

УДК 553.98:550.84

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ГАЗОГИДРАТОВ В ОХОТСКОМ МОРЕ: АСПЕКТЫ ТЕКТониКИ И ГЕНЕЗИСА

© 2021 г. А. И. Обжиров^{а, *}, Н. Л. Соколова^{а, **}, Ю. А. Телегин^{а, ***}

^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
ул. Балтийская, 43, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: obzhirov@poi.dvo.ru

**e-mail: natap81@mail.ru

***e-mail: telegin@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 02.09.2020 г.

После доработки 27.10.2020 г.

Принята к публикации 17.02.2021 г.

Объектом исследования является Охотское море, в котором обнаружены поля газогидратов и районы активной подводной газовой разгрузки. Изучение условий формирования и разрушения газогидратов и их связи с потоками метана является актуальным как для Охотского моря, так и для понимания этих процессов в Мировом океане. В работе представлены результаты исследований распределения природных газов и взаимосвязанных с ними газогидратов в Охотском море. Изучены геологические условия формирования полей аномальных концентраций метана и других газовых компонентов (C_2-C_4 , CO_2), определены их источники, оценено влияние сейсмо-тектонической активизации в регионе на миграцию газа из глубоких горизонтов к поверхности в осадочном бассейне Охотского моря.

Ключевые слова: Охотское море, метан, газогидраты, источники метана.

DOI: 10.31857/S0024497X21040066

Охотское море является одним из активных районов подводной газовой разгрузки в северном полушарии и наиболее интересным объектом в Дальневосточном регионе для изучения газогидратов метана. Море расположено в области активной зоны перехода от океана к континенту. В пределах акватории к настоящему времени выявлено три района распространения газогидратов в донных отложениях (западный борт впадины Дерюгина вблизи северного Сахалина, юго-восточный борт Голыгинского прогиба в прибрежье о. Парамушир и в районе залива Терпения, западный борт Курильской котловины). Изучение геологических условий формирования и разрушения газогидратов является важным фундаментальным и прикладным исследованием процессов формирования потоков газа и газогидратов в Охотском море и Мировом океане.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Различные компоненты природного газа, мигрируя по зонам разломов из глубины недр, являются индикаторами состояния геологической среды и ее сейсмической активности. Проникая в

толщу осадка, газ способствует формированию особых физико-химических условий в толще пород и осадочных комплексов, которые влияют на образование целого ряда аутигенных минералов. Эти представления помогают при прогнозе и поиске газогидратов и нефтегазовых залежей. Аномальные концентрации метана и тяжелых углеводородов (C_2-C_4) характеризуют восстановительные условия и указывают на присутствие в недрах залежей углеводородов, а в зоне стабильности газогидратов (высокое давление, аномальная концентрация метана, присутствие воды) – на образование газогидратов в донных осадках. Высокие концентрации углекислого газа (CO_2) свидетельствуют об окислительных условиях и позволяют предполагать, что источник газа может быть связан с вулканической активностью в недрах. Изучение условий формирования аномальных полей различных компонентов природного газа способствует пониманию геологических процессов, происходящих в донных отложениях Охотского моря, и помогает решить следующие задачи: прогноз присутствия газогидратов и нефтегазовых залежей, картирование зон разломов и определение их сейсмической активности, расчет потоков

парниковых газов (CO_2 , CH_4), поступающих из донных отложений в воду и из воды в атмосферу, что важно при изучении изменений (потепления) климата и решении прочих геологических задач, в том числе поисков минеральных ресурсов.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Представленные в статье данные являются результатом анализа и обобщения обширного фактического материала, полученного авторами во время экспедиционных работ (НИС “Академик М.А. Лаврентьев”, ГС “Маршал Геловани”, НИС “SONNE”) в рамках международных проектов “KOMEX” (Россия–Германия, 1998–2004), “CHAOS” (Россия–Япония–Корея, 2003–2006), “SSGH” (Россия–Япония–Корея, 2007–2015) и в процессе обработки данных предшественников.

Для изучения аномальных и фоновых полей метана в водной толще и донных осадках Охотского моря, авторами был применен газогеохимический метод, который усовершенствован и отработан для проведения исследований в морских условиях лабораторией Газогеохимии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН. Достоверность результатов газоаналитических работ обеспечивается применением современного хроматографического оборудования, новых усовершенствованных методов подготовки, отбора и дегазации проб, использованием современных методик обработки и интерпретации полученных данных.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Комплексный анализ геологических, геофизических, гидроакустических и газогеохимических параметров среды, полученных в результате отбора проб воды, донных осадков, газогидратов и проведения аналитических работ в экспедициях, а также обработка и обобщение полученных результатов, их сравнение с данными, приведенными в литературе и экспедиционных отчетах, позволили наиболее полно оценить геологическую обстановку в районе гидратсодержащих площадей исследуемой акватории.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показывают многочисленные публикации, активные выходы метана, связанные с областями скопления газовых гидратов, сосредоточены, в основном, в зонах, подверженных процессам тектонического сжатия. Подводная газовая разгрузка обычно встречается в областях интенсивного прогибания, в окраинных бассейнах и перед дугами в зонах субдукции [Nelson et al., 1979 и др.]. В подобных районах активных континентальных окраин, как правило, присутствуют раз-

рывные нарушения, складчатые дислокации, наблюдается геодинамическая активность, а также повышенная сейсмичность [Дегазация Земли ..., 1985]. Все вышеперечисленные условия и развитие в районе достаточно мощных осадочных толщ, содержащих жидкие и газообразные углеводороды, способствуют процессам миграции углеводородов из недр к поверхности. При этом в верхних слоях донных осадков, при определенных термодинамических условиях, происходит процесс формирования–разрушения газогидратов, сопряженный с существованием очагов подводной газовой разгрузки. В качестве наиболее благоприятных путей для вертикальных перетоков углеводородов рассматриваются узлы пересечения разнонаправленных напряжений, кольцевые структуры и диапиры [Мясникова, Шпильман, 2003]. С этой точки зрения Охотское море является природным объектом, в котором сочетается весь необходимый набор факторов и условий, благоприятных для существования газогидратов и подводной газовой разгрузки (рис. 1).

Геологическая обстановка в районах скопления газогидратов в Охотском море

Все участки северо-западного сектора Охотского моря со скоплениями газогидратов и признаками их присутствия в отложениях расположены в пределах западной части впадины Дерюгина. Газогидратное поле побережья о. Парамушир приурочено к Голыгинскому прогибу. В этих прогибах развит мощный осадочный чехол, характеризующийся достаточно высоким потенциалом генерации углеводородов [Веселов и др., 2006]. Газовые гидраты обнаружены в донных осадках западного склона Курильской котловины, со стороны залива Терпения.

Северо-западный борт впадины Дерюгина, где обнаружены скопления газовых гидратов, является наиболее изученным. Считается, что структура впадины Дерюгина сформировалась в результате рифтогенной деструкции [Харахинов, 1998] и находится в настоящее время под влиянием современной сейсмической активности. Восточная часть о. Сахалин принадлежит к трансформной границе Охотоморской плиты, протягивающейся с севера на юг. Это глобальная тектоническая структура, отделяющая Охотоморскую плиту от соседних Амурской и Евразийской плит (рис. 2).

Согласно В.В. Харахинову [1998], исследуемый район располагается в пределах северной части Западно-Дерюгинской котловины, которая простирается вдоль всего Северо-Сахалинского осадочного бассейна. Основными тектоническими структурами, контролирующими строение района, являются Восточно-Сахалинская и Западно-Дерюгинская разломные зоны. Восточный

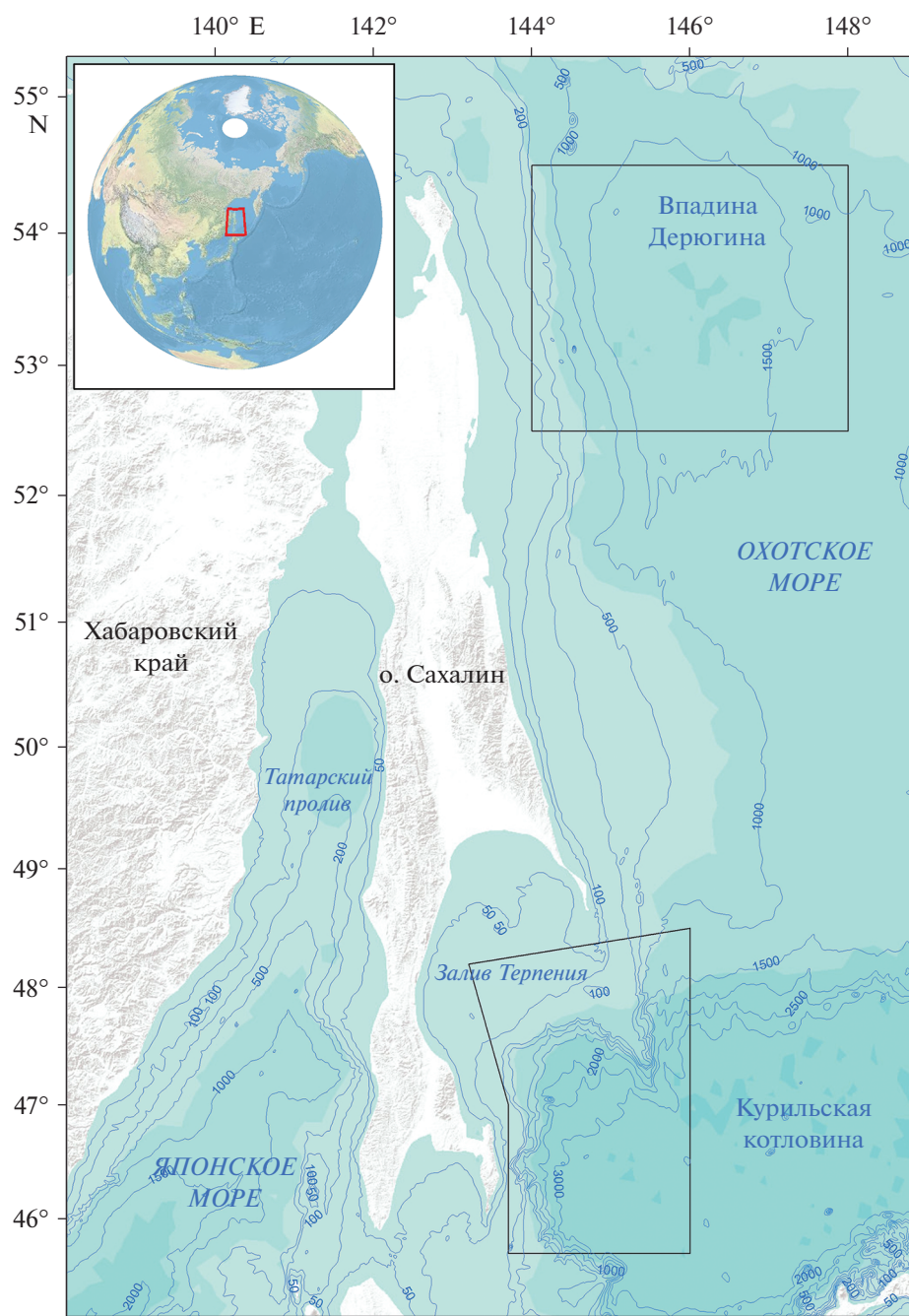


Рис. 1. Схема расположения районов экспедиционных исследований в Охотском море.

склон о. Сахалин представляет собой морфологическое выражение большой трансформной зоны северо-северо-западного направления, которая отделяет о. Сахалин от впадины Дерюгина [Cruise Reports ..., 1999]. В работе [Обжиров, Мустафин, 1989] отмечен участок с активными выходами газа, расположенный в пределах Дерюгинской плиоцен-голоценовой зоны нефтегазонакопления. Авторы полагают, что Дерюгинская область распространения мелководных морских песчано-

глинистых отложений может рассматриваться как одна из наиболее перспективных в отношении нефтегазоносности. Особенности геологического строения Дерюгинской структуры и присутствие в ней залежей углеводородов позволяют предполагать здесь источник метана, поступающего в верхние слои донных осадков по зонам разломов, и образование газогидратов.

В пределах северо-западного сектора Охотского моря многими исследователями признается

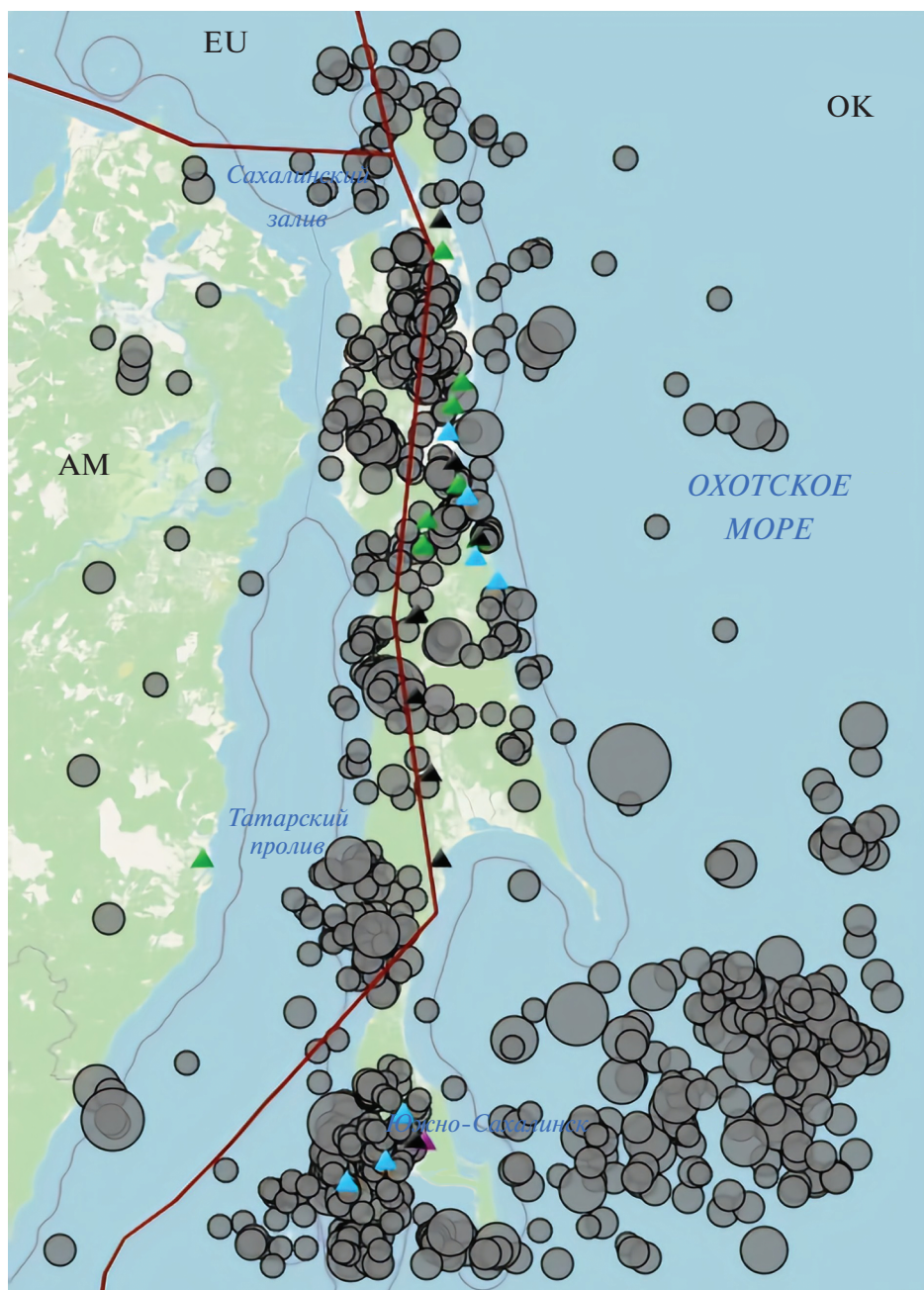


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений магнитудой $M > 3$ за период 2003–2020 гг. (по данным сайта <http://www.eq-alert.ru>). Границы литосферных плит указаны, по [Bird, 2003]: ОК – Охотоморская, АМ – Амурская, ЕУ – Евразийская. Треугольниками показано расположение сейсмических станций.

существование мощной сейсмически активной субмеридиональной разломной зоны [Бессонова, 2003; Шакиров, 2003 и др.]. А.И. Обжиров, на основании газогеохимических аномалий, предложил, что сейсмотектоническая активизация на Сахалинском северо-восточном склоне Охотского моря началась в 1988 г. [Обжиров и др., 1989]. В настоящее время тектоническая система Сахалина, возможно, развивается в условиях правостороннего субмеридионального сдвига. Вся без

исключения область о. Сахалин и прилегающая к нему со стороны моря территория подвержены сейсмическим проявлениям. Очаги землетрясений в виде широкой полосы располагаются вдоль литосферных разломов субмеридионального направления, а также в местах их пересечения с разрывами преимущественно северо-восточного направления [Бессонова и др., 2001; Бессонова, 2003]. Это хорошо видно на карте эпицентров

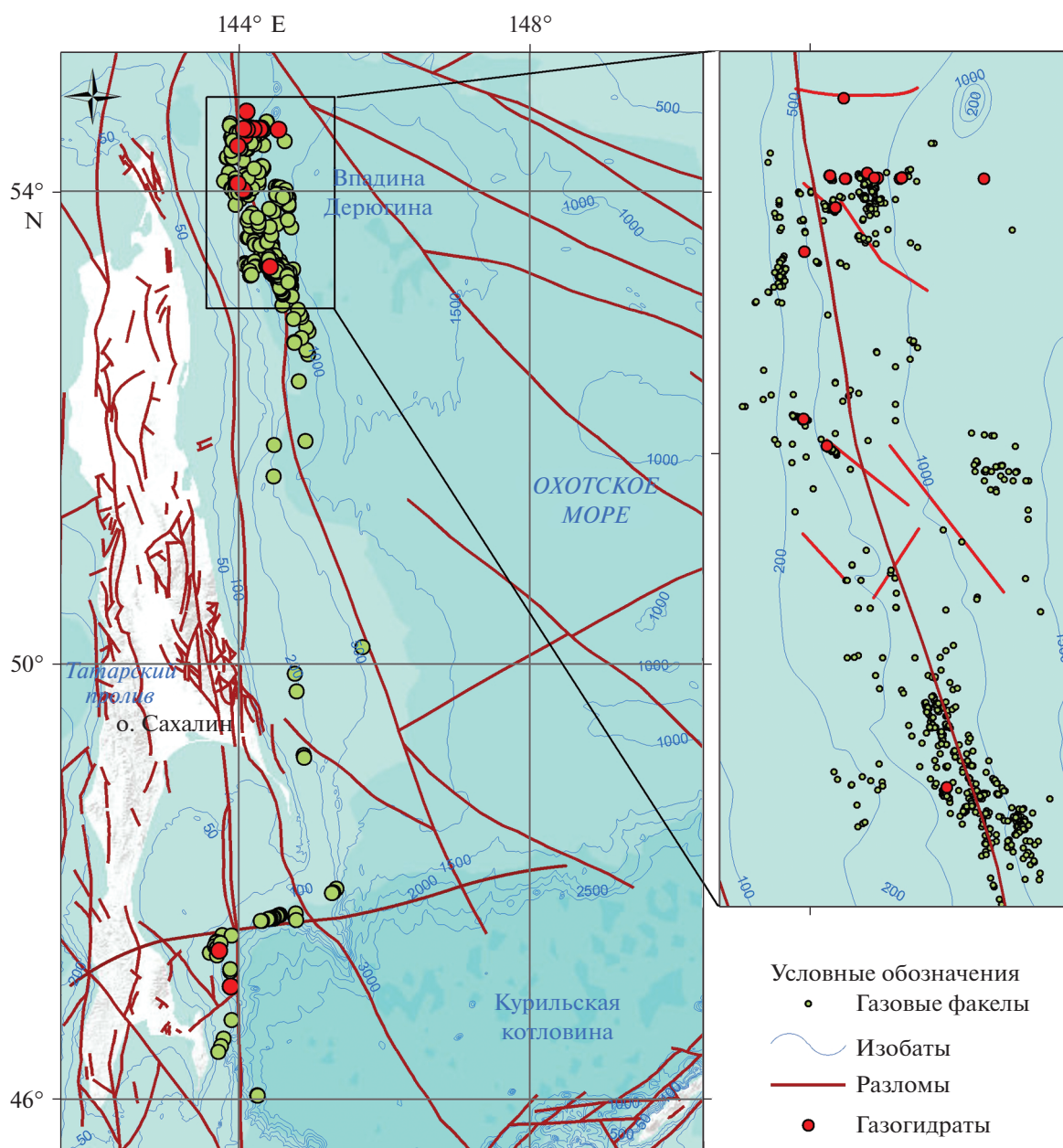


Рис. 3. Карта разломов и выходов природного газа из донных отложений исследуемого региона. На врезке справа показана зона разломов Лаврентьева [Геологическая карта ..., 1995; SO178-KOMEX Cruise ..., 2004; Mazurenko et al., 2006].

землетрясений о. Сахалин и сопредельных территорий (см. рис. 2).

В районе северо-западного сектора Охотского моря существуют две системы разломов: взбросы северо-северо-западного простирания и, предположительно, правые сдвиги северо-восточного простирания. В пределах южной части исследуемой территории отмечаются многочисленные нарушения слоистости осадочной толщи. Эти нарушения были интерпретированы Б.В. Барановым с соавторами как взбросы и сбросы [Cruise Reports ..., 1999]. Некоторые из них наклонены в сторону Сахалина, а часть — в сторону впадины Дерюгина.

Большинство газовых выходов зафиксировано вблизи пересечений неглубоких взбросов северо-северо-западного или северо-западного простирания и предполагаемых сдвигов северо-северо-восточного простирания, составляющих структурный план Восточно-Сахалинской и Западно-Дерюгинской разломных зон (рис. 3).

Геолого-газогеохимические особенности районов газогидратопроявления в Охотском море

В настоящее время в Охотском море известны три района, где в донных отложениях присутству-

ют газогидраты: восточный сахалинский склон – западный борт впадины Дерюгина (впервые обнаружены в 1991 г., предполагались в 1988 г. в результате обнаружения подводных газовых факелов), Припарамуширский район Курильских островов – район Голыгинского прогиба (1986 г.) и Курильская котловина – газовые гидраты вскрыты в донных осадках на западном склоне котловины (2012 г.).

Скопления газогидратов расположены в донных осадках в районе очагов газовой разгрузки и контролируются такими флюидопроводниками, как зоны разломов, диапиры и, возможно, грязевые вулканы [Зоненшайн и др., 1987; Обжиров и др., 1989; Гинсбург, Соловьев, 1994; Cruise Reports ..., 1999; Kurile Okhotsk Sea ..., 2002; Матвеева, Соловьев, 2003; Комплексные геологические ..., 2005; Обжиров и др., 2006]. В этих структурах развит мощный осадочный чехол, представленный в основном переслаивающимися песчаниками, алевролитами, вулканогенными слоями и глинами [Обжиров и др., 1999] и характеризующийся достаточно высоким потенциалом генерации углеводородов [Веселов и др., 2006].

Впервые газовые гидраты в Охотском море обнаружены в 1986 г. в прибрежье о. Парамушир. Первоначально работы в этом районе проводились с целью поиска гидротермы, признаком существования которой являлся звукорассеивающий “факел” в водной толще, который был обнаружен на эхолотных записях в 1982 г. [Гинсбург, Соловьев, 1994; Обжиров и др., 1999]. В результате исследований было установлено, что звукорассеивающее тело образовано преимущественно потоком пузырьков газов, поступающих вверх из донных отложений в морскую воду. Миграция газа здесь является, скорее всего, следствием сейсмотектонической активизации района и разложения газовых гидратов, находящихся на определенной глубине в донных отложениях, и обуславливает, в свою очередь, формирование “молодых” скоплений газовых гидратов в приповерхностных отложениях морского дна. Характерной особенностью этого района являются магматические диапиры, внедрившиеся в толщу осадочных пород либо достигшие дна. По мнению Л.П. Зоненшайна с соавторами [1987], магматические тела могли внедриться в толщу пород, содержащих газогидраты, и вызвать их разложение под воздействием тепла, тем самым обусловив выход газа с поверхности морского дна. Г.Д. Гинсбург, В.А. Соловьев и др. [1994, 2003] полагают, что в данном случае гидраты не разрушаются, а образуются. Мы же считаем, что эти процессы существуют одновременно. Согласно имеющимся сейсморазведочным данным [Бондаренко, Надежный, 1987], в районе газогидратопроявления на глубине около 200 м ниже поверхности дна, вероятно, располагается газовая залежь. На той же

глубине предполагается присутствие подошвы гидратсодержащей толщи – по маркирующему горизонту BSR, прослеженному и в 1994 г., а в верхнем (4 м) слое осадков в районе газовых выходов газовые гидраты определены непосредственно в результате отбора осадков гравитационной трубкой [Обжиров и др., 1999].

В районе северо-восточного сахалинского склона за весь период исследований выявлено около 400 выходов природного газа (преимущественно метанового состава) из донных отложений в воду и 11 структур, в которых отобраны газовые гидраты [Гинсбург, Соловьев, 1994; Cruise Reports ..., 1999; Kurile Okhotsk Sea ..., 2002; Матвеева, Соловьев, 2003; SO178-KOMEX Cruise ..., 2004; Мазуренко, 2004; Cruise Report CHAOS-1 ..., 2005; Обжиров и др., 2005б; Обжиров и др., 2006, Шакиров и др., 2016]. Газогидраты зафиксированы в керне донных осадков в результате отбора проб. Они встречены в виде линз, слоев, прослоев и их фрагментов, в том числе секущих осадочные слои по направлению движения потока газа (рис. 4).

Все образцы керна, отобранного с газифицируемых гидратоносных площадей, демонстрируют типичные осадочные разрезы [Kurile Okhotsk Sea ..., 2002; SO178-KOMEX Cruise ..., 2004; Комплексные ..., 2005]. Осадки включают слои илестых отложений, прослой гидротроилита, карбонатные конкреции и их образования; имеют сильный запах H_2S . Другой отличительной особенностью осадков является присутствие в них водо- и газонасыщенных горизонтов. Аналогично припарамуширскому газогидратному полю, в пределах северо-восточного сахалинского склона неоднократно фиксировалась граница BSR (рис. 5), которая характеризует подошву газовых гидратов, расположенную на глубине 200–300 м ниже поверхности дна в толще осадка [Cruise Reports ..., 1999; Kurile Okhotsk Sea ..., 2002; Обжиров, 2005б]. При этом отмечается подъем уровня верхней границы гидратсодержащих интервалов к поверхности раздела вода–осадок по мере приближения к центральным частям очагов газовых эманаций и, напротив, наблюдается увеличение ее поддонной глубины по мере удаления от газовых выходов. Так же как в прибрежье о. Парамушир, мы связываем это явление с образованием современных газогидратов в областях нарушения т. н. первичных (погребенных) гидратов, пространственно приуроченных к зонам разломов, которые являются проводниками и генераторами потоков метана. В периоды сейсмотектонической активизации происходит раскрытие разломов, усиление теплового потока и соответствующее нарушение термобарических условий стабильности газогидратов. Экспедиционные исследования 1998–2008 гг. показали, что узлы пересечений разрывных нарушений в пределах субмеридиональной разломной зоны являются основными структурами, которые

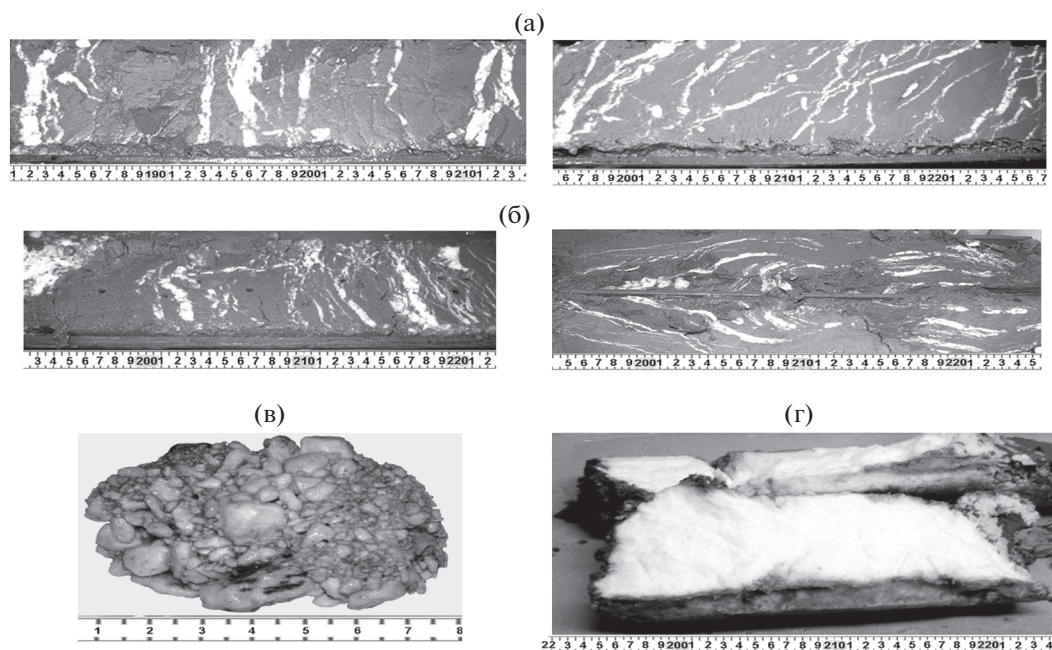


Рис. 4. Фрагменты морфологии и особенности залегания слоев газогидратов (белые слои), обнаруженных в верхних слоях донных осадков (глубины от поверхности дна 1–5 м). а, б — слои газогидратов в трещинах и песчаных накоплениях, в — конгломерат из фрагментов газогидратов, г — слой газогидрата толщиной 35 см, самый мощный из открытых в Охотском море.

определяют положение мощных выходов газа на северо-восточном шельфе, склоне о. Сахалин и во впадине Дерюгина.

Как известно, присутствие газа в гидратном состоянии в непосредственной близости от морского дна возможно только при условии его постоянного поступления снизу [Мониторинг метана ..., 2002, Матвеева, Соловьев, 2003]. Чем интенсивнее приток газа, тем на меньшей глубине от поверхности дна возможно образование газогидратов. Глубина моря в районах полей газогидратов вблизи о. Сахалин и о. Парамушир составляет от 385 до 1040 м (давление от 4 до 10 МПа), а температура у дна — 2.2–2.3 и 1.7–2.2°C соответственно [Зоненшайн и др., 1987; Ginsburg et al., 1993; Гинсбург, Соловьев, 1994; Обжиров и др., 2005б, 2006]. Обнаруженные во время экспедиций 2003–2005 гг. небольшие глубины залегания верхнего интервала гидратсодержащих осадков (0–0.4 м) в пределах северо-западного борта впадины Дерюгина, вероятно, свидетельствуют об усилении восходящего потока газа в эти годы, что согласуется с активизацией сейсмотектонических процессов в Охотоморском регионе [Обжиров и др., 2003, 2004, 2006].

В 2009 г. был изучен новый район подводной газовой разгрузки в Охотском море, расположенный южнее ранее открытых площадей газогидратопроявления и выходов природного газа из донных отложений в воду, в пределах северо-за-

падного сектора акватории [Operation Report ..., 2010]. Обнаружены аномалии (1000–2000 нл/л) метана в придонном слое воды. Исследованы осадочные донные отложения. В пределах “нового” южного района выявлены участки, перспективные на газогидратоносность (с повышенными концентрациями метана в осадке, творожистой структурой, установленной при визуальном об-

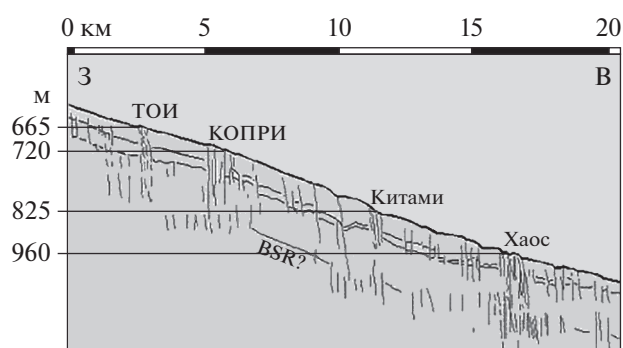


Рис. 5. Схематическая интерпретация фрагмента сейсмоакустического профиля LV36-54 через структуры ТОИ (Тихоокеанский океанологический институт), КОПРИ (Корейский институт полярных исследований), Китами и Хаос. Вертикальные линии — основные разрывные нарушения, нижняя наклонная — возможный BSR (Bottom Simulating Reflector (буквально “отражающая граница, повторяющая рельеф дна”). Данные В. Гладыша и Б. Смирнова [Обжиров и др., 2005б].

следовании поднятого материала и пр.). Однако в отличие от уже известной площади, признаки присутствия газогидратов здесь тяготеют к более глубоким горизонтам отложений, а проявления метана по концентрации меньше, чем в северной части. Возможно, это связано с глубинным нахождением газогидратов в этом районе.

В 2010 г. в пределах “нового” обширного района распространения газовых выходов [Operation Report ..., 2011], открытого в 2009 г. и расположенного к югу от ранее известной северной площади, обнаружены газогидратсодержащие отложения (на трех станциях). Также зафиксировано около 200 выходов пузырей метана из донных отложений в воду. В донных осадках, отобранных в районе газовых выходов, обнаружена аномальная концентрация метана (200 мл/л), которая в 1000–10000 раз превышает фон. В придонном слое воды в районе газовых потоков отмечена концентрация метана 2000–4000 нл/л, что превышает фон в 100 раз и более. Выявленные в донных осадках слои газогидратов обнаружены на глубине около 2 м ниже дна. Мощность газогидратсодержащей толщи составляет почти 1 м. Кроме того, геофизической съемкой выделены структуры с потоками газа и изменением поверхности дна с образованием неровностей, которые сформированы, вероятно, газо-флюидными потоками, поднимающимися из глубоких слоев осадочного чехла.

В 2012 г. впервые на юге Охотского моря в Курильской котловине обнаружены газовые гидраты [Operation Report ..., 2013]. В донных осадках, которые были отобраны в районе газовых выходов из морского дна, обнаружены аномальные концентрации метана (до 100 мл/л), которые превышают фон в 1000 и более раз. Кроме метана, в составе газа в небольших количествах присутствовали этан, пропан и углекислый газ.

В районе газовых выходов в придонном слое воды концентрация метана достигала 1000–2000 нл/л. При приближении к поверхности моря концентрация метана в воде снижалась почти до фоновой (30–40 нл/л) и на поверхности увеличивалась до 120–150 нл/л. Концентрации метана в воде, при отсутствии потока метана из донных отложений в воду, находятся в пределах фона.

В 2014 г. были детально изучены площади газогидратов, выявленные в двух предыдущих экспедициях 2012 и 2013 гг., а также осуществлялся поиск новых источников метана [Operation Report ..., 2015]. Опробование осадочной толщи выполнялось по профилям, в которых предыдущие экспедициями были выделены сейсмические аномалии, и на тех участках, где были выявлены новые зоны просачивания газа через морское дно. Две трубки были отобраны в районе газового выхода “Курильский” (рис. 6). Содержание мета-

на в осадке здесь соответствовало фоновому уровню. Этан являлся наиболее представительным, по сравнению с другими гомологами метана. Этот газ отсутствовал в приповерхностных горизонтах с низким содержанием метана, но с увеличением глубины концентрация этана и метана увеличивалась. Глубина опробования водной толщи в Курильской котловине составляла 2500 м. Распределение метана в водной колонке, так же как и в предыдущие годы, было неоднородным. Фактически все станции показали максимальные концентрации метана в придонных слоях воды.

Что касается источника метана газовых гидратов Охотского моря, то следует обратить внимание на то, что Дерюгинская депрессия (как наиболее представительная площадь для изучения газовых гидратов) расположена вблизи открытых и прогнозируемых нефтегазоносных площадей о. Сахалин и прилегающего к нему шельфа [Красный, 2001]. Подобная картина типична для многих гидратсодержащих площадей Мирового океана, например для Мексиканского залива. Подток метана из нефтегазовых залежей и угленосных отложений в исследованном регионе рассматривается нами как источник газа, поступающего в зону стабильности газогидратов, часть его преобразуется в гидратную фазу, а другая часть разгружается в воду в зонах нарушения морского дна. Результаты изотопного анализа углерода метана газовых гидратов северо-западного сектора Охотского моря указывают на их полигенетический характер ($\delta^{13}\text{C}$ составляет $-55\text{...}-65\text{‰}$). Для сравнения отметим, что основным источником метана газовых гидратов скопления Купарук Ривер–Прадхо Бей (Аляска) считаются катагенетические или еще более глубинные углеводороды [Дмитриевский, Валяев, 2004]. Значения $\delta^{13}\text{C}$ в метане составляют от -37 до -80‰ . По мнению авторов, они не укладываются в диапазон величин, который в традиционных представлениях соответствует микробному метану. Для такого метана характерен экстремально легкий изотопный состав ($\delta^{13}\text{C}$ до -110‰).

Обнаруженный в водной толще и осадках исследованной площади метан поступает из четырех источников [Шакиров и др., 2019]: 1) из реликтовых газовых гидратов в процессе их разрушения, 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 (углеметаморфогенный метан). Судя по сейсмостратиграфическим и геологическим исследованиям (“Дальморгеология”), газогидратоносный участок на северо-восточном склоне о. Сахалин в верхней части разреза сложен осадками, сформированными под влиянием стока р. Амур. Эти отложения

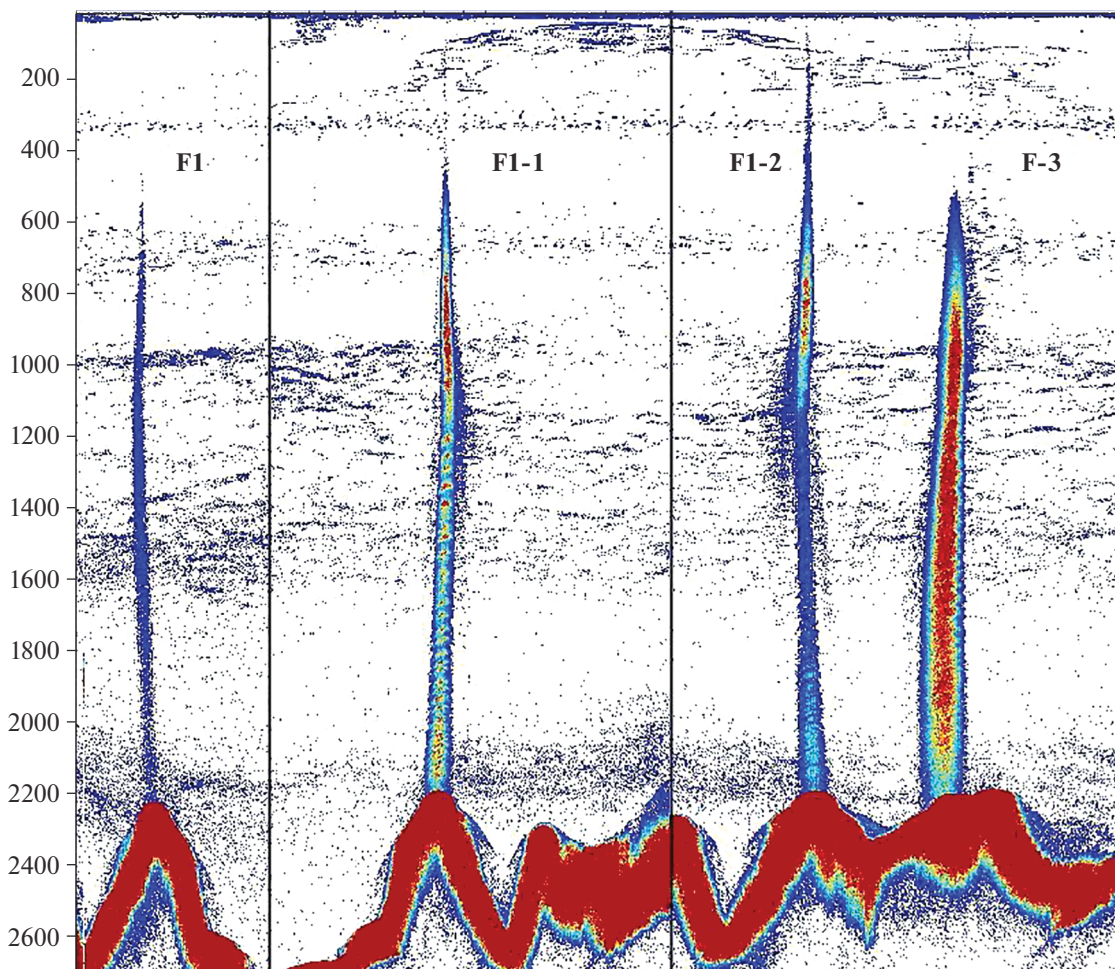


Рис. 6. Гидроакустическая аномалия, зафиксированная в районе газового выхода “Курильский” [Operation Report ..., 2013].

обогащены органическим веществом, что способствует активной деятельности микроорганизмов, в том числе метаногенных. В районе создается так называемый разбавляющий эффект для миграционных газов. Наибольшие концентрации органического углерода характерны для гидрат-содержащих 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]. Эти данные хорошо сопоставляются с результатами хромато-масс-спектрометрических исследований распределения высших углеводородов — их количество возрастает в очагах сосредоточенной разгрузки газов [Обжиров, Шакиров, 2012]. Молекулярный состав газогидратного газа (соотношения в углеводородной фракции) указывает на преимущественно термогенно-микробную смесь газов.

Убедительным доводом в пользу смешанного состава метана газовых гидратов (микробного и

термогенного) северо-восточного сахалинского склона служит и тот факт, что благоприятные условия ($P-T$ условия и источник вещества — микробная деятельность) для гидратообразования существуют практически вдоль всего восточного побережья о. Сахалин. Однако обнаруженные скопления газовых гидратов тяготеют именно к участкам тектонических нарушений Охотского моря, по которым мигрируют газы из глубоких горизонтов донных отложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Охотское море является природным объектом, сочетающим в себе весь необходимый набор факторов и условий для реализации процессов формирования—разрушения газовых гидратов: развитие достаточно мощных осадочных толщ, содержащих жидкие и газообразные углеводороды, в районах скопления газовых гидратов; присутствие разрывных нарушений; геодинамическая

активность, а также повышенная сейсмичность соответствующих территорий Охотоморского региона. Их сочетание является благоприятным для возникновения очагов подводной газовой разгрузки и связанных с ней аномальных полей метана в донных осадках и водной толще акватории.

Изотопный состав газовых гидратов и карбонатных образований верхних интервалов донных отложений и их приуроченность к активным разломным зонам позволяют рассматривать газовые гидраты Охотского моря как смешанные образования (термогенный газ в сочетании с микробным), в формировании которых не исключена роль метана из нефтегазоносных и угленосных отложений региона.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках госзаданий ТОИ ДВО РАН (номер гос. регистрации 121021500055-0 и АААА-А19-119122090009-2), а также частично по гранту РФФИ № 20-55-50005 ЯФ-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бессонова Е.А.* Области кратковременной активизации сейсмичности в земной коре острова Сахалин // Вопросы геоморфологии и тектоники западной Пацифики. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 16–20.
- Бессонова Е.А., Изергин В.Л., Никифоров В.М.* Пространственно-временная миграция сейсмичности в земной коре Северного Сахалина // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений // Тезисы докл. I Российско-Японского семинара, 26–29 сентября 2000 г. Хабаровск, 2001. С. 67–71.
- Бондаренко В.И., Надежный А.М.* Акустические неоднородности верхней части осадочного чехла в районе подводного газогидротермального выхода у о-ва Парамушир и возможная их природа // Вулканология и сейсмология. 1987. № 2. С. 100–104.
- Веселов О.В., Грецкая Е.В., Ильев В.Э. и др.* Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря: к 60-летию основания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. М.: Наука, 2006. 130 с.
- Газогеохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря / Ред. А.И. Обжиров и др. Владивосток: Дальнаука, 1999. 184 с.
- Геологическая карта России и прилегающих акваторий. Масштаб: 1 : 10000000. Серия: обзорные карты Российской Федерации масштаба 1 : 10000000 / Ред. И.М. Гашева, Б.Г. Лопатин, Р.И. Соколов. М.: ФГУП “ВСЕГЕИ”, 1995.
- Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А.* Субмаринные газовые гидраты. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. 199 с.
- Дегазация Земли и геотектоника // Тезисы докладов II Всесоюзного совещания / Отв. ред. П.Н. Кропоткин. М.: Наука, 1985. 199 с.
- Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М.* Распространение и ресурсы метана газовых гидратов // Наука и техника в газовой промышленности. 2004. № 1–2. С. 5–13.
- Зоненшайн Л.П., Мурдмаа И.О., Баранов Б.В. и др.* Подводный газовый источник в Охотском море к западу от о-ва Парамушир // Океанология. 1987. Т. 27. Вып. 5. С. 795–800.
- Комплексные геологические, гидрологические, газогеохимические и геофизические исследования в районе распространения газовых гидратов в Охотском море // Отчет по результатам экспедиционных исследований по проекту “СНАОС-2” в 36 рейсе НИС “Академик М.А. Лаврентьев”, 21 мая–10 июня 2005 г. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2005. 123 с.
- Комплексные геологические, гидрологические, газогеохимические и геофизические исследования в районе распространения газовых гидратов в Охотском море // Отчет по результатам экспедиционных исследований по проекту “СНАОС-3” в 39 рейсе НИС “Академик М.А. Лаврентьев”, 24 мая–19 июня 2006 г. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2006. 62 с.
- Красный М.* Охрана природы, мониторинг и обустройство сахалинского шельфа. Южно-Сахалинск: Русское географическое общество, Сахалинское отделение, 2001. 180 с.
- Мазуренко Л.Л.* Газогидратообразование в очагах разгрузки флюидов / Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2004. 27 с.
- Матвеева Т.В., Соловьев В.А.* Газовые гидраты Охотского моря: закономерности формирования и распространения // Журнал Росс. хим. общества им. Д.И. Менделеева. 2003. Т. 47. № 3. С. 101–111.
- Мониторинг метана в Охотском море / Отв. ред. А.И. Обжиров и др. Владивосток: Дальнаука, 2002. 247 с.
- Мясникова Г.П., Шпильман А.В.* Дегазация Земли и формирование месторождений нефти и газа // Вестник недропользователя Ханты-Мансийского автономного округа. 2003. № 10. С. 10–11.
- Обжиров А.И., Казанский Б.А., Мельниченко Ю.И.* Эффект звукорассеивания придонной воды в краевых частях Охотского моря // Тихоокеан. геология. 1989. № 2. С. 119–121.
- Обжиров А.И., Кулинич Р.Г., Бессонова Е.А., Мельниченко Ю.И.* Газогидротермальные явления вулканотектонических структур восточно-азиатских морей // Вулканизм и геодинамика // Материалы III Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2006. Т. 3. С. 741–745.
- Обжиров А.И., Мустафин И.А.* Литофациальные и геохимические условия нефтегазоаккумуляции в неогеновых отложениях Северо-Сахалинской нефтегазоносной области // Новые данные по геологии западной части Тихого океана / Отв. ред. Ю.И. Коновалов. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. С. 167–172.
- Обжиров А.И., Салюк А.Н., Шакиров Р.Б. и др.* Потоки метана и газовые гидраты Охотского моря // Наука и техника в газовой промышленности. 2004. № 1–2. С. 20–25.
- 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.
- Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Агеев А.А. и др.* Соприженность грязевого вулканизма в прибрежной полосе восточного побережья Сахалина и потоков метана в Охотском море // Подводные технологии и мир океана // Научно-технический журнал о проблемах освоения Мирового океана. М.: ФГУП МКБ “Электрон”, 2005а. № 3. С. 24–34.

- Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Саломатин А.С. и др. Метод поисков газогидратов и аномальных газогеохимических полей в морях и на суше // Технические проблемы освоения Мирового океана // Материалы Международной научно-технической конференции, 14–17 сентября 2005 г. Владивосток: Дальнаука, 2005б. С. 149–155.
- Харахинов В.В. Тектоника Охотоморской нефтегазонасыщенной провинции / Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Оха-на-Сахалине: Сахалинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт, 1998. 77 с.
- Шакиров Р.Б. Аномальные поля метана в Охотском море и их связь с геологическими структурами / Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2003. 23 с.
- Шакиров Р.Б., Обжиров А.И., Шакирова М.В., Мальцева Е.В. О газогидратах окраинных морей Восточной Азии: закономерности генезиса и распространения (обзор) // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 1. С. 65–106.
- Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И. Распределение гелия и водорода в отложениях и воде на склоне о.Сахалин // Литология и полез. ископаемые. 2016. № 1. С. 68–81.
- Bird P. An updated digital model of plate boundaries // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2003. V. 4. P. 1027. <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- Cruise Report CHAOS-1: RV Academic M.A. Lavrentyev, cruises 31 and 32 / Eds T. Matveeva, V. Soloviev, H. Shoji, A. Obzhairov. St. Petersburg: VNIIOkeangeologia, 2005. 164 p.
- Cruise Reports: KOMEX I and II. RV “Professor Gagarinsky”. Cruise 22. RV “Akademik M.A. Lavrentyev”. Cruise 28. GEOMAR Report 82 INESSA / Eds. N. Biebow, E. Huettner. Kiel, Germany, 1999. 188 p.
- Ginsburg G.D., Soloviev V.A., Cranston R.E. et al. Gas hydrates from the continental slope, offshore Sakhalin Island, Okhotsk Sea // *Geo-Marine Lett.* 1993. V. 13. P. 41–48.
- Kurile Okhotsk Sea Marine Experiment (KOMEX II). Cruise Report: RV “Akademik Lavrentyev”, cruise 29. Leg 1–2 / Eds N. Biebow, R. Kulinich, B. Baranov. Kiel, Germany, 2002. 190 p.
- 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 / Cruise Report CHAOS-1: RV Academic M.A. Lavrentyev, cruises 31 and 32 / Eds T. Matveeva, V. Soloviev, H. Shoji, A. Obzhairov. St. Petersburg: VNIIOkeangeologia, 2005. P. 47–60.
- Mazurenko L.L., Obzhairov A., Shoji H. et al. Hydro-Carbon Hydrate Accumulations in the Okhotsk Sea (CHAOS-II Project). Report of R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 36. Vladivostok–St. Petersburg, 2006. 127 p.
- Nelson C.H., Thor D.R., Sandstrom M.V., Kvenvolden K.A. Modern biogenic gas-generated craters (sea-floor “pockmarks”) on the Bering Shelf, Alyaska // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1979. V. 90(1). P. 1144–1152.
- Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project II, 2014, R/V Akademik M.A. Lavrentyev, cruise 67, June 17–July 3, 2014 / Eds Y.K. Jin, H. Minami, B. Baranov, A. Obzhairov. Korea: Korea Polar Research Institute, 2015. 121 p.
- Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2009, R/V Akademik M.A. Lavrentyev, cruise 47 / Eds H. Shoji, Y.K. Jin, A. Obzhairov, B. Baranov. Kitami, Japan: New Energy Resources Research Center Kitami Institute of Technology, 2010. 136 p.
- Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2010, R/V Akademik M.A. Lavrentyev, cruise 50 / Eds Y.K. Jin, H. Shoji, A. Obzhairov, B. Baranov. Korea: Published by Korea Polar Research Institute, 2011. 129 p.
- Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2012, R/V Akademik M.A. Lavrentyev, cruise 59 / Eds Y.K. Jin, H. Shoji, A. Obzhairov, B. Baranov. Korea: Korea Polar Research Institute, 2013. 163 p.
- SO178-KOMEX Cruise Report: RV SONNE. Mass exchange processes and balances in the Okhotsk Sea / Eds W.-Chr. Dullo, N. Biebow, K. Georgeleit. Kiel, Germany, 2004. 125 p.

Geological Conditions of the Formation and Destruction of Gas Hydrates in the Sea of Okhotsk: Aspects of Tectonics and Genesis

A. I. Obzhairov¹*, N. L. Sokolova¹** , Yu. A. Telegin¹***

¹*Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Baltiyskaya str., 43, Vladivostok, 690041 Russia*

*e-mail: obzhairov@poi.dvo.ru

**e-mail: natap81@mail.ru

***e-mail: telegin@poi.dvo.ru

The research object in this paper is the Sea of Okhotsk, where gas hydrate fields and active underwater gas discharge areas were found. The study of the geological conditions of the formation and dissociation of gas hydrates and their relations with methane fluxes is relevant both for the Sea of Okhotsk and for understanding these processes in the World Ocean. The study results of the distribution of natural gases and associated with them gas hydrates in the Sea of Okhotsk are presented here. The geological conditions for the formation of anomalous fields of methane and other gas components (C₂–C₄, CO₂) were studied, their sources and the influence of seismic-tectonic activations in the region on the gas migration from deep horizons to the surface in the sedimentary basin of the Sea of Okhotsk were determined.

Keywords: the Sea of Okhotsk, methane, gas hydrates, methane sources.