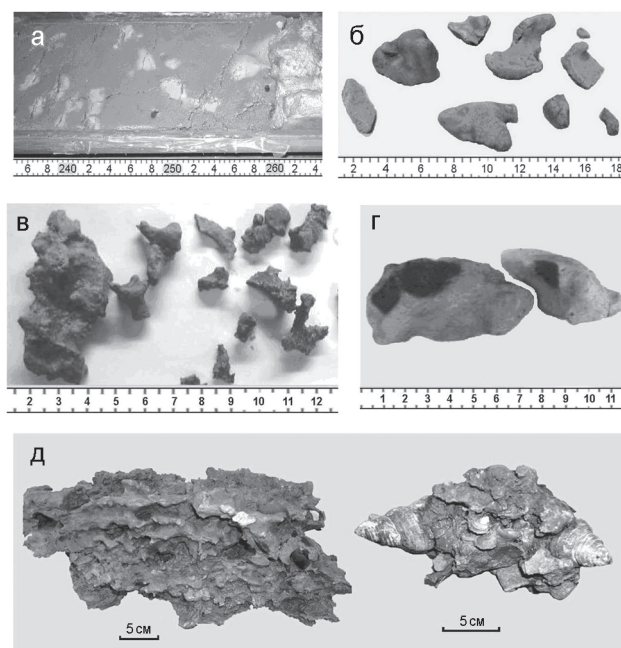


Рис. 9. Типы карбонатных образований в осадках северо-восточного склона о-ва Сахалин. Масштабные линейки – в см.

ния представлены двумя типами: 1) очень твердые, желтовато-зеленовато-серые, зеленовато-серые образования причудливой формы (уплощенные, ветвистые, червеобразные, трубчатые, с многочисленными выступами); в ряде случаев карбонатный материал формирует корки на крупных раковинах, цементирует ракушечный детрит и гравийно-галечный материал ледового разноса (рис. 9 в); 2) конкреции овальные, “желвакообразные” со сглаженными краями, удлиненные, трубчатые, образовавшиеся по ходам илоедов, характеризующиеся сложным строением: внутренняя их часть сложена темно-серым микрокристаллическим очень твердым карбонатом, внешняя часть состоит из светло-серого с зеленоватым оттенком слабоуплотненного осадка, пронизанного криптокристаллическим карбонатом (рис. 9 г). По данным рентгеноструктурного анализа, наиболее распространенной фазой карбонатов в изученных осадках является магнезиальный кальцит [7, 50], реже встречается арагонит (табл.).

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Газогеохимический анализ газовых гидратов, обнаруженных в осадках северо-восточного склона о-ва Сахалин, показал, что они состоят в основном из метана (97.95–99.29 %), незначительного количества CO_2 (0.5–2.05 %) и следов тяжелых углеводородов (этан – 0.0001–0.0025 %, пропан – 0.0013–0.0018 %, *i*-бутан – до 0.0004 %; $C_1/(C_2+C_3) > 20000$) [37, 56] в отличие от нефтегазовых месторождений шельфа северного Сахалина, где количество тяжелых гомологов метана достигает 7.2 % [2]. Углерод гидратного метана характеризуется значениями $\delta^{13}\text{C}$, равными -65.6 ‰ (структура Китами), -64.0 ‰ (структура Обжиров), -64.7 ‰ (структура КОПРИ). Близкие величины получены для этого района Г. Гинсбургом с соавторами (-64.3 ‰) [42] и Л.Л. Мазуренко с соавторами (-63.7...-65.6 ‰) [56]. Наличие изотопно-легкого углерода и незначительное количество тяжелых гомологов свидетельствуют о биогенном происхождении метана в районе исследований и о его форми-

Таблица. Минералогический и изотопный состав карбонатных образований из холодных сипов северо-восточного склона о-ва Сахалин.

Номер ст. и кол-во анализов	Состав конкреций	Mg, мол. %	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	Местоположение
		Минимум-максимум (среднее)			
Структура «Гизелла»					
Ge99-16 (5)	Mg-кальцит	4.14-5.31 (4.66)	3.33-3.45 (3.40)	-46.02...-41.72 (-44.51)	активный сип вблизи активного сипа
LV28-16 (5)	Кальцит глендонитовых псевдоморфоз	3.4-5.1 (4.18)	3.34-3.92 (3.66)	-33.88...-29.96 (-31.63)	
LV28-16 (4)	Mg-кальцит	4.1-14.0 (8.95)	3.54-4.47 (4.02)	-47.88...-38.36 (-44.59)	вблизи активного сипа вблизи активного сипа активный сип
LV36-61 (2)	Mg-кальцит		4.26-5.43 (4.85)	-42.80...-29.80 (-36.30)	
LV39-50 (3)	Mg-кальцит		3.50-3.80 (3.63)	-50.80...-49.00 (-49.83)	
Структура «Обжиров»					
Ge99-24 (13)	Mg-кальцит	8.81-17.39 (13.49)	3.61-4.56 (4.14)	-44.66...-40.90 (-43.34)	активный сип периферия крупного поля газового просачивания
LV28-21 (4)	Mg-кальцит	9.50-16.00 (12.93)	3.81-4.75 (4.26)	-45.50...-31.04 (-38.52)	
Структура «Хаос»					
LV32-16 (4)	Mg-кальцит	-	4.07-4.84 (4.36)	-42.80...-40.50 (-41.75)	активный сип периферия крупного поля газового просачивания
So178-51 (2)	Арагонит	-	3.87-4.16 (4.02)	-42.60...-41.90 (-42.25)	
Структура «КОПРИ»					
LV36-39 (2)	Mg-кальцит	-	4.94-5.13 (5.04)	-40.90...-40.60 (-40.75)	активный сип периферия структуры
LV39-15 (2)	Mg-кальцит	-	3.30-3.60 (3.45)	-42.70...-39.30 (-42.70)	
Структура «Разлом Лаврентьева»					
LV36-72 (3)	Mg-кальцит	-	4.16-4.46 (4.36)	-40.90...-38.30 (-39.57)	активный сип активный сип
LV36-74 (2)	Mg-кальцит	-	4.26-4.75 (4.51)	-45.00...-43.90 (-44.45)	
Грязевые вулканы о-ва Сахалин [68]					
Южно-Сахалинский	Сидерит		2.60	-0.70	
Пугачевский	Сидерит		4.40	0.30	

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных.

ровании в результате микробимального преобразования органического вещества в анаэробных условиях [12, 13, 21, 41, 60 и др.]. Узкий диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ может говорить о едином источнике метана в осадках северо-восточного склона о-ва Сахалин. В соответствии с имеющимися представлениями о вертикальной зональности генерации различных углеводородов [4], полученные нами газогеохимические данные свидетельствуют о генерировании метана в верхней части осадочной толщи.

Изотопный состав углерода аутигенных карбонатов является определенным индикатором, указывающим на его происхождение [23, 62]. Изученные нами конкреции (40 анализов) имеют изотопный состав углерода и кислорода, близкий к значениям изотопного состава карбонатов холодных шипов из других районов Мирового океана (табл., рис. 10). Это свидетельствует, что большая часть углерода, участвующего в процессе карбонатообразования, связана с метановым источником. Учитывая незначительные вариации значений изотопного состава, можно предположить, что на всех изученных структурах фокусированной разгрузки газовых потоков в пределах

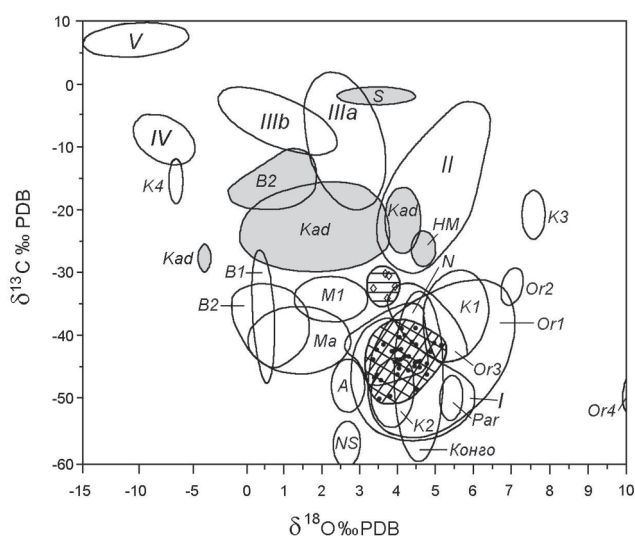


Рис. 10. Изотопный состав карбонатных образований из различных районов Мирового океана.

I–V – залив Монтерей [70], *K₁–K₄* – аккреционная призма Орегона [51], *A* – Алеутский желоб [72], *Or₁–Or₄* – аккреционная призма Орегона [43], *Kad* – залив Кадис [1], *B₁–B₂* – Черное море [1, 12], *HM* – грязевой вулкан Хаакон Мосби [12], *Par* – о-в Парамушир, Охотское море [68], *S* – грязевые вулканы о-ва Сахалин [68], *NS* – Северное море [46], *Ma* – аккреционная призма Макран, Индийский океан [74], *N* – желоб Нанкай [64], *Конго* – континентальная окраина Конго [26]. Серым цветом выделены поля, соответствующие карбонатам грязевых вулканов. Поля, соответствующие карбонатам северо-восточного склона о-ва Сахалин, заштрихованы и обозначены ромбами (глендонитовые конкреции) и черными точками (Mg-кальцит и арагонит).

северо-восточного склона о-ва Сахалин источником углерода для образования карбонатных конкреций в основном является микробимальный метан.

Необычные по составу и морфологии карбонатные образования были обнаружены на структуре “Хаос” в 2004 г. (станция So178-51). Телеграфифером было поднято большое количество зеленовато-серых и светло-серых карбонатных конкреций и корок различного размера. Среди них широко распространены крупные ветвистые карбонатные корки размером до 45 см (рис. 9 д). Их верхняя выровненная поверхность осложнена мелкими субпараллельными выступами и состоит из смеси Mg-кальцита и арагонита. Нижняя поверхность является кавернозной и состоит из арагонита. Арагонитовый цемент отмечается и в более сложных по форме корках, состоящих из сильно биотурбированного осадка, цементирующего многочисленные раковины моллюсков. Такие корки с арагонитовым цементом на северо-восточном склоне о-ва Сахалин были обнаружены впервые [34]. Изотопный состав углерода и кислорода этих корок находится в пределах $-41.9 \dots -42.6 \text{ ‰}$ и $3.87 \dots 4.16 \text{ ‰}$, соответственно. По морфологии и минеральному составу они близки к карбонатным образованиям Гидратного хребта аккреционной призмы Каскадия, происхождение которых связывается с процессом формирования и разрушения газогидратов в приповерхностных горизонтах осадков или непосредственно на морском дне [28, 43]. Как считают Burton [29] и Savard et al. [65], арагонит формируется в более окисленной обстановке, характеризующейся повышенными концентрациями SO_4 и общей щелочности. Такие условия существуют на поверхности дна либо в самых верхних горизонтах осадочной толщи. Внедрение в осадок обогащенного метаном флюида вызывает открытие порового пространства, в котором осажается карбонат в виде чистого ботриoidalного (гроздевидного) арагонита [73]. Кристаллизация же Mg-кальцита происходит при анаэробном окислении метана в более аноксидных условиях с пониженным содержанием SO_4 и низкой общей щелочностью [57].

Кроме карбонатных конкреций с Mg-кальцитом и арагонитовым цементом, свойственных большинству районов с проявлениями газово-флюидных эманаций, в осадках северо-восточного склона о-ва Сахалин были обнаружены специфические карбонатные образования серовато-желтого цвета размером до 2–6 см, представляющие собой глендонитовые конкреции [6, 7, 44]. Они состоят из агрегатов звездчатых сростков крупных бипирамидальных кристаллов (псевдокристаллов) кальцита с содержанием CaCO_3 до 92–96 %. Изучение внутренней структуры глендонитовых образований показало, что они пред-

ставляют собой псевдоморфозы превращения, для которых исходной минеральной фазой служил гексагидрат кальция (икаит). Значения изотопов углерода и кислорода крупных, размером до 10 см, кристаллов икаита, обнаруженных в толще осадков у подножия островного склона о-ва Сахалин ранее [30], составили $-19.2...-21.6$ ‰ PDB и $3.1...3.6$ ‰ PDB, соответственно [44]. Они сопоставимы с изотопными данными по икаитам из осадков пролива Брансфилд (Антарктика) [75] и свидетельствуют, что при их формировании был заимствован углерод, образовавшийся при анаэробном разложении органического вещества осадков. Существование данного процесса в пределах района исследований подтверждается увеличением количества аммония в поровых водах на некоторых участках. По сравнению с вышеописанными, глендонитовые псевдоморфозы, обнаруженные на структуре “Гизелла”, отличаются более легкими значениями изотопов углерода, достигающими $-33.88...-29.96$ ‰ PDB. Исследование этих образований показало, что и в поровом пространстве глендонитовых псевдоморфоз, и на поверхности зональных кристаллов перекристаллизованного кальцита образовался Mg-кальцит, для которого источником углерода явился метан. Подток метана обеспечил поставку дополнительного более легкого углерода, что и привело в конечном итоге к изменению (облегчению) изотопного состава глендонитовых псевдоморфоз.

Таким образом, карбонатные образования, обнаруженные на северо-восточном склоне о-ва Сахалин, были образованы с участием углерода различных генераций. Большая их часть, представленная главным образом Mg-кальцитом, реже – арагонитом, сформировалась благодаря углероду микробного метана. Об этом свидетельствуют данные по изотопному составу углерода и кислорода карбонатов, которые попадают в поле биогенного метана.

Площадная съемка гидролокатором бокового обзора, выполненная в пределах структур разгрузки газово-флюидных потоков [35–37], показала, что они выражены на морском дне в виде кольцевых структур либо одиночных, либо образующих изометричные площади диаметром 500–1000 м и более. На сейсмических разрезах они представляют собой зоны повышенных амплитуд сейсмических отражений и выглядят как структуры газового просачивания (seep structures), достигающие морского дна и выходящие на поверхность (рис. 11). Часто с ними ассоциируют газовые факелы. Аналогичные структуры обнаружены на многих участках дна Мирового океана, характеризующихся наличием холодных сипов, в частности, на Анапском шельфе Черного моря [9], в Ирландском и Северном морях [49].

Образование подобных структур характерно для участков распространения неконсолидированных тонкозернистых осадков, структура которых способствует насыщению порового пространства поднимающимся снизу газом и вспучиванию газонасыщенного осадка в виде куполоподобного возвышения на поверхности дна. Похожий процесс происходит при разложении газовых гидратов. Согласно Paull et al. [61], при этом создается избыточное давление, которое выталкивает на поверхность высвободившийся газ. Газ прорывает толщу вышележащих осадков и вовлекает в свое движение их мелкие частицы, которые затем отлагаются на поверхности дна в виде куполообразного возвышения. Поскольку при этом объем осадка в подповерхностных слоях уменьшается, то область морского дна вокруг образовавшегося возвышения проседает, что приводит к появлению депрессионных структур. Принимая во внимание то, что нами не выявлено существенных изменений в колонках осадков, можно сделать предположение о дестабилизации приповерхностных газовых гидратов.

Существует предположение, что в пределах северо-восточного склона о-ва Сахалин распространены структуры, подобные грязевым вулканам [18, 48, 55, 67]. Оно основано на данных сейсмопрофилирования, которые показывают наличие конусоподобных структур, выходящих на поверхность морского дна на участках разгрузки газовых потоков. Подобное предположение учитывает лишь структурно-морфологические особенности морского дна, которых недостаточно для правильной интерпретации генези-

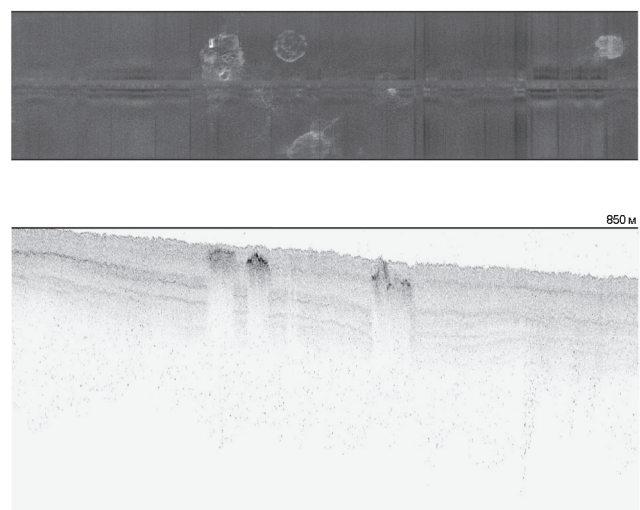


Рис. 11. Профиль локатора бокового обзора и сейсмический разрез через структуру разгрузки газово-флюидных потоков [37].

са выявленных структур. Известно, что одним из характерных признаков грязевого вулканизма является наличие грязевулканических брекчий, поступающих на поверхность морского дна из нижних горизонтов осадочной толщи и представляющих собой обломки различных пород, находящихся в глинисто-алевритовом матриксе [11, 14, 20 и др.]. Однако изучение вещественного состава осадков северо-восточного склона о-ва Сахалин в пределах структур газовой разгрузки (и даже на участке предполагаемого грязевого вулкана, ст. LV36-86) показало типичный для этого района Охотского моря разрез гомогенных глинисто-диатомовых отложений голоценового (реже – позднеплейстоценового) возраста и отсутствие каких-либо признаков грязевулканических брекчий. Изотопный состав углерода метана из типичных подводных грязевых вулканов ряда районов Мирового океана (Наполи, Буш Хил, некоторых вулканов залива Кадис и др.) характеризуется более тяжелыми значениями, чем метана из холодных сипов, а газовая составляющая представляет собой сложную многокомпонентную смесь, куда кроме метана входят его тяжелые гомологи [1, 3, 22, 25, 69]. Центральные части подводных грязевых вулканов отличаются повышенными значениями температур (например, до 15.8°C на вулкане Хаакон Мосби [39]). Такие параметры газового состава обычно характеризуют глубинные условия трансформации органического вещества на стадии катагенеза при высоких температурах и давлении [4, 20, 38]. Наши данные (вещественный состав осадков, легкий изотопный состав углерода метана и карбонатных конкреций, практически полное отсутствие тяжелых УВ, близкие к фоновым температуры придонной воды и осадков, отсутствие на мозаиках локатора бокового обзора грязевых потоков) не дают оснований говорить о существовании на северо-восточном склоне о-ва Сахалин типичных подводных грязевулканических структур. Для более точной диагностики выявленных конусоподобных возвышений на дне западной части Охотского моря необходимо выполнить целенаправленные детальные комплексные исследования в пределах структур, которые могут рассматриваться как грязевые вулканы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексные исследования, выполненные в пределах северо-восточного склона о-ва Сахалин, позволили выявить крупные структуры фокусированной разгрузки метана, характеризующиеся активностью и в настоящее время. В пределах этих структур обнаружено значительное количество действующих газовых сипов. Они представляют собой вертикально поднимающиеся от поверхности дна узкие

удлиненные эллипсоиды, называемые газовыми факелами, состоящие из газовых пузырьков. Высота подобных факелов изменяется от 90 до 500 м и зависит от мощности газового потока. Наибольшее их количество расположено в пределах глубин моря 600–900 м. Установлено, что аномалии метана, обнаруженные в водной толще и в колонках осадков, приурочены главным образом к участкам распространения газовых факелов и газогидратов.

Осадочная толща этой части склона имеет все характерные особенности, присущие районам газовой разгрузки: большое количество гидротроилита, биотурбация осадков, специфическая газонасыщенная текстура, сопровождающаяся сильным запахом сероводорода, наличие карбонатных конкреций и корок различной степени литификации, раковин симбиотрофных моллюсков, прослоев, линз и массивных залежей газовых гидратов. Все это свидетельствует о широком развитии различных процессов диагенетического преобразования осадочной толщи: микробное разложение тонкодисперсного органического вещества, анаэробное окисление метана на участках газового просачивания, сульфат-редукция.

Данные по изотопному составу углерода метана и карбонатных конкреций показывают, что метан имеет биогенное происхождение, обусловленное микробиальной переработкой органического вещества. Мощная толща богатых органическим веществом четвертичных отложений является природным резервуаром газа, из которого метан поступает через осадки в водную толщу и в атмосферу через системы разломов и трещин. При этом на различных горизонтах осадочного разреза образуются прослои и линзы газовых гидратов, дестабилизация которых дает дополнительно некоторое количество метана.

Большая часть карбонатов, представленная главным образом Mg-кальцитом, реже – арагонитом, образовалась благодаря углероду микробиального метана, поступившего к поверхности из зоны свободного газа либо высвободившегося при дестабилизации газовых гидратов, о чем свидетельствуют данные по изотопному составу углерода карбонатов, которые попадают в поле биогенного метана. Более тяжелый изотопный состав специфических метастабильных кристаллов икаита и псевдоморфоз превращения по ним (глендонитовых конкреций) свидетельствует об их образовании при участии углерода, генерированного в результате анаэробного окисления органического вещества осадков. Находки этих конкреций в морских осадках являются палеогеографическим признаком, свидетельствующим о том, что во время его образования в регионе господствовали холодные условия.

Анализ полученных данных (вещественный состав осадков, легкий изотопный состав углерода метана и карбонатных конкреций, компонентный состав газов, близкие к фоновым температуры придонной воды и осадков) свидетельствует о существовании значительных резервуаров свободного газа, локализующихся ниже зоны стабильности газовых гидратов, при этом глубина распространения горизонта BSR (200–300 м) позволяет говорить об их довольно неглубоком поддонном залегании. Вышеуказанные литологические, минералогические и газогеохимические параметры осадков и газов, вскрытых в районе исследований, снижают вероятность поступления метана из глубоких горизонтов осадочной толщи, в том числе связанных с грязевыми вулканами. То есть на изученном нами участке островного склона обнаружены признаки генерирования метана в верхней части осадочной толщи.

Данные по аномальным концентрациям метана имеют большое значение для исследования глобальных процессов изменения (потепления) климата. В этой связи применение мониторинга как метода исследования газогеохимических полей в водной толще различных акваторий является перспективным инструментом для фундаментальных и прикладных геолого-геохимических исследований на море.

Экспедиционные исследования были выполнены в рамках российско-германского (KOMEX) и российско-корейско-японского (SNAOS) международных проектов. Авторы выражают глубокую признательность координаторам проектов Николь Бибоу, Хитоши Шоджи и Янгу Джину, руководителям экспедиций Р.Г. Кулиничу и К. Дуло за содействие в отборе колонок осадков и взаимопонимание при решении поставленных перед авторами задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП “Мировой океан” и Госконтракта № 02.515.11.5017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинова В.Н. Состав и происхождение углеводородных флюидов в грязевых вулканах залива Кадис: Дис.... канд. геол.-минер. наук. М.: МГУ, 2006. 156 с.
2. Богданчиков С.М., Стыщенко Т.Л. Влияние гидродинамических условий на размещение залежей углеводородов на шельфе северо-восточного Сахалина // Геология нефти и газа. 1995. № 3. С. 31–35.
3. Валяев Б.М., Титков Г.А., Чудецкий М.Ю. О генезисе изотопно легкого ($\delta^{13}\text{C}$, δD) метана в нефтегазовых месторождениях // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2002. С. 108–134.
4. Геология и геохимия нефти и газа. М.: Изд-во МГУ, 2000. 384 с.
5. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. 200 с.
6. Деркачев А.Н., Николаева Н.А., Обжиров А.И. и др. Глендонитовые конкреции островного склона северо-восточного Сахалина // Геология океанов и морей: Тез. докл. XIII Междунар. школы по морской геологии. Т. 2. М., 1999. С. 154–155.
7. Деркачев А.Н., Обжиров А.И., Борман Г. и др. Аутигенное карбонатообразование на участках проявления холодных газово-флюидных эманаций на дне Охотского моря // Условия образования донных осадков и связанных с ними полезных ископаемых в окраинных морях. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 47–60.
8. Деркачев А.Н., Николаева Н.А. Особенности аутигенного минералогенеза в осадках Охотского моря // Дальневосточные моря России. Кн. 3. Геологические и геофизические исследования. М.: Наука, 2007. С. 223–239.
9. Егоров А.В., Лобковский Л.И., Ковачев С.А. и др. Метановая аномалия в водах Анапского шельфа и ее возможная связь с нефтегазоносными структурами // Океанология. 2008. Т. 48, № 1. С. 73–82.
10. Зоненшайн Л.П., Мурдмаа И.О., Баранов Б.В. и др. Подводный газовый источник к западу от о-ва Парамушир (Охотское море) // Океанология. 1987. Т. XXVII, вып. 5. С. 795–800.
11. Иванов М.К. Потоки углеводородных флюидов на глубоководных окраинах Европы и связанные с ними явления // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2000. № 5. С. 31–46.
12. Леин А.Ю. Аутигенное карбонатообразование в океане // Литология и полезные ископаемые. 2004. № 1. С. 3–35.
13. Леин А.Ю., Иванов М.В. Крупнейший на Земле метановый водоем // Природа. 2005. № 2. С. 19–26.
14. Лимонов А.Ф. Грязевые вулканы // Соросовский образовательный журн. 2004. Т. 8, № 1. С. 63–69.
15. Матвеева Т.В., Соловьев В.А. Газовые гидраты Охотского моря: закономерности формирования и распространения // Рос. хим. журн. 2003. Т. XLVII, № 3. С. 101–111.
16. Мониторинг метана в Охотском море. Владивосток: Дальнаука, 2002. 250 с.
17. Обжиров А.И., Казанский Б.А., Мельниченко Ю.И. Эффект звукорассеивания придонной воды в краевых частях Охотского моря // Тихоокеан. геология. 1989. № 2. С. 119–121.
18. Обжиров А.И., Агеев А.А., Шакиров Р.Б. и др. Газовые гидраты в Охотском море. Их экономическое и экологическое значение // Подводные технологии и мир океана. 2005. № 1. С. 16–23.
19. Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д., Дуглас В.К. и др. Газовые гидраты Охотского моря // Отечественная геология. 1994. № 2. С. 10–16.
20. Холодов В.Н. О природе грязевых вулканов // Природа. 2002. № 11. С. 47–58.
21. Abrams M.A. Interpretation of Methane Carbon Isotopes Extracted from Surficial Marine Sediments for Detection of Subsurface Hydrocarbons // Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66, 1996. P. 309–318.
22. Aloisi G., Pierre C., Rouchy J.-M. et al. Methane-related authigenic carbonates of eastern Mediterranean Sea mud volcanoes and their possible relation to gas hydrate destabilization // Earth Planet. Sci. Lett. 2000. V. 184. P. 321–338.
23. Anderson T.F., Arthur M.A. Stable isotopes of oxygen and carbon and their applications to sedimentologic and paleo-

- environmental problems // *Stable Isotopes in Sedimentary Geology. SEPM Short Course*, 1983. V. 10. P. 1–151.
24. Barry J.P., Green H.G., Orange D.L. et al. Biologic and geologic characteristics of cold seeps in Monterey Bay, California // *Deep Sea Res.* 1996. V. 43, N 11–12. P. 1739–1762.
 25. Blinova V., Ivanov M., Bohrmann G. Hydrocarbon gases in deposits from mud volcanoes in the Sorokin Trough, north-eastern Black Sea // *Geo-Mar. Lett.* 2003. V. 23. P. 250–257.
 26. Blinova V., Elvert M., Teichert B.M.A. et al. Fluid venting and methane-related authigenic carbonates in the pockmark area at the northwest African margin off Congo // *EGU 1st General Assembly, Nice, France, 2004.*
 27. Bohrmann G., Greinert J., Suess E., Torres M. Authigenic carbonates from Cascadia subduction zone and their relation to gas hydrate stability // *Geology.* 1998. V. 26, N 7. P. 647–650.
 28. Bohrmann G., Suess E., Greinert J. et al. Gas hydrate carbonates from Hydrate Ridge, Cascadia Convergent Margin: indicators of near-seafloor clathrate deposits // *Fourth Int. Conf. Gas Hydrates, Yokohama, Japan. 2002.* P. 102–107.
 29. Burton E.A. Controls on marine carbonate cement mineralogy: review and reassessment // *Chem. Geol.* 1993. V. 105. P. 163–179.
 30. Cruise Report: GREGORY Project. R/V “Akademik M.A. Lavrentyev”, Cruise 27. Kiel, 1997, GEOMAR Report 60. 69 p.
 31. Cruise Report: KOMEX I and II. R/V “Professor Gagarinsky”, Cruise 22; R/V “Akademik M.A. Lavrentyev”, Cruise 28. Kiel, 1999. GEOMAR Report 82. 188 p.
 32. Cruise Report: KOMEX VI. M/V “Marshal Gelovany”, Cruise 1, Kiel, 2000, GEOMAR Report 88. P. 101–296.
 33. Cruise Report: KOMEX II. R/V “Akademik M.A. Lavrentyev”, Cruise 29, Leg 1 and Leg 2. Kiel, 2003, GEOMAR Report 110. 190 p.
 34. Cruise Report: R/V “Sonne”, Cruise 178, Kiel, 2004, GEOMAR Report. 125 p.
 35. Cruise Report: CHAOS Project. R/V “Akademik M.A. Lavrentyev”, Cruise 31 and 32, VNIIOkeangeologia, St. Petersburg, 2005, ISSN: 5-88994-066-X. 164 p.
 36. Cruise Report: CHAOS Project. R/V “Akademik M.A. Lavrentyev”, Cruise 36, Vladivostok-St. Petersburg, 2006. ISBN 5-88994-074-0. 127 p.
 37. Cruise Report: CHAOS Project. R/V “Akademik M.A. Lavrentyev”, Cruise 39, KOPRI, Korea, 2007. ISSN 978-89-960160. 133 c.
 38. Egorov A.V., Ivanov M.K. Hydrocarbon gases in sediments and mud breccia from the central and eastern part of the Mediterranean Ridge // *Geo-Mar. Lett.* 1998. V. 18. P. 127–138.
 39. Egorov A.V., Crane K., Vogt P.R., Rozhkov A.N. Gas hydrates that outcrop on the sea floor: stability models // *Geo-Mar. Lett.* 1999. V. 19. P. 68–75.
 40. Egorov A.V. Formation and dissociation of the seafloor gas hydrates // *Proc. of Indo-Russian joint workshop on gas hydrates under ILTP. Dept. of Ocean Development, Government of India, New Delhi, 2002.*
 41. Floodgate G.D., Judd G. The origins of shallow gas // *Continental Shelf Res.* 1992. V. 12, N 10. P. 1145–1156.
 42. Ginsburg G.D., Soloviev V.A., Cranston R.E. et al. Gas hydrates from the continental slope, offshore Sakhalin Island // *Geo-Mar. Lett.* 1993. V. 13. P. 41–48.
 43. Greinert J., Bohrmann G., Suess E. Gas Hydrate-Associated Carbonates and Methane-Venting at Hydrate Ridge: Classification, Distribution, and Origin of Authigenic Lithologies // *Natural Gas-Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection*, 2001. P. 99–113.
 44. Greinert J., Derkachev A. Glendonites and methane-derived Mg-calcites in the Sea of Okhotsk, Eastern Siberia: Implications of a venting-related ikaite/glendonite formation // *Mar. Geol.* 2004. V. 204, N 1–2. P. 129–144.
 45. Haq B.U. Climate impact of natural gas hydrate // *Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 2000. P. 137–148.
 46. Hovland M., Talbot M.R., Qvale H. et al. Methane-related carbonate cements in pockmarks of the North Sea // *J. Sediment. Petrol.* 1987. V. 57. P. 881–892.
 47. Hyndman, R.D., Davis, E.E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating reflectors by rapid fluid expulsion // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97 (B5). P. 7025–7041.
 48. Jin Y.K., Obzhairov A., Mazurenko L.L. et al. 2005 CHAOS Expedition on the Hydrate-Bearing Structures within the Sea of Okhotsk // *Gas Hydrates for the Future Energy and Environment.* Kitami, Japan, 2007. ISBN 978-4-903845-00-5. P. 45–47.
 49. Judd A.G., Hovland M. The evidence of shallow gas in marine sediments // *Continental Shelf Res.* 1992. V. 12, N 10. P. 1081–1095.
 50. Krylov A., Mazurenko L., Hachikubo A. et al. Sediments and Authigenic Carbonates Related to Gas Hydrates in the Sea of Okhotsk: First Results from the CHAOS 2005 Expedition // *Gas Hydrates for the Future Energy and Environment.* Kitami, Japan, 2007. ISBN 978-4-903845-00-5. P. 49–54.
 51. Kulm L.D., Suess E. Relationship between carbonate deposits and fluid venting: Oregon accretionary prism // *J. Geoph. Res.* 1990. V. 95. P. 8899–8915.
 52. Kvenvolden K.A. Gas Hydrates and Humans // *Gas Hydrates: Challenges for the Future.* Ann. N.Y. Acad. Sci. 2000. V. 912. P. 17–22.
 53. Lee M.W., Hutchinson D.R., Agena W.F. et al. Seismic character of gas hydrates on the southeastern U.S. continental margin // *Mar. Geophys. Res.* 1994. V. 16. P. 163–184.
 54. Lüdmann T., Baranov B., Karp B. Seismo-stratigraphic Research off Northern Sakhalin and in the Derugin Basin // *Cruise Report: KOMEX VII. R/V ‘Professor Gagarinsky’, Cruise 32, Kiel, 2002, GEOMAR Report 105.* P. 1–40.
 55. Lüdmann T., Wong H.K. Characteristics of gas hydrate occurrences associated with mud diapirism and gas escape structures in the northwestern Sea of Okhotsk // *Mar. Geol.* 2003. V. 201. P. 269–286.
 56. Mazurenko L.L., Soloviev V.A., Matveeva T.V. et al. Gas Hydrate Studies in the CHAOS Project // *Gas Hydrates for the Future Energy and Environment.* Kitami, Japan, 2007. ISBN 978-4-903845-00-5. P. 3–9.
 57. Naehr T.H., Rodriguez N.M., Bohrmann G. et al. Methane-derived authigenic carbonates associated with gas hydrate decomposition and fluid venting above the Blake Ridge Diapir // *Proc. of the Ocean Drilling Program, Scientific Results.* 2000. V. 164. P. 285–300.

58. Niemann H., M. Elvert M. Hovland B. Orcutt et al. Methane emission and consumption at a North Sea gas seep (Tommeliten area) // *Biogeosci. Discuss.* 2005. N 2. P. 1197–1241.
59. Nikolaeva N.A., Derkachev A.N., Obzhairov A.I. Lithological, mineral and geochemical indicators of both methane emanations and associated gas hydrates in the sediments of Sakhalin north-eastern slope // *Abstracts of AOGS 5th Ann. Gen. Meeting, Busan, Korea, June 16 to 20, 2008.*
60. Paull C.K., Chanton J.P., Neumann A.C. et al. Indicators of methane-derived carbonates and chemosynthetic organic carbon deposits: examples from the Florida escarpment // *Chemosynthesis: Geological Processes and Products. Soc. Econ. Paleont. Mineral.*, 1992. P. 361–375.
61. Paull K.Ch., Ussler III W., Dallimore S.R. et al. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34, N 1. P. L01603 (5 ps.).
62. Ritger S., Carson B., Suess E. Methane-derived authigenic carbonates formed by subduction-induced pore-water expulsion along the Oregon/Washington margin // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1987. V. 98. P. 147–156.
63. Roberts H.H., Aharon P. Hydrocarbon-derived carbonate buildups of the northern Gulf of Mexico continental slope: A review of submersible investigations // *Geo-Mar. Lett.* 1994. V. 14. P. 135–148.
64. Sakai H., Gamo T., Ogawa Y. et al. Stable isotopic ratios and origins of the carbonates associated with cold seepage at the eastern Nankai Trough // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1992. V. 109. P. 391–404.
65. Savard M.M., Beauchamp B., Veizer J. Significance of aragonite cements around Cretaceous marine methane seeps // *J. Sediment. Res.* 1996. V. 66/3. P. 430–438.
66. Seliverstov N.I., Torokhov P.V., Egorov Yu.O. et al. Active seeps and carbonates from the Kamchatsky Gulf (East Kamchatka) // *Bull. Geol. Soc. Denmark.* 1994. V. 41. P. 50–54.
67. Shakirov R., Obzhairov A., Suess E. et al. Mud volcanoes and gas vents in the Okhotsk Sea area // *Geo-Mar. Lett.* 2004. V. 24. P. 140–149.
68. Sorochinskaya A.V., Nikolaeva N.A., Obzhairov A.I. Authigenic mineral formation in mud volcanoes of Sakhalin Island // *Minerals of the Ocean-4: Abstracts of the Intern. Conf. VNIOkeangeologia, St. Petersburg, 12–15 May, 2008.*
69. Stadnitskaia A., Ivanov M.K., Blinova V.N. et al. Molecular and carbon isotopic variability of hydrocarbon gases from mud volcanoes in the Gulf of Cadiz, NE Atlantic // *Marine and Petrol. Geol.* 2006. V. 23. P. 281–296.
70. Stakes D.S., Orange D., Paduan J.B. et al. Cold-seeps and authigenic carbonate formation in Monterey Bay, California // *Mar. Geol.* 1999. V. 159. P. 93–109.
71. Suess E., Bohrmann G., Von Huene R. et al. Fluid venting in the eastern Aleutian subduction zone // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N B2. P. 2597–2614.
72. Suess E., Torres M.E., Bohrmann, G. et al. Gas hydrate destabilization: enhanced dewatering, benthic material turnover and large methane plumes at the Cascadia convergent margin // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1999. V. 170. P. 1–15.
73. Teichert B.M.A., Gussone N., Eisenhauer A., Bohrmann G. Clathrites: Archives of near-seafloor pore-fluid evolution ($\delta^{44/40}\text{Ca}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) in gas hydrate environments // *Geology.* 2005. V. 33, N 3. P. 213–216.
74. Von Rad U., Rasch H., Berner U., Geyh M., Marchig V., Schulz H. Authigenic carbonates derived from oxidized methane vented from the Makran accretionary prism off Pakistan // *Mar. Geol.* 1996. V. 136. P. 55–77.
75. Whiticar M.J., Suess E. The cold carbonate connection between Mono Lake, California and Bransfield Strait, Antarctic // *Aquatic Geochem.* 1998. N 4. P. 429–454.
76. Wong H.K. TP7: Sedimentationsprozesse und strukturgeologische Entwicklung des Okhotskischen Meeres // *KOMEX-Zwischenbericht, Kiel, 1999. P. 114–143.*
77. Wong H.K., Lüdmann T., Baranov B.V. et al. Bottom current-controlled sedimentation and mass wasting in the northwestern Sea of Sakhalin // *Mar. Geol.* 2003. V. 201. P. 287–305.

Рекомендована к печати Г.Л. Кирилловой

N.A. Nikolayeva, A.N. Derkachev, A.I. Obzhairov

Characteristic features of manifestations of gas-fluid emanations on the north-eastern slope of Sakhalin Island (Sea of Okhotsk)

Manifestations of cold methane seeps, gas hydrates and carbonate concretions are investigated within the north-eastern Sakhalin slope. Data on isotopic composition of carbon from methane, carbonate concretions and crust have shown that methane has mainly biogenic origin due to microbial reworking of the immature organic matter. Gas composition (including gas of gas hydrates) with a very small admixture of heavy methane homologues, light isotopic composition of carbon from methane and carbonate concretions, low temperature of near-bottom waters and sediments testify to the fact that the manifestations of numerous methane emanations are connected with gas generation within the upper part of the sedimentary rock series. The indicators of formation depth of gas have not been established on the investigated floor area. Typical mud volcano structures have not been recognized either.

Key words: cold seeps, gas hydrates, methane flows, carbonate concretions, Sea of Okhotsk.