

О газогидратах окраинных морей Восточной Азии: закономерности генезиса и распространения (обзор)

© 2019 Р. Б. Шакиров¹, А. И. Обжиров¹, М. В. Шакирова², Е. В. Мальцева^{*1}

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

²Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

*E-mail: ekor@poi.dvo.ru

Приведены результаты обобщения авторского и литературного материала о генезисе и распространении газогидратов в окраинных морях Восточной Азии. Гидратообразующий газ в зоне перехода континент–океан, в целом, представлен смесью термогенной и микробной компонент с характерным изотопным составом углерода метана от –40 до –75 ‰, причем в ряде районов существует вклад магматогенной и углеметаморфогенной компоненты в гидратовмещающие отложения. Охотоморская и Японморская газогидратоносные провинции характеризуются проявлениями вертикальной газовой углеводородной зональности (в соответствии с классической схемой нефтегазообразования). Установлена многоярусная газогидратоносность окраинных морей северо-западной части Тихого океана, которая является важным фактором цикла метана и углерода. Прослеживается преобладающая генетическая и пространственная связь газогидратоносности с нефтегазоносными и угленосными районами; важнейшим фактором формирования газогидратов представляется геологическое строение районов при благоприятных термобарических и геохимических условиях. Неотектоника есть важнейший фактор контроля реликтовых газогидратов, современная тектоника – газогидратов в придонном интервале. Узлы пересечений активных разрывных нарушений, особенно контролируемые глубинными зонами проницаемости и при близости нефтегазоносных формаций, являются наиболее перспективными участками с формированием массивных тел в газогидратных скоплениях. Сделан вывод о недостаточной изученности газогидратов окраинных морей, что требует организации долговременной международной программы по их исследованию.

Ключевые слова: газогидраты, окраинные моря, закономерности генезиса и распространения, Восточная Азия.

About gas hydrates of East Asian marginal seas: patterns of genesis and distribution (review)

Renat B. Shakirov¹, Anatoliy I. Obzhirov¹, Mariya V. Shakirova², Elena V. Maltseva^{*1}

¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, RAS, Vladivostok, Russia

²Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch, RAS, Vladivostok, Russia

*E-mail: ekor@poi.dvo.ru

The reviewed results on the genesis and distribution of gas hydrates in the marginal seas of Eastern Asia have been presented. Hydrate-forming gas in the continent–ocean transition zone, in general, is a mixture of the thermogenic and microbial components with the characteristic isotopic composition of methane from –40 to –75 ‰ PDB. Gas hydrates were found also within the areas of magmatic and coal-metamorphogenic gases fluxes into the host sediments. The Okhotsk and Japan Seas gas hydrate-bearing provinces have a signs of gas hydrocarbon zonality (in accordance with the classical oil and gas formation pattern). Multilevel (stratified) gas hydrates accumulations in the western part of the Pacific Ocean have been revealed, which is an important factor in the methane and carbon cycle. The genetic and spatial correlation of gas hydrate-bearing

Исследование выполнено в рамках задания Программы фундаментальных научных исследований «Газогеохимические поля морей Востока Азии, геодинамические процессы и потоки природных газов, влияющие на формирование геологических структур с залежами углеводородов и аутигенной минерализации в донных осадках» при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00153).

sediments with oil- gas and coal-bearing strata is traced. The most important factor in the formation of gas hydrates is the geological structure of the regions under favorable temperature, pressure and geochemical conditions. Neotectonics is the most important factor controlling relict gas hydrates, located below the sea floor up to 2000 meters, and modern tectonics – gas hydrates in the near-bottom interval. The nodes of active faults intersections, especially those controlled by deep zones, are the subject to permeability and are in close proximity to petroleum-bearing forms, which are the most promising patterns for the massive aggregates of gas hydrates. The gas hydrates of the East Asian marginal seas are insufficiently studied, and this requires the long-term international research programs.

Keywords: gas hydrates, marginal seas, patterns of genesis and distribution, East Asia.

Введение

Цель работы – выявление закономерностей формирования подводных газогидратных скоплений в АТР. Сопоставление распространения аномальных газогеохимических полей с различным уровнем присутствия миграционных компонент показывает, что проявления и аномальные поля углеводородных газов, иногда гелия и углекислого газа, служат индикаторами и газогеохимической средой формирования концентрированных твердых форм метана и реже углекислого газа – газогидратов (ГГ). Они рассматриваются как один из основных альтернативных источников природного газа [Мах, 2000]. В настоящее время осуществляется полупромышленная разработка под толщей вод (Нанкайский трог, Япония) и промышленная добыча газа в районах вечной мерзлоты (дельты рек Мессояха (Россия) и Маллик (Канада), высокогорье Китая и др.). Газогидраты являются самой эффективной и экологически чистой формой скопления природного газа – в 1 м³ газогидрата содержится от 160 до 180 м³ чистого газа. Знание Р-Т условий стабильности гидратов метана позволило прогнозировать газогидратные залежи на суше (вторичные ГГ) на глубине 200–1100 м при температуре от –10 до +15 °С и в придонных слоях водоемов (первичные ГГ) на глубинах моря 1200–1500 м при температуре 0...+17 °С. Эти прогнозы начали подтверждаться с 1969 г.: залежи ГГ найдены в северных районах Западной Сибири, на Дальнем Востоке и его шельфе, на Аляске, в Канаде, в Японии, а позднее во многих других странах, как правило, вдоль континентальных и островных склонов, а также в дельтах и па-

леodelьтах крупных рек и в районах вечной мерзлоты. На основании прогноза по геотермическим данным найдены газогидраты при бурении в Южной котловине оз. Байкал на глубине 1433 м [Кузьмин и др., 1998]. Выявлены скопления газогидратов в Ямбургском и Бованенковском месторождениях (реликтовые газогидраты, находящиеся вне современной зоны их термодинамической стабильности), в Улан-Юряхинской антиклинали, а также реликтовые газогидраты на Чукотке и в Колымском крае [Истомин, Якушев, 1992]. Первая в мире разработка ГГ залежей осуществлена на Мессояхском месторождении с помощью закачки метанола, при этом в течение ряда лет производился отбор газа [Макогон, 1965]. На 01.01.2001 г. суммарный отбор газа составил 11.6 млрд м³, из которых 5.7 млрд м³ поступило в результате разложения гидратов при снижении пластового давления ниже равновесного. Газогидраты также были обнаружены во внутренних морях [Ефремова, Гритчина, 1981]: в 1979 г. в южном Каспии описаны газогидраты, поднятые с глубины 480 м. Содержание ГГ в осадке визуальное оценивалось в 5–10 % от объема грунта. Газовые гидраты часто обнаруживаются в подводных грязевулканических структурах. Так, в газовой смеси газогидратов грязевых вулканов содержится метан (CH₄) – 22.2–73.7 см³/л; углекислый газ (CO₂) 14.28–34.97 см³/л, гомологи метана и их производные – до 17 см³/л [Ефремова, Гритчина, 1981]. Газогидратные залежи, ассоциируемые с грязевым вулканизмом, известны в Черном море, а также в высоких широтах [Мах, 2000]. Распространение осадков с возможными локальными фаціальными

зонами ГГ характеризуется переслаиванием газонасыщенных и неgasонасыщенных разностей в разрезе осадочной толщи. Это снижает расчетные запасы газогидратов в Мировом океане, а также затрудняет их разработку. Добыча газогидратов из морских осадков может привести к ликвидации поверхностного слоя вместе с бентосом, уничтожение донных организмов – к необратимым нарушениям экологического равновесия, что подорвет биологические ресурсы Мирового океана [Ефремова, 1979].

Термобарические, геохимические и гидрологические условия формирования газогидратов подробно изучались многими исследователями, в том числе авторами [Отчет о НИР... , 2008]. По-прежнему одной из наиболее дискуссионных проблем в формировании и диссоциации подводных газогидратов является роль геологического строения районов.

Газовые гидраты в Мировом океане

За последние полвека исследований природных газовых гидратов в мире накоплен большой объем информации по распространению их скоплений. Имеются сведения о более чем двухстах выявленных прямыми методами газогидратных скоплений как в Мировом океане, так и на суше в районе распространения вечной мерзлоты. Интерес к этому виду энергоресурсов определяется прежде всего тем, что запасы природного газа, преимущественно метана, в газогидратном состоянии весьма велики и превышают запасы природного газа в свободном состоянии. Исследования подводных газогидратных скоплений проводятся и в России, и во многих странах (США, Канада, Япония, Индия, Китай и др.). Опубликованы многочисленные результаты исследований газогидратов в монографиях, отраслевых и академических журналах. Например, в составленных сотрудниками ВНИИГАЗ обзорах работ по природным и техногенным газовым гидратам [Карпюк, 1988; Истомин, Якушев, 1992] приведены резюме 320 отечественных и иностранных публикаций за 1983–1987 гг. и рассмотрены основные результаты прикладных и фундаментальных исследований по про-

блемам газогидратных технологий. К настоящему времени в мире открыто уже более 220 месторождений газогидратов вблизи берегов США, Канады, Коста-Рики, Гватемалы, Мексики, Японии, Южной Кореи, Индии и Китая, а также в Средиземном, Черном, Каспийском, Южно-Китайском морях. Ожидается, что значительные запасы газогидратов могут находиться в Аравийском море, вблизи западного побережья Африки, у берегов Перу и Бангладеш. Следует особо выделить озерные газогидраты. Самыми крупными газогидратными скоплениями, часто сопряженными с грязевыми вулканами и проявлениями нефти, являются гидраты метана оз. Байкал [Хлыстов и др., 2014]. На сегодняшний день установлено, что не менее 10 % площади дна Мирового океана перспективны для поиска залежей газогидратов. Самые значительные газогидратные скопления за рубежом находятся на юго-востоке и западе Северной Америки, вблизи Канады, Перу, Коста-Рики, Южной Кореи, Мексики, Японии – все эти страны граничат с Тихим океаном, главным регионом распространения газогидратов. Начальные ресурсы природного газа в газогидратных скоплениях в областях вечной мерзлоты составляют до 34 000 трлн м³, тогда как на акваториях – до 7 600 000 трлн м³ [Ginsburg et al., 1999; Sloan et al., 2007; Suess et al., 1999; Suess, 2014; Max, 2000; и др.]. Газогидратные образования могут отличаться по форме и размерам, но в любом случае они связаны с пересыщением поровой воды газом [Kvenvolden, 1998] и формируются, когда температура и давление подходят для соединения газа и воды (давление варьирует в пределах 1–500 бар, температура –10...+10 °C). Газовые гидраты стремятся кристаллизоваться в придонных интервалах осадка, т.е. в верхней части зоны их стабильности. Причиной неглубокого залегания зоны стабильности газовых гидратов является повышенный тепловой поток.

В Мировом океане газогидраты обнаруживаются в основном на континентальных шельфах и склонах окраинных или внутренних морей. Это связано с тем, что там накапливаются мощные толщи осадочных пород с повышенным содержанием органического

вещества и, как следствие, высоким нефтегазовым потенциалом. Они являются источником метаморфогенного, термогенного и микробного метана. Кроме того, в морях обычно район перехода из шельфа в склон осложнен зонами разломов, по которым при сейсмостектонической активизации могут поступать углеводороды из подстилающих, в том числе нефтегазоносных пород фундамента. В этом заключается очень важная закономерность – сопряженность процессов формирования нефтегазовых месторождений и газогидратов. При этом сцементированные газогидратами осадки могут выполнять роль флюидоупора и способствуют накоплению метана и тяжелых углеводородов. Если есть источник метана, то в морях в донных осадках формируются газогидраты на глубинах моря от 320 м (Татарский пролив, северо-восточный склон о. Сахалин) и глубже. Глубина моря, на которой могут формироваться газогидраты, зависит от температуры придонной воды: чем выше температура, тем большая глубина моря необходима для формирования газогидрата. Уменьшение уровня моря и(или) увеличение температуры придонной воды в море приводят к разрушению газогидратов и выделению в воду и атмосферу большого количества метана. Термогенные газогидраты образуются также в гемипелагических осадках на глубинах от 450 м и температуре

+7 °С в Мексиканском заливе [Milkov, 2000].

В подводных газогидратах содержится около 90–95 % метана. Эндотермический процесс диссоциации газогидрата, когда из него начинает выделяться метан, происходит при нарушении условий его стабильного состояния: при уменьшении давления, повышении температуры или повышении давления в газонасыщенной толще, перекрытой осадками, сцементированными газогидратами. В последнем случае формируется пульсационный характер газовых выходов. Важным фактором разрушения/формирования газогидратов является сейсмостектоническая активность разломов. В вулканически активных районах могут формироваться гидраты углекислого газа магматогенного происхождения (Восточно-Китайское море).

Фактически (прямыми методами) газогидраты или их признаки отмечены во множестве вдоль континентальных и островных окраин (рис. 1). Особенно много их обнаружено в Тихом океане, который занимает площадь 179.7 млн км², т.е. примерно одну треть поверхности Земли. Тихоокеанский регион – один из богатейших бассейнов планеты, обладающий основными запасами топливно-энергетических ресурсов. Уже к 1998 г. в нем было выявлено более 300 тыс. месторождений нефти и газа [На нефтяном рынке... , 1998]. В странах Юго-Восточной Азии еже-

годно добывается свыше 50 млрд т природного газа. Вдоль западной части Тихого океана, от Берингова моря до 60° южной широты (на протяжении примерно 15 500 км), лежит много окраинных морей, заложенных на деструктивной коре океанического и континентального типов (Берингово, Охотское, Японское, Восточно-Ки-

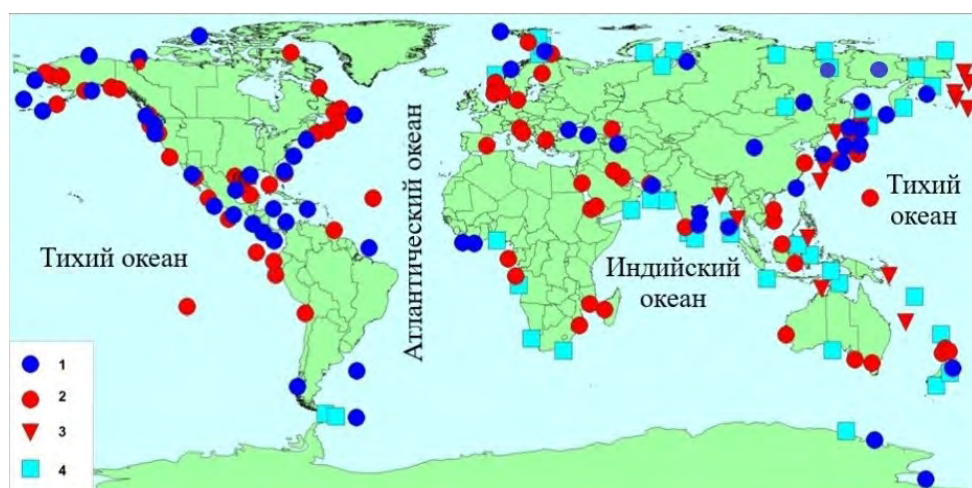


Рис. 1. Распространение скоплений газогидратов и углеводородных проявлений в Мировом океане. 1 – установленные газогидраты; 2 – подводные проявления водно-углеводородных флюидов в свободном состоянии; 3 – газопроявления; 4 – предполагаемые газогидраты (по геологическим и геохимическим критериям; наличию на сейсмических профилях отражающего горизонта BSR, термобарическим условиям).

тайское, Южно-Китайское, Желтое, Коралловое, Филиппинское), а также межостровных морей, газогидратоносный потенциал которых еще не изучен (моря Банда, Сулу, Сулавеси и др.). Гидраты природного газа, главным образом метана, систематически исследуются в западной части Тихого океана с 1980-х годов. Одно из первых обнаружений газогидратов сделано в рейсе 34 НИС «Морской геофизик» (ТОИ ДВО РАН, Владивосток) в Охотском море [Обжиров, 1993]. Газогидратоносный осадок был поднят прямоточным пробоотборником, а поток метана, связанный с газогидратами, зарегистрирован эхолотной съемкой на глубине 700 м.

Многочисленные находки газогидратов диктуют необходимость геологического районирования этого явления и поиска парагенетических взаимосвязей с источниками углеводородных газов. Газовые гидраты были обнаружены вдоль пассивной и активной Тихоокеанских окраин на глубинах от 320 м (Охотское море) до 2000 м (Мексиканский залив) и предполагаются на глубинах даже более – 2800 м (Берингово море). Отражающая сейсмическая граница зоны стабильности подводных газогидратов на сейсморазрезах обусловлена соответствием температуры и

давления на глубинах от 300 до 1500 м и покрывает огромные территории, однако этот фактор далеко не всегда свидетельствует о наличии газогидратов. Тем не менее прямое опробование и бурение расширяет зону обнаружений газогидратов год от года. Широкое распространение газовых гидратов предполагается в морях Арктики, но фактически они были обнаружены только в 2016 г. на склоне Чукотского плато в экспедиции южнокорейского НИС «Араон». На сейсморазрезах часто регистрируется косвенный поисковый признак, наличие которого не гарантирует обнаружения газогидратов в местах его распространения. В ряде морских бассейнов, таких как Охотское и Японское моря, горизонт BSR (bottom simulating reflector) может отражать диагенетические границы, в том числе переходные зоны опал – кристобаллит – «силикатная» граница, а также, возможно, параллельные дну стратиграфические горизонты со скачком градиента скорости волн. Моделирование физико-химических границ обнаружения газогидратов в Тихом океане хорошо согласуется с распространением доказанных и прогнозируемых газогидратоносных кластеров (рис. 2), что подтверждает их широкое распространение. В то время как восточная

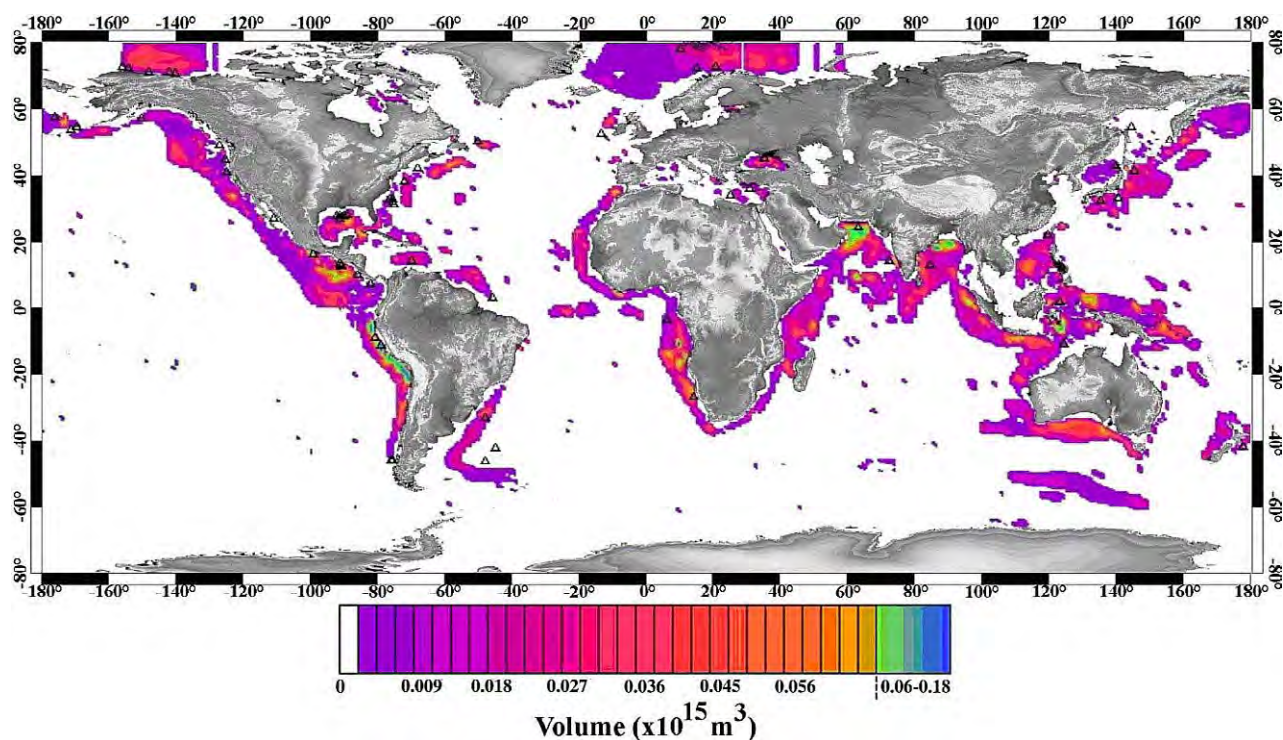


Рис. 2. Термобарическое моделирование распространения начальных ресурсов газовых гидратов в Мировом океане [Klauda, Sandler, 2005].

часть Тихого океана довольно представитель-но охвачена программами подводного бурения, некоторые бассейны западного сектора не исследованы в достаточной мере даже малоглубинным опробованием. Экспедиции ODP (Ocean Drilling Program) и DSDP (Deep Sea Drilling Project) внесли большой вклад в изучение геологического строения и геохимических особенностей окраин Тихого океана: за период с 1968 г. до конца века было пробурено более 1160 скважин с поднятием керна и выполнением каротажных измерений [Мах, 2000]. В связи с огромным количеством находок газогидратов и ростом их энергетического значения, это нетрадиционное для промышленности соединение природного газа вполне можно отнести к новому виду каустобиолитов.

Западная и восточная окраины Тихого океана представляют газогидратоносные пояса, которые отличаются друг от друга по геологическому строению, но имеют ряд общих черт формирования газогидратов. Западная Тихоокеанская окраина является более сейсмически и вулканически активной по сравнению с восточной. В статье рассмотрен Западно-Тихоокеанский сегмент Тихоокеанского газогидратоносного кольца (Pacific Gashydrate Rim, авторский термин), представленный провинциями следующих морей: Берингово, Охотское, Японское, Восточно-Китайское, Южно-Китайское, Сулу-Сулавеси, Филиппинское – и акваториями Австралии и Новой Зеландии [Шакиров, Обжиров, 2011; Shakirov et al., 2014]. Наиболее представительные залежи газогидратов (многочисленные образцы массивных агрегатов) обнаружены в Охотском, Японском, Восточно-Китайском и северной части Южно-Китайского морей. В морях юго-западного сектора газогидраты отмечены реже, что, скорее всего, связано с недостатком соответствующих исследований. Газогидратоносность восточного сегмента Тихоокеанского газогидратоносного пояса рассмотрена детально и описана в работах [Гинсбург, Соловьев, 1994; Milkov, 2000; Мах, 2000; и др.].

Основные методы, позволяющие с 80-х годов обнаруживать газогидраты, – это гидроакустическая съемка, высокоразрешающее сейсмопрофилирование и геологическое

опробование (взятие кернов гравитационными и гидростатическими пробоотборниками). В последние годы быстро растет значение бурения на газогидраты с помощью специальных буровых установок (Япония, Корея, Китай), в связи с чем были открыты реликтовые газогидраты в Японском море, на севере Южно-Китайского моря и в Нанкайском тропе Филиппинского моря, есть свидетельство о наличии газогидратов на горизонте 600 м ниже дна в Беринговом море. Газогидраты формируются в условиях восходящих потоков метана (диффузных, фильтрационных, струйных) в верхних горизонтах осадочных бассейнов с мощностью выполнения до 15 км. Наиболее благоприятны проницаемые зоны в пределах активных разрывов, составляющих структурный план глубинных разломов. Наиболее мощные восходящие потоки метана обусловлены главным образом углеводородными скоплениями: нефтегазовыми и углегазовыми [Отчет о НИР... , 2008; Нетрадиционные ресурсы... , 2013].

Газогидратоносность западной части Тихого океана определяется активными геологическими процессами (вулканизм, сейсмичность, разломообразование, осадконакопление, контактовый и термальный метаморфизм и др.), протекающими вдоль границ литосферных плит. Несколько сотен активных вулканов в определенных районах, трассирующих в том числе сейсмофокальные зоны, также ускоряют созревание углеводородной матрицы, в частности благодаря проработке осадочной толщи глубинными газами и флюидами. Гидратоносные осадки содержат газогидраты в рассеянной форме, цементирующей осадок, линзы, прослойки, слои и массивные агрегаты. Большинство скоплений ГГ обнаружено в осадках четвертичного возраста. Существуют определенные основания предполагать широкое развитие газогидратов (вероятно, иногда представляющих первичные формы ГГ) в интервале 200–500 м ниже поверхности дна. Многоярусное залегание газогидратов установлено также в Атлантическом океане [Mienert, Posewang, 1999]. Газогидратоносные осадки в основном представлены илами, глинистыми илами, песками с различной долей обломочного материала.

На сегодняшний день самое высокоширотное газогидратное подводное проявление Восточной Азии закартировано в верхней части западного склона Чукотского плато в пределах глубоководной восточной окраины Восточно-Сибирского моря. Газогидраты были обнаружены в экспедиции южнокорейского НИС «Араон» (RV Araon) в 2016 г. [ARA07C... , 2017]. Они подняты на глубине моря 610 м в интервале до 3 м ниже поверхности дна (рис. 3) в двух кернах гравитационного пробоотборника (участок станции ARA07C GC13, координаты 75.6795 N, 169.7379 E) на локальных положительных морфоструктурах (небольшие холмы). Такие морфоструктуры, как правило, формируются над газонасыщенными каналами (gas chimney) в верхней части осадочных толщ над газонасыщенными или нефтегазонасыщенными структурами. Ранее в этом районе [Savvichev et al., 2004] были закартированы структуры газовых выходов (покмарки) и аномалии метана. Проявление газогидратов, возможно, связано с продолжением рифтогенной структуры, расположенной в Чукотском море.

Ниже приведены сведения о наиболее характерных особенностях проявлений газогидратов в окраинных морях СЗ части Тихого океана.

Берингоморская газогидратоносная провинция

Берингово море замыкает северное звено переходной зоны западной части Тихого океана. Море отличаются широкий шельф на севере и востоке и мощные осадочные тол-

щи глубоководных (более 3800 м) бассейнов. Наиболее перспективными в отношении газогидратоносности представляются глубоководные впадины Алеутская и Бауэрс на глубинах 3600–3900 м. В пределах этих структур были закартированы множество аномалий сейсмической скорости на сейсмических разрезах (VAMPs – velocity-amplitude anomalies), в которых, как правило, находятся газонасыщенные зоны (газовые вертикальные зоны и «мутные» толщи). Подсчет ресурсов метана в этих бассейнах дал 2×10^7 м³ газа [Scholl et al., 2007]. Экспедициями ТОИ ДВО РАН также были обнаружены аномалии метана в придонной воде прикамчатского склона и газовые факелы (2008 г.). В российской части в приконтинентальных впадинах (Хатырский осадочный бассейн) Берингова моря выявлены перспективные зоны площадью 1650 и 1100 км² по материалам сейсмических исследований (рис. 4), проведенных ОАО «Дальморнефтегеофизика» в 1988 и 2007 гг. [Грецкая, Петровская, 2010].

Потенциально газогидратоносные структуры обнаружены в зонах тектонических прогибов и контролируются разломами разных кинематических типов. Напротив этих зон на побережье зафиксированы проявления метана (Угловое, Янракоимское, Анольское). Над этими зонами и рядом с ними в 1992 г., по данным лаборатории газогеохимии, зафиксированы высокоинтенсивные аномалии содержания метана в придонном слое до 1600 нл/л (рис. 3). Сейсмические признаки газогидратов установлены на внешнем шельфе и континентальном склоне при глубине моря от 0.5

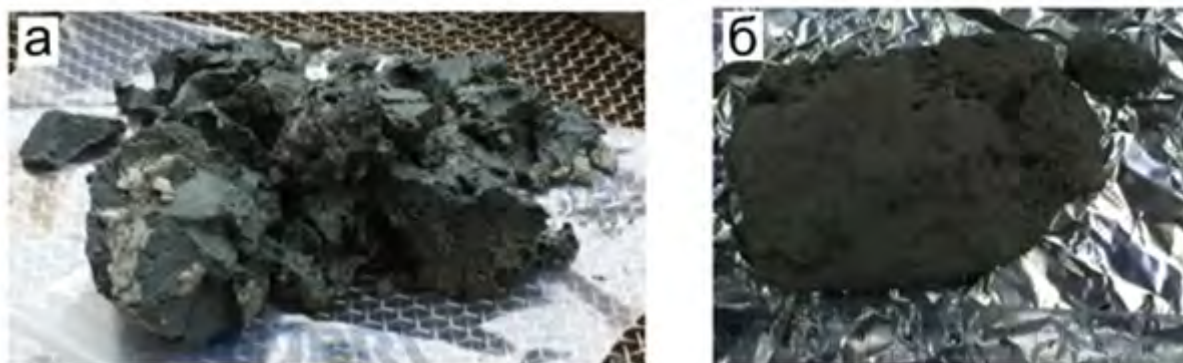


Рис. 3. Образцы газогидратов (белые включения в темно-сером осадке, горизонт 247 см ниже поверхности дна) (а) и массивного аутигенного карбонатного образования (б) со станции ARA07C GC13 (RV Araon, 2016 г.).

до 2 км. На временных разрезах им отвечает однофазовое отрицательное сейсмическое отражение (BSR), пересекающее отражения от слоисто-осадочного разреза и практически повторяющее конфигурацию морского

дна. Кроме хорошо выраженной отрицательной фазы на сейсмограммах ОГТ наблюдается эффект усиления амплитуд отражения, характерных для гидратонасыщенных отложений. Негативная фаза отражения BSR формирует-

ся из-за резкого понижения акустического импеданса за счет присутствия в разрезе свободного газа ниже подошвы содержащего газогидраты слоя. На суммарных разрезах работами «Дальморнефтегеофизики» выявлено усиление амплитуд отражений от осадочных слоев непосредственно под BSR и нижележащий интервал разреза, содержащий свободный газ, который прослеживается в виде четко выраженных положительных аномалий.

Первые сведения о наличии газогидратов в глубоководной части Берингова моря (глубина воды 2110 м) были получены при бурении скв. 185 [Панаев, 1987]. Газогидраты обнаружены на горизонте ниже дна 610 м при величине водного слоя 2110 м в миоценовых терригенных отложениях, где был выявлен 10–15-метровый газогидратоносный горизонт. В котловинах Алеутской и Бауэрса в результате сейсмических исследований (более 25 тыс. пог. км) было зарегистрировано 12 000 скоростных

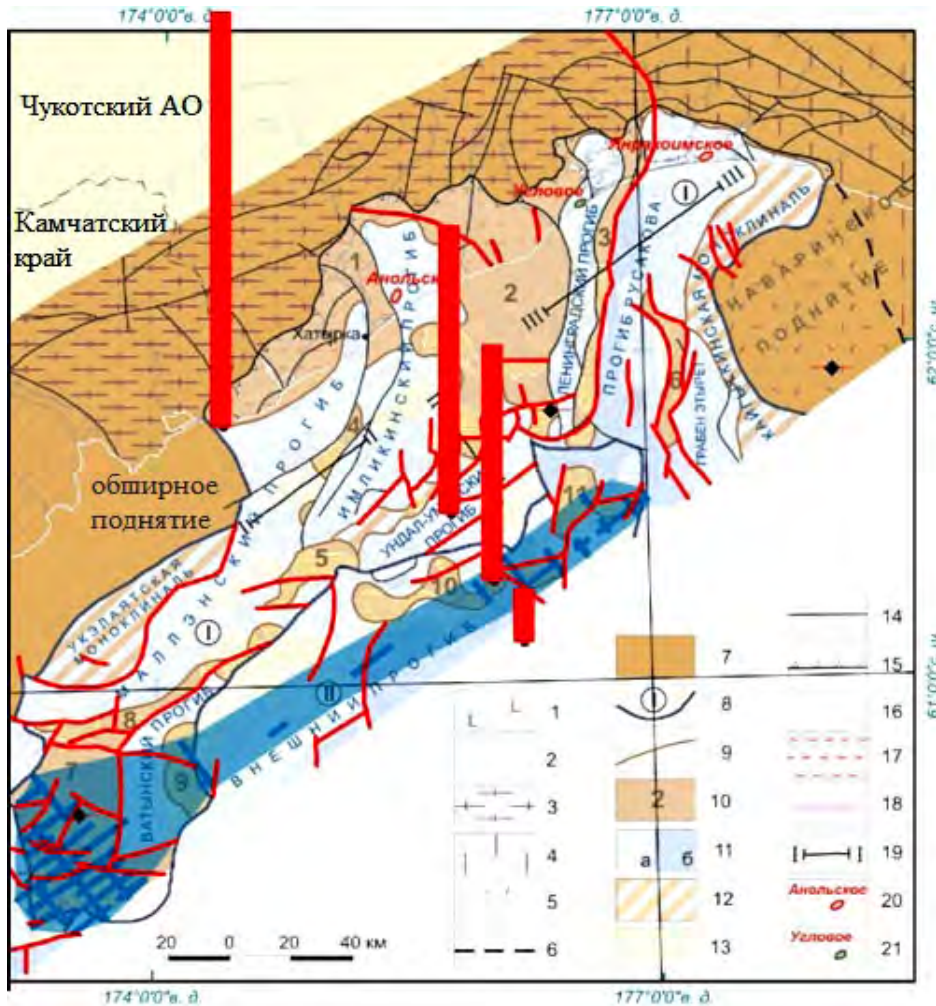


Рис. 4. Структура перспективной газогидратоносной площади Хатырского бассейна по [Грецкая, Петровская, 2010]. Красные столбцы – аномальные поля метана средней и высокой интенсивности. Перспективная газогидратоносная площадь занимает верхний континентальный склон, глубина 300–900 м.

1–5 – тектонические зоны: 1 – Олюторская (нижний мел – палеоген), 2 – Укэлятская (верхний мел – палеоген), 3 – Эконайская (средний палеозой – мезозой), 4 – Алькатваамская (средний триас – верхний мел), 5 – Наваринская (средний палеозой – мезозой); 6 – граница между тектоническими зонами; 7 – небассейновое пространство; 8 – граница осадочного бассейна, его номер: I – Хатырский осадочный бассейн, II – Алеутский глубоководный осадочный бассейн; 9 – граница поднятия, прогиба; 10 – внутрибассейновые поднятия: 1 – Усть-Хатырское, 2 – Накепейлякское; 3 – Майнопольгинское; 4 – Хатырское; 5 – Центральное, 6 – Пекульнейское, 7 – Аниваямское, 8 – Дежнёва, 9 – Ровное, 10 – Склоновое, 11 – Южное; 11 – прогиб: глубина погружения акустического фундамента до 5.6 км (а) и более 7.6 км (б); 12 – моноклиналь; 13 – локальная антиклинальная структура; 14 – тектоническое нарушение; 15 – Хатырский надвиг; 16 – изобата; 17 – выход палеогеновых отложений на поверхность в наземной части бассейна; 18 – газогидраты (по данным AVO-съемки 2007 г.); 19 – сейсмический разрез по линии; 20 – газопроявление; 21 – месторождение нефти. Вытянутая зона голубого цвета вдоль надписи «внешний прогиб» – перспективная площадь на поиски газогидратов. Черные ромбики – газопроявления. Красные линии – разломы. Голубые прямые линии – сейсмические профили.

аномалий, интерпретируемых как газовые гидраты и экранированные ими скопления свободного газа. Объем метана в этих проявлениях составляет около 31 трлн м³ [Scholl et al., 2007]. Распространение газогидратов в глубоководных частях Берингова моря усиливает значимость этого региона как потенциального источника углеводородов. Накопление объема фактических данных о газогидратах сдерживается отсутствием поисковых экспедиций.

Газоносность осадочных отложений приконтинентальной части Берингова моря также обусловлена наличием угольных пластов [Гресов, 2014], которые могут быть источником гидратообразующего метана. На сопредельной суше Берингова моря, на Аляске газогидраты обнаружены в районе нефтегазовых месторождений Прадхо Бей и Купарук Ривер. Здесь формирование слоев газогидратов сопряжено с газовой эмиссией из нефтегазовых залежей. В газогидратах Купарук Ривер – Прадхо Бей (Аляска) заключено 1.1×10^{12} м³ метана [Collet, 1993].

Охотоморская газогидратоносная провинция

Одна из наиболее представительных газогидратоносных провинций Тихого океана находится в Охотском море, втором по величине из окраинных морей Тихого океана.

Первые подводные газовые выходы метана, связанные с газогидратами, были найдены благодаря эхолотной съемке в 1988 г. во время рейса НИС «Морской геофизик» [Обжиров, 1993]. К этому времени в Охотском море были обнаружены три факела: факел «Припарамуширский», «Казанский», зарегистрированный на северо-восточном склоне о. Сахалин в 1988 г., и «Пильтунский» в районе Пильтунского нефтегазового месторождения. Позже, в 1991 г., во впадине Дерюгина были найдены новые газовые факелы, а также вскрыты осадки, содержавшие газовые гидраты [Гинсбург, Соловьев, 1994].

Подводные газогидраты исследованы здесь с помощью дистанционных сейсмической и гидроакустической съемок и подтверждены прямыми методами [Обжиров, Шакиров, 2012]. Экспедиционные исследова-

ния ТОИ ДВО РАН в международных проектах KOMEX (1998–2004 гг.), CHAOS (2003–2006 гг.), SSGH (2007–2014 гг.) позволили собрать уникальный материал о газогеохимических характеристиках газогидратоносных отложений в Охотском и Японском морях [Gas Hydrate..., 2008; Николаева и др., 2009]. Важно, что в Охотском море, по сравнению с другими бассейнами, газогидраты представлены часто массивными образцами, линзами и прослоями мощностью до первых десятков сантиметров [Operation Report..., 2012]. Такие скопления можно отнести к структурному типу, контролируемому неоднородностями, возникающими за счет активной разломной тектоники. Эти залежи легче разрабатывать – в малом объеме больше концентрация полезного ископаемого (в частности гидрата метана), чем, к примеру, те скопления, где преобладает литологический или стратиграфический контроль (Нанкайский трог, хребет Окусири и т.п.).

Метан поступает в верхнюю часть гидратоносных осадков из зон газогенерации и газонакопления в пределах осадочных толщ мощностью до 10 км, некоторые из них подвергнуты флюидной проработке на деструктивном фундаменте в тектонических прогибах. Эти толщи содержат разные виды углеводородных полезных ископаемых: месторождения нефти и газа, газогидраты и угленосные осадки. Метан доминирует в газовом составе гидратоносных толщ, занимая до 99.9 об. % от количества всех углеводородных газов (УВГ), поэтому газогидраты Охотского моря в основном относят к кристаллической структуре I. Удавалось поднять образцы сплошных газогидратов длиной до 35 см. Распределение потенциала генерации углеводородов в осадках до $(10-20) \times 10^6$ т/км² [Грецкая и др., 1992], благоприятные литолого-стратиграфические условия нефтегазоносных этажей, система рифтов, подходящие глубины (400–1500 м) и температура придонной воды +2 °С и ниже, распространение сейсмических аномалий, повышенный тепловой поток [Luedmann, Wong, 2003] и тектонические характеристики района [Харахинов, 1998; Baranov et al., 1999; Объяснительная записка..., 2000] позволили сделать прогноз размещения газогидратов в Дерюгинской депрессии вдоль продолжения

северо-восточного склона Сахалина (рис. 5) [Shakirov et al., 2005]. К 2005 г. данные о распределении газогидратов, газовых факелов, аномалиях метана (до 1200 нМ/л) стали основанием для проведения комплексного анализа перспектив гидратоносности сахалинского склона (проекты CHAOS, SSGH I, SSGH II). Этот прогноз был подтвержден работами последующих лет. В настоящее время вдоль восточного склона о. Сахалин площадь фактического распространения газогидратоносных осадков занимает около 15 000 км². В экспедициях 2009–2011 гг. был обнаружен микрогидратный цемент – форма распро-

странения газогидратов, характерная для южного участка присахалинской газогидратной площади [Gas Hydrate... , 2008]. Начальные ресурсы метана Охотоморской газогидратоносной провинции оцениваются в 2×10^{12} м³ (2.5 млрд т усл. т.) [Веселов и др., 2006], в газогидратных скоплениях северо-западного борта впадины Дерюгина сосредоточено порядка 8×10^8 м³/км² метана [Luedmann, Wong, 2003]. Для всего Охотского моря приводят величины 15×10^{13} м³ [Luedmann, Wong, 2003]. Для сравнения: в газогидратах Купарук Ривер – Прадхо Бей (Аляска) заключено 1.1×10^{12} м³ метана [Kvenvolden, Kastner, 1986]. Общемировые запасы природного газа оцениваются в 187×10^{12} м³ [International... , 2010].

Потоки природного газа со дна Охотского моря, ассоциируемые с газогидратами, одни из самых активных среди современных. Например, в августе 2012 г. у подножия северо-западного борта Курильской котловины под руководством авторов был обнаружен один из самых высоких газовых потоков (гидроакустическая аномалия) в Мировом океане высотой около 2200 м [Operation Report... , 2013]. На основе полученных данных в Охотском море выделяется крупная газогидратоносная провинция, включающая в себя на сегодняшний день как минимум четыре района:

1) северо-восточный склон о. Сахалин (западный борт впадины Дерюгина, или Дерюгинская депрессия). Для этого района характерны наиболее многочисленные струйные истечения пузырей метана («факелов») и его аномальных полей (рис. 5);

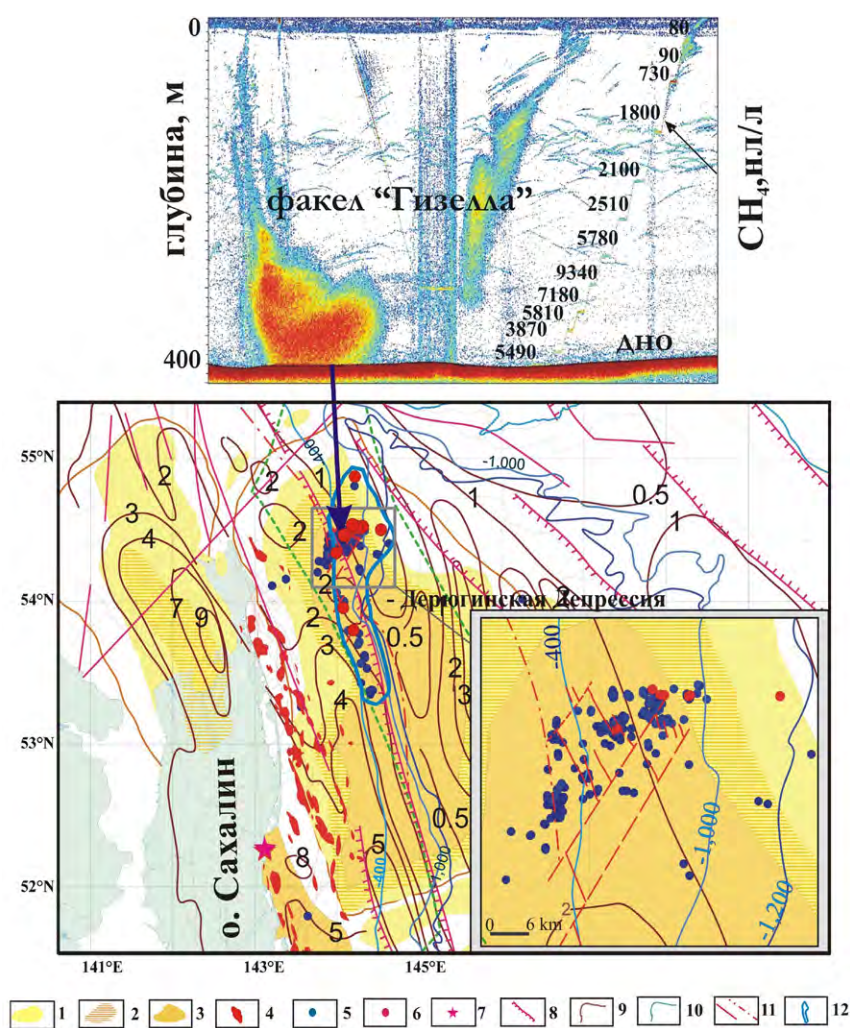


Рис. 5. Геоструктурное положение газогидратоносного участка Дерюгинской депрессии. Газовый факел и высокоинтенсивное аномальное поле метана в толще вод северо-восточного склона о. Сахалин (вверху) и геоструктурная схема участка (внизу). 1–3 – зоны высокой потенциальной плотности генерации углеводородов в осадке [Грецкая и др., 1992], 4 – локальные структуры, 5 – потоки газов, 6 – нефтегазопроявления, 7 – Дагинская геотермальная система, 8 – рифты, 9 – изопакиты, 10 – изобаты, 11 – разломы (установленные и предполагаемые), 12 – границы гидратоносной провинции на 2005 г.

2) Припарамуширский участок (Гольгинский прогиб);

3) западный склон Курильской котловины;

4) потенциально гидратоносная площадь у подножия о. Хоккайдо.

Потенциально газогидратоносная площадь выделяется также по результатам региональных работ ФГУП «Севморгео» в центральной части моря у подножия возвышенности Академии Наук [Верба и др., 2011]. Но центральная часть моря недостаточно исследована прямыми методами.

Впадина Дерюгина

Дно западного борта впадины Дерюгина характеризуется наличием большого количества участков фокусированной газовой разгрузки, ассоциированных с газогидратоносными осадками. Склон имеет слабо вогнутый профиль и подразделяется на три части: верхнюю (180–300 м), среднюю (300–600 м) и нижнюю (ниже 600 м), которые различаются между собой морфологией дна и углом наклона. В пределах нижней части площади имели место крупномасштабные оползневые процессы, которые явились следствием неустойчивости склоновых осадков. Это могло быть вызвано землетрясениями и разложением газогидратов с высвобождением свободных газов и воды. Средняя часть северо-восточного склона о. Сахалин имеет сложное строение, характеризуется наличием многочисленных уступов, распространенных в интервале глубин 380–750 м [Cruise Report... , 1999]. Данные эхозондирования показывают, что эти уступы ассоциируют с нормальными сбросами. На нижней части склона имеются многочисленные мелкие желобки и холмы высотой несколько десятков метров. Они объединяются в цепочки, которые простираются в двух направлениях: ЮЮЗ–ССВ и СЗ–ЮВ. По данным эхозондирования, с этими морфологическими структурами ассоциируют участки активного газового просачивания [Cruise Report... , 1999]. Основным фактором, определяющим распространение полей очагов разгрузки газа, являются тектонические нарушения (крутопадающие сбросы СЗ простираения и сдвиги СВ простираения), контролируемые зоны газонасыщенных осадков.

Общая площадь закартированных полей очагов разгрузки, входящих в присахалинскую газогидратоносную область, по данным экспедиционных исследований 2003–2013 гг., составляет более 15 000 км².

Тектонический характер распределения очагов газовой разгрузки на восточно-сахалинской окраине предполагает, что они образовались в условиях компрессионного режима [Cruise Reports... , 1999] со сдвигом.

В пределах островного склона было окартировано более 15 структур фокусированной разгрузки метана. Наиболее крупными из них являются газогидратоносные структуры «Хаос» и «Обжиров». Структура «Хаос» самая крупная на склоне Сахалина. Она расположена в нижней части склона на глубинах 950–980 м и занимает площадь размером 2000 × 700 м. Структура имеет в плане изометричную форму и характеризуется наибольшей акустической прозрачностью в южной и центральной частях, что свидетельствует о наличии в поровом пространстве осадков свободного газа [Cruise Report... , 2005]. Структура представлена группой мелкомасштабных газовых сипов в пределах большого поля газового просачивания, имеющих, вероятно, единый источник газа. Структура «Обжиров» расположена в нижней части склона на юго-восточном крае крутого уступа в пределах глубин 680–700 м на расстоянии ~18 км на юго-запад от структуры «Хаос». Газовые факелы здесь концентрируются в двух направлениях: ЮЗ–СВ и СЗ–ЮВ – и приурочены к небольшим грядам, состоящим из отдельных бугорков.

На участках локализации многочисленных газовых факелов и газогидратных проявлений были выполнены геотермальные исследования [Cruise Report... , 2005]. Полученные данные свидетельствуют о том, что в пределах структуры «Хаос» вблизи газовых факелов отмечаются высокие значения термального градиента (до 249 мК/м), типичные для холодных сипов, в то время как на структуре «Обжиров» они значительно ниже (около 58 мК/м). Это объясняется тем, что в первом случае просачивается не только свободный газ, но и газонасыщенная вода, а во втором отмечается выделение более чистого газа,

менее способного к транспортировке тепла к поверхности [Cruise Report... , 2005].

Гидроакустические исследования восточнее структур «Хаос» и «Обжиров» показали, что в этом направлении также существуют участки газового просачивания. В юго-западной части на внешнем шельфе (на глубине 180–190 м) и в верхней части склона (на глубине 360–390 м) были околонтурены структуры «Эрвин» и «Гизелла». На первой из них газовые факелы протягиваются в направлении с северо-востока на юго-запад и локализируются на выступах или в западинах. Вторая структура обусловлена морфологическим перегибом склона, который предположительно связан с зоной разлома, скрытого под мощным слоем осадков [Cruise Report... , 2000]. Также были выявлены структуры газового просачивания, названные «Китами», «КО-ПРИ», «ТОИ», «ВНИИОкеангеология», «Разлом Лаврентьева», и многие другие. Данные по сейсмоакустическому профилированию, полученные при исследовании структур «ТОИ», «Копри», «Китами» и «Хаос», показали наличие отчетливо видимых разрывных нарушений, которые служат флюидопроводниками. Наиболее интенсивно они проявлены в пределах структуры «Хаос». Следует отметить, что ослабленные зоны широко распространены в пределах всего изученного района, при этом очаги разгрузки флюидов, по всей видимости, соответствуют зонам пересечения более крупных нарушений [Cruise Report... , 2006]. Несмотря на то что изученные отложения в целом характеризуются присутствием значительного количества газа, образование гидратов идет именно в областях фокусированной разгрузки флюидов.

Значительное количество газовых факелов обнаружено в пределах разлома Лаврентьева (53°40'–54°00' N) [Cruise Report... , 2005]. По гидроакустическим и сейсмическим данным, газовые факелы и сопровождающие их аномалии микробных и термогенных газов в пределах этой структуры концентрируются на двух участках: на опущенном крыле разлома и на поверхности оползневого блока.

В 2004 г. в рейсе НИС «SONNE» у северной части о. Сахалин на глубине 920 м был обнаружен каньон широтного направления

[Cruise Report... , 2006] шириной до 2 км и глубиной 150 м. Он асимметричен: верхняя часть северной стенки имеет неровную расчлененную поверхность, а южной стенки – пологую. Фокусированная разгрузка газа была обнаружена на стенке каньона, а также в центральной части на глубине 720 м (структура «ВНИИОкеангеология») и к востоку от русла каньона в его проксимальной части [Cruise Report... , 2006]. Каньон, возможно, является также каналом для транспортировки осадочного материала р. Амур в район северо-восточного склона о. Сахалин.

Среди газогидратоносных и вмещающих отложений преобладают терригенно-диатомовые алевроиты, пелиты и пелиты алевроитовые с незначительной примесью песчаных частиц [Cruise Report... , 2006]. Большая часть колонок осадков не выходила из голоценовой части разреза, что свидетельствует о высоких скоростях осадконакопления в этой части Охотского моря. Осадки в пределах полей фокусированной газовой разгрузки имеют специфические особенности и отличаются от фоновых отложений рядом признаков. В них наблюдается определенная закономерность в изменении текстуры и цвета осадков, распределении аутигенных новообразований (преимущественно карбонатных конкреций), включений раковин специфической хемоаутоτροφной фауны моллюсков, а также газовых гидратов. Эта закономерность отчетливо проявляется по мере приближения к центрам газовой разгрузки на морском дне. По степени проявления в осадочном разрезе подобных признаков изученные колонки осадков можно разделить на два типа – расположенные по периферии и вблизи центров фокусированной разгрузки метана, сопровождаемой микроконцентрациями термогенного этана и повышением содержания высших углеводородов в отложениях. Осадки, отобранные по периферии от центров разгрузки метана, содержат большое количество гидротроилита и сильно биотурбированы, что придает им темно-серый оттенок и пятнисто-слоистую текстуру. Осадки, находящиеся вблизи центров разгрузки метана, часто содержат слои, насыщенные газовыми гидратами (рис. 6). Газогидраты представлены главным обра-

зом тонкими прослойками и линзами среди неслоистых осадков мощностью от 1 мм до 1–2 см, залегающими субгоризонтально или наклонно (рис. 6 д, з), реже отмечается субвертикальная и волнистая текстуры (рис. 6 а и з), в меньшем количестве встречаются обломки размером от 2–3 до 5–8 см (рис. 6 в, г, ж) и их сmerzшиеся агрегаты (рис. 6е). На структуре «Копри» обнаружены наиболее мощные прослои (14 и 34 см) массивных газовых гидратов (рис. 6б). Граница залегания гидратсодержащих осадков, обнаруженных при отборе прямоточной трубкой в Охотском море, варьирует от поверхности дна до поддонной глубины 500 см. Какой-либо отчетливой закономерности в ее расположении не выявлено.

Например, на структуре «Обжиров» эта граница располагается на глубинах 17–45 см и 305–395 см ниже поверхности дна. В некоторых случаях пробоотборник не смог глубоко войти в очень плотные газогидратонасыщенные осадки и откалывал их верхнюю часть. Поэтому их мощность часто определялась глубиной проникновения трубки в газогидратонасыщенный слой. Она также значительно варьирует – например, на структуре «Хаос» от 5 до 220 см. На структурах «Хаос» и «Китами» были взяты образцы осадков, полностью заполненных агрегатами газовых гидратов (до 5 м). Особенность поднятых газогидратов состоит в том, что все они имеют различную форму залегания от горизонтальных

слоев (в том числе 35 см толщиной) до фигурных прослоев и фрагментов слоев (рис. 6). В осадках Охотского моря мощность слоев или фрагментов газогидратов обычно составляет 2–5 см, чаще не более 1–10 см. Такой их морфологический облик в осадках, возможно, характеризует сейсмотектонические активизации, при которых увеличивался поток метана, предположительно из нефтегазовых залежей или других источников, что приводило к формированию прослоев газогидратов.

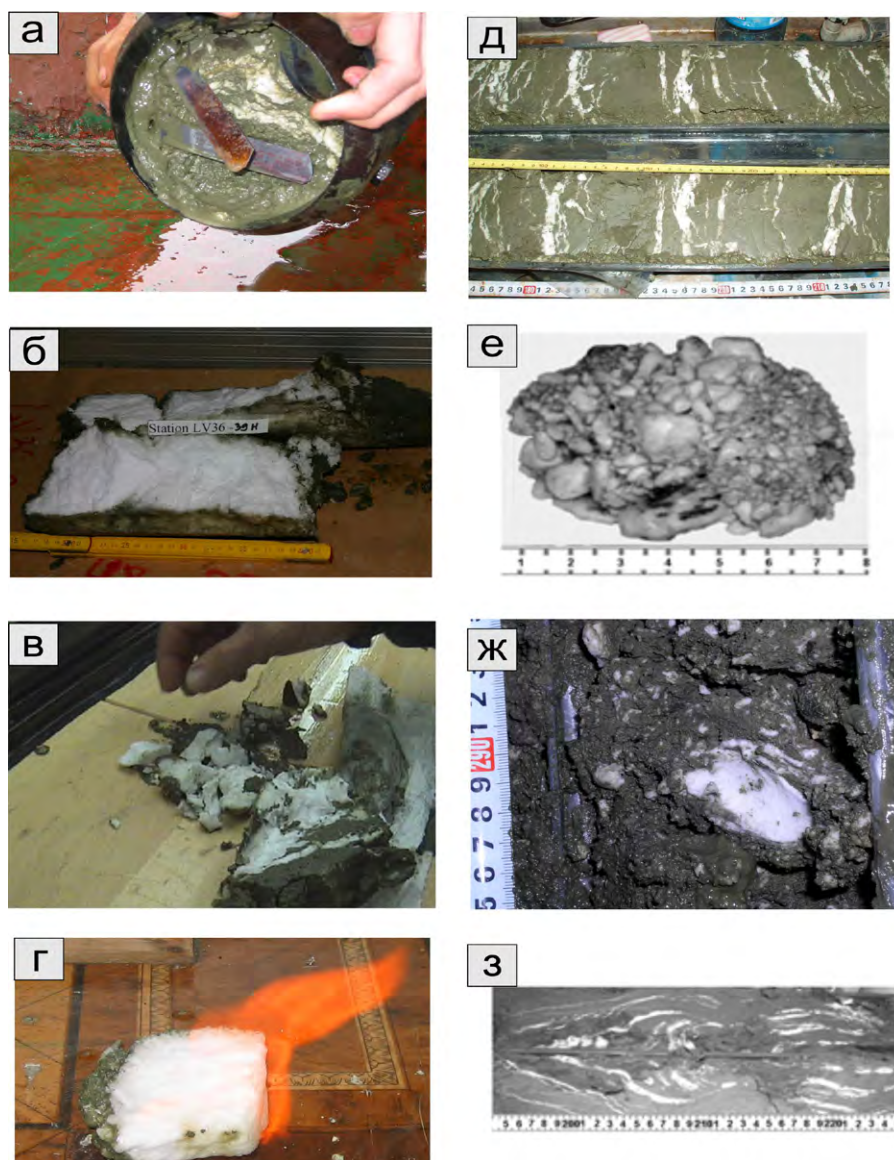


Рис. 6. Примеры морфоструктурных типов газогидратных образований в осадках западного борта впадины Дерюгина [Gas hydrate... , 2008; Николаева и др., 2009]. Сост. авторами. а – слои газогидрата в забое керна осадка, б – образец массивного газогидрата, в – крупнообломочные газогидраты, г – образец горящего обломка газогидрата, д – прослои и линзы, залегающие субгоризонтально, е – сmerzшийся агрегат обломков газогидратов, ж – изометричное включение газогидрата в осадке, з – прослои и линзы, залегающие в осадке субвертикально.

Газогидраты формируются благодаря потоку метана смешанного генезиса – микробного и термогенного, формируя скопления. Исходный газовый поток, подпитывающий субстратом микробные сообщества из подстилающих отложений, по всей совокупности геологических и газогеохимических данных, является термогенным.

В пределах изученного района широко развиты такие морфологические структуры дна, как покмарки, которые ассоциируют с участками газовых сипов. Они имеют округлую форму, а их диаметр достигает 500 м. Покмарки образуются благодаря поднимающимся к поверхности дна газовым потокам и представляют собой депрессии, развитые в основном на участках распространения мягких илистых осадков. Следует отметить, что южнее, на восточном склоне о. Сахалин, могут образовываться также изометричные депрессии, похожие на покмарки, но имеющие тектоническую природу [Баранов и др., 2013]. Кроме этого, на некоторых участках района исследования с помощью сейсмической и сонарной съемки обнаружены морфоструктурные неоднородности морского дна, представленные небольшими возвышенностями и депрессиями высотой, глубиной и диаметром несколько десятков метров. Иногда они образуют изометричные морфоструктуры диаметром 500–1000 м и часто ассоциируют с разгружающимися газовыми потоками, а образование подобных морфоструктур обусловлено, вероятно, процессом дестабилизации газовых гидратов. При разложении газовых гидратов создается избыточное давление, которое выталкивает на поверхность высвободившийся газ. При этом 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 депрессий. В совокупности такие локальные участки активной разгрузки природного газа могут быть причиной протяженных (до 100 км

и более) аномальных полей метана в толще вод [Шакиров, 2003].

Анализ полученных данных позволяет выделить в Охотском море три основных типа миграции метана, связанной с газогидратами: 1) фильтрационно-фокусированная, выраженная в виде газового факела, приуроченная к зоне разлома, 2) фильтрационно-диффузионная, обусловленная газовым просачиванием через зону трещиноватости [Гинсбург, Соловьев, 1994; Cruise Report... , 2000]; 3) диффузионная, являющаяся причиной формирования микрогидратного цемента (зерен). В первом случае отмечается интенсивный вынос метана и образование газовых гидратов. Во втором наблюдается более медленный процесс, проявляющийся в газонасыщенности осадков и формировании карбонатных конкреций по периферии от центра фокусированной разгрузки. В третьем случае газогидраты не наблюдаются визуально, но фиксируются по газовым трещинам в осадке, звуку потрескивания в поднятых со дна грунтовых колонках, отрицательной температуре забоя керна и геохимическим аномалиям.

Обнаруженный в водной колонке и осадках метан поступает из четырех источников: 1) из реликтовых газовых гидратов в процессе их дестабилизации, в том числе из-под подошвы газогидратсодержащих отложений (полигенетическая смесь), 2) из нефтегазовых залежей (термогенный газ); 3) из зоны бактериального метанообразования (микробный газ); 4) из угленосных отложений (угле-метаморфогенный метан).

Часто сложно сказать, откуда поступил обнаруженный газ, поскольку потоки метана обнаружены как на склоне, где газогидраты термодинамически стабильные, так и на шельфе, где по термодинамическим условиям не могут существовать газогидраты, но присутствуют нефтегазовые залежи. Более того, судя по сейсмостратиграфическим и геологическим («Дальморгеология») исследованиям, газогидратоносный участок на северо-восточном склоне о. Сахалин в верхней части разреза сложен осадками, сформированными под влиянием стока р. Амур. Эти осадки должны быть обогащены питательными веществами для активной

деятельности микроорганизмов, в том числе метаногенных. В данном районе создается камуфлирующий, разбавляющий эффект для миграционных газов. Наибольшие концентрации органического углерода характерны для гидратсодержащих структур (1.8 %) (соотношение общего и неорганического углерода может быть разным). На значительном удалении от них содержание органического углерода резко понижается до 0.5–1.2 % [Mazurenko et al., 2005]. Здесь же приведено, что разброс значений ^{13}N в пробах органического вещества, содержащегося в симбиотрофных моллюсках *Caliptogena*, указывает на существование двух источников углерода метана, участвующего в формировании аутигенных карбонатов: микробного *in situ* и метана, мигрирующего из разрушаемых нефтегазовых скоплений. Содержание органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$) остается повышенным в пределах газогидратоносной геологической структуры в целом (Дерюгинская депрессия). Эти данные хорошо сопоставляются с результатами хромато-масс-спектрометрических исследований распределения высших углеводородов – их количество возрастает в очагах сосредоточенной разгрузки газов [Обжиров, Шакиров, 2012]. Увеличение содержания ароматических углеводородов при усилении активности газовой выделения нами зафиксировано также для Южно-Сахалинского грязевого вулкана [Полоник и др., 2015]. На основании широкого разброса ^{18}O карбонатов в работе [Mazurenko et al., 2005] обосновано, что существует низкозалегающий источник «инфильтрационного» кислородсодержащего флюида.

Молекулярный состав газогидратного газа (соотношения внутри углеводородной фракции) уверенно указывает на наличие преимущественно бинарной, термогенно-микробной смеси газов (табл. 1).

В пределах впадины Дерюгина распространены также диапировые структуры, подобные грязевым вулканам [Luedmann, Wong, 2003]: конические или куполоподобные структуры, выходящие на поверхность морского дна на участках разгрузки газовых потоков. На северо-восточном склоне о. Сахалин вещественных доказательств грязевого вулканизма (брекчии и др.) не было обнаружено, в отличие от газогидратоносных подводных грязевых вулканов Хаакон Мосби, Наполи, Буш Хил, вулканов зал. Кадис и др. Очень важным индикатором являются концентрации этана и его изотопные характеристики, поскольку он входит постоянной компонентой в состав газов нефтегазовых месторождений. В природе потоки 100 % чистого термогенного этана пока не зафиксированы, он всегда сопровождает основной компонент природного газа – метан. При миграции термогенного метана в зону микробных газов его средний изотопный состав «облегчается» до –65 ‰ и даже меньше. Следует учитывать также, что при образовании газогидрата происходит эффект изотопного фракционирования, при котором метан газогидратов оказывается легче (на величину около 5 ‰), чем метан поровых вод [Nashikubo et al., 2011]. Газохроматографический анализ газовых гидратов западного борта впадины Дерюгина показывает, что они состоят в основном из метана (до 98–99 %) и незначительного количества углеводородных газов, при этом содержание CO_2 не более 1 %. Средний изотопный состав углерода метана из газовых гидратов впадины Дерюгина и склона зал. Терпения [Shakirov et al., 2014] составляет –64.3 ‰. Полученные данные $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ для северо-восточного склона о. Сахалин показывают в большинстве случаев диапазон –60...–65.6 ‰ (редко –55 ‰). При определении

Таблица 1. Молекулярный состав газогидратного газа западного борта впадины Дерюгина [Long et al., 2009].

Структура газовой эмиссии	Номер керна, интервал (см)	$\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4/^{13}\text{C}-\text{CO}_2$, ‰ PDB	Молекулярный состав гидратных газов ($\text{УВГ}+\text{CO}_2$) = 100 %					
			CH_4	C_2H_6	C_3H_8	$i\text{C}_4\text{H}_{10}/n\text{C}_4\text{H}_{10}$	He+Ne	CO_2
Kitami	LV32-09GC, 167	– 65.0/– 15.4	99.44	0.0025	0.0013	He опр.	0.0001	0.5
Hieroglyph	LV32-13GC, 160	– 64.6/– 18.4	99.34	0.0024	0.0018	0.0003/0.0003	0.0001	0.65
CHAOS	LV32-16GC, 490	– 64.4/– 4.8	99.04	0.0018	0.0015	0.0003/0.0002	0.0001	0.95
CHAOS	LV31-34GC, 160	– 64.0/– 8.7	99.29	0.0001	0.0015	0.0004/0.0004	0.0001	0.7

генезиса метана используются не только значения изотопного состава углерода, но и молекулярный состав сопутствующих углеводородных газов [Abrams, 1992], коэффициенты, основанные на их соотношениях [Никонов, 1961; Гресов, 2011], а также изотопный состав углерода и кислорода аутигенных карбонатов [Николаева и др., 2009]. Незначительное, по сравнению с метаном, количество тяжелых гомологов метана (сотые доли процента) было определено в газе, выделяющемся на западном борте впадины Дерюгина при разрушении газогидратов, и в гидратоносных осадках. На основании этого и изотопных данных можно утверждать о смешанном источнике микробного ($^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ –70...–90 ‰) и термогенного метана ($^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ –35...–45 ‰) из нефтегазовых месторождений на северо-восточном шельфе и склоне о. Сахалин. Процессы образования микробного метана широко развиты на континентальных окраинах морей и океанов, где для этого существуют необходимые условия, такие как высокие ско-

рости осадконакопления, наличие большого количества органического вещества, восстановительная среда с характерными для нее метанотрофными бактериями и низкие придонные температуры [Леин, Иванов, 2009]. Подобные условия наблюдаются на всех изученных нами структурах фокусированной разгрузки «холодносиповых» газовых потоков на западном борте впадины Дерюгина. Сильный поток восстановленных газов приводит к тому, что на некоторых участках восстановительные условия отмечаются прямо на поверхности дна (структуры «Копри», «ТОИ» и др.).

Примечательно, что на участке обнаружения газогидратов и факелов «Обжиров» и «Гизелла» было закартировано линзовидное осадочное тело, сложенное в результате терригенного стока р. Амур (рис. 7). В данной осадочной линзе должен происходить активный процесс генерации микробного метана, поскольку совпадают все благоприятные для этого условия.

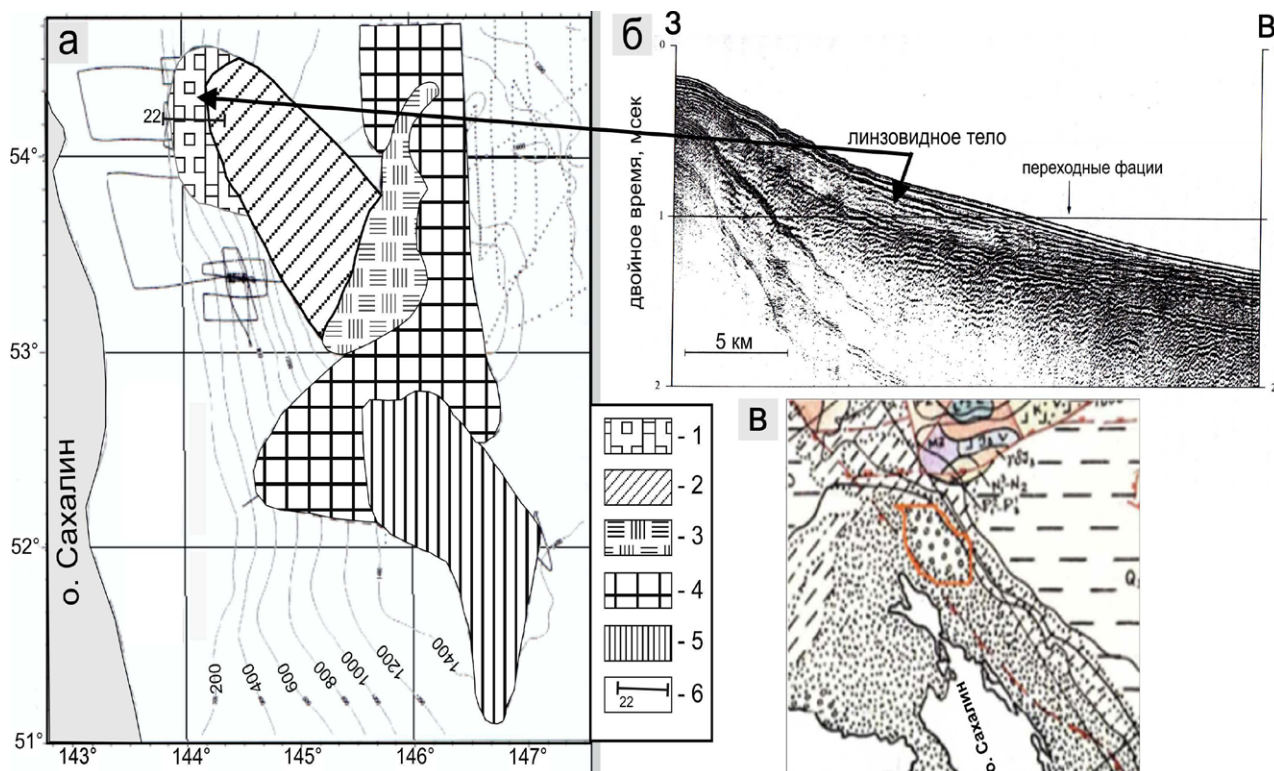


Рис. 7. Карта газогидратоносного района, осадконакопление в котором сильно подвержено влиянию стока р. Амур. а – участки с разными типами сейсмостратиграфических комплексов, выделенных при НСП, 1998. INESSA Cruise [Baranov et al., 1999]: 1–4 – участки 1, 2, 3 и 4 соответственно, 2 – участок с развитием эрозионных каналов; 5 – «молодое» линзовидное осадочное тело; 6 – положение профиля 22 НСП; б – сейсмический разрез (профиль 22) через линзовидное осадочное тело; в – фрагмент геологической карты, на которой красным контуром обведены отложения, сформированные под сильным влиянием стока р. Амур (выполнено в лаборатории геологических формаций морского дна ТОИ ДВО РАН под руководством д.г.-м.н. Е.П. Леликова).

Одним из признаков присутствия в осадочной толще газовых гидратов является наличие отражающего сейсмического горизонта (BSR), который фиксируется на сейсмических профилях и маркирует основание зоны стабильности газовых гидратов. Его появление обусловлено различными плотностными свойствами отложений, содержащих газовые гидраты или свободный газ, а глубина расположения зависит от давления и температуры, при которых газовые гидраты являются устойчивыми. В пределах северо-восточного склона о. Сахалин BSR отчетливо выделяется на некоторых участках. Наименьшие поддонные глубины, на которых этот горизонт был зафиксирован (100–200 м), отмечаются в пределах верхней и средней части северо-восточного сахалинского склона, а с увеличением глубины моря увеличивается глубина его залегания [Luedmann, Wong, 2003]. Учитывая, что ниже горизонта BSR находится зона свободного газа, можно предположить, что в северо-западной части Охотского моря существует обширная зона газонасыщения (газовый резервуар), располагающаяся в пределах верхней и средней части северо-восточного сахалинского склона.

В целом источниками гидратообразующего газа в Охотском море является смесь микробного и термогенного метана с изотопным рядом углерода –40...–77.5 ‰ PDB. Поля газогидратов установлены в областях развития осадков мощностью от 2 до 5–8 км. При этом глубина подошвы залежей газогидратов от поверхности дна не превышает 300–400 м и в основном колеблется в пределах 7–150 м. Для установления генетической принадлежности (источников) углеводородных газов были посчитаны коэффициенты соотношений УВГ, которые необходимы в ряде случаев как дополнительные индикаторы при отсутствии масс-спектрометрических измерений стабильных изотопов углерода (рис. 8), водорода и других газообразующих элементов.

Для расчета взяты данные табл. 2. Так, этановый коэффициент (K_{C_2}) [Гресов, 2014] для всех проб из выборки составил намного меньше 1, что характерно для нефтяных за-

лежей. Этан-пропановый коэффициент указывает на принадлежность газа к сухому типу ($C_2/C_3 > 2.6$). Бутановый коэффициент – генетический, он свидетельствует о наличии/отсутствии миграционных газов в зоне опробования. Так, для 10 проб значения бутанового коэффициента не попадают в диапазон от 0.3 до 1.1, только одна проба имеет коэффициент 1, характерный для газов термогенного ряда. Отношение C_1/C_2+C_3 , введенное в диаграмме Бернарда (разработано на данных по Мексиканскому заливу), дает основание определить микробный генезис, однако в случае динамического явления – струйного потока пузырей газа является некорректным. Согласно изотопному составу и комплексу коэффициентов углеводородных газов, метан из диссоциированных газогидратов северо-восточного склона о. Сахалин относится к микробным газам с примесью термогенной компоненты. Последняя указывает на миграционный подток термогенных газов, который подтверждается этаном (рис. 8) в поверхностных отложениях и парафиновыми углеводородами [Обжиров и др., 2013] в осадках участков газовой разгрузки. Изотопный состав углерода метана сильно облегчается, когда термогенный газ разбавляется микробными газами (–70...–90 ‰), и достигает значений –65 ‰ за счет «масс-балансного эффекта» [Шакиров, 2015]. Дополнительным источником микробных газов является органическое вещество осадочной линзы, сформированной при значительном влиянии осадконакопления Амурского терригенного стока в зоне его смешения с Восточно-Сахалинским течением.

Вопрос о роли микробного метана в формировании газогеохимических аномалий и газогидратов не решается однозначно [Blair, 1998]. Например, приведенные в таблице значения критерия $C_1/УВГ$ дают «микробный» сигнал. Но, по мнению авторов, абсолютизация этих отношений не оправдана в случае интенсивной разгрузки природного газа, когда газогеохимическое поле определяется не площадными процессами диффузии или фильтрации газа, а газодинамическим явлением – концентрированными потоками метана. В этом случае опора на одну классификацию

(например, диаграмма Бернарда создана на примере осадков Мексиканского залива) может дать ошибочную трактовку генезиса.

Западный борт впадины Дерюгина находится под влиянием компрессионного режима со среднего миоцена вплоть по настоящее время [Baranov et al., 1999; Luedmann et al., 2002], это подтверждается высокой сейсмичностью данного района [Карп, Бессонова, 2002]. По опыту работ авторов, тектоническое сжатие определяет возникновение газонасыщенных зон в осадках и восходящие потоки сложной смеси газов, в которой в поверхностных отложениях преобладает метан. А в условиях растяжения, напротив, часто формируются потоки газов с большим содержанием гомологов метана вплоть до нефтяных углеводородов, при этом значительную роль играет субгоризонтальная миграция флюидов.

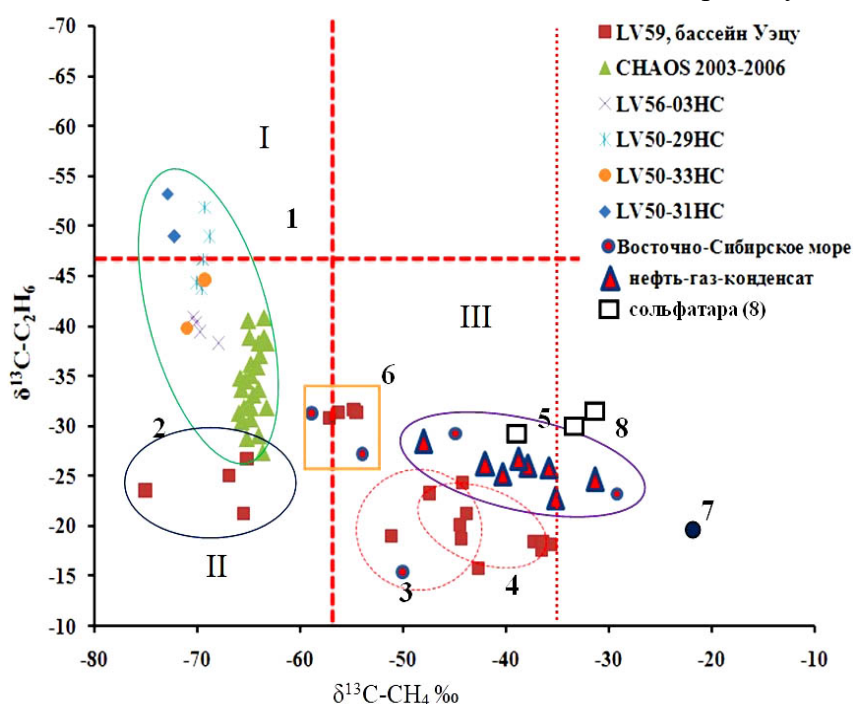


Рис. 8. Газогенетическая диаграмма некоторых гидратоносных осадков и нефтегазоносных провинций района исследований по данным [Кудрявцева, Лобков, 1984; Равдоникас, 1986; Nachikubo et al., 2010; Nachikubo et al., 2011; Nachikubo et al., 2015; и др.] и авторским [Шакиров и др., 2012; Шакиров и др., 2013; Шакиров, 2014; Shakirov et al., 2014]. 1 – впадина Дерюгина и Курильская котловина (Охотское море), Цусимская котловина (Японское море), бассейн Шеньху (Южно-Китайское море); 2 – Курильская котловина (северо-западный борт); 3 – Южно-Татарский прогиб (Японское море); 4 – бассейн Уэцу (Японское море); 5 – нефтегазовые залежи Северо-Сахалинского осадочного бассейна и осадки Восточно-Сибирского моря; 6 – бассейн Уэцу и осадки Восточно-Сибирского моря; 7 – Южно-Сахалинский грязевой вулкан; 8 – вулкан Менделеева (о. Кунашир). Поле I – микробные газы C_1 и C_2 , поле II – микробные C_1 и термогенные C_2 , поле III – термогенные C_1 и термогенные C_2 .

По результатам интерпретации опорных профилей в Охотском море, выполненных ФГУНПП Севморгео совместно с ТОИ ДВО РАН в 2006–2009 гг., были выделены два новых перспективных участка [Верба и др., 2011]. Один из них расположен во впадине Дерюгина (глубина 1270–1300 м), а другой на южном склоне поднятия Академии Наук (2340–3210 м). Оба участка выделены по термобарическим условиям и геофизическим характеристикам (BSR и конфигурации волнового поля), свойственным уже обнаруженным газогидратным скоплениям. Существование газогидратов предполагается в интервале 200 м ниже поверхности дна. Протяженность перспективной зоны во впадине Дерюгина составляет около 85 км, а на склоне поднятия Академии Наук – 25 км. Как уже описывалось в предыдущих разделах, при общих фоновых

величинах на ряде пикетов, в том числе попадающих в эти зоны, были обнаружены высокие концентрации УВГ. Упомянутые авторы [Верба и др., 2011] также приходят к выводу, что эти УВГ имеют миграционную природу.

Голыгинский прогиб

По простирацию Голыгинского прогиба к западу, у северо-западного подножия о. Парамушир, обнаружено аномальное поле метана, приуроченное к участку приповерхностного скопления газогидратов в осадке [Авдейко и др., 1984; Obzhirrov, 1992]. Голыгинский прогиб характеризуется довольно высоким углеводородным потенциалом [Грецкая и др., 2008]. На отдельном участке, около 100 м диаметром, было зафиксировано пузырьковое выделение природного газа [Зоненшайн и др., 1987]. Данное явление регистрировалось на эхограмме как акустическая аномалия.

лия типа «факел». В составе пузырей газа был преимущественно метан (60 %), содержание углекислого газа составило 5 %. Примечательно, что в континентальной окраине Южной Америки (Перу) в газогидратах, обнаруженных в кернах осадка в интервале 99–141 м ниже поверхности дна, на глубинах 3000–6000 м, также содержалось 5 и 8 % CO₂, метан при этом составлял 95 и 91.5 % соответственно [Kvenvolden, Kastner, 1986]. Здесь отмечены также этан 39–22 ppm и пропан 28 ppm. Значения $\delta^{13}\text{C}$ метана газогидратов варьировали в пределах –65...–59.6 ‰ (PDB). В растворенном газе придонного слоя воды рядом с Припарамуширским факелом были обнаружены концентрации метана, значительно превышающие фон для этого района (более 200 нл/л). В придонной воде непосредственно над местом выхода пузырей газа зафиксирована концентрация метана 1000 нл/л (рис. 9) [Газогеохимическое..., 1999]. Содержание других газовых компонентов, за исключением CO₂, охарактеризовано как фоновое.

Морское дно было изучено здесь с помощью погружаемых обитаемых аппаратов [Зоненшайн и др., 1987] и эхолотного зондирования с отбором донных осадков гравитационными трубками [Обжиров, 1993]. Газирующий участок представлял участок с депрессиями и холмиками диаметром и высотой до 2–3 м. В районе газового источника газогидраты были обнаружены в верхнем слое осадков в экспедициях на НИС «Мстислав Келдыш» [Зоненшайн и др., 1987] и «Геолог Петр Антропов» [Гинсбург, Соловьев, 1994]. Газогидраты находились в осадке в виде неровных прослоев 5–20 см толщиной и имели серовато-белый цвет. В отличие от газа пузырей, газ, выделенный из газогидрата, содержал больше метана – 90–95 % и меньше углекислого газа – 2–3 %. Концентрации ТУВ (тяжелых углеводородов) не превышали 0.1 %. Восходящая миграция гидратообразующего метана ассоциируется с подводной вулканогенной структурой, входящей в погребенную вулканогенную зону

Таблица 2. Химический и изотопный состав газов газогидратоносных осадков западного борта впадины Дерюгина в 2003–2005 гг. [Nachikubo et al., 2011].

Проект	Структура	Керн	Горизонт ниже дна, см	C ₁ , %	C ₂ , %	C ₃ , ppm	iC ₄ , ppm	nC ₄ , ppm	H ₂ S, %	C ₁ /УВГ	C ₁ /C ₂
CHAOS 1	Иероглиф	LV32-13GC	126	100	0.063	3	21	6	0.0	1 506	1 587
			143.6	100	0.070	7	6	5	0.0	1 384	1 425
			160	100	0.008	4	3	2	0	10 443	11 833
			162	100	0.007	4	4	2	0.0	12 087	15 243
			165	99.9	0.018	4	3	2	0.0	5 386	3 666
			1675	99.9	0.022	4	4	4	0.0	31 089	60 024
CHAOS 1	Китами	LV32-11HC LV32-06GC	40	99.9	0.002	2	2	0	0.0	49 423	60 827
			119	99	0.018	18	17	4	1.3	4 501	5 619
CHAOS 1	ХАОС	LV32-16GC	250	99	0.017	9	30	4	1.5	4 705	5 022
CHAOS 2	Копри	LV36-31H LV36-32H	45	100	0.021	2	124	0	0.0	2 921	4 587
			69	99	0.034	2	2	0	1.0	24 883	27 687
CHAOS 3	ТОИ	LV39-40H	175	99	0.005	–	–	–	0.6	21 825	21 825
			184	99.9	0.003	–	–	–	0.0	36 852	36 852
			194	99.9	0.003	–	–	–	0.0	29 180	29 180
			196	99.9	0.005	–	–	–	0.0	21 578	21 578
			260	99.9	0.004	–	–	–	0.0	23 065	23 065
			260	99.9	0.004	–	–	–	0.0	23 624	23 624
CHAOS 2	ВНИИОкеангеология	LV36-58H	110	99.9	0.039	12	115	38	0.0	1 778	2 570
CHAOS 2	Гизелла	LV36-61H	54	99.9	0.028	46	145	45	0.0	1 875	3 627

Примечание. Прочерк – не обнаружено.

(В.1.2 на рис. 9Б), которая в том числе является источником повышенного содержания углекислого газа.

В газонасыщенных осадках отмечается высокое содержание как легкого, так и тяжелого изотопов углерода карбонатных образований. Значения $\delta^{13}\text{C}$ карбонатов наблюдались в пределах $-28.7\ldots-50.1$ ‰. Одновременное увеличение содержания легкого и тяжелого изотопа с уменьшением изотопного отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ объясняется вкладом микробного и термогенного метана [Леин и др., 1989]. На примере Припарамуширского газогидратного скопления было экспериментально доказано, что во вмещающих осадках Охотского моря происходит активный анаэробный процесс окисления метана, скорость которого на 1–2 порядка превышает скорость его микробного образования (высокие скорости характерны только для самого верхнего слоя осадков) *in situ*. Это свидетельствует о дополнительном поступлении метана в газогидратсодержащие осадки из более древних отложений [Леин, Иванов, 2009]. Необходимо отметить, что в некоторых

абиссальных районах котловины также были обнаружены конформные рельефу дна границы «газогидратной» BSR, выявленные на некоторых профилях в абиссальной части котловины [Баранов и др., 2013].

Западный борт Курильской котловины

В данном районе газогидраты были обнаружены впервые в 2012 г. под руководством авторов (А.И. Обжирова и Р.Б. Шакирова), затем участки с газогидратоносными осадками детализировались в 2013–2015 гг. Газовые гидраты были подняты на участках с газовыми факелами (рис. 10б). Ранее в этом районе газовые факелы, карбонатные конкреции и газонасыщенные осадки уже регистрировались. В 2012–2013 гг. здесь были взяты 14 колонок осадков длиной от 304 до 536 см, одна из которых (LV59-05HC) впервые вскрыла газовые гидраты в виде небольших кусочков (рис. 10в). В 2013 г. газогидраты были обнаружены на тех же и соседних участках (LV62-07HC и LV62-08HC), что характеризует район как новую газогидратную провинцию.

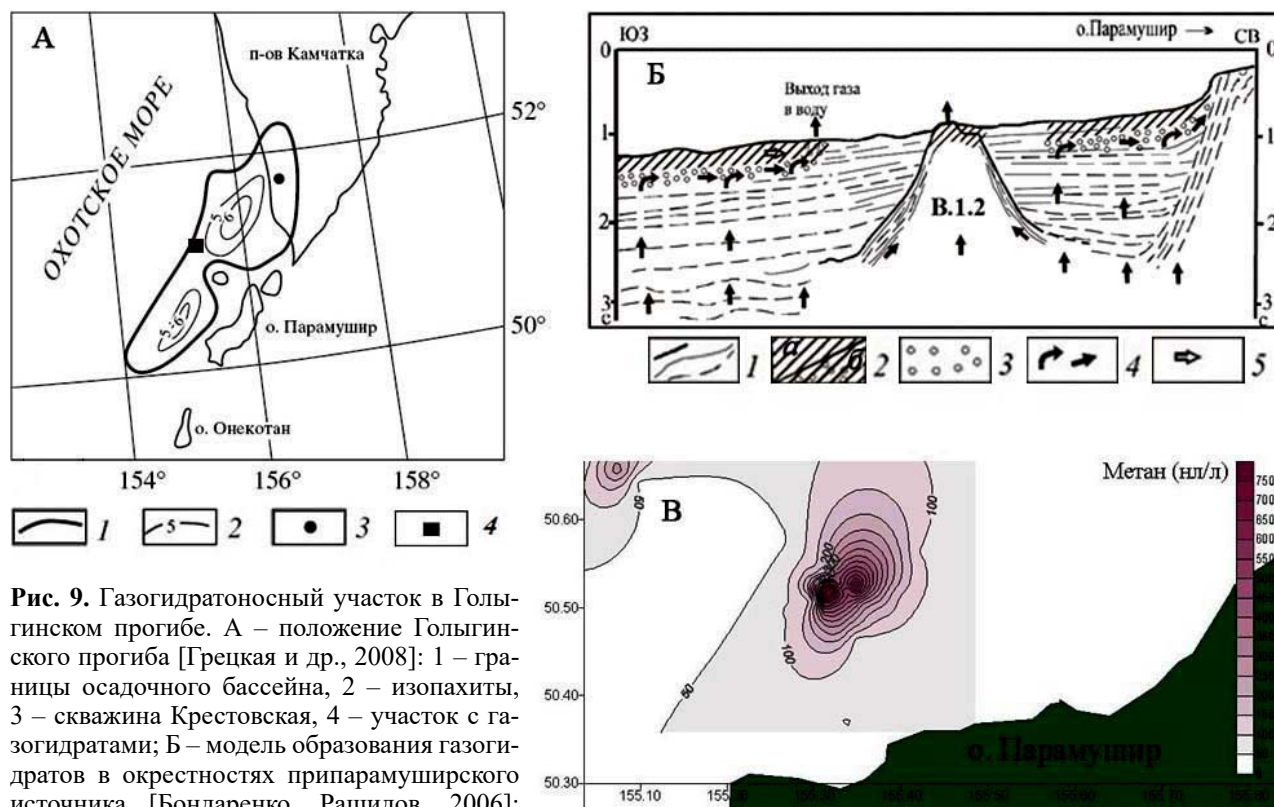


Рис. 9. Газогидратоносный участок в Гольгинском прогибе. А – положение Гольгинского прогиба [Грецкая и др., 2008]: 1 – границы осадочного бассейна, 2 – изопакиты, 3 – скважина Крестовская, 4 – участок с газогидратами; Б – модель образования газогидратов в окрестностях припарамуширского источника [Бондаренко, Рашидов, 2006]: 1 – отражающие границы, 2 – гидратоносные осадочные отложения (а – со свободными газами, б – без свободных газов), 3 – свободные газы в осадках, 4 – направление миграции газов, 5 – направление нарастания (обновления) газогидратного слоя. В.1.2 – вулканический конус. В – аномальное поле концентраций метана в придонном слое толщ вод над газогидратами (по данным авторов).

Отбор осадков и литологические исследования этого района были выполнены в лаборатории седиментологии и стратиграфии ТОИ ДВО РАН (зав. лаб. д.г-м.н. А.Н. Деркачев). Осадочный разрез типичен для Охотского моря, он представлен пелитом алевроитовым зеленовато-серого либо серовато-зеленого цвета, с характерной линзовидно-пятнистой текстурой, обусловленной наличием линз и пятен гидротроилита и биотурбацией [Operation Report... , 2013]. Как и на западном борте впадины Дерюгина, для осадков характерна псевдобрекчиевидная текстура, присутствуют карбонатные конкреции и раковины *Calypptogena*. Следует отметить, что количество карбонатных конкреций резко

снижается вплоть до исчезновения при удалении от мест газовой разгрузки уже на первые метры. Газогидраты обнаружены в зонах влияния тектонических разломов, где были зарегистрированы газовые факелы. Газогидраты западного борта Курильской котловины характеризует меньшая доля заполнения порового пространства (рис. 11), чем у таковых западного борта впадины Дерюгина. Это связано с меньшей интенсивностью газовых потоков и более низкой сейсмической активностью территории (рис. 10а).

Были обнаружены аутигенные метанпроизводные карбонаты [Operation Report... , 2013] (в большинстве колонок осадков). Встречались диагенетические карбонаты,

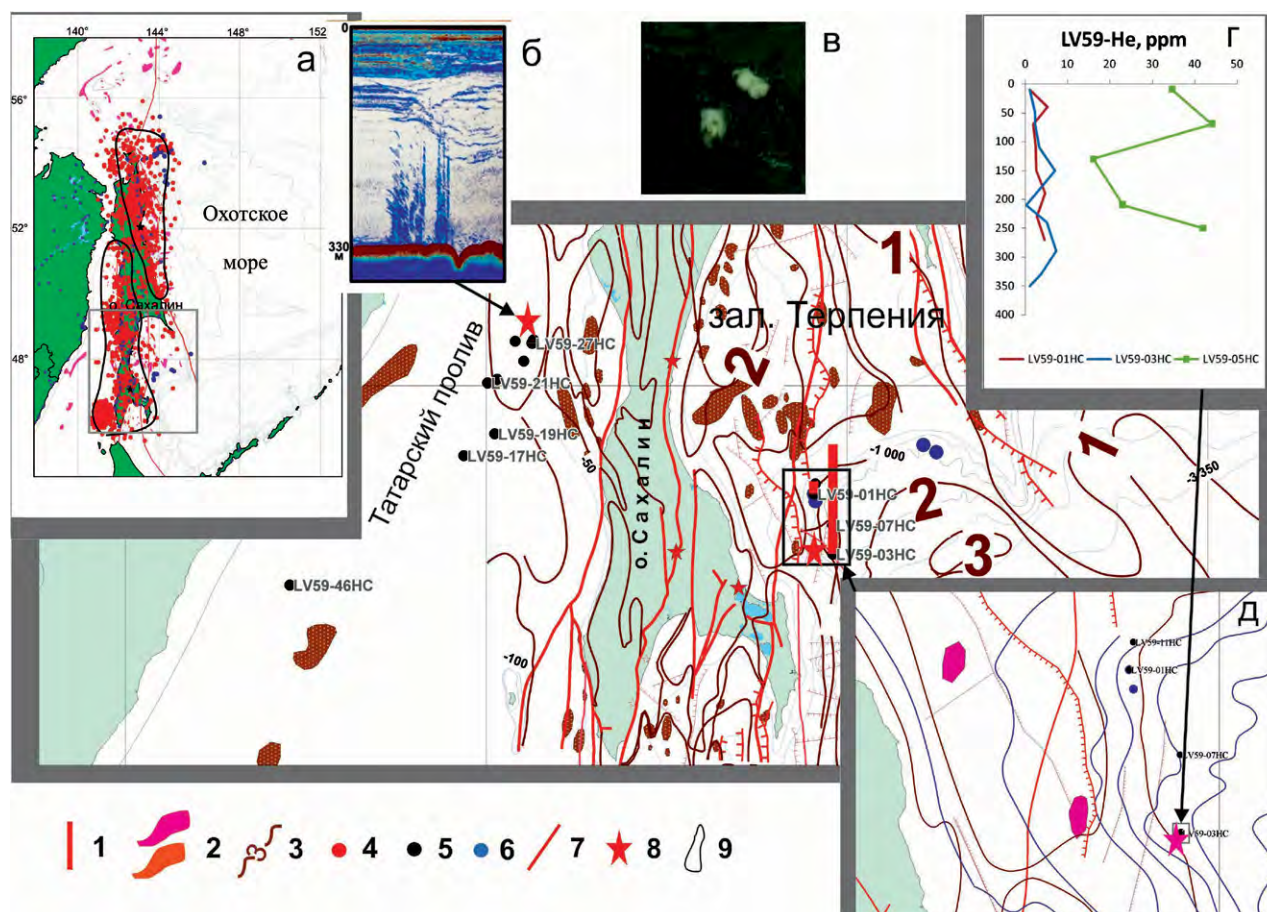


Рис. 10. Карта расположения станций опробования осадков на западном борте Курильской котловины и в Южно-Татарском прогибе в 2012–2013 гг. (красным обозначены станции с газогидратами) и новых газогидратных скоплений и газопроявления («факелы») в Курильской котловине (глубины 90–2200 м) и в Татарском проливе (глубины 140–330 м) в 2012–2013 гг. [Operation Report... , 2013]. Сост. Р.Б. Шакиров.

1 – аномальное поле метана в газогидратоносных осадках, 2 – локальные структуры, 3 – изопахиты, 4 – землетрясения, 5 – станции и их номера, 6 – газопроявления («факелы»), 7 – разломы, 8 – грязевые вулканы, 9 – изотопно-газогеохимические зоны. Врезки: а – карта землетрясений о. Сахалин и прилегающего шельфа и склона; б – пример акустических аномалий типа газовый «факел»; в – белые кусочки газогидратов в осадках западного борта Курильской котловины; г – распределение гелия в трех колонках осадков (ст. LV59HC – аномалия гелия); д – карта локализации гелиевой аномалии в гидратоносном осадке.

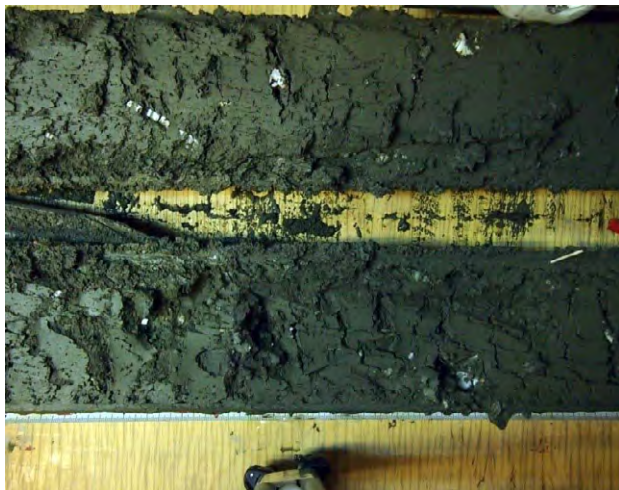


Рис. 11. Газогидраты (белые включения), обнаруженные в осадках СЗ борта Курильской котловины. Рейс 62 НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2013 г.

образованные в результате разложения рассеянного органического вещества. На одном из участков в нижней части колонки вскрыты два горизонта (400–412 и 430–500 см) с газовыми гидратами (LV62-07HC). Первый горизонт представлен твердыми (мерзлыми) осадками с многочисленными мелкими линзами и слойками газогидратов, во втором просматриваются субвертикальные линзы и прослои газогидратов (рис. 12). На участке, расположенном немного южнее, в пределах изобаты 1050 м, где в 2012 г. были подняты небольшие кусочки газогидратов (LV59-05HC), при повторных работах в 2013 г. были подняты типичные газогидратоносные (мерзлые) осадки (LV62-08HC) в интервалах 140–153 и 180–255 см с многочисленными линзами и слойками газогидратов [Operation Report... , 2013].

Гомологи метана в газогидратоносных осадках представлены в основном этаном и пропаном, при этом содержание этана во много раз превышает содержание пропана. Распределение этана в осадочных колонках практически повторяет распределение метана, хотя и имеет некоторые отличия. Для примера представлены кривые этана и метана для колонок, содержащих газогидраты (рис. 13).

Наибольшая концентрация этана отмечена на станции LV62-24HC (1187 нл/дм³) в слое 110 см ниже дна (рис. 14). Максимальные концентрации этана проявляются



Рис. 12. Газовые гидраты в колонках осадков западного борта Курильской котловины, 2013 г. [Operation Report... , 2013].

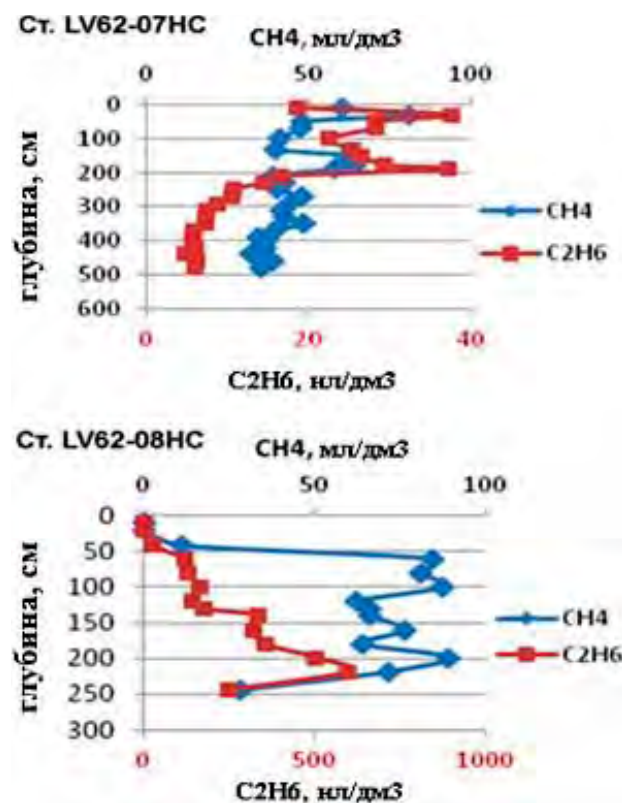


Рис. 13. Распределение метана и этана в колонках осадков с газогидратами.

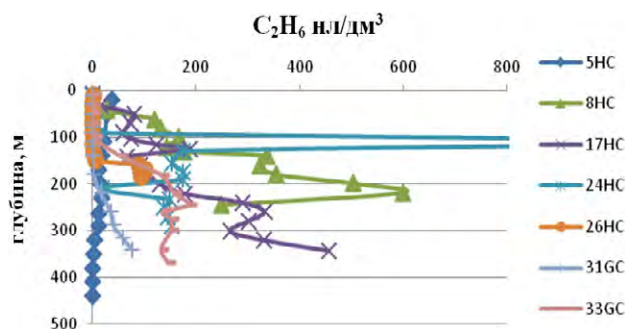


Рис. 14. Диаграммы распределения максимальных концентраций этана на западном борте Курильской котловины и в Южно-Татарском прогибе (2013 г.).

на станциях, содержащих газогидраты, за исключением LV62-07НС и LV62-26НС.

Кроме того, на гидратоносном участке (рейс LV62, станция 8НС) зафиксированы углеводородные газы насыщенного ряда от этана до бутана и неопентана, а также изопентан и пентан. Это явные признаки миграционных термогенных УВГ с учетом того, что здесь в течение 3 лет обнаруживались аномалии гелия (до 80 ppm при фоне 5 ppm). Следует отметить, что метан из диссоциированных газогидратов западного борта Курильской котловины характеризуется средней изотопной меткой -65‰ , сходной с углеродом метана западного борта впадины Дерюгина.

Таким образом, на западном газогидратоносном склоне Курильской котловины в донных осадках обнаружен весь комплекс тяжелых углеводородов от этана до пентана включительно, что характеризует поступление углеводородных газов к поверхности по зонам разломов из нефтегазоносных интервалов глубоких осадочных комплексов (нижняя зона «нефтяного окна» и зоны мезокатагенеза с признаками глубинного флюида).

Примеры образцов газогидратоносных осадков западного борта Курильской котловины представлены на рис. 15.

Признаки газогидратных скоплений в других районах Охотского моря

Газогидратоносный район расположен на охотоморской акватории западнее п-ова Сиретоко (о. Хоккайдо) [Freire et al., 2011; Overview... , 2009] (рис. 16).

Район выделен по комплексу сейсмических, магнитометрических и гравиметриче-

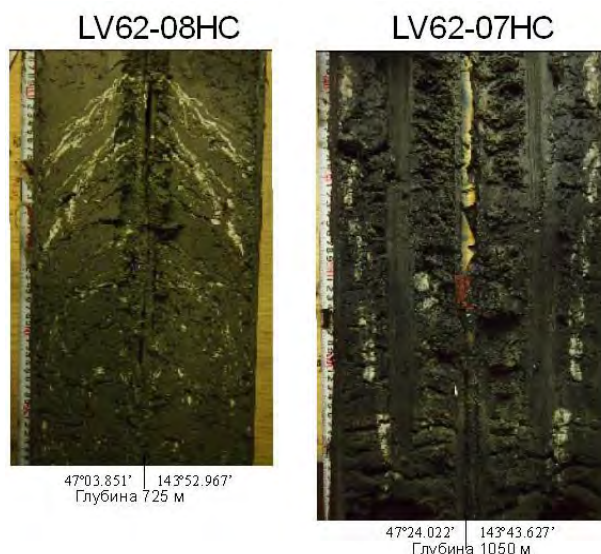


Рис. 15. Примеры газогидратоносных осадков западного борта Курильской котловины [Cruise Report... , 2013].

ских данных. Район также характеризуют повышенный тепловой поток, наличие низкотемпературных аномалий поверхностного слоя воды и термогенный состав газа в осадках (-40‰) [Sasaki et al., 2002]. Площадь перспективного района составляет 3000 км².

Япономорская газогидратоносная провинция

В Японском море газогидраты обнаружены на склонах островов Сахалин, Хонсю и Хоккайдо и в Цусимской котловине (рис. 17).

Газогидратоносные перспективные площади закартированы вдоль всего западного склона Японского архипелага и в северо-восточной части Японского моря и контролируются зонами распространения пород смешанного состава [Геология... , 2004]. Комплексы пород смешанного состава, видимо за счет своей повышенной пористости и трещиноватости, являются хорошими коллекторами для газогидратов. Расположенные на побережье и шельфе нефтегазоносные бассейны, углегазовые скопления в поле формации «зеленых туфов» создают высокий газовый потенциал для образования газогидратов в этом районе. На рис. 17 показаны скопления, уверенно выделяемые японскими исследователями как зоны с высокой концентрацией газогидратов в поровом пространстве (более 40 %).

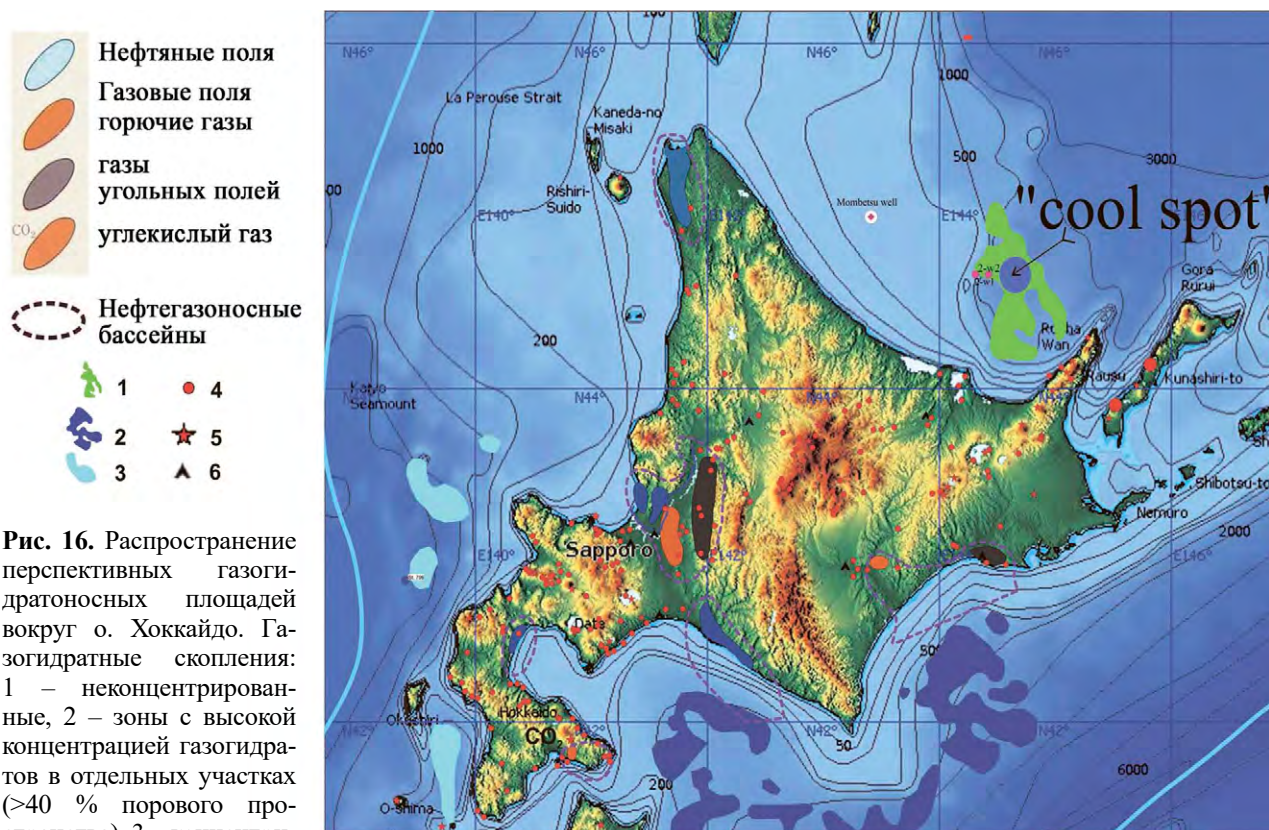


Рис. 16. Распространение перспективных газогидратоносных площадей вокруг о. Хоккайдо. Газогидратные скопления: 1 – неконцентрированные, 2 – зоны с высокой концентрацией газогидратов в отдельных участках (>40 % порового пространства), 3 – концентрирование не оценено; 4 – термальные источники; 5 – вулканы четвертичного возраста; 6 – города. «Cool spot» – низкотемпературная аномалия на поверхности воды, предположительно связанная с газовым потоком со дна.

Газогидраты Южно-Татарского прогиба

В северной части Японского моря газогидраты обнаружены в пределах юго-западного склона о. Сахалин в зонах разных сейсмических аномалий, которые закартированы методом непрерывного сейсмопрофилирования [Operation Report... , 2013, 2014, 2015].

Впервые газогидраты в северной части Японского моря (Татарский пролив) были открыты в рейсе 59 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2012 г. на юго-западном верхнем склоне о. Сахалин. В 2013–2015 гг. район распространения газогидратов был расширен (рис. 18, 19). Газовые «факелы» располагались на глубинах моря главным образом в интервале 100–300 м, единичные обнаруживались до глубины 600 м. Газогидраты представлены, как правило, тонкими линзами и прослоями, а также изометричными включениями. Как было установлено в других районах Мирового океана, оползневые и турбидитные осадочные толщи, распространенные в Южно-Татарском осадочном бассейне, часто являются коллекторами газогидратов. Этому также благоприятствуют текстурные особенности осадочных толщ, сформированных при таких процессах (повышенная пористость и проницаемость, особенности гидрохимического режима).

Газогидратоносные осадки в северной части Японского моря (Татарский пролив) представляли слой мощностью до 1 м, причем газогидраты сформированы термогенным метаном со средним изотопным составом углерода около –43 ‰. Источником термогенного метана, вероятно, являются газо- и угленосные толщи с вкладом газов подстилающих отложений [Шакиров и др., 2016].

Опробование выполнялось по результатам гидроакустической и геофизической съемки на участках обнаружения газовых факелов. В 2012–2017 гг. было взято более 50 колонок осадков длиной до 550 см. Большая часть колонок поднята в пределах площади газовых эманаций, оконтуренной по результатам гидроакустической съемки на западном склоне о. Сахалин.

Практически все колонки осадков отличала высокая степень газонасыщения, они содержали большое количество карбонатных конкреций, были разбиты многочисленными

трещинами, обусловленными выходом газа из осадка. Газовые гидраты в основном обнаруживались в виде небольших фрагментов смерзшегося осадка.

Важен факт обнаружения в 2015 г. участка на глубине 600 м рядом с единичным факелом (станция LV70-15HC), где был поднят керн осадка, наполненный газогидратами по всей длине (5 м). При разложении газогидрата во время опробования весь осадок превратился в пузырящуюся пульпу (рис. 20), газогидратоносный осадок воспламенялся при поджигании.

При детальном обследовании газогидратоносной площади в 2013–2015 гг. [Operation Report... , 2013, 2014, 2015] во вмещающих осадках были обнаружены углеводородные газы вплоть до гексана (!). В приповерхностных условиях данный углеводород является жидкостью, и его наличие в керне уверенно указывает на приток термогенных углеводородных газов из подстилающих отложений.

В Татарском проливе в поверхностном слое осадка вне газогидратоносных участков наблюдались низкие, близкие к фоновым концентрации метана (рис. 21). Максимальные

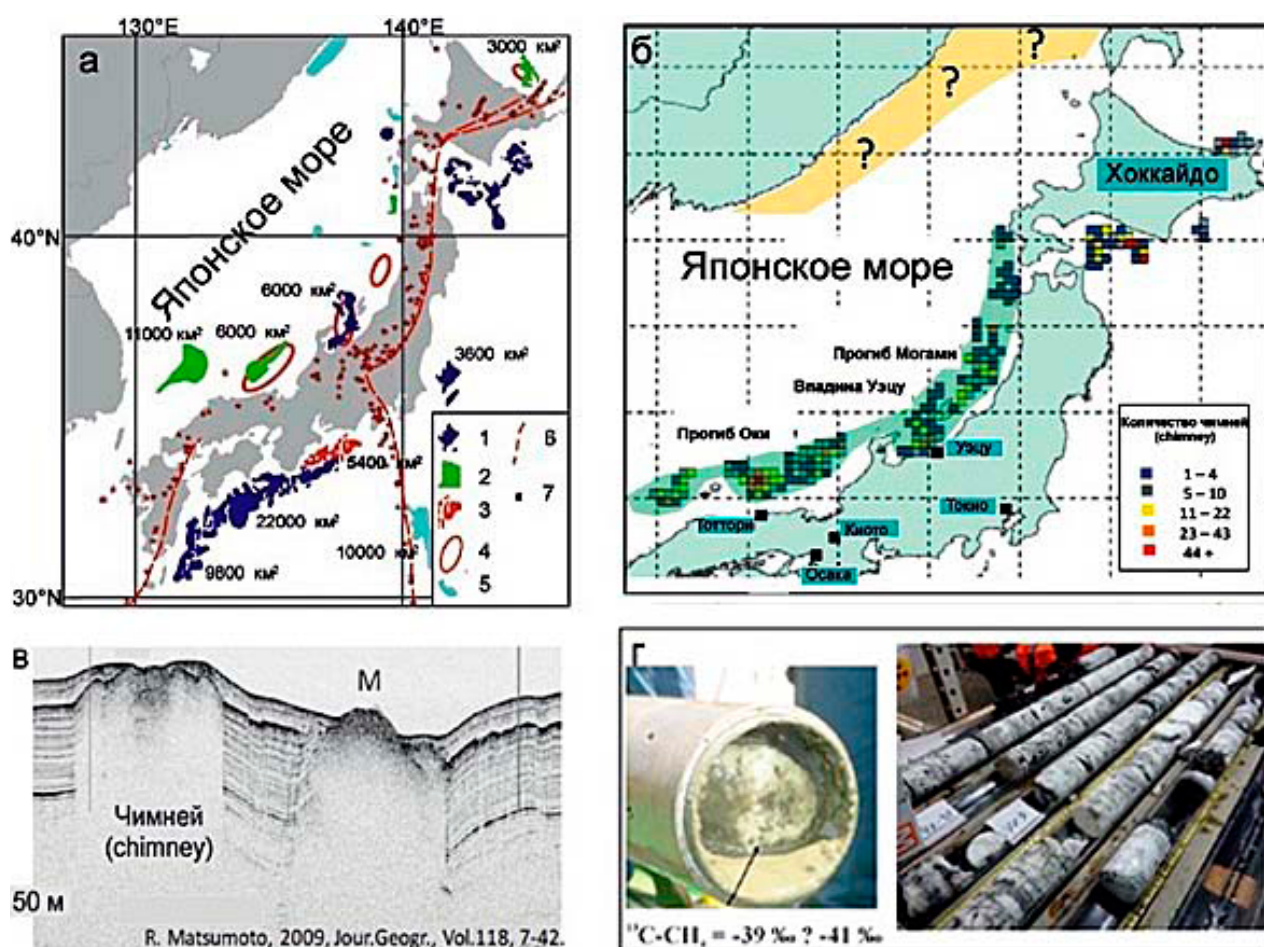


Рис. 17. Распространение газогидратоносных районов в Японском море и вокруг Японского архипелага. (а) – расположение газогидратоносных районов Япономорского региона, за исключением Татарского пролива: 1 – с высокой степенью концентрирования газогидратов, 2 – со средней степенью концентрирования ГГ, 3 – с полупромышленной разработкой ГГ, 4 – с приповерхностными преимущественно массивными ГГ, 5 – с литологическими, геохимическими и геофизическими признаками наличия ГГ, 6 – вулканический фронт, 7 – четвертичные вулканы; (б) – карта распространения газоносных структур «чимней» вдоль островов Хонсю и Хоккайдо [Matsumoto et al., 2017], светло-коричневым полигоном и знаком вопроса выделен перспективный район вдоль континентального склона Приморья по результатам архивных сейсморазрезов и экспедиций ТОИ ДВО РАН 2017–2018 гг. (рейс 54 НИС «Академик Опарин» и рейс 81 НИС «Академик М.А. Лаврентьев»); (в) – пример структур типа «чимней» на временном разрезе высокоразрешающего сеймопрофилирования во впадине Уэцу. М – mound (холм) [Matsumoto et al., 2009]; (г) – массивные газогидраты из впадины Уэцу, полученные бурением [Matsumoto et al., 2017]. Изотопный состав углерода метана газогидратов указывает на его термогенный генезис ($^{13}\text{C}-\text{CH}_4 = -39 \dots -41 \text{‰ PDB}$).

величины аномальных концентраций проявлялись на глубинах 125 см и ниже. При этом только редкие участки (LV62-30GC) можно считать полностью фоновыми. На остальных станциях аномально высокий уровень метана фиксировался на разных глубинах залегания осадка. Газогидраты здесь обнаружены в слоях 240 и 160 см ниже дна (LV62-17HC и LV62-26HC), причем газонасыщенные слои в колон-

ках начинались со 125 и 160 см соответственно (рис. 21). Станция LV62-24HC имеет максимум метана на такой же глубине ниже дна, как и станция с гидратами метана LV62-17HC.

В кернах, поднятых за пределами факелов и газогидратов, обнаруживалось газогеохимическое поле с невысокими концентрациями метана, но при этом часто фиксировались этан и пропан. На многих участках были обнаружены аномалии водорода, что указывает на другие признаки активного газогеохимического режима Южно-Татарского прогиба. Этан, как индикатор подтока термогенного углеводородного газа нефтегазовых залежей, обнаружен в гидратоносных осадках и распределяется по осадочным колонкам неравномерно. В Южно-Татарском прогибе аномальные концентрации этана обнаруживались в донных осадках до аномальных значений 1190 нл/дм³, при этом фиксировалась аномальная концентрация метана 113 мл/дм³ (станция LV62-24HC). Так как потоки чисто-

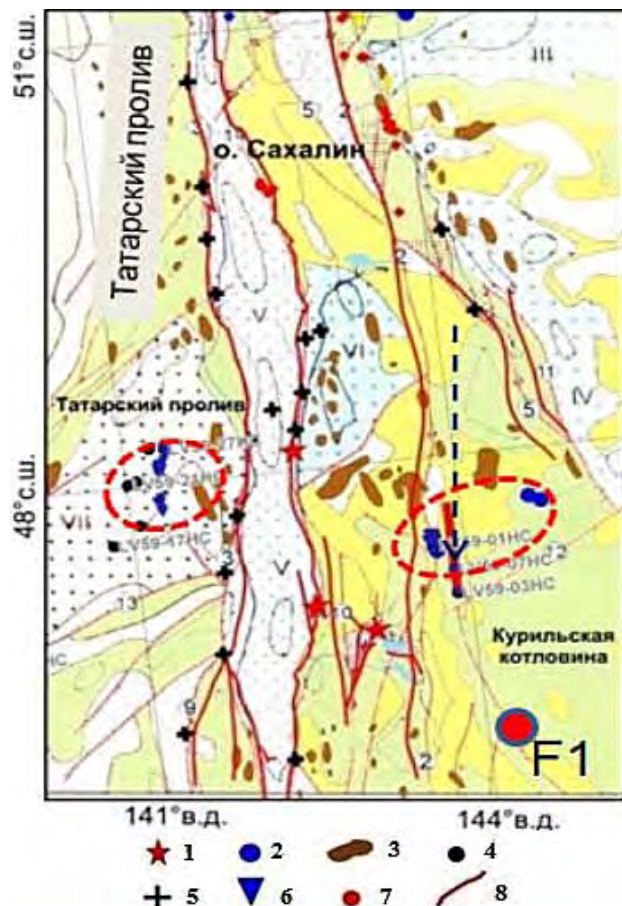


Рис. 18. Карта газогидратоносных районов в Татарском проливе и Курильской котловине (показаны красным пунктиром) по материалам рейсов НИС в 2012–2015 гг. на основе карты по [Харахинов, 2010].

1 – грязевые вулканы, 2 – газовые факелы прежних лет (данные предоставлены к.ф.м.н. А.С. Саломатиным, ТОИ ДВО РАН), 3 – локальные структуры, 4 – станции опробования, 5 – палеовулканические центры, 6 – газовые факелы 2012 г., 7 – просачивания нефти, 8 – тектонические разломы. Цифры в кружках – разломы [Харахинов, 2010]: 1 – Срединно-Сахалинский, 2 – Хоккайдо-Сахалинский, 3 – Западно-Сахалинский, 4 – Восточно-Сахалинский, 5 – Первомайский, 9 – Монеронский, 10 – Сусунайский, 11 – Богатинский, 12 – Академический, 13 – Слепиковский, 14 – Центрально-Сахалинский. III – Мынгинский прогиб, IV – Пограничный прогиб, V – Западно-Сахалинский прогиб; VI – Макаровский прогиб, VII – Северо-Япономорская глубоководная котловина.

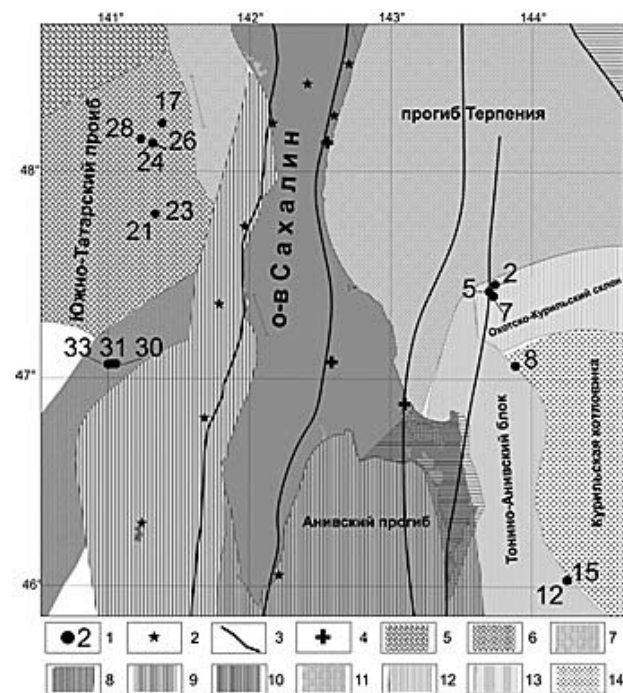


Рис. 19. Тектоническая карта района работ 2013 г. с расположением станций опробования донных осадков. 1 – станции опробования и их порядковый номер на карте, 2 – палеовулканы, 3 – разломные зоны, 4 – грязевые вулканы, 5 – Северо-Татарский прогиб, 6 – Южно-Татарский прогиб, 7 – складчато-надвиговый пояс, 8 – Северо-Монеронское поднятие, 9 – Прогиб Исикари, 10 – Анивский прогиб, 11 – прогиб зал. Терпения, 12 – Тонинно-Анивский блок, 13 – Охотско-Курильский склон, 14 – Курильская котловина.

го этана неизвестны (он и его гомологи являются спутниками нефтяных газов), приходим к выводу, что аномальные газогеохимические поля гидратоносных отложений Татарского пролива сформированы с участием преимущественно термогенных и, возможно, метаморфогенных газов [Шакиров и др., 2016].

Факт, что угольный метан может формировать газогидраты в осадочном разрезе, подтверждается обнаружением в 2008 г. китайскими исследователями углегазовых гидратов в высокогорье (4200 м над ур. м.) Тибета [Zhu et al., 2014]. Газовые гидраты были выявлены в области вечной мерзлоты в горах Квин-Лиань в среднеюрской угленосной формации. Они заполняли трещины и поровое пространство в песчаниках в объемах от 11.5 до 82 %. Тестовая добыча нагреванием и изменением давления позволила получить 95 м³ в течение 101 ч, при этом отрицательного влияния на окружающую

среду не было зафиксировано. Газогидраты также предполагаются в поздне триасовой формации Тумен Гела (Северный Тибет), которая является в этом районе наиболее важным источником газа (начальные ресурсы 34.3×10^8 т) [Fu et al., 2014]. Здесь же отмечено, что в центральной части бассейна Кианг-Танг недавно обнаружено большое количество грязевых вулканов, которые, возможно, являются спутниками газогидратов.

Газогидратоносная провинция Садо-Окусири

В северо-восточной части Японского моря газогидраты обнаружены на станции глубоководного бурения 796 в прибрежье о. Хоккайдо (Гинсбург, Соловьев, 1994). Станция расположена на восточном склоне южной части тектонического хребта Окусири, основание склона которого контролируется надвигом [Гинсбург, Соловьев, 1994].



Рис. 20. Фрагменты газогидратонасыщенного керна осадка из осевой зоны Южно-Татарского прогиба.

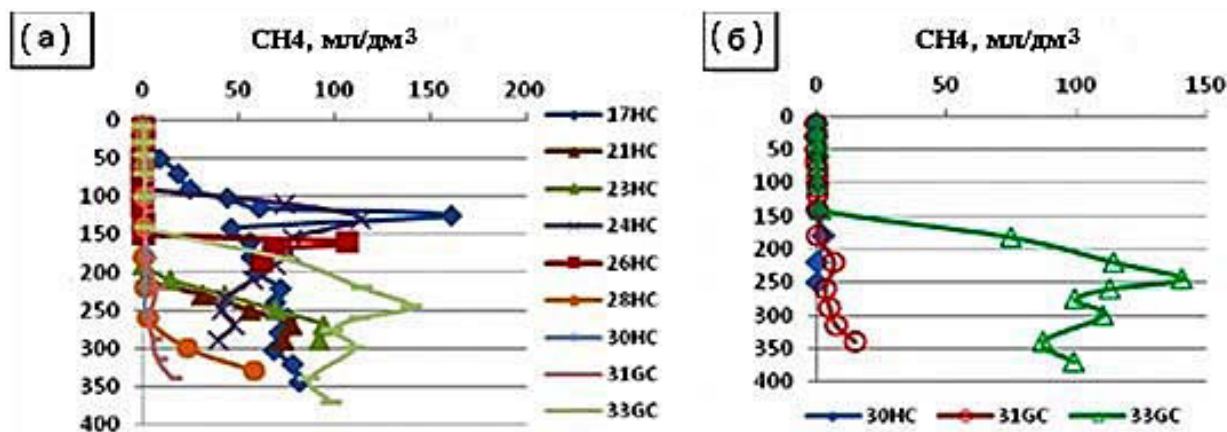


Рис. 21. Основные типы распределения метана в осадках Южно-Татарского прогиба: на шельфе и верхнем склоне (а) и на глубине более 1000 м (б). По оси ординат – глубина под дном (в см).

Гидраты подняты с горизонта 90 м под дном из песчаных отложений, и литологический контроль, вероятнее всего, является определяющим для этого скопления. Газ, полученный из гидратов, состоял на 30–37 % из метана. Это значение более чем в 2 раза ниже по сравнению с Охотоморскими газогидратами, однако нельзя исключить возможную потерю газа во время подъема образца из скважины.

Массивные тела газогидратов открыты у подножия о. Садо в 2004 г. [Matsumoto, Hiromatsu, 2011] в осадочном бассейне Уэцу, приуроченном к неоген-четвертичному прогибу. Осадочный бассейн Уэцу (нефтегазоносный) расположен в восточной части Японского моря и частично охватывает западную часть о. Хонсю. Центральную часть осадочного бассейна составляет впадина Ниигата. Здесь сосредоточено более 90 % запасов нефти и 70 % запасов газа Японии. Площадь бассейна – 75 тыс. км², из них 53 тыс. км² заняты акваторией. В тектоническом плане бассейн приурочен к кайнозойскому задуговому прогибу Японской островной дуги, осложненному системой горстов и грабен. Осадочный чехол сложен вулканогенно-осадочными комплексами неогенового возраста, в том числе газоносной формации «зеленых туфов» суммарной мощностью до 6 км. Нефтематеринскими являются глинистые сланцы и аргиллиты нижнего–среднего миоцена и верхнего миоцена – нижнего плиоцена. Отложения нижнего–среднего миоцена находятся на глубине 3.9–5.1 км с температурой +110–140 °С. Отложения верхнего миоцена – плиоцена залегают на глубинах 1.5–3.8 км с температурой 70–140 °С. В бассейне открыто 130 месторождений, заключающих около 20 млн т разведанных запасов нефти и 60 млрд м³ газа, в том числе 7 месторождений в акваториальной части бассейна [Арешев, 2003]. Для бассейна характерен высокий тепловой поток в осадочном бассейне и магматическая деятельность.

Газогидраты, открытые японскими учеными в 2004 г. у подножия склона о. Садо в бассейне Уэцу, стали началом открытия серии газогидратных скоплений вдоль всего западного подножия островов Хонсю и Хок-

кайдо и наряду с присахалинской провинцией являются на сегодняшний день самым значительным скоплением газогидратов в дальневосточных морях. Здесь обнаружены морфоструктуры 0.3–0.5 км в диаметре и 30–40 м глубиной (покмарки), содержащие газогидраты. Глубинным сейсмическим и придонным эхозондированием выявлены структуры газонасыщения – «газовые каналы», или «chimney», в количестве не менее 3000 вдоль восточной окраины Японского моря. В газогидратах бассейна Уэцу обнаружены микропримеси нефти и микрокристаллы доломита. Известно, что этот район подвергался рифтовым процессам в раннем миоцене и находился под влиянием компрессионного режима с позднего плиоцена [Proceedings... , 2000; Matsumoto, Hiromatsu, 2011]. Вдоль рифтов развиты сбросы и взбросы, а мощность осадочной толщи достигает 5000 м. В 2004 г. судно JOIDES Resolution провело бурение с электрокаротажем. Отбор керна производился на 16 участках, в основном в пределах районов обследования методом НСП. В 2003 г. проведены геотехнические изыскания глубокой разведочной скважины на нефть и газ в бассейне Уэцу (юго-запад о. Садо) на восточной окраине Японского моря. Тепловой поток здесь в целом высокий (80–110 мВт/м²), температурный градиент составляет примерно 10 °С/100 м. Интенсивные потоки метана были зарегистрированы вокруг локальных поднятий с газовыми «факелами». BSR найдена на 0.20–0.23 с (двойная скорость пробега) вне газонасыщенных зон [Matsumoto, Hiromatsu, 2011], в то время как в газовых каналах BSR обычно выделяется на 0.14–0.18 с. Эта аномалия, вероятно, указывает на накопление высокоскоростных газогидратоносных толщ. На газогидратоносном участке поднятия Умитака бассейна Уэцу [Freire et al., 2011] также установлен следующий важный факт: на линии ССВ простираения в пределах 13 км ¹³С-СН₄ изменяется от –47...–54 ‰ в центре участка газовых сипов над газогидратами до –67...–89 ‰ на расстоянии 2 км по удалении от участка на север и юг и достигает –99 ‰ на расстоянии 9 км от ближайшего «газогидратного» сипа. Газовые

сипы сосредоточены в перекрестии разломов в центре асимметричной антиклинали около 6 км вдоль длинной оси, разбитой сбросами и взбросами. Термогенный газ в центральной части антиклинали Умитака мигрирует из нефтегазоносных отложений по активным разломам. За счет «масс-балансного эффекта» микробный сигнал в верхних осадках нарушается в сторону утяжеления $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ [Шакиров, 2015]. Антиклиналь сложена в верхней части четвертичной формацией Хаизуме (поздний плейстоцен, глинистые толщи). BSR находится полностью в этой формации. Облегчение изотопного состава углерода метана при удалении по латерали от центров газовой разгрузки подтверждает существование влияния масс-балансного эффекта на полигенетический состав газогеохимических полей. Ниже формации Хаизуме залегает нефтегазоносная формация Нисияма, осложненная системой грабенов и горстов [Okui et al., 2008].

Метан мелководных газовых гидратов и фильтрационных потоков мигрирует из глубинных термогенных газов, что подтверждается изотопными отношениями углерода ($\delta^{13}\text{C}$ от -30 до -40 ‰ VPDB). Имеющееся несоответствие между молекулярными и изотопными отношениями указывает на эффективное молекулярное фракционирование при длительной миграции газа через глинистые отложения. Также установлен эффект «облегчения» изотопного состава углерода метана при достижения миграционного потока в зоне диагенеза, где за счет примеси микробных газов изотопный состав углерода метана становится легче на величину -20 ‰

(рис. 22). В результате изотопно-газогеохимических исследований в скважине METI-Sado 04 (2004) было доказано облегчение изотопного состава углерода гидратообразующего метана при миграции из глубинных горизонтов (2 км ниже поверхности дна, $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 -32$ ‰) за счет смешения с микробным газом [Matsumoto, Hiromatsu, 2011].

Смесь микробных и термогенных газов в поверхностных осадках имеет значение $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 -60$ ‰. Такой показатель изотопного смещения в зоне проницаемости при наличии интенсивного газового потока объясняется в первую очередь «масс-балансным эффектом» [Zeebe, Wolf-Gladrow, 2001] (рис. 23). На севере о. Сахалин в районе Дагинских геотермальных источников при миграции из нефтегазовых залежей углерод метана «облегчается» на 15 ‰ PDB.

Газогидратоносные хребты (Окусирри, Садо) тектонического происхождения были сформированы в результате движений по крутопадающим разломам и надвигам

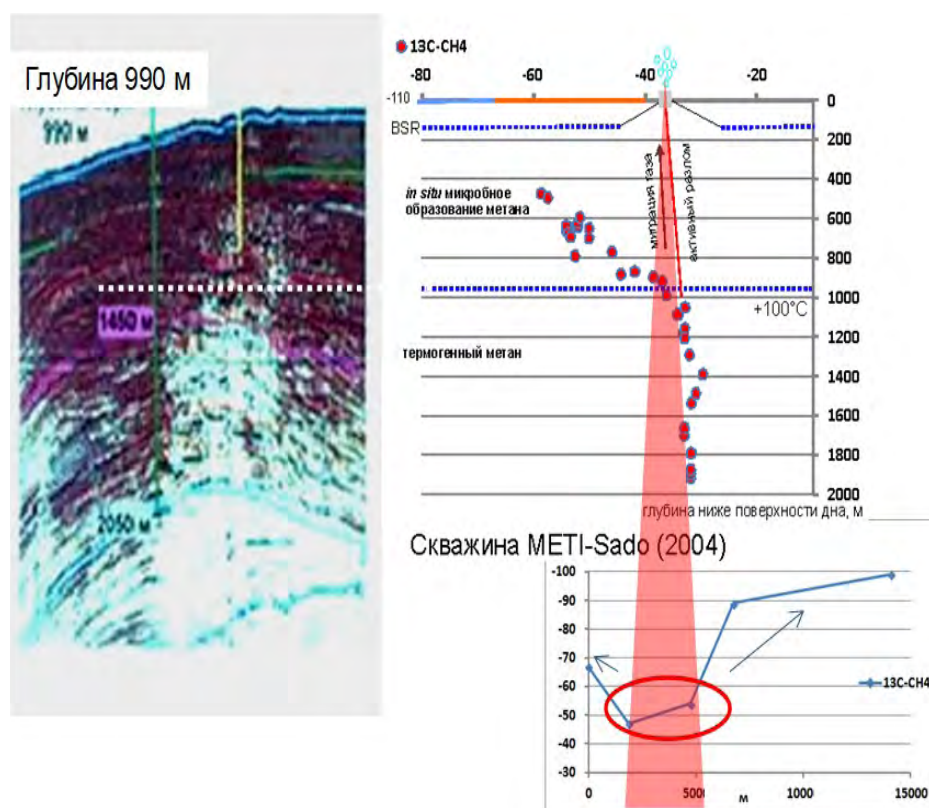


Рис. 22. Изменение изотопного состава углерода метана при миграции к поверхности дна в скважине (2060 м) в бассейне Уэцу [Matsumoto, Hiromatsu, 2011]. Красный треугольник показывает соответствие наиболее тяжелого изотопного состава углерода метана центру газового выхода по отношению к его периферии (диаграмма в нижнем правом углу).

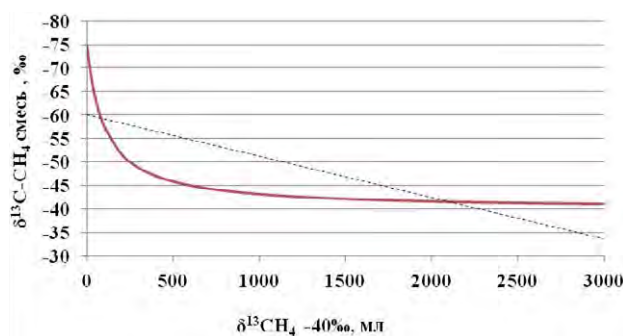


Рис. 23. Изотопный эффект смешения микробного и термогенного газа на основе масс-балансного расчета (Р.Б. Шакиров). Подтверждено независимыми расчетами в ДВГИ ДВО РАН (Т.А. Веливетская) и в Технологическом институте Китами, Япония (А. Хачикубо) (служебная переписка). При постоянном объеме микробного метана (100 мл, -75 ‰) добавляется термогенный метан (-40 ‰).

в конце плиоцена. Их фундамент сложен нижнемиоценовыми базальтами и андезитовыми туфами. Поднятие Окусири представляет собой эшелон хребтов, перекрытых осадочным чехлом позднемиоцен-плиоценового возраста. Хребты пространственно связаны с крупными депрессиями в акустическом фундаменте (трог Могами и др.), мощность осадочного чехла в которых может превышать 1.5 км. Примечательно, что в структурах обоих газогидратоносных районов была обнаружена баритовая минерализация [Астахова, 2007]. Пояс обнаружения баритовых конкреций Садо–Окусири также характеризуется переслаиванием пирокластического материала с углями, песчаниками и алевроитами (ранний миоцен). Газогидраты восточной части Японского моря тяготеют к областям развития смешанных комплексов пород [Леликов, Емельянова, 2002], которые, видимо, за счет хорошей пористости являются благоприятной средой для кристаллизации газогидратов. Миоценовые отложения обоих хребтов и северной части возвышенности Ямато относят к формации «зеленых туфов». К этой формации приурочены гидротермальные системы на Японской островной дуге, а также скопления метана магматогенного генезиса [Wakita et al., 1990].

Предполагаемые скопления газогидратов в северо-восточной части Японского моря оконтурены в основном по результатам сейсмопрофилирования (по обнаружению BSR),

а также отрицательным аномалиям хлорности поровой воды осадков и данным теплового потока (например, в южной части хребта Окусири данные теплового потока достигают значений 156 мВт/м^2) [Родников и др., 2014].

Цусимский газогидратоносный район

Газогидраты здесь были открыты (2007 г.) с использованием поршневого трубчатого пробоотборника научной организацией KIGAM. Затем ими было проведено бурение в Цусимской котловине (UBGH) в рамках Корейской национальной программы по исследованию газогидратов. Расположение скважин представлено на рис. 24. В ноябре 2007 г. в Цусимской котловине в экспедиции (UBGH1) в ходе бурения специальными устройствами были подняты массивные образцы (рис. 24г). Газогидраты были успешно извлечены на трех глубоководных участках (UBGH1-4, UBGH1-9 и UBGH1-10). На станции UBGH1-4 с координатами 36.268° N , 130.906° E (глубина моря 1841 м) зона стабильности газовых гидратов была перебурена (196 м ниже дна). Газовые гидраты представляли собой тонкие крупнозернистые слои отложений в интервале 185–196 м. На станции UBGH1-9 (36.714° N , 130.900° E , глубина моря 2099 м) был поднят длинный керн, который показал разнообразную насыщенность газовыми гидратами на большой глубине. Граница зоны стабильности газогидратов здесь находилась на 182 м ниже дна. Газовые гидраты на станции UBGH1-9 располагались в илистых и(или) песчаных слоях в интервале 63–151 м. На станции UBGH1-10 (36.6355° N , 130.900° E , глубина моря 2077 м) зона стабильности газогидратов зафиксирована на горизонте 163 м ниже дна. Газовые гидраты найдены в интервале 0–141 м ниже морского дна в песчаных отложениях с прослоями вулканического пепла. Газогидратоносный участок UBGH2-9 находится на глубине моря 2102 м, где обнаружены сейсмические аномалии типа «мутная толща», подошва которой уходит ниже регионального BSR [Kang et al., 2009].

Методы глубоководного бурения показали, что газогидратные слои располагаются на различных горизонтах в илистых, песчаных

и пепловых отложениях. Глубина залегания гидратов значительно варьирует на станциях UBGN1-4, UBGN1-9, UBGN1-10: 185–196 м ниже дна, 63–151 м, 0–141 м ниже дна на глубинах моря 1841, 2099 и 2077 м соответственно. Таким образом, в этом районе установлено наличие стратифицированного (многоярусного) проявления газогидратов с реликтовыми образованиями. Состав углеводородных газов $C_1/C_2 + > 1000$ и изотопные метки $^{13}C-CH_4$ –65 ‰ и $\delta D-CH_4$ –171 ‰ указывают на микробное и термогенное происхождение газов. В то же время в осадочных отложениях (турбидиты) котловины установлено наличие термогенных газов, поднимающихся из глубоких горизонтов и насыщающих турбидитные отложения [Lee, Chough, 2003]. По-видимому,

здесь также имеет место процесс смешивания термогенных газов с микробными [Jeong et al., 2010]. При этом нельзя исключать вклад угольных газов, поскольку прослои углей обнаружены в нижних горизонтах осадков котловины. Глубоководные части Цусимской котловины характеризуются значительным числом сейсмических аномалий типа «мутная толща» шириной до 2 км, которые часто достигают морского дна [Ryu B.-J. et al., 2013].

Перспективный газогидратоносный район Приморского континентального склона

Литологическими и газогеохимическими исследованиями на склоне зал. Посьета (континентальный склон зал. Петра Великого,

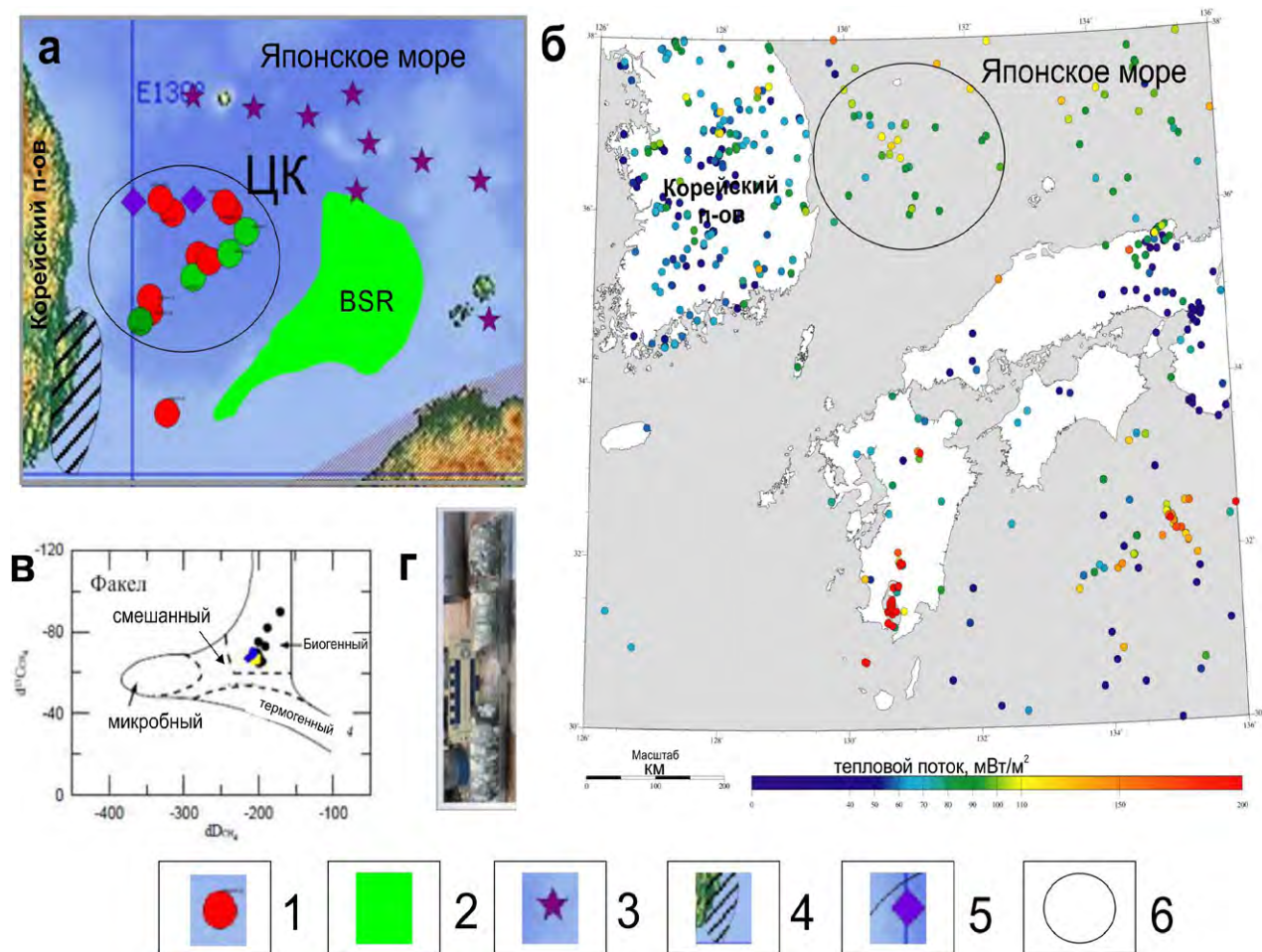


Рис. 24. Расположение скважин и пикетов отбора газогидратов поршневым пробоотборником в Цусимской котловине (осадочный бассейн Уллындо) [Ryu B.-J. et al., 2013; Chun et al., 2011]. а – схема расположения станций (красные кружки – трубка; зеленые – бурение); б – карта распределения теплового потока; в – газогенетическая диаграмма вмещающих осадков; г – фрагмент керна (бурение) с газогидратами. 1 – станции отбора осадка трубкой, 2 – район распространения BSR в пределах исключительной экономической зоны Японии, 3 – вулканы, 4 – угольный бассейн [Аблаев и др., 2002], 5 – контрольные станции, 6 – район исследований газогидратов в Цусимской котловине (ЦК).

Японское море) (рис. 25) впервые установлены два важнейших факта:

1) наличие на континентальном склоне Приморья прямых условий для формирования газогидратов – газогеохимических (13 об. % метана по методу термовакuumной дегазации (д.г.-м.н. А.И. Гресов, к.г.-м.н. А.В. Яцук) и 4 % равновесным методом, headspace на борту судна), литологических (песчанистый осадок) и термобарических (на глубинах 400–1500 м);

2) наличие уникальной аутигенной карбонатной минерализации в зоне газовой эмиссии на склоне с плотностью нахождения конкреций 3 шт. на одном горизонте в керне осадка малого диаметра (90 мм). Эти результаты были получены в комплексной геолого-геофизической экспедиции на НИС «Академик Опарин» (рейс № 54, 21.09 – 31.10.2017 г., руководитель рейса к.г.-м.н. М.Г. Валитов). В ходе выполнения профиля, пересекающего вкрест континентальный склон и состоящего из 5 станций, было впервые открыто аномальное поле метана в осадках в интервале глубин 200–1500 м.

В керне станции ОР54-71 (глубина моря 380 м) были обнаружены три конкреции слож-

ного состава (глендонит–ватерит–икаит) [Шакиров, 2018]. В настоящее время ведется комплексное исследование этих конкреций. Они являются индикаторами метановых сипов и, вероятно, газогидратов.

Необходимо отметить, что перспективный газогидратоносный район был обнаружен также в северной части континентального склона Приморья в районе северного замыкания Центральной котловины в экспедиции ТОИ ДВО РАН (рейс 81 НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2018 г.). Сведения об этом районе будут опубликованы после интерпретации материалов.

Газогидратоносная провинция Филиппинского моря

Крупная газогидратоносная провинция располагается на аккреционной осадочной призме о. Хонсю. Поиски газогидратов вокруг Японских островов начаты в 1995 г. с тихоокеанской стороны в трогее Нанкай. В 1997 г. две скважины (ВН-1 и ВН-2) были пробурены в 50 км к югу от устья р. Тенрю Токайского района (восточный склон о. Хонсю). Затем глубокая разведочная скважина была пробурена примерно до глубины 2300 м через слой газогидратов на глубине ниже поверхности дна около 270 м [Proceedings..., 2000; Matsumoto, Hiromatsu, 2011]. В комбинированных скважинах (ВН-1, ВН-2 и МВТП) идентифицированы 3 зоны накопления газовых гидратов в преимущественно песчаных отложениях в интервале 200–270 м ниже поверхности дна. В этом районе гидраты в основном представлены рассеянной формой, цементирующей отложения. Температура вещества газогидратоносных интервалов была на 4–6 °С ниже вмещающих осадков, при этом были обнаружены

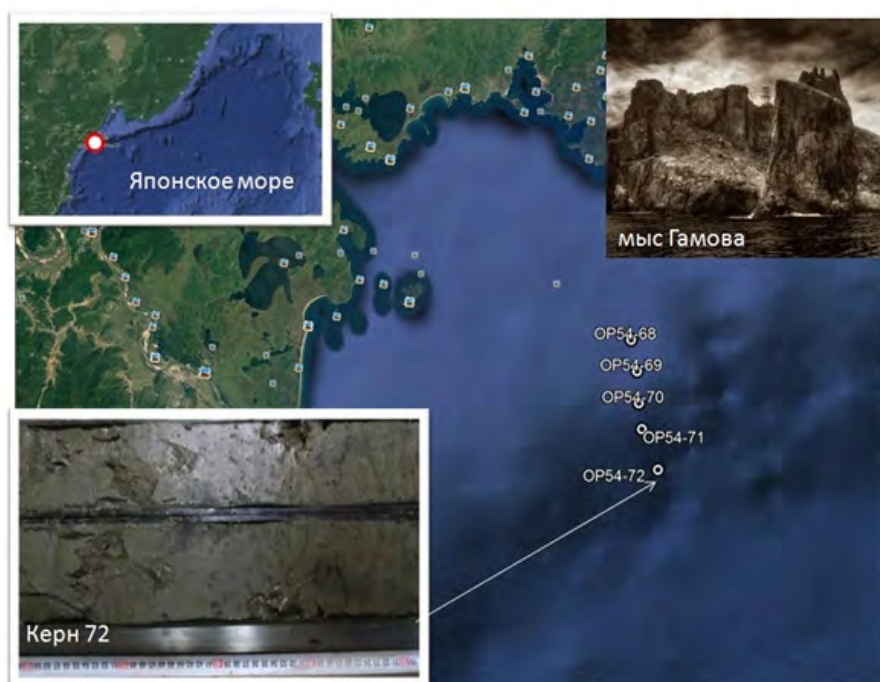


Рис. 25. Карта станций отбора осадка в районе мыса Гамова. На врезках показаны: положение района работ в Японском море (красный кружок), мыс Гамова и фрагмент глубоководного керна ОР54-72. Рейс 54 НИС «Академик Опарин», ТОИ ДВО РАН, 2017 г. Оператор лебедки и П-рамы к.г.-м.н. К.И. Аксентов.

отрицательные аномалии хлорности 517 мМ на глубине BSR 420 м. Взбросы, как часто наблюдалось и для других районов (например, западного борта впадины Дерюгина), обеспечивают подток метана из нижележащих толщ в верхние слои осадков (Нанкайский трог) и эмиссию метана из диссоциированных газогидратов при погружении осадков в новую зону гидратообразования [Proceedings... , 2000].

Ресурсы метана в Нанкайском трог эквивалентны объему внутренних потребностей Японии в природном газе на 14 лет [Tanahashi, 2011], ведется испытательная полупромышленная добыча метана. Добыча метана из этого газогидратного скопления на сегодняшний день нерентабельна. Рассеянный в песчаных отложениях газогидратный цемент, в отличие от массивных тел, является сложным объектом для разработки. Общие ресурсы метана в газогидратных скоплениях вокруг Японских островов оцениваются в 10^{12} – 10^{13} м³ [Tanahashi, 2011].

Газогидратоносная провинция о. Тайвань

В некоторых районах юго-западного склона о. Тайвань газогидраты не были удостоверены прямыми методами, но гидратоносная толща прогнозируется по результатам сейсмического профилирования, термобарическим и геохимическим признакам [Chuang et al., 2010]. Согласно этим параметрам, общая площадь поля стабильности газогидратов южнее о. Тайвань (интервал ниже поверхности дна 300–600 м) ассоциируется с тремя толщами осадков Q1–Q2–Q3 общим объемом 18 062 м³ [Chi et al., 2006]. Дополнительно в указанной работе был оценен объем порового пространства в осадках зоны стабильности газогидратов в 8308 км³ на всей площади

BSR. Впервые образцы газогидратов на юго-западной акватории Тайваня удалось поднять только в июне 2018 г. в совместной тайваньско-французской экспедиции на судне Marion Dufresne при глубине моря 1200 м.

Газогидратоносная провинция Восточно-Китайского моря

Восточно-Китайское море мало изучено в отношении газогидратов и не так перспективно, как другие моря западной части Тихого океана. Но примечательно, что именно в этом море были обнаружены гидраты углекислого газа в трог Окинава на участке «низкотемпературного» черного курильщика. Пузыри газов поднимаются с гидротермального поля JADE (глубина моря 1335–1550 м) [Sakai et al., 1990] (рис. 26). Генезис газовых компонентов в этом районе определен как глубинный, а углекислый газ как неорганический [Jianming et al., 2003], из гидротермальных источников, имеющих температуру не ниже 320 °С. Это характеризует важный геоэкологический аспект: гидраты углекислого газа при разложении будут выделять накопленный углекислый газ. Газовый флюид в этом районе содержит 86 % CO₂, 3 % H₂S, 11 % (CH₄ + H₂) (табл. 3).

Открытие гидратов углекислого газа в присутствии глубинных флюидов является важным фактом: разгрузка гидротермальных флюидов в зонах проницаемости Дальневосточного региона проявляется скоплениями глубинных газов в виде газогидратов. Напомним, что газогидраты Припарамуширского источника (Курильская котловина, Охотское море) также содержат повышенные содержания углекислого газа.

Гидраты метана предполагаются также, по данным сейсмических методов, на скло-

Таблица 3. Химический и изотопный состав газогидратоносного гидротермального поля JADE, трог Окинава (по [Sakai et al., 1990]).

Проба	CO ₂ , об. %	H ₂ S, об. %	CH ₄ +H ₂ , об. %	δ ¹³ C-CO ₂ , pdb	δ ¹³ C-CH ₄ , pdb	δ ¹³ C- ³⁴ S	³ He/ ⁴ He
424-M	86 ± 5	3	11 ± 1	-5.0	-36	+8.0	6.6
424-RV4	92 ± 1	4.4	4 ± 1	-4.8	—	+7.2	5.8
Черный курильщик	91.1 ± 1	5.5	3.5	-4.8	-40	+7.3	6.51
Среднее	89.66	4.3	6.17	-4.87	-38	+7.5	6.3

не о. Кюсю [Tanahashi, 2011]. В работе [Sun et al., 2015] установлена связь обогащенных железом аутигенных карбонатов с холодными сипами, которые связаны с диссоциируемыми газогидратами в северной части трога Окинава. Газогидратоносный район на южном склоне о. Тайвань географически лежит в самой северной части недостаточно изученного во многих аспектах Южно-Китайского моря.

Газогидратоносная провинция Южно-Китайского моря

В Южно-Китайском море газогидраты вскрыты бурением в северной части акватории [Wu et al., 2011a] в осадках осадочного бассейна аванделъты р. Жемчужная (рис. 27). Китай в настоящее время выходит в мировые лидеры по исследованию газогидратных ресурсов. Этому способствует целевая научно-

экономическая политика правительства КНР, которое в настоящее время разработало долгосрочную трехэтапную программу освоения газогидратов вплоть до 2050 г. [Xiang, 2010]. В этой же программе предусматривается выход Китая на добычу 100 млн т/год усл. т. на акватории Восточно-Китайского моря и Южно-Китайского моря (ЮКМ).

На сегодняшний день Геологическая служба Министерства земель и ресурсов КНР провела 40 экспедиций по исследованию газогидратов в Южно-Китайском море [Geology... , 2014]. В целом выполнено более 455 800 км высокоразрешающей многоканальной сейсмоки, 36 800 км многолучевой эхолотной съемки, 7100 км придонного профилирования, 1480 пикетов отбора осадков и 222 измерения теплового потока. Кроме того, в 2004 г. проведен рейс немецкого НИС Sonne-177, на-

правленный на изучение распространения газогидратов и их влияния на окружающую среду ЮКМ. Китай систематизировал методики, основанные на комплексировании высокоразрешающего сеймопрофилирования, подводной микрогеоморфологии, теплового потока, отбор поровых вод *in situ* и других методов. В 2013 г. Морская геологическая служба Гуанчжоу в составе 5 НИИ впервые провела три экспедиции по бурению к востоку от устья р. Жемчужная на глубинах 600–1100 м. Пробурено 10 скважин на разных участках с использованием каротажа по температуре и сопротивлению. Аномальные характеристики по этим методам позволили выбрать 4 участка для бурения на газогидраты. На следующем этапе было пробурено 10 скважин на этих участках и подняты многочисленные образцы гидратов метана разных морфологических типов. Наиболее значительным достижением является обнаружение много-

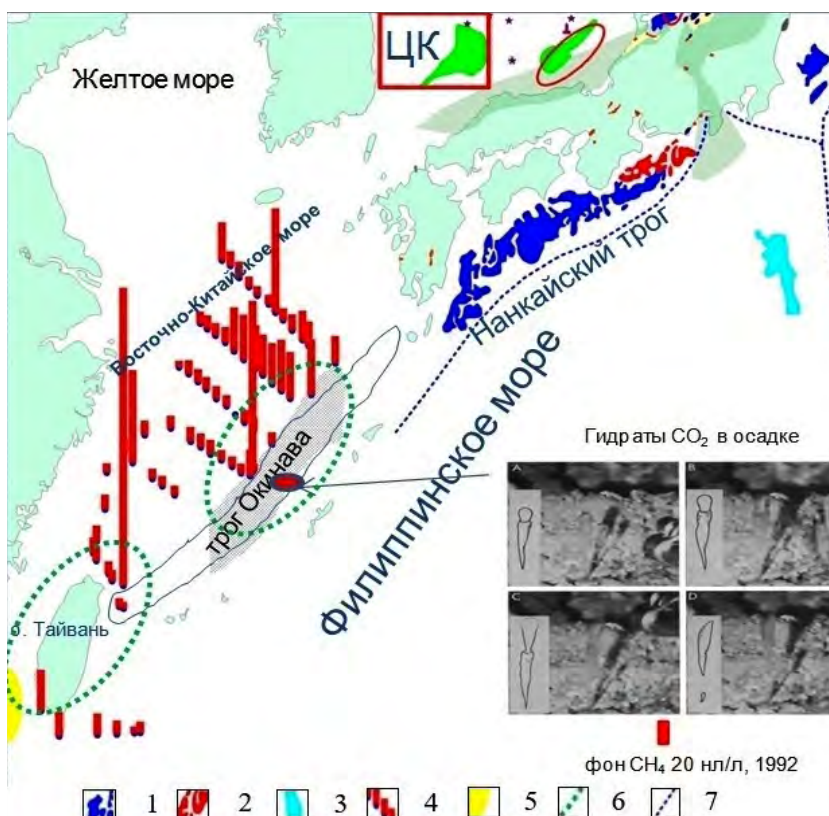


Рис. 26. Местоположение и фотографии вертикальных трубок (длина около 10 см) гидратов углекислого газа в трое Окинава. Глубина 1333 м [Sakai et al., 1990].

1–3 – газогидратные скопления с высоким типом концентрирования (1), средним типом (2) и неустановленным типом концентрирования (3); 4 – средне- и высокоинтенсивные аномальные поля метана в придонном слое толщ воды; 5 – перспективная газогидратоносная площадь на склоне о. Тайвань; 6 – районы с аномальными газогеохимическими полями максимальной (для данной акватории) интенсивности; 7 – границы литосферных плит. Красный овал – район активных современных исследований газогидратов. ЦК – Цусимская котловина

ярусной гидратоносной толщи. Как и в Японском море, здесь найдены реликтовые скопления газогидратов. Газогидраты подтверждены в интервале 170–230 м ниже поверхности дна [Wu et al., 2011a]. Изотопный состав углерода метана газогидратов находится в диапазоне $-74.3...-46.2$ ‰ PDB (18 проб), большая часть газа имеет термогенный генезис ($>50\%$) с примесью микробной компоненты [Wu et al., 2011b]. Также были подняты газогидраты с интервалов 9, 23, 58, 63, 74, 77, 98, 120 м ниже поверхности дна [Wang et al., 2016]. Для оценки распространения газогидратов на 1/3 площади обнаружения BSR в ЮКМ, были подсчитаны объемы метана в структурах I, II и Н соответственно: 1.38×10^{14} м³, 1.41×10^{14} и 1.7×10^{14} м³ при стандартных температурах и давлении [Trung, 2012].

Самое «северное» скопление газогидратов в ЮКМ, как указывалось выше, было обнаружено на юго-западной акватории Тайваня 21 июня 2018 г. в ходе выполнения совместной тайваньско-французской экспедиции на судне Marion Dufresne при глубине моря 1200 м (<https://www.energytrend.com/>

news/20180704 - 12368.html). К этому успеху тайваньские ученые шли более 15 лет.

Газогидратоносность юго-западной части Тихого океана

В глубоководных районах Юго-Восточной Азии установлено не менее 27 потенциально газогидратоносных крупных бассейнов в межостровных морях [Wilde, Quinby-Hunt, 1997]. Глубины погружения этих структур варьируют от 400 (море Сулу) до 3130 м (прогиб Талауд, бассейн Банда) и в среднем составляют 2300 м. Глубина моря в этих бассейнах изменяется от 1590 м (бассейн Бали) до 10 500 м (желоб Минданао), в среднем составляя 4550 м. На бортах перечисленных и подобных глубоководных структур могут содержаться скопления газогидратов на участках с проявлениями потоков метана. В море Сулавеси газогидратные скопления прогнозируются по геофизическим аномалиям, но нуждаются в верификации прямыми методами. На сопредельной суше здесь развиты угленосные отложения, которые могут быть также источниками газогидратного метана.

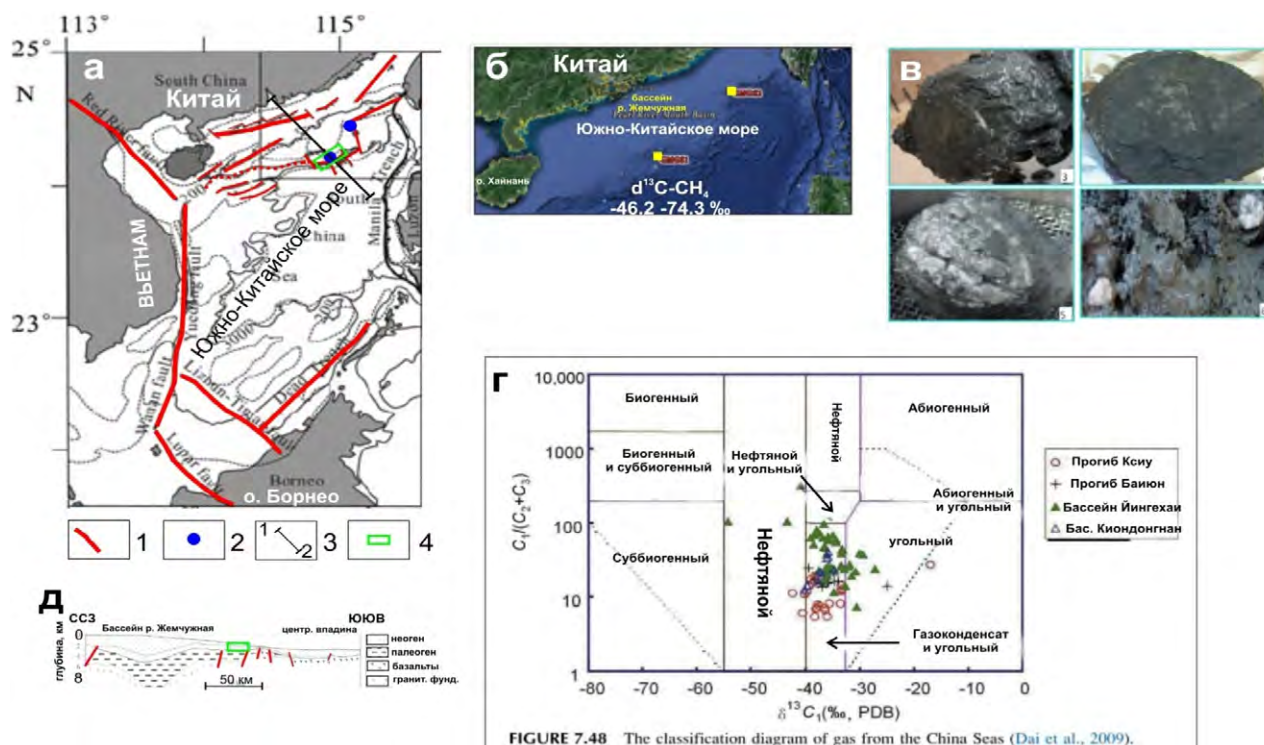


Рис. 27. Карта положения газогидратоносных участков Южно-Китайского моря (а, б); образцы газогидратов (в), поднятых с интервала 200 м ниже поверхности дна в авандельтовых отложениях р. Жемчужная; газогенетическая диаграмма УВГ ЮКМ [Yan et al., 2006; Dai et al., 2009; Dai et al., 2014; Wu et al., 2011b; Geology... , 2014] (г); геологический разрез через бассейн р. Жемчужная (д). 1 – главные разломы; 2 – газогидраты, установленные прямыми методами; 3 – положение профиля 1–2; 4 – газогидратоносная площадь в осадочном бассейне дельты р. Жемчужная.

Самое южное скопление газогидратов в западной окраине Тихого океана обнаружено на склоне Новой Зеландии в бассейне Хикуранги. Гидратоносными являются песчаные отложения [Pecher, Formann, 2011], так же как в Нанкайском трог и многих других районах. За счет своей пористости отложения с песчаным гранулометрическим составом служат наиболее распространенным газогидратным коллектором. Газоносными каналами выступают разломы в виде сдвигов и взбросов. В этом районе также закартирован BSR и выходы углеводородных газов на дне.

Заключение

В осадках окраинных морей Восточной Азии существует многоярусная (стратифицированная) газогидратоносность: придонные газогидраты в интервале 0–10 м ниже поверхности дна (впадина Дерюгина, западный борт Курильской котловины, Южно-Татарский прогиб, Голыгинский прогиб, бассейн Уэцу), в интервале 90–100 м (Японское море, хребет Окусири, Цусимская котловина), 10–120 м, 170–230 м и, предположительно, 250–500 м ниже поверхности дна (север Южно-Китайского моря), 610 м (Берингово море); выделена перспективность интервала 1500–2000 м (Нанкайский трог). Вертикальная зональность проявлений газогидратов в осадочном чехле – важнейший факт и доказательство существования реликтовых газогидратов вниз по разрезу. Количество таких фактов увеличивается с каждым годом. Следовательно, с учетом ресурсной емкости этого полезного ископаемого, его связей с аутигенной минерализацией и других факторов возрастает роль газогидратов как потенциального ресурса, участника цикла углерода, палеоклиматических явлений и процессов седиментации.

Гидратообразующий метан в целом представлен смесью термогенной, метаморфогенной и микробной компонент с изотопным составом углерода метана –30...–75 ‰ PDB, при этом в ряде районов может быть значителен вклад угольного вещества. Крупные угольные бассейны Тихого океана располагаются в недрах шельфа Японского моря, Китая, о. Тайвань, юго-восточной Австралии и других. Перечисленные районы характеризуются или доказанной газогидратонос-

ностью, или являются перспективными для поисков газогидратов.

Вмещающие газогидраты осадки часто содержат гомологи метана ряда этан–гексан. Генезисная и пространственная связь газогидратов с нефтегазоносными и угленосными районами Тихоокеанского подвижного пояса позволяет выделить их в отдельный вид каустобиолитов. Наиболее благоприятные районы для образования газогидратов – это проницаемые зоны, особенно в узлах сопряжения активных дизъюнктивов, составляющих структурный план глубинных разломов. Реликтовые газогидраты, находящиеся в нижних горизонтах изучаемого разреза (на сегодняшний день до 2000 м ниже дна), контролируются неотектоническими разломными системами, часто типа «тюльпан».

Высококонтентрированные (более 40 об. % порового пространства) скопления газогидратов обнаруживаются в зонах активных разломов, с приповерхностными аномалиями типа «чимней», нарушениями рельефа дна типа «покмарк» и др.

Возникновение подводных газовых гидратов обусловлено активными геологическими процессами, которые предопределяются геодинамическим режимом и находятся под влиянием сейсмотектонической активности окраинноморских геоструктур.

Начальные ресурсы газогидратного метана западного сегмента Тихоокеанского газогидратоносного пояса по совокупности приведенных в литературе сведений составляют до $(5-7) \times 10^{13} \text{ м}^3$.

Вопрос оценки реальных ресурсов газогидратов в Мировом океане находится только в начальной стадии решения.

Суммируя вышеизложенное, можно заключить, что есть все основания рассматривать газогидратоносность окраинных морей Восточной Азии как проявление газогеохимической зональной восходящей миграции углеводородных газов от их источников, контролируемых тектоническим фактором и сейсмической активностью. Иногда вулканическая активность также оказывает влияние на газовый состав газогидратоносных осадков и газогидратов. При этом могут формироваться гидраты углекислого газа (трог Окинава).

Влияние микробиальных газов сложно переоценить, они обнаруживаются во всех типах газогидратных скоплений.

Восточноазиатские газогидраты являются унаследованной от нефтегазоносных и угленосных толщ конечной формой накопления горючего природного газа в осадочных отложениях перед его высвобождением в виде газовых потоков в водную толщу и атмосферу. Пространственно их скопления контролируются локальными структурами, а наиболее перспективные залежи с массивными агрегатами обнаруживаются в поверхностных осадках в местах развития активных разломов. В аккреционных осадочных призмах часто преобладает литологический тип газогидратов с небольшой долей формирования массивных агрегатов. Газовые гидраты занимают в рассеянном виде до 45 % порового пространства осадков, массивные агрегаты представляют сплошные линзы.

В Охотском море находится одна из самых представительных гидратоносных провинций Тихого океана – на северо-восточном сахалинском склоне, площадью около 15 000 км², с начальными ресурсами гидратного метана 2×10^{12} м³. Образцы гидратов метана поднимаются, как правило, из плейстоцен-голоценовых отложений в интервале 0–10 м ниже поверхности дна.

Осадочные отложения в дельтах и палеодельтах крупных рек являются перспективным объектом для поисков залежей газогидратов благодаря лавинной седиментации, высокому содержанию органического вещества смешанного морского и терригенного генезиса, контролирующей роли разломных зон, а также интенсивной микробной деятельности.

Сдвиговые дислокации, которые играют важнейшую роль в формировании нефтегазовых [Харахинов, 2010] и углеметановых месторождений, например, в Приморье и на о. Сахалин, также контролируют образование крупных газогидратных скоплений в морских осадках. При этом наиболее благоприятными участками являются структурные узлы сдвигов и оперяющих их активных взбросов и сбросов, вместе составляющих план разломных зон в тектонических прогибах.

Газогидратоносные провинции морей Восточной Азии объединяются в Азиатско-

Тихоокеанский газогидратоносный пояс. Газогидратоносные провинции, как правило, соответствуют окраинным морям и представлены в Западно-Тихоокеанском и Восточно-Тихоокеанском сегментах. Эти сегменты, в свою очередь, объединяются в Тихоокеанское газогидратоносное кольцо. Азиатско-Тихоокеанский пояс представлен прерывистой полосой скоплений газогидратов в кайнозойских отложениях с мощностью (на сегодняшний день) до 600 м в диапазоне глубин 350–2000 м и начальными ресурсами метана до $(2-3) \times 10^{15}$ м³.

Приповерхностные газогидратные скопления являются новым видом каустобиолитов и, как правило, унаследованной эпигенетической формой: их происхождение обусловлено миграцией природного газа из газоносных, нефтегазоносных и угленосных толщ, часто при значительном вкладе сингенетических микробных газов.

Для максимально эффективного изучения газогидратоносности окраинных морей Восточной Азии необходима международная комплексная экспедиционная программа. Особенно это касается перспективных зон в международных водах, где без сотрудничества государств проведение исследований невозможно. В настоящее время ТОИ ДВО РАН выступает инициатором такой программы.

Авторы выражают искреннюю благодарность всем коллегам по вместе выполненным экспедициям, а также командам НИС «Академик М.А. Лаврентьев», НИС «Академик Опарин», НИС «Профессор Гагаринский». Авторы признательны рецензенту за конструктивные замечания.

Список литературы

1. Аблаев А.Г., Тащи С.М., Мельников Н.Г. Угленосность побережий и шельфа западного сектора Япономорского региона // *Геология и полезные ископаемые шельфов России*. М.: ГЕОС, 2002. С. 256–260.
2. Авдейко Г.П., Гавриленко Г.М., Черткова Л.В. и др. Подводная газогидротермальная активность на северо-западном склоне о. Парамушир (Курильские острова) // *Вулканология и сейсмология*. 1984. № 6. С. 66–81.
3. Арешев Е.Г. *Нефтегазоносность окраинных морей Дальнего Востока и Юго-Восточной Азии*. М.: Аванти, 2003. 288 с.
4. Астахова Н.В. *Аутигенные образования в позднекайнозойских отложениях окраинных морей Восточной Азии*. Владивосток: Дальнаука, 2007. 244 с.

5. Баранов Б.В., Рукавишников Д.Д., Прокудин В.Г., Джин Я.-К., Дозорова К.А. Природа замкнутых депрессий на восточном склоне острова Сахалин // *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2013. Вып. 21, № 1. С. 86–97.
6. Верба М.Л., Иванов Г.И., Тихонова И.М. Геолого-геохимические и геофизические свидетельства перспектив нефтегазоносности центральной и южной областей Охотского моря // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2011. Т. 6, № 4. С. 1–12. URL: http://www.ngtp.ru/rub/1/49_2011.pdf (дата обращения: 19.12.2018).
7. Веселов О.В., Гордиенко В.В., Куделькин В.В. Термобарические условия формирования газогидратов в Охотском море // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. Киев: НАН Украины, 2006. Вып. 3. С. 62–68.
8. *Газогеохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря* / А.И. Обжиров, Н.В. Астахова, М.И. Липкина и др. Владивосток: Дальнаука, 1999. 184 с.
9. *Геология и полезные ископаемые шельфов России*: Атлас. М.: Науч. мир, 2004. 108 с.
10. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. *Субмаринные газовые гидраты*. Л.: ВНИИОкеангеология, 1994. 86 с.
11. Гресов А.И. Геохимическая классификация углеводородных газов угленефтегазоносных бассейнов востока России // *Тихоокеан. геология*. 2011. Т. 30, № 2. С. 85–101. [Gresov A.I. Geochemical classification of hydrocarbon gases of the coal basins of East Russia. *Russian J. of Pacific Geology*, 2011, 5(2): 164–179. <https://doi.org/10.1134/s1819714011020047>].
12. Гресов А.И. *Геолого-промышленная оценка метаноресурсного потенциала и перспектив углеметанового промысла в углегазоносных бассейнах северо-востока России*: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук / Томский политехн. ун-т. Томск, 2014. 48 с.
13. Грецкая Е.В., Петровская Н.А. Нефтегазоносность Хатырского осадочного бассейна (Берингово море) // *Газовая промышленность*. 2010. Вып. 654, № 14. С. 38–44.
14. Грецкая Е.В., Ильев А.Я., Гнибиденко Г.С. *Углеводородный потенциал осадочно-породных бассейнов Охотского моря*. Южно-Сахалинск, 1992. 44 с.
15. Грецкая Е.В., Крапивенцева В.В., Сергеев К.Ф. Углеводородный потенциал осадочных отложений Голыгинского бассейна (Камчатка) // *Докл. АН*. 2008. Т. 420, № 6. С. 796–798.
16. Ефремова А.Г. Типы газопроизводящих отложений // *Геология нефти и газа*. 1979. № 2. С. 50–54.
17. Ефремова А.Г., Гритчина Н.Д. Газогидраты в морских осадках и проблема их практического использования // *Геология нефти и газа*. 1981. № 2. С. 32–34.
18. Зоненшайн Л.П., Мурдмаа И.О., Баранов Б.В. и др. Подводный газовый источник в Охотском море к западу от острова Парамушир // *Океанология*. 1987. Вып. 5. С. 795–800.
19. Истомин В.А., Якушев В.С. *Газовые гидраты в природных условиях*. М.: Недра, 1992. 236 с.
20. Карп Б.Я., Бессонова Е.А. Сейсмичность районов Охотского и Японского морей. Строение фундамента дна Охотского моря // *Геология и полезные ископаемые шельфов России*. М.: ГЕОС, 2002. С. 320–323.
21. Карпюк В.В. *Аналитический библиографический указатель литературы по газовым гидратам (1983–1987 гг.)*. М.: ВНИИГАЗ, 1988. 246 с.
22. Кудрявцева Е.И., Лобков В.А. Изотопный состав углерода метана как критерий прогнозирования дифференцированных залежей углеводородов // *Тихоокеан. геология*. 1984. № 3. С. 117–120.
23. Кузьмин М.И., Калмычков Б.Г., Конторович А.Э. и др. Первая находка газогидратов в осадочной толще озера Байкал // *Докл. АН*. 1998. Т. 362, № 4. С. 541–543.
24. Леин А.Ю., Иванов М.В. *Биогеохимический цикл метана в океане*. М.: Наука, 2009. 576 с.
25. Леин А.Ю., Гальченко В.Ф., Покровский Б.Г. и др. Морские карбонатные конкреции как результат процессов микробного окисления газогидратного метана в Охотском море // *Геохимия*. 1989. № 10. С. 1396–1406.
26. Леликов Е.П., Емельянова Т.А. Строение фундамента дна Охотского моря // *Геология и полезные ископаемые шельфов России*. М.: ГЕОС, 2002. С. 314–320.
27. Макогон Ю.Ф. Образование гидратов в газозоносном пласте в условиях многолетней мерзлоты // *Газовая промышленность*. 1965. № 5. С. 14–15.
28. На нефтяном рынке мира // *Бюл. иностр. коммерч. информации*. 1998. № 4. С. 12–13.
29. *Нетрадиционные ресурсы метана Дальнего Востока России: распределение, генезис, промышленное значение, экология*: науч.-техн. отчет / исполн. Шакиров Р.Б.; ТОИ ДВО РАН; соглашение № 8319 от 17 авг. 2012 г. Владивосток, 2013. № 01201281458. 226 с.
30. Николаева Н.А., Деркачев А.Н., Обжиров А.И. Характерные особенности проявлений газово-флюидных эманацй на северо-восточном склоне о-ва Сахалин (Охотское море) // *Тихоокеан. геология*. 2009. Т. 28, № 3. С. 38–52. [Nikolaeva N.A., Derkach A.N., Obzhir A.I. Characteristic features of the occurrence of gas-fluid emanations on the northeastern slope of Sakhalin Island, Sea of Okhotsk. *Russian J. of Pacific Geology*, 2009, 3(3): 234–248. <https://doi.org/10.1134/s181971400903004x>].
31. Никонов В.Н. Тяжелые углеводороды и их соотношения в газах нефтяных и газовых залежей // *Геология нефти и газа*. 1961. № 8. С. 12–21.
32. Обжиров А.И. *Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов*. М.: Наука, 1993. 139 с.
33. Обжиров А.И., Шакиров Р.Б. Комплексные геолого-геофизические исследования газогидратов в Охотском море // *Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии*. Вып. 4. *Геология и полезные ископаемые окраинных морей Евразии*. М.: ГЕОС, 2012. С. 122–136.
34. Обжиров А.И., Берлин Ю.М., Верховская З.И., Коровицкая Е.В., Верещагина О.Ф. Особенности распределения высокомолекулярных углеводородов в донных осадках Охотского моря в районе аномальных полей метана // *Геология, геофизика и разработка не-*

фтяных и газовых месторождений. 2013. № 2. С. 7–11.

35. Объяснительная записка к тектонической карте Охотоморского региона: м-б 1: 2 500 000 / отв. ред. Н.А. Богданов, В.Е. Хаин. М.: ИЛОВМ РАН, 2000. 193 с.

36. Отчет о НИР по теме «Условия формирования и разрушения газогидратов в Охотском море, их моделирование и технико-экономическое обоснование извлечения метана из газогидратов» / исп. Обжиров А.И. и др.; ТОИ ДВО РАН; Гос. контракт № 02.515.11.5017. Владивосток, 2008. № 02.515.11.5017. 135 с.

37. Панаев В.А. Газогидраты в Мировом океане // Бюл. МОИП. 1987. Т. 62, № 3. С. 66–71.

38. Полоник Н.С., Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. Изучение состава углеводородных компонентов Южно-Сахалинского и Пугачевского грязевых вулканов // Докл. АН. 2015. Т. 462, № 1. С. 79–83. [Polonik N.S., Shakirov R.B., Sorochinskaya A.V., Obzhirrov A.I. Studies of the composition of hydrocarbon components of the Yuzhno-Sakhalinsk and Pugachevo mud volcanoes. *Doklady Earth Sciences*, 2015, 462(1): 463–467. <https://doi.org/10.1134/s1028334x15050074>]

39. Равдоникас О.В. Нефтепоисковая гидрогеология Сахалина. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. 167 с.

40. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. М.: Науч. мир, 2014. 172 с.

41. Харахинов В.В. Тектоника Охотоморской нефтегазоносной провинции: дис. ... д-ра геол.-минер. наук / СахалинНИПИМорнефть. Оха-на-Сахалине, 1998. 77 с.

42. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Науч. мир, 2010. 276 с.

43. Хлыстов О.М., Нишио Ш., Манаков А.Ю., Сугияма Х., Хабуев А.В., Белоусов О.В., Грачев М.А. Опыт картирования кровли приповерхностных газовых гидратов озера Байкал и извлечение газа из них // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 9. С. 1415–1425. [Khlystov O.M., Khabuev A.V., Belousov O.V., Grachev M.A., Nishio S., Sugiyama H., Manakov A.Y. The experience of mapping of Baikal subsurface gas hydrates and gas recovery. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, 55(9): 1122–1129. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.08.007>]

44. Шакиров Р.Б. Аномальные поля метана в Охотском море и их связь с геологическими структурами: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук / ТОИ ДВО РАН. Владивосток, 2003.

45. Шакиров Р.Б. Особенности химического и изотопного состава углеводородных газов вулканов Менделеева и Головнина (о. Кунашир) // Геохимия. 2014. № 3. С. 267–269. <https://doi.org/10.7868/S0016752514010063> [Shakirov R.B. Chemical and isotopic characteristics of hydrocarbon gases from Mendeleev and Golovnin volcanoes, Kunashir Island. *Geochemistry International*, 2014, 52(3): 247–259. <https://doi.org/10.1134/s0016702914010066>]

46. Шакиров Р.Б. К вопросу об источниках углеводородных газов морских отложений и газогидратов окраинных морей Дальневосточного региона. Геодинамические процессы и природные катастрофы // Опыт Нефтегорска: Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г.: сб. материалов: в 2 т. / под ред. Б.В. Левина, О.Н. Лихачевой. Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 2. С. 177–181.

47. Шакиров Р.Б. Газогеохимические поля морей Восточной Азии. М.: ГЕОС, 2018. 341 с.+1 вкл.

48. Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Западно-Тихоокеанский газогидратоносный пояс // Теоретические и практические аспекты исследований природных и искусственных газовых гидратов: сб. материалов всерос. науч.-практ. конф. / Ин-т проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, 24–28 авг. 2011. Якутск: Ахсаан, 2011. С. 191–200.

49. Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И. Изотопно-газогеохимические особенности распределения метана и углекислого газа на о. Сахалин и прилегающем шельфе Охотского моря // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. Т. 2, вып. 20. С. 100–113.

50. Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. Газогеохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. Вып. 21, № 1. С. 231–243.

51. Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И. Особенности распределения гелия и водорода на юго-восточном и юго-западном склоне о. Сахалин (по результатам 59 рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2012 г.) // Литология и полезные ископаемые. 2016. № 1. С. 68–81. [Shakirov R.B., Syrbu N.S., Obzhirrov A.I. Distribution of helium and hydrogen in sediments and water on the Sakhalin slope. *Lithology and Mineral Resources*, 2016, 51(1): 61–73. <https://doi.org/10.1134/s0024490216010065>].

52. Abrams M. Geophysical and geochemical evidence for subsurface hydrocarbon leakage in the Bering Sea, Alaska // *Marine and Petroleum Geology*. 1992. Vol. 9, N 2. P. 208–221. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(92\)90092-s](https://doi.org/10.1016/0264-8172(92)90092-s)

53. ARA07C Cruise Report 2016: Korea-Russia-Germany East-Siberian Sea Arc Project. Korea Polar Research Inst., 2017. 108 p.

54. Baranov B.V., Karp B.Ya., Wong H.K. Areas of gas seepage // *Cruise Reports I & II: INESSA – Investigation of Eastern Sakhalin Seepage Areas*. RV Professor Gagarinsky Cruise 22, RV Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 28. Kiel, 1999. P. 45–52. (GEOMAR Report; 82).

55. Blair N. The $\delta^{13}\text{C}$ of biogenic methane in marine sediments: the influence of C_{org} deposition rate // *Chemical Geology*. 1998. Vol. 152(1–2). P. 139–150. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00102-8](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00102-8)

56. Ryu B.-J., Collett T.S., Riedel M., Kim G.-Y., Chun J.-H., Bahk J.-J., Lee J.Y., Kim Ji.-H., Yoo D.-G. Scientific results of the second gas hydrate drilling expedition in the Ulleung Basin (UBGH2) // *Marine and Petroleum Geology*. 2013. Vol. 47. P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.07.007>

57. Chi W.-Ch., Reed D.L., Tsai Ch.-Ch. Gas hydrate stability zone in offshore Southern Taiwan // *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 2006. Vol. 17(4). P. 829–843. [https://doi.org/10.3319/tao.2006.17.4.829\(gh\)](https://doi.org/10.3319/tao.2006.17.4.829(gh))
58. Chuang P.C., Yang F.T., Lee H.F., Lan T.F., Hong W.L., Lin S., Sun C.H., Chen J.C., Wang Y., Chung S.H. Estimation of methane flux offshore SW Taiwan and the influence of tectonics on gas hydrate accumulation // *Geofluids*. 2010. N 10. P. 497–510. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2010.00313.x>
59. Chun J.-Hwa, Ryu B.-J., Lee S.-R. Korea gas hydrate R&D Program // *Report PETRAD-CCOP-PETROVIETNAM-VASI Workshop on Gas hydrates, 1–3 March 2011*: Abstracts. Halong, Vietnam, 2011. P. 21.
60. Collett T.S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River Area, North Slope, Alaska // *AAPG Bulletin*. 1993. Vol. 77 (5). P. 793–812. doi:10.1306/BDF8D62-1718-11D7-8645000102C1865D
61. *Cruise Reports I & II: INESSA – Investigation of Eastern Sakhalin Seepage Areas*. RV Professor Gagarinsky Cruise 22, RV Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 28 / Eds N. Biebow, E. Huetten. Kiel, 1999. 188 p. (GEOMAR Report; 82).
62. *Cruise Reports 88: KOMEX V & VI*. RV Professor Gagarinsky Cruise 26 and M/V Marshal Gelovany Cruise 1 / Eds N. Biebow, T. Ludmann, B. Karp, R. Kulinich. Kiel, 2000. 296 p.
63. *Cruise Reports: CHAOS Project. RV Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 31 and 32*. VNIIOkeangeologia, St. Petersburg, 2005. 164 p.
64. *Cruise Reports: CHAOS Project. RV Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 36*. Vladivostok; St. Petersburg, 2006. 127 p.
65. Dai J., Zou C., Li J., Ni Yu., Hu G., Zhang X., Liu Q., Yang C., Hu A. Carbon isotopes of Middle–Lower Jurassic coal-derived alkane gases from the major basins of northwestern China // *Intern. J. of Coal Geology*. 2009. Vol. 80. P. 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.08.007>
66. Dai J., Gong D., Ni Yu., Huang Sh., Wu W. Stable carbon isotopes of coal-derived gases sourced from the Mesozoic coal measures in China // *Organic Geochemistry*. 2014. Vol. 74. P. 123–142. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.04.002>
67. Freire F., Matsumoto R., Santos A.L. Structural-stratigraphic control on the Umitaka Spur gas hydrates of Joetsu Basin in the eastern margin of Japan Sea // *Marine and Petroleum Geology*. 2011. Vol. 28. P. 1967–1978. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.10.004>
68. Fu X., Wang J., Tan F., Feng X., Wang D., He J. Gas hydrate formation and accumulation potential in the Qiangtang basin, northern Tibet, China // *Energy Conversion and Management*. 2013. Vol. 73. P. 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.020>
69. *Gas hydrate system of the Eastern Sakhalin slope: Geophys. Approach*: Scientific report of the Sakhalin slope gas hydrate project 2007 / Eds. B.V. Baranov, Y.K. Jin, H. Shoji, A. Obzhairov, K.A. Dozorova, A. Salomatin, V. Gladyshev. Korea Polar Res. Inst. (KOPRI), Incheon, 2008. 116 p.
70. *Geology of the China Seas* / P. Wang, Q. Li, C.-F. Li. Amsterdam: Elsevier, 2014. 702 p. (Developments in Marine Geology; vol. 6).
71. Ginsburg G.D., Milkov A.V., Soloviev V.A. et al. Gas hydrate accumulation at the Haakon Mosby Mud Volcano // *Geo-Marine Letters*. 1999. Vol. 19(1–2). P. 57–67. <https://doi.org/10.1007/s003670050093>
72. Hachikubo A., Krylov A., Sakagami H., Minami H., Nunokawa Y., Shoji H., Matveeva T., Jin Y.K., Obzhairov A. Isotopic composition of gas hydrates in subsurface sediments from offshore Sakhalin Island, Sea of Okhotsk // *Geo-Marine Letters*. 2010. Vol. 30(3–4). P. 313–319. <https://doi.org/10.1007/s00367-009-0178-y>
73. Hachikubo A., Tatsumi K., Sakagami H., Minami H., Yamashita S., Takahashi N., Shoji H. Molecular and isotopic compositions of hydrate-bound hydrocarbons in subsurface sediments from offshore Sakhalin Island, Sea of Okhotsk // *Proceedings of the 7th Intern. Conf. on Gas Hydrates (ICGH 2011)*, Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17–21, 2011. Edinburgh, 2011. <http://www.researchgate.net/publication/259493672>
74. Hachikubo A., Yanagawa K., Tomaru H., Lu H., Matsumoto R. Molecular and isotopic composition of volatiles in gas hydrates and in sediment from the Joetsu Basin, eastern margin of the Japan Sea // *Energies*. 2015. Vol. 8, N 6. P. 4647–4666. <https://doi.org/10.3390/en8064647>
75. *International Energy Outlook, 2010*: Reference case. U.S. Dep. of Energy Wash., 2010. URL: www.eia.gov/oiaf/ieo/index.html
76. Jeong I.S., Cho J.-Ch., Bahk J.-J., Hyun S.M., Kwon K.K., Lee J.H. et al. Vertical profile of bacterial community in the sediment of Ulleung Basin: implication of the presence of methane-driven community: Conf. paper // *Microorganisms in Industry and Environment*. 2010. P. 219–226. https://doi.org/10.1142/9789814322119_0049
77. Jianming G., Jianwen Ch., Gang L., Xunhua Zh., Jipeng Li, Fulin H. Hydrocarbon test in lower-layer atmosphere to predict deep-sea petroleum or hydrate in the Okinawa Trough: an example // *Acta Oceanol. Sinica*. 2003. Vol. 22(4). P. 569–576.
78. Kang D.-H., Yoo D.G., Bahk J.J., Ryu B.J., Koo N.H., Kim W.S., Park K.S., Park K.P., Kim J.S. The occurrence patterns of gas hydrates in the Ulleung Basin, East Sea // *J. Geol. Soc. Korea*. 2009. Vol. 45(2). P. 143–155. (In Korean with Engl. abstr.).
79. Klauda J.B., Sandler S.I. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment // *Energy Fuels*. 2005. Vol. 19. P. 459–470.
80. Kvenvolden K.A., Kastner M. Gas hydrates of the Peruvian outer continental margin // *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific results. Sites 679–688. Peru Continental Margin* / Eds. W.E. Dean et al. 1986. Vol. 112. P. 517–526.
81. Kvenvolden K.A. A primer on the geological occurrence of gas hydrate // *Geological Society Special Publication*. 1998. Vol. 137. P. 9–30.
82. Lee S.H., Chough S.K. Distribution and origin of shallow gas in deep-sea sediments of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan) // *Geo-Marine Letters*.

2003. Vol. 22(4). P. 204–209. <https://doi.org/10.1007/s00367-002-0114-x>

83. Long D., Lovell M.A., Rees J.G., Rochelle C.A. Sediment-hosted gas hydrates: new insights on natural and synthetic systems // *Geological Society Special Publications*. 2009. Vol. 319. P. 1–9. <https://doi.org/10.1144/SP319.1>

84. Luedmann T., Wong H.K. Characteristics of gas hydrate occurrences associated with mud diapirism and gas escape structures in the northwestern Sea of Okhotsk // *Marine Geology*. 2003. Vol. 201(4). P. 269–286. [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(03\)00224-x](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(03)00224-x)

85. Luedmann Th., Baranov B., Karp B. (Eds) *KOMEX, Kurile Okhotsk Sea Marine Experiment: Cruise report RV Professor Gagarinsky Cruise 32 SERENADE; Seismo-Stratigraphic Research off Northern Sakhalin and in the Derugin Basin, August 31 – September 29, 2001*. Kiel, 2002. 52 p. (GEOMAR Report; 105). doi:10.3289/GEOMAR_REP_105_2002

86. Matsumoto R., Hiromatsu M. Fluid flow and evolution of gas hydrate mounds of Joetsu basin, eastern margin of Japan Sea: constraints from high-resolution geophysical survey by AUV // *Proceedings of the 7th Intern. Conf. on Gas Hydrates (ICGH 2011)*, Edinburgh, Scotland, UK, July 17–21, 2011. <http://www.pet.hw.ac.uk/icgh7/papers/icgh2011Final00468.pdf> (дата обращения 18.12.2018).

87. Matsumoto R. et al. Formation and collapse of gas hydrates deposits in high methane flux area of the Joetsu basin, eastern margin of Japan Sea // *J. of Geography*. 2009. Vol. 118. P. 43–71. 10.5026/jgeography.118.43

88. Matsumoto R., Tanahashi M., Kakuwa Y., Snyder G., Ohkawa S., Tomaru H., Morita S. Recovery of thick deposits of massive gas hydrates from gas chimney structures, eastern margin of Japan Sea: Japan Sea shallow gas hydrate Project // *Fire in the Ice (US DOE–NETL newsletter)*. 2017. Vol. 17, N 1. P. 1–6. URL: <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrates> (дата обращения: 13.03.2019).

89. Max M.D. (Ed.) *Natural gas hydrate*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publ., 2000. 410 p. (Oceanic and Permafrost Environments; vol. 5). <https://doi.org/10.1007/978-94-011-4387-5>

90. Mazurenko L., Kaulio V., Grineva V., Sigacheva A. Gas hydrates: 6.1. Results obtained during Leg 1 // *Hydro-carbon hydrate accumulations in the Okhotsk Sea (CHAOS Project Leg 1 and Leg 2)*: Report of RV Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 31 and 32 / T. Matveeva, V. Soloviev, H. Shoji, A. Obzhairov (Eds). St.-Petersburg: VNIIOkeangeologiya, 2005. P. 47–60.

91. Mienert J., Posewang J. Evidence of shallow- and deep-water gas hydrate destabilizations in North Atlantic polar continental margin sediments // *Geo-Marine Letters*. 1999. Vol. 19. P. 143–149. <https://doi.org/10.1007/s003670050101>

92. Milkov A.V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates // *Marine Geology*. 2000. Vol. 167(1–2). P. 29–42. [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(00)00022-0)

93. Obzhairov A.I. Gasgeochemical manifestation of gashydrates in the Sea of Okhotsk // *Alaska Geology*. 1992. Vol. 21. P. 1–7.

94. Okui A., Kaneko M., Nakanishi S., Monzawa N., Yamamoto H. An integrated approach to understanding the petroleum system of a Frontier deep-water area, offshore Japan // *Petroleum Geosciences*. 2008. Vol. 14(3): 223–233. <https://doi.org/10.1144/1354-079308-765>

95. *Operation Report of Sakhalin slope gas hydrate Project 2011, RV Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 56* / H. Shoji, Y.K. Jin, A. Obzhairov, B. Baranov (Eds). New Energy Resources Res. Center, Kitami Inst. of Technology, 2012. 140 p.

96. *Operation Report of Sakhalin slope gas hydrate Project 2012, RV Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 59* / Y.K. Jin et al. (Eds) Korea Polar Res. Inst., Incheon, 2013. 163 p.

97. *Operation Report of Sakhalin slope gas hydrate Project II, 2013, RV Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 62* / H. Shoji et al. (Eds) New Energy Resources Res. Center, Kitami Inst. of Technology, 2014. 111 p.

98. *Operation Report of Sakhalin slope gas hydrate Project II, 2014, RV Akademik M. A. Lavrentyev Cruise 67* / Y.K. Jin et al. (Eds) Korea Polar Res. Inst., Incheon, 2015. 121 p.

99. *Overview: What are gas hydrates?* / Meiji University, Gas hydrate research laboratory, 2009. URL: <http://www.kisc.meiji.ac.jp/~hydrate/english/about/index.html>

100. Pecher I.A., Fohrmann M. Natural gas hydrates as an energy resource and new developments in gas hydrate exploration // *Report PETRAD-CCOP-PETROVIETNAM-VASI Workshop on Gashydrates, 1–3 March 2011: Abstracts*. Halong, Vietnam, 2011. P. 26.

101. *Proceedings of the Ocean Drilling Program*. Vol. 190. *Initial reports deformation and fluid flow processes in the Nankai Trough Accretionary Prism*. Covering Leg 190 of the cruises of the Drilling Vessel JOIDES Resolution. Sites 1173–1178. College Station TX. 2000. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.ir.190.2001>

102. Sakai H., Gamo T., Kim E.-S., Tsutsumi M., Tanaka T., Ishibashi J., Wakita H., Yamano M., Oomori T. Venting of carbon dioxide-rich fluid and hydrate formation in Mid-Okinawa Trough Backarc Basin // *Science*. 1990. Vol. 248(4959). P. 1093–1096. <https://doi.org/10.1126/science.248.4959.1093>

103. Sasaki M., Endo N., Ohashi N., Tsukahara E. Dissociation of methane hydrate in the Sea of Okhotsk—Survey of dissolved methane concentration in sea water and sea ice // *Proceedings of the Fourth Intern. Conf. on gas hydrates*. Yokohama, Japan, 2002. P. 170–184. See also: <https://doi.org/10.1299/jsmehokkaido.2001.41.198>; <https://doi.org/10.1299/jsmehokkaido.2002.42.96>

104. Savvichev A., Rusanov I., Crane K. *Distribution of methane in the water column and bottom sediments of the Bering Strait and Chukchi Sea*. 2004. URL: [https://www.pmel.noaa.gov/rusalca/sites/default/files/atoms/files/Methane in the Bering Strait and Chukchi Sea.pdf](https://www.pmel.noaa.gov/rusalca/sites/default/files/atoms/files/Methane%20in%20the%20Bering%20Strait%20and%20Chukchi%20Sea.pdf) (дата обращения: 25.03.2019).

105. Scholl D., Barth G., Childs J., Gibbons H. *Sub-sea floor methane in Bering Sea – USGS Emeritus describes possible gas-hydrate accumulations to the Geophysical Society of Alaska*. 2007. URL: <https://soundwaves.usgs.gov/2007/04/research3.html> (дата обращения: 12.03.2019).
106. Shakirov R.B., Obzhirrov A.I., Biebow N., Salyuk A.N., Tsunogai U., Terekhova V.E., Shoji H. Classification of anomalous methane fields in the Okhotsk Sea // *J. of Polar Meteorology and Glaciology*. Tokyo, Nat. Inst. of Polar Res., 2005. Vol. 19. P. 50–66.
107. Shakirov R., Obzhirrov A., Shoji H., Jin Y.K., Syrbu N., Trung N.N. New gas hydrates in the Okhotsk and Japan seas: manifestations of Pacific Gashydrate Belt // *8-th Intern. Conf. on Gas Hydrates (ICGH8)*: Abstracts. China Nat. Convention Center, Beijing, China, 28 July – 1 August, 2014. P. 92–93. <https://doi.org/10.13140/2.1.5013.4725>
108. Sloan E.D., Dendy J.E., Koh C. *Clathrate hydrates of natural gases*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. 752 p. <https://doi.org/10.1201/9781420008494>
109. Suess E. Marine cold seeps and their manifestations: geological control, biogeochemical criteria and environmental conditions // *Intern. J. of Earth Sciences. GR Geologische Rundschau*. 2014. Vol. 103(7). P. 1889–1916.
110. Suess E., Torres M.E., Bohrmann G., Collier R.W., Greinert J., Linke P., Rehder G., Trehu A., Wallmann K., Winckler G., Zuleger E. Gas hydrate destabilization: enhanced dewatering, benthic material turnover and large methane plumes at the Cascadia convergent margin // *Earth and Planetary Science Letters*. 1999. Vol. 170(1–2). P. 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00092-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00092-8)
111. Sun Zh., Wei H., Zhang X., Shang L., Yin X., Sun Yu., Xu L., Huang W., Zhang X. A unique Fe-rich carbonate chimney associated with cold seeps in the northern Okinawa Trough, East China Sea // *Deep Sea Research. Pt I: Oceanographic Research Papers*. 2015. Vol. 95. P. 37–53. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.10.005>
112. Tanahashi M. Present status of Japanese methane gas hydrate research and development program // *Report PETRAD-CCOP-PETROVIETNAM-VASI Workshop on Gashydrates, 1–3 March 2011*: Abstracts. Halong, Vietnam, 2011. P. 19–20.
113. Trung N.N. The gas hydrate potential in the South China Sea // *J. of Petroleum Science and Engineering*. 2012. Vol. 88–89. P. 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.01.007>
114. Wang Y., Feng J.-C., Li X.-S., Zhang Y., Li G. Evaluation of gas production from marine hydrate deposits at the GMGS2-Site 8, Pearl River Mouth Basin, South China Sea // *Energies*. 2016. Vol. 9. P. 222.
115. Wakita H., Sano Y., Urabe A., Nakamura Y. Origin of methane-rich natural gas in Japan: formation of gas fields due to large scale submarine volcanism // *Applied Geochemistry*. 1990. Vol. 5(3). P. 263–278. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(90\)90002-m](https://doi.org/10.1016/0883-2927(90)90002-m)
116. Wilde P., Quinby-Hunt M.S. Methane clathrate outgassing and anoxic expansion in South-East Asian deeps due to global warming // *Environmental Monitoring and Assessment*. 1997. Vol. 44(1/3). P. 149–153. <https://doi.org/10.1023/a:1005772120776>
117. Wu N., Yang Sh., Zhang H., Su Zh., Zhang K., Mordis G.J. Gas hydrate system in Northern South China Sea and numerical investigation of gas production strategy in Shenhu Area // *Report PETRAD-CCOP-PETROVIETNAM-VASI Workshop on Gashydrates, 1–3 March 2011*: Abstracts. Halong, Vietnam, 2011a. P. 17–18.
118. Wu N., Zhang H., Yang Sh., Zhang G., Liang J., Lu J., Su X., Schultheiss P., Holland M., Zhu Y. Gas hydrate system of Shenhu Area, Northern South China Sea: Geochemical results // *J. of Geological Research*. Vol. 2011b. Article ID 370298. 10 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/370298>
119. Xiang J. (Ed.) *Marine Science and Technology in China: A Roadmap to 2050*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 182 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05346-7>
120. Yan Pin, Deng Hui, Hailing Liu. The geological structure and prospect of gas hydrate over the Dongsha Slope, South China Sea // *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 2006. Vol. 17(4). P. 645–658. [https://doi.org/10.3319/tao.2006.17.4.645\(gh\)](https://doi.org/10.3319/tao.2006.17.4.645(gh))
121. Zeebe R.E., Wolf-Gladrow D., Eds. CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes. Chapter 3. Stable isotope fractionation // *Elsevier Oceanography Series*. Amsterdam, 2001. Vol. 65. P. 141–250. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(01\)80004-0](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(01)80004-0)
122. Zhu Y., Zhang Y., Sun Zh. Overview on permafrost gas hydrate exploration in China // *8-th Intern. Conf. on Gas Hydrates (ICGH8)*: Abstracts. China National Convention Center, Beijing, China, 28 July–1 August, 2014. P. 87. See also: Zhu Y., Zhang Y., Wen H. et al. Gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost and their basic characteristics // *Acta Geoscientica Sinica*. 2010. Vol. 31. P. 7–16; Zhu Y., Lu Z., Xie X. Potential distribution of gas hydrate in the Qinghai-Tibetan Plateau // *Geo Bull. China*. 2011. Vol. 30. P. 1918–1926.

Сведения об авторах

ШАКИРОВ Ренат Белалович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, заместитель директора, ОБЖИРОВ Анатолий Иванович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, МАЛЬЦЕВА Елена Валерьевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник – лаборатория газогеохимии, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток; ШАКИРОВА Мария Витальевна, аспирант – Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток.