

Геологическая история формирования газогидратов

Обжиров Анатолий

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева (ТОИ) ДВО РАН

DOI: 10.5281/zenodo.5497547



Введение

Базой для современных научных исследований всегда являются научные и практические достижения нас и наших коллег в различных областях знаний, в том числе, в прошлом. Важным является изучение условий формирования газогидратов, их физико-химические особенности, влияние на окружающую среду и возможность использования в энергетических и других целях. В лаборатории Газогеохимии ТОИ ДВО РАН под руководством автора был разработан комплекс исследований в Охотском и других морях Мирового Океана, который использовался для изучения условий формирования и разрушения газогидратов. Комплекс представлен геологическими, геофизическими, гидроакустическими, океанологическими, газогеохимическими, батиметрическими исследованиями. Изучаются источники метана, которые участвуют в образовании газогидратов, определяется взаимосвязь потоков метана из донных отложений в воду и газогидратов, оценивается поступление метана в атмосферу. В результате исследований установлено, что основным источником потоков метана, образующим газогидраты, являются нефтегазосодержащие породы, возможно, мантийные и угленосные углеводородные газы. Потоки углеводородных газов мигрируют из недр к поверхности по зонам разломов, особенно в периоды сейсмо-тектонических активизаций. Закономерности формирования газогидратов в Охотском море являются общими с распространением их в Мировом океане.

Потоки метана и газогидраты являются одним из важных процессов развития геосферы, гидросферы и атмосферы Земли. Они взаимосвязаны с процессами сейсмотектонической активизации, формированием нефтегазовых залежей, морфоструктур морского дна, землетрясений, цунами и процессами глобального изменения (потепления) климата. В геологической истории Земли газогидраты могли играть роль консервации углеводородов в периоды похолоданий и перераспределение их в периоды потеплений. При низкой температуре формировались газогидраты, которые являлись хорошими покрывками, препятствующими миграции углеводородов к поверхности. Под ними формировались газовые залежи. В процессе накопления осадков за геологическое время, в связи с увеличением температуры с глубиной погружения, согласно геотермическому градиенту, газогидрат превращался в газ, при этом формировался коллектор. Метан и тяжелые углеводороды из газогидратов мигрировали по зонам разломов к поверхности и снова образовывали при низкой температуре газогидрат. Так проходил круговорот углеводородов и газогидратов с образованием залежей углеводородов. Интересно и важно рассмотреть этот процесс на примере формирования газогидратов в Охотском

море, который достаточно хорошо изучен сотрудниками ТОИ.

История исследований газогидратов лабораторией газогеохимии

Начиная с 1984 года, сотрудниками лаборатории Газогеохимии изучается распределение природных газов в донных осадках и воде Охотского моря. В результате были обнаружены аномальные поля метана и тяжелых углеводородов в придонной воде, которые использовались как индикаторы для прогноза залежей нефти и газа. В этот период были открыты потоки пузырей метана из донных отложений в воду в Охотском море, и их изучением заинтересовались ученые из Германии и других зарубежных стран [1,2,3]. С 1998 по 2012 годы эти исследования продолжались по трем международным проектам: Российско-Германскому (ГЕОМАР, 1998-2004 гг.), Российско-Японско-Корейскому ХАОС (2003-2006 гг.) и Российско-Японско-Корейскому САХАЛИН (2007-2012 гг., 2013-2017гг.). В результате комплекса геолого-геофизических, гидроакустических, газогеохимических и океанологических исследований в научных морских экспедициях по международным проектам были обнаружены газогидраты на 17 площадях в Охотском море, выявлены геолого-геофизические, гидроакустические, газогеохимические закономерности формирования и разрушения газогидратов. Представим обнаруженные закономерности с акцентом использования их для дискуссии об основном источнике метана газогидратов.

Как уже отмечалось, в комплексе исследований в морских экспедициях использовалось сочетание стандартных геолого-геофизических методов (структурного, литолого-фациального, тектонического, стратиграфического, сейсмо- и электроразведки, акустики и др.) для анализа геологического контроля потоков углеводородных флюидов. Выполняется отбор проб воды и донных осадков для извлечения и анализа газов. Определяются углеводородные газы (C1-C4), CO₂, He, H₂, O₂, N₂ газовыми хроматографами. Проводится [2,3]. увязка локальных зон газогидратной флюидной разгрузки с контролирующими структурами первого и второго порядков, включая региональные линейменты. Выполняется анализ пространственной и генетической связи газогидратного скопления с соседствующими нефтегазовыми залежами на присахалинском шельфе с запада и газонасыщенными осадками глубоководной части впадины Дерюгина с востока. С помощью многолучевого эхолотирования на разных частотах детально изучаются характеристики дна района исследований. По результатам составляется карта специфических для газовых потоков морфоструктур, считается количество потоков пузырей газа (метана) и рассчитывается величина эмиссии метана с газогидратных участков из донных осадков в воду и. частично в атмосферу.

Аномалии метана и связь их с газогидратами и нефтегазоносностью

В настоящее время ученые активно обсуждают процесс формирования - разрушения газогидратов в морских условиях. Один из основных вопросов, который до сих пор является актуальным, – источник метана, образующий газогидраты. Если им является термогенный метан нефтегазосодержащих отложений, который мигрирует из глубоких слоев к

поверхности и образует газогидраты в зоне его стабильности, то соответственно это характеризует высокий объем потока метана в верхние слои донных отложений, в воду и из воды в атмосферу. Это связано с количеством его запасов в недрах. Если принять за источник метана современный микробный процесс, то расчет его количества должен основываться на этом источнике.

На основе многолетних наблюдений выявлены особенности распределения метана в различных геологических условиях и структур Охотского моря. Сравнение этих характеристик важно для понимания источника и объема выделения метана из недр к поверхности осадков, в воду и в атмосферу. Изучение аномальных полей метана (АПМ) и анализа их распределения были выявлены следующие особенности закономерности их распределения в водной толще Охотского моря. Так, на протяжении всего восточного шельфа о. Сахалин, включая залив Терпения, существует сквозное устойчивое аномальное поле метана с концентрациями порядка 1000-4000 нл/л (рис. 1). Эти данные используются нами, как критерии поиска газогидратов, нефтегазовых залежей и расчета объема метана, который поступает в атмосферу и может влиять, как «парниковый» газ на глобальное изменение (потепление) климата.

Максимальные концентрации метана в нижних горизонтах водной толщи восточного присахалинского шельфа возрастают в восточном направлении от мелководья к бровке шельфа. На глубинах до 70-100 м чаще встречаются порядка 500-1000 нл/л, а на глубинах 100-200 м — 3000-4000 нл/л. На восточном и юго-восточном склоне о. Сахалин сквозной тип АПМ переходит в комбинированный тип. Далее, к востоку от о. Сахалин у подножия его склона, на фоне общего снижения АПМ вплоть до фоновых значений наблюдаются устойчивые подповерхностные АПМ, наблюдаемые в подповерхностном слое наиболее низких температур. Так в толще вод может проявляться аддитивный характер аномального поля ме-

тана. Максимальные концентрации метана в промежуточных горизонтах толщи вод восточно-сахалинского склона варьируют в зависимости от сезона года. Так, АПМ весной (май, 1999) значительно превышают таковые осенью, что, по-видимому, обусловлено сезонными особенностями гидрологического режима и динамики вод этой области Охотского моря. Аномальное поле метана плавно переходит в фоновое в центральной глубоководной области Охотского моря и в южной и восточной частях Курильской котловины. При этом в западной глубоководной части Охотского моря, у подножия юго-восточного склона о. Сахалин, и в северо-западной части Курильской котловины сохраняется устойчивое подповерхностное АПМ со значениями 150-300 нл/л, что, по-видимому, объясняется сносом метана из области восточного шельфа и склона о. Сахалин Восточно-Сахалинским течением.

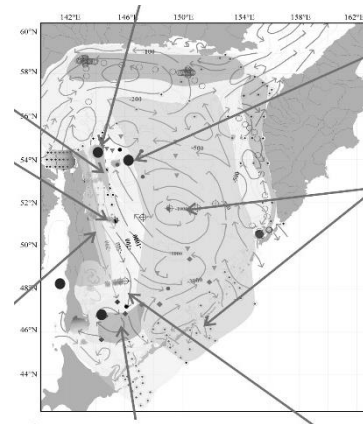


Рис. 1 Геолого-структурная характеристика участков с выходами метана в Охотском море и на о. Сахалин. Стрелками показаны участки аномальных полей метана, черные точки-районы, где обнаружены газогидраты.

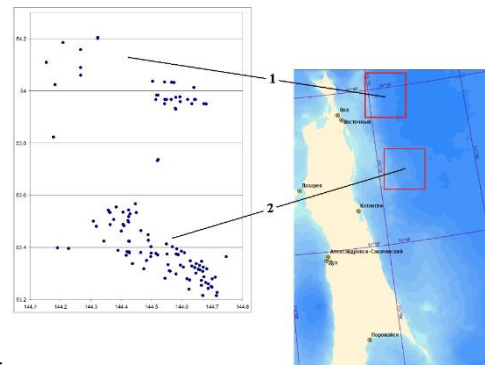
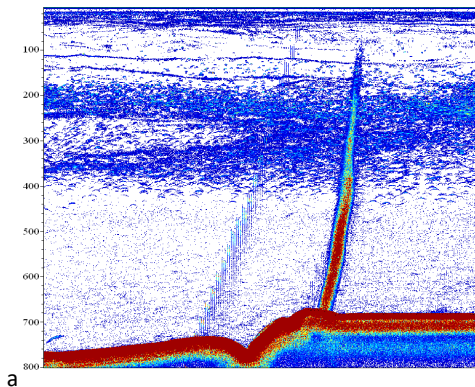


Рис. 2 а) Гидроакустическая запись выхода пузырей метана (субвертикальное тело) из донных отложений в воду на Сахалинском северо-восточном склоне Охотского моря (запись А.С.Саломатина, 2011);
 б) точки – выходы пузырей метана на Сахалинском северо-восточном склоне Охотского моря.

Первый поток метана из донных отложений в воду был обнаружен нами в 1988 году в западной части Охотского моря на глубине моря 700 м. За период исследований с 1988 по 2017 г. обнаружено более 500 выходов пузырей метана из донных отложений в воду (рис. 2 а, б). При выходе в водную толщу поток метана представляет собой большое количество пузырей, поднимающихся от дна субвертикально к поверхности. Экспедиция 1991 года в этом районе обнаружила уже около 10 таких потоков пузырей метана, а в донных осадках на площади выхода пузырей метана, зафиксированном в 1988 году, были открыты газогидраты (рис. 3) [4,5,6].



Рис. 3. Газогидраты (белые слои) в керне донных осадков в нижней части колонки LV50-29 на северо-восточном склоне Охотского моря.

Существует две точки зрения на источники формирования газогидратов. В метане, образованном за счет продукции бактерий, при этом метан содержит больше легкого изотопа углерода ^{12}C и $\delta^{12}\text{C}/\text{C}^{13}$ составляет $-70\text{...}-110\text{‰}$. В процессе термогенного образования метана из органического вещества осадочных отложений $\delta^{12}\text{C}/\text{C}^{13}$ составляет $-30 - -40\text{‰}$. Одни исследователи считают, что основным поставщиком метана для образования газогидратов является современный микробный метан. Их доводы основаны на анализе изотопного состава углерода метана газогидратов, в котором $\delta^{12}\text{C}/\text{C}^{13}$ составляет $-55 - 65\text{‰}$. Другие исследователи, включая нас, считают, что преобладающим поставщиком метана газогидратов является термогенный метан нефтегазовых залежей. По нашему мнению, изотопный состав углерода не полностью отражает генезис метана. Во-первых, изотопный состав углерода ($\delta^{12}\text{C}/\text{C}^{13} = -55 - 65\text{‰}$) указывает на возможную смесь термогенного и микробного метана, во-вторых, существуют работы [2], в которых указывается возможность вторичных процессов микробной переработки термогенного метана микробами и облегчение в этом случае изотопного состава углерода. В тоже время, на то, что метан является термогенным, указывает наличие в Охотском море нефтегазовых залежей и мощной толщи осадочных отложений с нефтегазосодержащими слоями, нарушенными зонами разломов, по которым метан мигрирует к поверхности. В зоне благоприятной по давлению и температуре для образования газогидратов, формируются слои газогидратов, которые являются и покрывкой, и резервуаром углеводородов.

Еще одним доводом в пользу термогенного метана является то, что в Охотском море газогидраты встречены на локальных участках, приуроченных к зонам разломов. Если бы источником метана был бы микробный метан, то газогидраты должны были бы формироваться на всей площади акватории. Все это позволяет говорить о том, что метан нефтегазосодержащих пород является источником газогидратов. Примером такой сопряженности газогидратов и нефтегазовых залежей являются геологические особенности нефтегазовых месторождений Прадхо-Бей и Купарук-Ривер Аляски. На них газ из нефтегазосодержащих пород по зоне разлома поднимается вверх и в зоне, благоприятной по давлению и температуре для образования газогидратов, формируются слои газогидратов, которые являются и покрывкой, и резервуаром углеводородов [7,8].

Современные геологические процессы и связь их с мортектоникой

Метан и тяжелые углеводороды ($\text{C}_2\text{-C}_4$) по зонам разломов мигрируют из нефтегазосодержащих слоев к поверхности. Количество потока углеводородных газов к поверхности усиливается в период сейсмо-тектонической активизации. В процессе наших наблюдений по газогеохимическим критериям было установлено увеличение сейсмической активности в окраинных морях западной части Тихого океана с 1988 года, которое продолжается и в настоящее время. В районе образования газогидратов поверхность донных осадков нарушается. Во-первых, газогидраты внедряются в слои осадков, увеличивая их мощность, создавая бугорки на поверхности осадка. Во-вторых, стабильность газогидратов нарушается при небольших изменениях давления и температуры. При уменьшении давления и повышении температуры газогидраты начинают разрушаться и 1 м^3 газогидрата превращается в 165 м^3 метана. При этом происходит нарушение поверхности дна, образуются на поверхности бугры и

ямки глубиной 10-20 м, случаются оползни. В районе выходов потока метана концентрация метана в донных осадках достигает 50-100 мл/кг осадка, что превышает фоновое его количество в 100000 раз.

По данным статистики за последние 15 лет только на континентах случилось столько землетрясений, сколько за прошедшие полтора столетия. Линейные градиенты силы тяжести ограничивают структуры и отражают нарушения коры, которые относятся к категории глубинных разломов. Они перекрываются рыхлыми осадками, мощность которых достигает несколько тысяч метров. Возникающие при взаимодействии плит тектонические напряжения получают разрядку и частично гасятся (демпфируются) в региональном или локальном масштабе полей деформаций и далее не распространяются. Они влияют на строение осадков и иногда выражаются в микрорельефе поверхности, что служит признаком недавних тектонических событий. Поэтому зоны разломов (линеаменты) выполняет функцию своеобразного динамического буфера, где напряжения выражаются в дискретном распределении сейсмических событий. Хонсю-Сахалинский сегмент встраивается в границы Амурской, Охотоморской, Филиппинской и Тихоокеанской плит, иногда отдельно выделяется Япономорский геоблок.

Усиление активности метановых эманацій на морском дне проявляется также в увеличении числа их источников. Множество новых гидроакустических аномалий обнаружено в 29 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в июне 2002 г., который сопровождался сейсмической активностью региона. Она стала вероятной причиной роста количества выходов метана и одновременного увеличения его концентраций в воде. К 2004 г. на шельфе и в котловине Дерюгина их было выявлено уже более сотни. Всего за время наших газогеохимических исследований обнаружено к 2017 году более 500 выходов пузырей метана из донных отложений в воду и из воды частично в атмосферу.

Указанные изменения в эманациях метана наблюдались после отмеченных выше пиков сейсмической активности, т.е. после динамической «встряски» тектонической системы и раскрытия разломов. Сопоставление сейсмической динамики с изменениями активности метановых эманацій показывает существование их взаимосвязи. В результате многолетних наблюдений оказалось, что увеличение количества выходов метана и его концентраций в водной толще взаимосвязано с ростом межгодовой динамики коровой сейсмичности Сахалина, например, по наблюдениям с 1985 по 2002 годы. Расчет сделан по 247 эпизодам землетрясений магнитудой больше 3. По 457 эпизодам землетрясений подсчитана выделенная энергия землетрясений с магнитудой от 2.1 до 6.7. Кривые распределения энергии землетрясений, динамики сейсмичности хорошо коррелируют с кривыми распределения количества выходов пузырей метана и его концентрациями в придонной воде. При сейсмо-тектонической активизации разломные зоны раскрываются и становятся путями миграции газа. Его источником могут быть разрушающиеся нефтегазовые и газогидратные залежи, поступление газа с высоким содержанием водорода и углеводородов из мантии, наличие остаточной или продолжающейся вулканической деятельности [9, 10, 11, 12].

Заключение

Таким образом, согласно нашим исследованиям в Охотском море, следует сделать вывод, что основным источником метана в этом регионе, является термогенный метан нефтегазосодержащих слоев нефтегазовых месторождений. Метан по зонам разломов поступает из недр к поверхности и в зоне стабильности газогидратов, в районе метановых потоков в донных осадках, образуются газогидраты. Изотопный состав углерода метана изменяется (облегчается) в связи

с его фракционированием в процессе микробной переработки термогенного метана - окисления и вновь образования в подповерхностных слоях донных осадков.

В период сейсмо-тектонической активизации по разломам из нефтегазодержащих слоев метан мигрирует в верхние слои донных осадков, где образуются газогидраты в условиях их стабильности (низкой температуры и высокого давления). В то же время, газогидраты являются хорошей крышкой, консервируют углеводородные газы и тем самым способствуют формированию нефтегазовых залежей. В определенное геологическое время в период накопления осадков в море, газогидраты опускаются глубже, где температура повышается и они снова переходят в газ. Часть этого газа затем по разломам переходит в верхние слои донных осадков и образует вновь газогидраты.

Проведенные исследования показывают, что выявленное в результате многолетнего мониторинга, усиление газогидротермальной активности в Охотском море, связанного с общим тектоническим оживлением земной коры в переход-

ной области от Азии к Тихому океану. Эманация и концентрации метана и сопутствующих газов в приповерхностных слоях коры могут служить своеобразной "смазкой" или "подушкой", способствующей сдвигу и резкому перемещению блоков коры относительно друг друга, что облегчает возникновение землетрясений и цунами в условиях сейсмической активизации при имеющихся тектонических напряжениях. Их следует рассматривать, как один из факторов усиления геодинамического эффекта. Поэтому газогеохимические поля и газо-гидротермальные источники можно использовать для оценки прогноза сейсмической активности региона, картирования зон активных разломов, поиска залежей углеводородов и газогидратов. Эти исследования являются важной базой для продолжения исследований в этом направлении в Мировом океане, в том числе проведения экспериментальных работ, что даст возможность уточнить процесс формирования газогидратов и использования новых знаний для оценки влияния их на экологию, формирования залежей углеводородов и участия в геологических процессах на Земле.

Литература:

1. Кулинич Р.Г., Бессонова Е.А., Обжиров А.И. О корреляции метановых эманаций со структурой фундамента северо-восточного шельфа и склона о.Сахалин и сейсмической активностью региона // Дальневосточные моря России. Кн. 3. М.: Наука, 2007. С. 277-285.
2. Леин А.Ю. Биохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
3. Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.
4. Обжиров А.И., Казанский Б.А., Мельниченко Ю.И. Эффект звукорассеивания придонной воды в краевых частях Охотского моря // Тихоокеанская геология, 1989. №2. С. 119-121.
5. Обжиров А.И., Телегин Ю.А. Метан нефтегазодержащих пород – основной источник формирования газогидратов в Охотском море // Газохимия. № 1, 2011. С.44-49.
6. Соловьев В.А., Гинзбург Г.Д., Обжиров А.И., Дуглас В.К. Газовые гидраты Охотского моря // Отечественная геология. 1994. С. 190-197.
7. Collett T. Natural gas production from Arctic gas hydrates // The future of energy gases. US geological survey professional paper. 1993. № 1570. P. 299-311.
8. Young Keun Jin, Young-Gyun Kim, Boris Baranov, Hitoshi Shoji and Anatoly Obzhiriv. Distribution and expression of gas seeps in a gas hydrate province of the northeastern Sakhalin continental slope, Sea of Okhotsk // Marine and Petroleum Geology 28 (2011) 1844-1855.
9. Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Мельников О.А., Копанина А.В. Вариации параметров грязевулканической деятельности и их связь с сейсмичностью юга острова Сахалин // Региональная геология и металлогения. 2010. № 42. С. 49–57.
10. Мельников О.А., Ильев А.Я. О новых проявлениях грязевого вулканизма на Сахалине // Тихоокеан. геология. 1989. № 3. С. 42–49.
11. Прасолов Э.М., Лобков В.А., Якуцени В.П. Интенсивность и глубина генерации метана в земной коре (по изотопным данным) // ДАН СССР. 1980. Т. 252, № 6. С. 1476–1479.
12. Сорочинская А.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И., Зарубина Н.В., Карабцов А.А. Геохимические и минералогические особенности грязевых вулканов острова Сахалин: о результатах исследования 2001, 2005 и 2006 годов // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 4. С. 58–65.