

Marine gas hydrate electromagnetic signatures in Cascadia and their correlation with seismic blank zones**Электромагнитные исследования морских газогидратов в Каскадии и их связь с зонами сейсмической тени**

Katrin Schwalenberg¹, Eleanor Willoughby², Reza Mir¹, и R. Nigel Edwards¹ рассказывают о недавних практических исследованиях методом потенциального морского э/м контролируемого источника с целью поиска и оценки газогидратов на окраине Каскадии на западном побережье Канады.

Методы морских электромагнитных исследований с контролируемым источником (CSEM) стали очень важным и ценным инструментом для определения местоположений углеводородов на шельфе. Нефть, газ и газогидраты увеличивают сопротивление содержащих их пород, если они формируются в достаточном количестве в породах с высокой пористостью. На окраине Каскадии к западу от острова Ванкувер Британской Колумбии ведется интенсивное изучение газогидратов, которые выделяются по сейсмическим разрезам с применением анализа проб керна и каротажа, полученного в рамках программы океанического бурения (ODP).

Газогидрат является источником большого количества метанового газа и рассматривается, как важнейший источник энергии в будущем. Летом 2004 года мы провели морской CSEM эксперимент в районе точки 889 и 890 программы океанического бурения (ODP) на площади, содержащей несколько больших территорий до сотен метров в диаметре, которые содержали области сейсмической тени. Мы использовали корабль с вышкой, электромагнитную импульсную систему диполь-диполь, разработанную в Университете Торонто. Коса из приемников и источников была размещена вдоль профиля на дне. Текущий сигнал, имеющий прямоугольный вид, был сформирован на бортовом источнике и послан через коаксиальный стальной кабель на диполь источника, находящегося на морском дне. Коса приемников состояла из пары электродов серебро - хлорид серебра, которые были снабжены собственным усилителем, часами, процессором и памятью для хранения данных. Простой анализ полученных данных показывает повышения сопротивления над неизученными зонами. Сопротивление возрастает от фоновых значений с 1.1 Ωm - 1.5 Ωm до более чем 5 Ωm . Эти значения являются высоко аномальными для морского дна. Мы полагаем, что аномалии в этих неизученных зонах можно объяснить концентрацией залежей газогидратов, сопровождаемых, возможно, свободным газом. Количество нефти в аномальных зонах оценивается до 50% от доступного порового пространства (средняя величина 25%), а содержание газа в каждой зоне может достигать миллиардов кубических метров.

¹ Department of Physics, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada, M5S1A7.

² Geological Survey of Canada, Pacific Geoscience Centre, 9860, West Saanich Road, Sidney, BC, Canada, V8L4B2.

Введение

На протяжении двух десятилетий в районе залежей газогидратов в шельфовой зоне Каскадии острова Ванкувер проводится большое количество исследовательских проектов и морских экспериментов. Природные газогидраты, первоначально открытые на Арктических территориях в условиях вечной мерзлоты, представляют собой твердые тела, похожие на ледовые блоки, которые встречаются по всему миру на дне океанов, вдоль континентальных окраин. Они состоят из газовых молекул, преимущественно метанового состава, имеющих решетчатую кристаллическую структуру молекул воды. Эти образования формируются при низких температурах и высоких давлениях, обычно в первых сотнях метров осадков на глубине около 500 м. Общие запасы замерзшего метана превосходят все известные на сегодняшний день запасы ископаемых углеводородов. В чистом виде гидраты обладают огромным потенциалом, как источник энергии будущего (Kvenvolden 1993;1999). Метан также является очень сильным парниковым газом и может вызвать глобальное потепление, в случае если он попадет в верхние слои атмосферы. Залежи газогидратов в общем случае могут быть выделены с помощью сейсмических разрезов. О наличии залежи свидетельствует отражающий горизонт типа морского дна (BSR), который ассоциируется с областью стабильности газогидратов. Этот уровень является переходной зоной между гидратами над ним и свободным газом и водой под ним. Положение зоны контролируется температурными условиями и зависит от величины геотермального градиента.

Признаков присутствия газогидратов на окраине Каскадии были обнаружены на сейсмических разрезах (рефлектор типа морского дна) в 1985 году и при анализе данных каротажа и керна на точках 889 Программы Океанического Бурения ODP Leg 146 (Westbrook et al., 1994). В последующие годы в этой области велись интенсивные научно-исследовательские работы, включая одноканальные и многоканальные сейсмические съемки (Yuan et al., 1996; Fink and Spence 1999; Riedel et al., 2002), записи по океаническому дну (OBS) (Hobro et al., 1998; Spence et al., 1995),

Нефтяная геология

соответствие техническим нормам (Willoughby and Edwards, 2000) и изучение электрического сопротивления (Yuan and Edwards, 2000). Несколько сейсмически непрозрачных районов диаметром между 80 и 400 м были впервые исследованы методом DTAGS (Wood et al., 2000) и позднее там была проведена высокоразрешающая многоканальная 3D сейсморазведка (Riedel et al., 2002). Гидраты были найдены в поршневом пробоотборнике в различных местах внутри неизученных областей. Тщательный анализ изучения газогидратов в этом регионе провели Hyndman et al. (2001) и Spence et al. (2000).

Существуют несколько моделей, объясняющих сейсмическое затенение и требующих дополнить сейсмическое изучение другими геофизическими методами, к примеру, CSEM. Wood et al. (2002) утверждали, что уровень стабильности газогидратов является нарушенным выше зон сейсмической тени из-за повышения температуры и поднимающихся флюидов, поэтому зоны сейсмической тени сами по себе являются газовыми скоплениями, подтверждающими, что гидраты могут формироваться только в узких зонах между этой возмущенной границей BSR и океаническим дном.

Эксперимент CSEM был разработан для изучения электрических свойств зон сейсмической тени и вентиляционных участков. Электрическое сопротивление морских осадков зависит от количества морской воды в доступном поровом пространстве и пористости. Его обычное значение между 1 Ωm и 2 Ωm непосредственно рядом с океаническим дном.

Гидрат сам по себе является изолятором, и формируют поровое пространство внутри зоны стабильности гидратов, замещая проводящий поровый флюид. Упругие и электрические свойства области изменяются, включая удельное сопротивление, которое может значительно вырастать. Региональная концентрация гидратов и аномальная концентрация внутри зон сейсмической тени может быть оценена независимо от ее локального распределения.

Место эксперимента

Место исследование располагалось на аккреционной призме окраины Каскадии недалеко от точки ODP 885, как показано на рисунке 1. В этом месте плита Хуан де Фука испытывает субдукцию в восточном направлении под Северо-Американскую плиту со скоростью сближения около 45 мм в год (Riddihough, 1984). Плейстоценовые осадки с приходящей океанической плиты, соскребленные с деформированного края, сильно смятые и поднятые вверх формируют протяженные антиклинальные структуры, поднятые на 700 м выше примыкающего бассейна. Далее на восток вглубь континента океаническое дно быстро поднимается, достигая глубины 1400-1500 м формируя глубоководный уступ. Площадь детальной сейсмической съемки располагается на этом уступе и покрывает две топографические вершины, возвышающиеся на 200 м относительно океанического дна. Впадина между этими двумя вершинами заполнена современными осадками (Davis and Hyndman, 1989). По крайней мере, четыре значимые зоны сейсмической тени можно выделить на площади приблизительно 1 км x 3 км, как показано на рисунке 5а. Самая большая из них, зона тени 1 диаметром около 400 м, названная Bullseye, имеет отчетливую выраженную поверхность высотой около 6 м.

В направлении ЮЗ-СВ был проведен CSEM эксперимент,

вдоль профиля, пересекающего Булсейе и подходящего к другим участкам вентиляционного участка, были сделаны измерения в 28 точках с шагом 250 м.

Сопротивление и закон Арчи.

Оценка гидратов основывается на предположении увеличения сопротивления в зонах с повышенным содержанием гидратов. Мы можем использовать закон Арчи (Archie, 1942) для установления

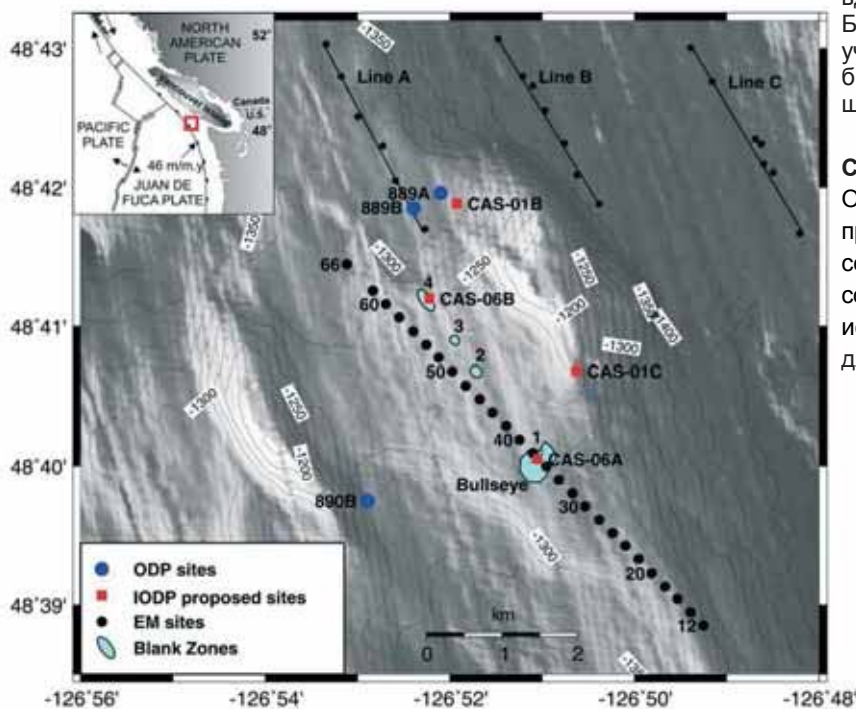


Рисунок 1 Глубинная карта области исследования окраины Каскадии. Вентиляционные участки расположены на уступе между двумя вершинами в непосредственной близости от точек ODP 889/890. Измерения CSEM были проведены вдоль профиля, пересекающего Булсейе, самый большой из четырех вентиляционных участков. Линии А, В, и С являются EM профилями предыдущих съемок (Yuan and Edwards, 2000).

Нефтяная геология

взаимосвязи между измеренным сопротивлением и оценками пористости для простых двухфазных систем, которые состоят из матрикса-изолятора и электропроводящим поровым флюидом. В общей форме это выглядит так:

$$\rho_f = a \rho_w \Phi^{-m},$$

ρ_f - измеренное сопротивление породы, ρ_w - сопротивление морской воды, Φ - пористость осадков, a - постоянная и m - фактор цементации. Последние два параметра могут быть получены из лабораторных измерений, и их значения лежат в пределах $0.5 < a < 2.5$ и $1.5 < m < 3$. Для расчета концентрации гидрата в отложениях нам необходимо модифицировать вышеприведенную формулу, вычитая поровое пространство, заполненное теперь гидратом, из общего порового пространства. Модифицированная формула выглядит так:

$$\rho_f = a \rho_w \Phi^{-m} S_n^{-n},$$

Параметр S_n является теперь фактором насыщения пор водой, n - коэффициент насыщения и $S_n = (1 - S_i)$ - насыщение газогидратом. Подробное описание методов получения коэффициентов в законе Арчи описано в работах Collett и Ladd (2000).

Метод CSEM

Мы используем продольную диполь-диполь конфигурацию для определения сопротивления структур океанического дна. Теория буксируемых систем была разработана в Университете Торонто (Edwards and Chave, 1986; Edwards 1997) на основе ранних работ

Скриппского Института Океанографии Chave и Cox (1982). Предложение использовать буксируемые косы для разведки углеводородов было сделано в конце 1980х годов и предвосхитило волну патентов по морским CSEM системам, которые стали появляться последнее время. Методология, основанная на этой теории, успешно применялась в предыдущих экспериментах на окраине Каскадии и Чили margin (Yuan and Edwards, 2000; Schwalenberg et al., 2004).

Донная коса буксируется в прямом контакте с морскими мягкими осадками. В ее начало прикрепляется тяжелый груз (свинья), чтобы сохранять контакт системы с дном. После нее идет диполь-трансммиттер (TX) длиной 124 м и в этом эксперименте только два диполя-приемника (RX1) и (RX2), каждый из которых по 15м в длину и расположен на расстоянии r_1 и r_2 равных 174 м и 292 м относительно кабеля трансмиттера соответственно. Каждый диполь приемник состоит из пары электродов серебро - хлорид серебра. Он имеет собственный усилитель, блок синхронизации, процессор и модуль памяти. Донная система соединена коаксиальным стальным кабелем, который передает ток трансмиттера, созданный на борту корабля, донному дипольному трансмиттеру. Аналогичное напряжение тока трансмиттера подается на схожую электронную систему, которая используется на приемной косе.

Система работает во временной области. Создаваемый ток имеет форму прямоугольного импульса с полным размахом амплитуды 20 А и периодом 6.6 с, как показано на рисунке 3а. Э/м поля

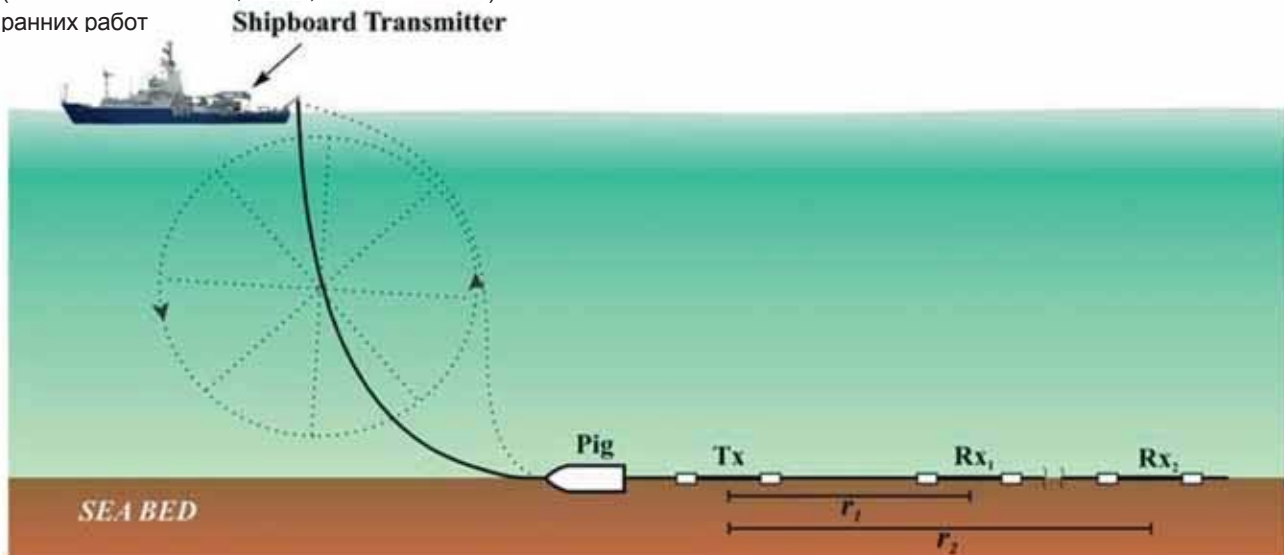


Рисунок 2 Геометрия продольной диполь-диполь конфигурации. Электрический сигнал создается бортовым трансмиттере и посылается по коаксиальному стальному кабелю на дипольный трансмиттер на дне. Два приемных диполя на расстоянии r_1 и r_2 ведут запись сигнала после того, как он пройдет по воде и по осадкам. Тяжелый груз (свинья) прикрепляется к передней части системы, чтобы сохранять ее контакт с морским дном во время перемещения вдоль профиля. Сплошная и пунктирная линия показывают стальной кабель в спокойном состоянии и во время движения соответственно. Колесо показывает кривую, по которой морской кабель совершает колебания во время движения.

Нефтяная Геология

создаются диполем транзиттером и распространяются по проводящей морской воде и по обладающим большим сопротивлением осадком к приемникам. На транзиттере и на приемниках мы записываем суммированную временную серию полного волнового пакета с частотой дискретизации около 1 мс и длительностью окна 10.6 с, которая составляет около 1.5 временного периода сигнала. Пример данных показан на рисунках 3с и 3д. Сигнал транзиттера и сигналы обоих приемников пропускаются через ФНЧ для ограничения шумовой полосы частот. Фильтр искажает прямоугольный сигнал, но не область, следующую за переходной зоной, где содержится нужная информация.

Проводится анализ данных в частотной области. Амплитуда и фаза данных соотносится с каждой точкой для выбранной частоты и рассчитывается среднее сопротивление морского дна. Две системы приемников дают информацию о двух различных глубинах, которые составляют приблизительно половину расстояния источник-приемник. В начале и в конце профиля каждого измерения коса калибруется. Для этого его подвешивают в горизонтальное положение и проводят измерение в однородном пространстве с известным сопротивлением. Чистые калибровочные данные достаточно сложно наблюдать, потому что электроды приемников колеблются в водяной толще во время проведения измерений, создавая ложное напряжение.

Результаты

Перед началом анализа полезно просмотреть калибровочные данные. На рисунке 4 нам показана амплитуда и фаза, полученная во время калибровочных измерений в теоретической модели единого пространства, отвечающее изменению проводимости морской воды (3.0, 3.2, 3.5 S/m). Для сравнения показана также модель двойного полупространства: морское дно (1 С/м) и проводящая водная толща (3.2 С/м). Наблюдаемые амплитуды и фазы хорошо подходят для теоретических рассчитанных моделей водной толщи, дающих проводимость между 3.0 и 3.5 С/м. Расхождение с моделью океанического дна четко видно. Разногласие более отчетливо проявляется в фазе, чем в нормализованной амплитуде, что доказывает, что фазовые изменения более чувствительны к изменению сопротивления, чем амплитудные. Качество данных ухудшается на частотах выше 100 Гц для первого приемника и на 20 Гц для второго, что вызвано влиянием ФВЧ.

Анализ данных профильных измерений был выполнен с использованием 1D инверсии (Edwards, неопубликованное программное обеспечение), применявшейся отдельно к фазовым данным. Шаг инверсии был выбран на основе сингулярного значения декомпозиции (SVD), учитывая набор собственных данных и собственных значений, используемый в процессе инверсии. Внутренняя кристаллическая модель была полупространством,

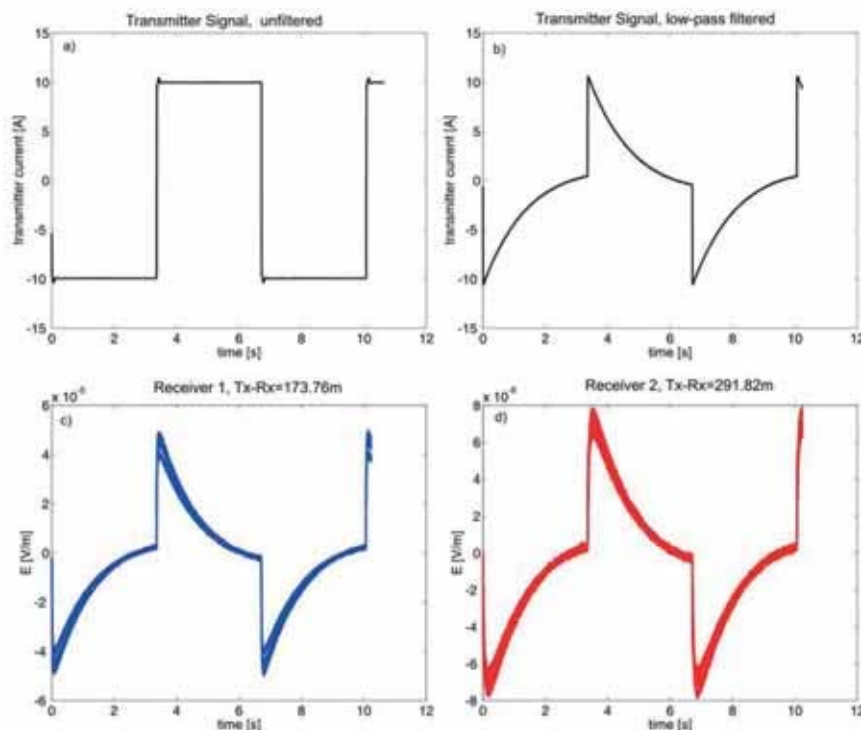


Рисунок 3

а) Сигнал транзиттера прямоугольной формы с полным размахом амплитуды 20А и периодом 6.6 с.

б) Тот же сигнал, прошедший через ФНЧ с а 3дБ на частоте 0.1 Hz.

с) Суммированные данные со всех точек записи на приемнике 1.

д) Суммированные данные со всех точек приемника 2. На втором приемнике амплитуды меньше, а уровень шума возрастает.

полученное сопротивление являлось средним значением для всего осадочного разреза. Результаты построены на рисунке 5b для обоих разносов приемников. Две значимые аномалии сопротивления, выделенные вдоль профиля, очень хорошо согласуются с проекцией морского дна на области вентиляции. Точность измерений составляет порядка 100м в определении положения приемников с помощью GPS станции, расположенной на борту, глубины моря и длины кабеля. Кроме того, з/м измерение производят осреднение большого объема, чем сейсмические данные. Значения сопротивления внутри аномальных зон выше для больших разносов RX2, чем для RX1 и локально достигают значений более 5 Ωm по сравнению с региональным фоном, который находится в пределах 1.1 Ωm и 1.5 Ωm .

Интерпретация

Присутствие границы BSR на протяжении всей съемки предполагает повсеместное наличие газогидратов. Исходя из этого, мы интерпретируем региональный тренд сопротивления на рисунке 5b с фоновой моделью, содержащей небольшое количество гидратов. Для сравнения, относительное сопротивление около 1 Ωm должно наблюдаться в морских отложениях, где нет гидратов (Hyndman et al., 1999). Существует два возможных объяснения причины сейсмической непрозрачности и значительного локального увеличения сопротивления над непрозрачными зонами - дополнительные газогидраты и свободный газ. Для того чтобы увеличить значения сопротивления до наблюдаемых 5 Ом необходимо очень большое количество свободного газа. Это маловероятно, потому что присутствие свободного газа внутри зоны стабильности газогидратов привело бы к образованию газ гидрата за исключением случая, когда поровая вода отсутствует.

Следовательно, мы полагаем, что локальное увеличение сопротивления является результатом повышенной концентрации гидратов в сочетании с достаточным для препятствия проникновению сейсмических лучей количеством свободного газа. Модель соответствует наблюдениям газогидратов в мелководном керне.

В некоторых областях, таких как Гидратный Выступ на юге Каскадии (Tréhu et al., 2003; 2004), интерпретация аномалий сопротивления сильно усложняется увеличением солёности поровой воды. Так как образование гидратов использует абсолютно чистую воду, то после них в порах остается флюид с повышенной солёностью. Такая система обладает также меньшей проницаемостью и вентиляция может быть представлена в виде закрытой гидротермальной системы, являющейся ловушкой для аномально солёных флюидов. Закрытая система могла бы создавать более низкое, чем среднее наблюдаемое сопротивление. Вовсе не очевидно, что такая система представлена в нашем районе.

Мы можем рассчитать концентрацию газогидрата с помощью модифицированного закона Арчи, о котором рассказывалось ранее. Предполагая, что средняя фоновая пористость составляет 60% (Westbrook et al., 1994), мы использовали два различных набора коэффициентов Арчи. Первых из них ($a=1.4$, $m=1.76$, $n=1$) был предложен Hyndman et al. (1999). В его основе лежат данные из точек ODP 889/890. Hyndman et al. (1999) рассчитали среднее гидратное насыщение, которое составило 25% в 100м выше границы BSR. Второй набор ($a=1$, $m=2.8$, $n=1.94$) является результатом недавней переоценке, сделанной Collett и Riedel (личные связи, 2005). Он основан на данных каротажа с точек ODP 889/890 и дает значительно меньшую концентрацию гидратов в скважине (10% в среднем для некоторых глубинных интервалов).

Концентрация газогидратов, полученная из наших профильных измерений сопротивления вдоль участков вентиляции также зависит от выбора коэффициентов. Значения, наблюдаемые с использованием набора Hyndman, являются более высокими, чем те, которые получены на основе предположений Collett и Riedel. Однако, если уровень концентрации, полученный из фоновых значений сопротивления, вычитается из

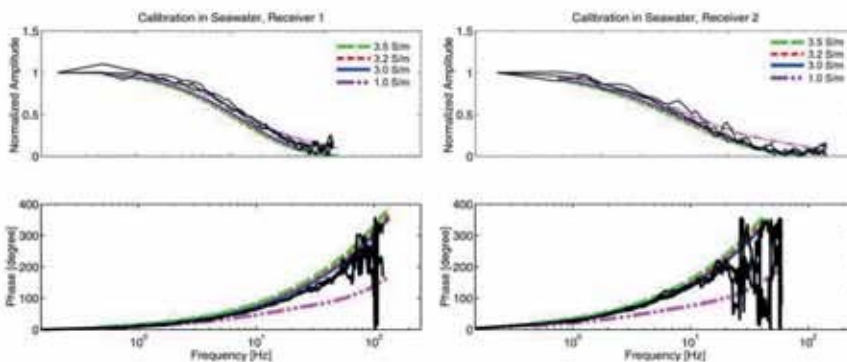


Рисунок 4 Калибровка данных может быть осуществлена при изменении положения косы на вертикальное и проведении измерений в морской воде. Нормализованные амплитуды и фазы, полученные из калибровочных измерений, хорошо согласуются с теоретически предсказанными значениями для проводимости морской воды, лежащими в пределах 3.0 и 3.5 С/м, что сильно расходится со значениями проводимости морского дна 1 С/м.

Нефтяная геология

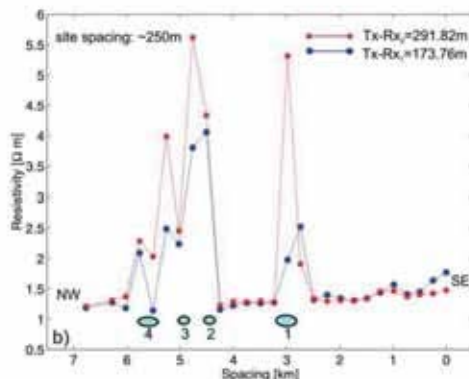
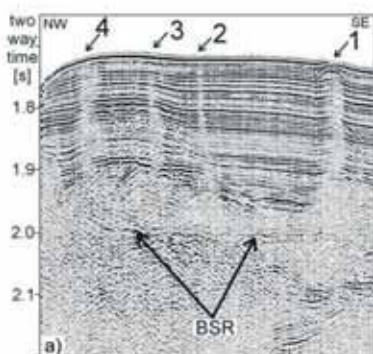


Рисунок 5 а) Сейсмограмма, показывающая протяженность BSR границы вдоль профиля и зон сейсмической тени (Riedel et al., 2002). **б)** Объемное удельное сопротивление, полученное из данных CSEM, показывает аномальные зоны, превышающие фоновое значение (между 1.1 и 1.5 Ом) на 5 Ом. Аномальные области пространственно совпадают с областью сейсмической тени, показанной на рисунке.

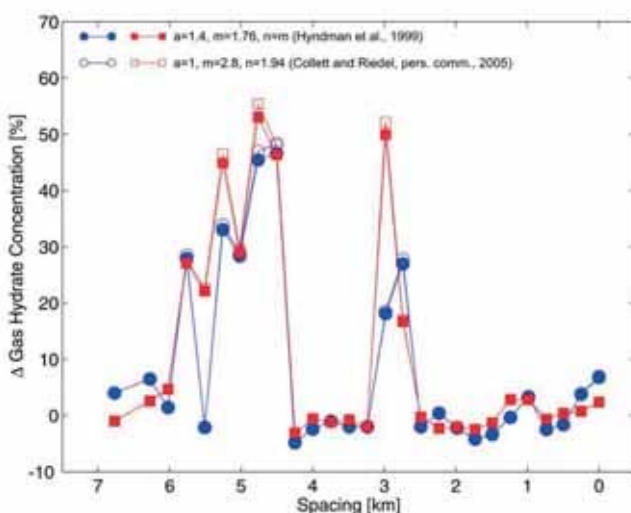


Рисунок 6 Концентрация газогидратов, полученная из закона Арчи с использованием двух различных наборов коэффициентов. Первый набор ($a=1.4$, $m=1.76$, $n=m$) основан на данных по керну из ODP Leg 146 (Hyndman et al., 1999). Недавняя переоценка дала возможность получить второй набор коэффициентов, основанный на каротажных данных ($a=1$, $m=2.8$, $n=1.94$) (Collett and Riedel, личное общение, 2005). Синие и красные линии и значки отвечают разносам TX-RX1 и TX-RX2 соответственно. На этом рисунке профиль региональной концентрации газогидратов, полученный из уровня сопротивлений на рисунке 5b, был вычтен из «общей» концентрации гидратов. Таким образом, на профиле представлено дополнительное количество гидрата и идентичность обоих наборов коэффициентов Арчи.

соответствующих профилей, то тогда требуется дополнительное количество гидрата для объяснения аномальных сопротивлений, которые являются довольно интенсивными для заданного набора используемых коэффициентов, как показано на рисунке 6. Дополнительная концентрация должна быть порядка 50 % от максимального порового пространства и около 25% от среднего значения доступного порового пространства.

Выводы

Измерения CSEM на ряде сейсмически непрозрачных зонах на окраине Каскадии в непосредственной близости от точек ODP 889/890 выявили аномально высокие значения сопротивления, превышающие на 5 Ωm фоновые значения, находящиеся в пределах между 1.1 Ωm и 1.5 Ωm . Расположение аномалий сопротивления четко отвечает донным проявлениям областей вентиляции. Мы делаем вывод, что увеличение сопротивления внутри сейсмически непрозрачных зон было вызвано более высокой концентрацией газогидратов. Количество дополнительных запасов гидратов оценивается порядка 25% от доступного порового пространства и порядка 50% от максимального порового пространства. Концентрация гидратов может быть даже выше в локальных зонах, расположенных близко ко дну или в районе области стабильности гидратов. Свободный газ мог бы также способствовать увеличению сопротивления.

Разрешение метода CSEM не позволяет проводить детальный анализ распределения сопротивления в сейсмически непрозрачных зонах, но обеспечивает интегральную оценку. Последнее из двух может быть преобразовано в полную массу гидрата или полностью доступный метан. Грубая оценка запасов области Bullseye может быть сделана в предположении, что она представляет собой цилиндрический объем с диаметром и 400м и глубиной 200 м. Двадцать пять процентов доступного порового пространства составляют 3.8 миллионов m^3 . С коэффициентом перевода твердого гидрата в газ равным 1:164, относительный объем метанового газа равен 0.62 миллиарда (US) m^3 . При расчете мы предполагаем, что решетчатая структура содержит атом метана. Мы считаем, что определение зон вентиляции с помощью сейсмических методов и их последующее изучение методом CSEM является подходящей стратегией обнаружения и оценки.

Благодарности

Мы благодарим Roy Hyndman и Michael Riedel за множество ценных замечаний, капитана и команду C.C.G.S. Tully за их помощь в навигации и управлении судном. Исследование проводилось при поддержке Геологической Службы Канады и гранте Академии Естественных Наук и Совета Инженерных Исследований.

Ссылки

- Archie, G.E. [1942] The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Journal of Petroleum Technology*, **5**, 1-8.
- Chave, A.D. and Cox, C.S. [1982] Controlled electromagnetic sources for measuring the electrical conductivity beneath the oceans. *Journal of Geophysical Research*, **87**, 5327-5338.
- Collett, T.S. and Ladd, J. [2000] Detection of gas hydrate with downhole logs and assessment of gas hydrate concentrations (saturations) and gas volumes on the Blake Ridge with electrical resistivity log data, in Paull, C. K., Matsumoto R., Wallace, P. J., and Dillon, W. P. (eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **164**, 179 – 191.
- Davis, E.E. and Hyndman, R.D. [1989] Accretion and recent deformation of sediments along the northern Cascadia subduction zone. *Geological Society of America Bulletin*, **101**, 1465-1480.
- Edwards, R.N. and Chave A.D. [1986] A transient electric dipole-dipole method for mapping the conductivity of the seafloor. *Geophysics*, **51**, 2, 204-217.
- Edwards, R.N. [1997] On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using sea-floor transient electric dipole-dipole method. *Geophysics*, **62**, 1, 63-74.
- Fink, C.R. and Spence, G.D. [1999] Methane hydrate distribution offshore Vancouver Island from detailed single seismic reflection data. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 2909-2922.
- Hobro, J.W., Singh, S. and Minshull, T. [1998] Tomographic seismic studies of the methane hydrate stability zone in the Cascadia margin. *Geological Society of London Special Publication*, **137**, 133-140.
- Hyndman, R.D., Yuan, T., and Moran, K. [1999] The concentration of deep sea gas hydrates from downhole electrical resistivity logs and laboratory data. *Earth and Planetary Science Letters*, **172**, 167-177.
- Hyndman, R.D., Spence, G.D., Chapman, N.R., Riedel, M., and Edwards, R.N., 2001, *Geophysical Studies of Marine Gas Hydrate in Northern Cascadia*, in Paull, C.K and Dillon, W.P., eds., *Natural gas Hydrates, Occurrence, Distribution and Detection*, Geophysical Monograph Series No. 124: American Geophysical Union (AGU), p. 273-295.
- Kvenvolden, K.A. [1993] Gas hydrates: Geological perspective and global change. *Reviews of Geophysics*, **31**, 173-187.
- Kvenvolden, K.A. [1999] Potential effect of gas hydrate on human welfare. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, **96**, 3420-3426.
- Riddiough, R.P. [1984] Recent movements of the Juan de Fuca plate system. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 6980 – 6994.
- Riedel, M., Spence, G.D., Chapman, N.R., Hyndman, R.D. [2002] Seismic investigations of a vent field associated with gas hydrates, offshore Vancouver Island. *Journal of Geophysical Research*, **107**, (B9), doi:10.1029/2001JB000269.
- Riedel, M., Novosel, I., Spence, G.D., Hyndman, R.D., Chapman, N.R., Solem R.C., and Lewis, T. [2005] Geophysical and geochemical signatures associated with gas hydrate related venting at the North Cascadia Margin. *Review paper submitted to Geological Society America*.
- Schwalenberg, K., Edwards, R.N., Willoughby, E.C., Yuan, J., Cairns, G., and Diaz-Naveas, J. [2004] Marine controlled source electromagnetic experiment to evaluate gas hydrates off the coastlines of North and South America. *Proceedings*, 4th MARELEC Conference, London, UK, 17-18 March 2004.
- Spence, G.D., Hyndman, R.D., Chapman, N.R., Riedel, M., Edwards, R.N., and Yuan, J., 2000, *Cascadia Margin, north-east Pacific Ocean: hydrate distribution from geophysical investigations*, in Max, M.D., ed., *Natural Gas Hydrate in Ocean and Permafrost Environments*: Kluwer Academic Publisher, p. 183 – 198.
- Westbrook, G.K., Carson B., Musgrave R.J., et al. [1994] *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Report*, Part 1, Vol 146, Ocean Drilling Program, College Station, Texas.
- Wood, W.T., Lindwall, D.A., Gettrust, J.F., Sekharan, K.K., and Golden, B. [2000] Constraints on gas or gas hydrate related wipeouts in seismic data through the use of physical models. *EOS, Trans., American Geophys. Union*, **81**, (48), F639.
- Wood, W.T., Gettrust, J.F., Chapman, N.R., Spence, G.D., and Hyndman R.D. [2002] Decreased stability of methane hydrate in marine sediments owing to phase boundary roughness. *Nature*, **420**, 656-660.
- Yuan, T., Hyndman, R.D., Spence, G.D., and Desmons, B. [1996] Seismic velocity increase and deep-sea gas hydrate concentration above a bottom-simulating reflector on the northern Cascadia continental slope. *Journal of Geophysical Research*, **101**, 13655-13671.
- Yuan, J. and Edwards, R.N. [2000] The assessment of marine hydrates through electrical remote sounding: Hydrate without a BSR? *Geophysical Research Letters*, **27**, 16, 2397-2400.
- Zühlsdorff L. and Spiess V. [2004] Three-dimensional seismic characterization of a venting site reveals compelling indications of natural hydraulic fracturing. *Geology*, **32** (2), 101-104.