

Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти

Л. В. Дмитриев, Б. А. Базылев, С. А. Силантьев

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН

М. В. Борисов

Московский государственный университет (МГУ)

С. Ю. Соколов

Геологический институт (ГИН) РАН

А. Буго

Брестский Океанографический центр, Франция

Аннотация. Методом термодинамического моделирования взаимодействия морской воды с мантийными перидотитами при 25–400°C, 1–5 кбар и различных отношениях вода/порода рассчитана интенсивность генерации водорода и метана при серпентинизации. На фактическом материале с использованием расчетных данных проанализирована зависимость характера минеральных ассоциаций от величины отношения вода/порода при серпентинизации перидотитов в разных геологических условиях. Согласно выполненным расчетам, серпентинизация мантийных перидотитов океана сопровождается выделением огромных количеств водорода и метана в условиях, соответствующих начальному этапу генерации нефти. Произведены качественные оценки вероятной интенсивности генерации водорода и метана при серпентинизации перидотитов для обстановок рифтовых зон, остывающей океанической литосферы и преддуговых бассейнов. Эти оценки свидетельствуют о необходимости учета роли глобального процесса серпентинизации в формировании флюидного режима Земли, а также при разработке фундаментальных и прикладных задач геологии нефти и газа вне зависимости от биогенной или абиогенной гипотез их происхождения.

Источники

Источники водорода и метана на дне Мирового океана известны с начала 1980-х годов. Их можно разделить на две основные группы. Первая представлена локальными аномалиями в морской воде, связанными с действующими высокотемпературными (до 400°C) гидротермальными источниками ("black smokers"). Эти источники широко распространены в

пределах срединно-океанических хребтов и в задуговых центрах спрединга. Их всесторонняя характеристика приводится в многочисленных публикациях и обобщена в недавней сводке [Rona and Scott, 1993].

Согласно опубликованным материалам, содержание в этих источниках метана CH_4 2,5–3,6 составляет нмоль/кг. [Charlou et al., 1998]. Характерной чертой этих гидротерм является повышенное содержание ^3He и корреляция содержаний метана и марганца [Charlou et al., 1991]. Это свидетельствует о том, что просачивающаяся вода реагировала преимущественно с базальтами. Присутствие в них метана связывают с неорганическим синтезом при 300–400°C или с дегазацией ювенильного CH_4 [Lilley et al, 1993; Welhan and Craig, 1983].

©1999 Российский журнал наук о Земле.

Статья N RJE00030.

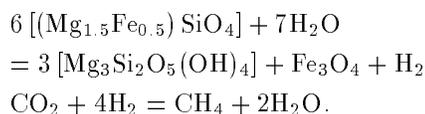
Онлайновая версия этой статьи опубликована 5 февраля 2000.
URL: <http://eos.wdcb.rssi.ru/rjes/RJE00030/RJE00030.htm>

Вторая группа представлена интенсивными мантийными аномалиями (содержание CH_4 до 50 ммоль/кг), не сопровождающимися аномально высокими содержаниями марганца и ^3He , но обнаруживающими повышенные содержания водорода (до 13 ммоль/кг) и приуроченными к выходам массивных мантийных гипербазитов вблизи некоторых трансформных разломов Срединно-Атлантического хребта (САХ). Генерация метана и водорода в этих аномалиях связывается с серпентинизацией мантийных перидотитов [Симонов и др., 1999; Charlou et al., 1991, 1998; Donval et al., 1997].

В обобщающей работе [Charlou et al., 1998] сделан вывод о том, что такие аномалии обычны для участков САХ, где в условиях медленного спрединга и слабо развитого базальтового магматизма образуется кора с широким распространением остаточных мантийных гипербазитов (кора “Хессовского типа” [Cannat et al., 1995]). В связи с этим выводом авторы статьи ставят вопрос о необходимости пересмотра представлений о формировании литосферы океанов с пассивными окраинами в условиях медленного спрединга. Такая постановка вопроса стимулировала предлагаемое исследование.

Данные эксперимента и расчетов

В соответствии с термодинамическими данными, серпентинизация перидотитов может протекать при температурах ниже 400–700°C, в зависимости от давления и парциального давления воды [напр., Schmidt and Poli, 1998]. При умеренных давлениях наиболее интенсивно серпентинизация происходит при 150–350°C [Martin and Fyfe, 1970]. Образование метана и водорода теоретически может происходить в данных условиях при реакции воды (содержащей растворенный CO_2) с ультраосновными породами с образованием серпентина и магнетита, в частности, по известным реакциям, например, [Сорохтин, Ушаков, 1991]:



Действительно, высокие концентрации водорода создаются при реакции чистой воды с породами основного и ультраосновного состава при 25–300°C, что демонстрируют результаты расчетов равновесий в системе “вода-порода” [Борисов, 1980; Борисов и др., 1984]. Высокая (0,025 моль/1000 г H_2O) концентрация водорода может быть достигнута также и в результате реакции морской воды с толеитовыми

базальтами при температурах 300–350°C [Гричук и др., 1985].

Для уточнения данных о выходе водорода и метана в этой реакции нами было проведено моделирование взаимодействия морской воды с гарцбургитом и толеитовым базальтом, составы которых отвечают средним для океана [Дмитриев и др., 1976, 1990]. Расчеты выполнены по программе HCh [Шваров, 1999] в системе H-O-K-Na-Ca-Mg-Al-Fe-Si-C-Cl-S при температуре 25–400°C и давлении 1–5 кбар. Исследованы различные соотношения реагирующих масс морской воды и породы. Установлено, что при реакции 1 кг морской воды и 0,4–0,5 и более кг гарцбургита (отношение вода/порода “В/П” ≤ 2) во всем принятом интервале температуры и давления вся углекислота из морской воды восстанавливается до метана, т.е. достигается концентрация водорода 0,03–0,05 моль/1000 г H_2O , а метана 0,0024 моль/1000 г H_2O . Аналогичный уровень концентраций водорода и метана отмечается и при реакции морской воды с толеитовым базальтом при 400°C. Однако при более низких температурах концентрация водорода снижается до $n \cdot 10^{-5} - 10^{-6}$ моль/1000 г H_2O .

Эти данные позволяют приблизительно оценить количество водорода и метана, генерируемых в этих условиях при реакции морской воды с гипербазитами. При отношении В/П = 2 и содержании в морской воде в среднем 2,4 ммоль/кг углекислоты [Понов и др., 1979], получим для 1 км³ гарцбургита $5 \cdot 10^5$ т H_2 и $2,5 \cdot 10^5$ т CH_4 . Для реакции с толеитовым базальтом рассчитанное количество метана аналогично, а количество водорода уменьшается с падением температуры. Приведенные оценки свидетельствуют о принципиальной возможности генерации огромных количеств водорода и метана при серпентинизации мантийных перидотитов океанов.

Отношение вода/порода

Интенсивность выделения водорода и метана существенно зависит от отношения вода/порода (В/П) в ходе серпентинизации. При небольших величинах этого отношения фугитивность кислорода в системе буферизуется породой и остается низкой, свойственной мантийным перидотитам (примерно QFM+1 лог. ед. и ниже), тогда как при высоких величинах этого отношения фугитивность кислорода буферизуется морской водой и становится сравнительно высокой (примерно отвечающей буферу НМ и выше) [Файф и др., 1981]. Таким образом, при высоком отношении В/П серпентинизация перидотитов должна сопровождаться их окислением, а при низком – нет. Так, при 300°C и буфере Ni-NiO доминирующей фор-

мой присутствия углерода во флюиде будет CH_4 , а при буфере $\text{HM} - \text{CO}_2$ [Eugster and Skippen, 1967]. Содержание водорода во флюиде также резко падает с повышением фугитивности кислорода.

В общем, в обстановке океанического метаморфизма отношение В/П уменьшается с глубиной и с ростом температуры [Силантьев, Костицын, 1990]. Однако в оптимальном интервале температур серпентинизации (150–350°C согласно [Martin and Fyfe, 1970]) величина отношения В/П зависит главным образом от проницаемости пород, обусловленной их тектонической трещиноватостью. В этом контексте можно отметить две контрастные геологические ситуации.

Первая ситуация отвечает высокой проницаемости пород. В пределах СОХ эта ситуация наиболее отчетливо реализуется в бортах активных долин крупных трансформных разломов, где устанавливаются признаки просачивания морской воды на глубину порядка 20 км [Базылев, 1992]. Судя по величине $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в перидотитах, отношение В/П при серпентинизации могло превышать 10,000 [Snow and Reisberg, 1995]. Минимальное значение В/П (около 300) при серпентинизации перидотитов следует из сопоставления среднего содержания урана в серпентинизированных перидотитах (примерно 1 ppm, [Vinogradov et al., 1971]) и среднего содержания урана в морской воде ($3,2 \cdot 10^{-3}$ мг/л, [Хендерсон, 1985]), если принять во внимание, что практически весь уран в перидотитах был сорбирован из морской воды и если допустить стопроцентную эффективность сорбции.

Вторая ситуация отвечает низкой проницаемости пород. В принципе, низкая проницаемость пород должна вести к их серпентинизации при низком значении В/П. Следствием серпентинизации в таких условиях должен быть ее изохимический характер, проявляющийся минералогически в присутствии в перидотитах ассоциирующих с серпентином брусита (по крайней мере, в гарцбургитах) и диопсида. Другим следствием этого должна быть низкая фугитивность кислорода при серпентинизации, проявлением которой можно считать присутствие в перидотитах равновесного с серпентином аваруита (Ni_3Fe). Ассоциация серпентина с диопсидом и бруситом воспроизводится при термодинамическом моделировании взаимодействия перидотитов с морской водой, однако при В/П выше 50–60 брусит может не образовываться [Силантьев и др., 1992]. В серпентинизированных перидотитах СОХ брусит не установлен [Базылев, 1989; Snow and Dick, 1995], однако равновесные с серпентином диопсид и аваруит обнаружены в ряде участков СОХ [Базылев, 1989, 1997, 1998]. Это свидетельствует о том, что серпентинизация перидотитов при низком отношении В/П (ко-

гда, согласно приведенным выше оценкам, генерация водорода и метана при серпентинизации протекает наиболее интенсивно) в принципе реализуется в пределах СОХ. Именно к обнажениям подобных массивных перидотитов, локализованных в пределах тектонически ненарушенных сегментов СОХ второго и третьего порядка, приурочены наиболее крупные из известных метановые аномалии САХ (14°45' с.ш. – гидротермальное поле Логачев; 15°05' с.ш. – “диапир Буго”; область MARK).

Примечательно, что равновесные с серпентином брусит, диопсид и аваруит широко развиты в офиолитовых перидотитах, для которых характерен при этом также изохимичный характер серпентинизации [напр., Силантьев и др., 1997; Штейнберг, Чащухин, 1977; Coleman and Keith, 1971; Poreda et al., 1990; Wicks and Plant, 1979]. Эти признаки позволяют утверждать, что серпентинизация офиолитовых гарцбургитов протекала при более низком отношении В/П по сравнению с перидотитами СОХ и сопровождалась более высокой интенсивностью генерации водорода и метана.

Оценка возможных объемов генерации водорода и метана в разных геодинамических обстановках

Степень изученности строения литосферы океанов и процессов, сопровождающих ее формирование, позволяет дать лишь приближенную оценку возможного объема генерации водорода и метана при серпентинизации мантийных перидотитов. Во всех оценках принята установленная выше интенсивность генерации водорода и метана, соответствующая величине отношения В/П равной 2: при полной серпентинизации 1 км³ перидотита выделяется $5 \cdot 10^5$ т H_2 и $2,5 \cdot 10^5$ т CH_4 . Выделение водорода и метана при взаимодействии морской воды с базальтами и габброидами не учитывалось, поскольку эти породы устойчивее перидотитов при гидратации, а кроме того, их гидратация протекает в основном при существенно более высоких значениях В/П [Силантьев, Костицын, 1990].

Осевые зоны Срединно-Океанического хребта (СОХ)

Большая часть срединно-океанических хребтов относится к хребтам с низкой скоростью спрединга (исключением является Восточно-Тихоокеанское поднятие). Представительным является относительно хорошо изученный Атлантический океан, где от экватора до 35° с. ш. установлена провинция базальтов типа TOP-2 и TOP-На протяженностью вдоль оси САХ около 3000 км [Дмитриев и

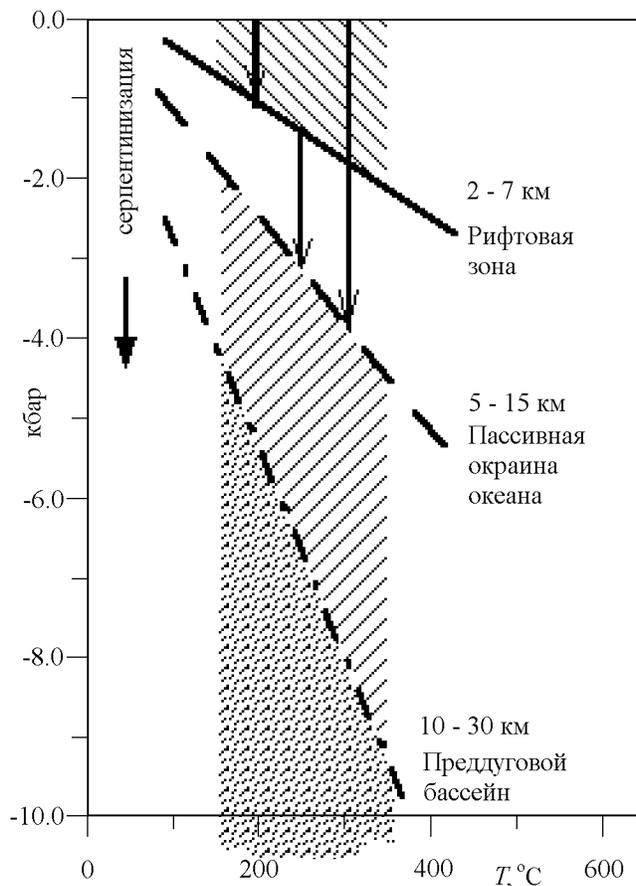


Рис. 1. Мощность зоны потенциальной серпентинизации (вертикальные стрелки) для разных геодинамических обстановок с характерными значениями геотермического градиента по данным [Лангсет, Уэда, 1990; Попова, Смирнов, 1985; Schmidt and Poli, 1998]. Температурная область, соответствующая интенсивной серпентинизации перидотитов, нанесена по данным [Martin and Fyfe, 1970].

др., 1990; 1994], для которой типична низкая продуктивность базальтового магматизма, невысокие степени частичного плавления мантийных перидотитов [Bonatti, 1996; Bonatti et al., 1993] и высокая доля перидотитов в составе новообразованной коры [Cannat et al., 1995].

Судя по статистике драгирования в этом районе, выходы перидотитов составляют примерно 10% по площади. Глубина зоны серпентинизации в осевых частях СОХ оценивается как 2–7 км (рис. 1), при этом для расчета можно принять среднее значение 5 км. При средней половинной скорости спрединга 2 см/год ежегодный латеральный прирост литосферы вкост оси хребта составляет $4 \cdot 10^{-5}$ км. Исходя из этих цифр, ежегодный объем подвергающихся серпентинизации перидотитов в пределах данной провинции САХ составляет $0,06 \text{ км}^3$, а еже-

годный объем генерации водорода и метана соответственно $3 \cdot 10^4$ т и $1,5 \cdot 10^4$ т. При этом за все время существования Атлантического океана (здесь 150 млн. лет) в его осевой зоне в пределах этой провинции могло выделиться и раствориться в морской воде или дегазировать в атмосферу $4,5 \cdot 10^{12}$ т водорода и $2,25 \cdot 10^{12}$ т метана.

Если попытаться оценить ежегодную интенсивность генерации водорода и метана за счет серпентинизации перидотитов в пределах всей системы СОХ, то в первую очередь следует пренебречь хребтами с высокой скоростью спрединга и областями проявления плюмовых ассоциаций базальтов, где высокая продуктивность вулканизма препятствует обнажению мантийных перидотитов на поверхности дна. Для части оставшихся участков медленно-спрединговых СОХ можно предполагать меньшую долю перидотитов в составе коры, чем в рассмотренной провинции. С учетом этих ограничений вероятный ежегодный объем подвергающихся серпентинизации перидотитов во всей системе СОХ составляет $0,3\text{--}0,6 \text{ км}^3$, а ежегодный объем генерации водорода и метана имеет порядок соответственно $2 \cdot 10^5$ т и $1 \cdot 10^5$ т.

Литосфера океанов с пассивными окраинами

Разрастание площади океанической литосферы сопровождается ее остыванием, благодаря чему изотерма 400°C постепенно погружается, и с приближением к пассивной окраине океана с возрастом около 150–170 млн. лет может достигнуть глубины порядка 10–15 км и более (рис. 1). Это означает, что часть литосферных перидотитов, не испытавших серпентинизации под осевой зоной СОХ, остывает за его пределами до температур, при которых их серпентинизация становится возможной. Обобщенный схематический разрез такой литосферы, построенный по данным глубинного сейсмического зондирования [Зверев, 1996; Зверев, Косминская, 1990] приведен на рис. 2. На этом же рисунке показано положение изотермы 400°C (по данным [Лангсет, Уэда, 1990; Попова, Смирнов, 1985]), трассирующей глубину зоны потенциальной серпентинизации перидотитов. Под слоем осадков показан горизонт коры, где серпентинизация проходила в условиях открытой рифтовой зоны. Ниже этого слоя до глубины изотермы 400°C размещается зона потенциальной серпентинизации, мощность которой увеличивается в направлении от оси хребта к пассивной окраине. Еще ниже залегает несерпентинизованная мантия. Согласно этой схеме, второму сейсмическому слою может соответствовать горизонт коры, сформированной в рифтовой долине, третьему слою – зона потенциальной серпентинизации, а изотерма 400°C может быть расположена вдоль поверхности Мохо.

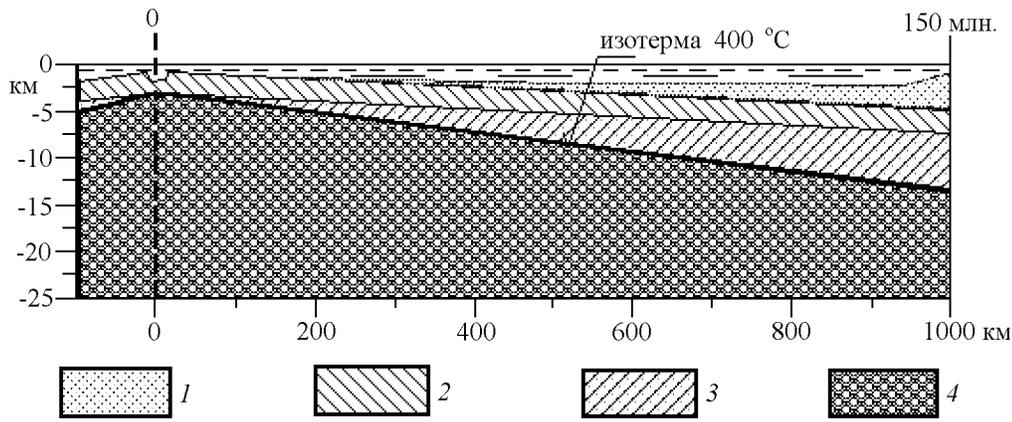


Рис. 2. Схематический разрез литосферы океана с пассивными окраинами (обобщение по данным [Зверев, 1996; Зверев, Косминская, 1990]). Обозначения: 1. Осадки, скорости сейсмических волн км/сек (СВ) 1–3; 2. Кора, сформированная в рифтовой зоне, (СВ) 4–6; 3. Область потенциальной серпентинизации мантийных перидотитов вне рифтовой зоны, (СВ) 6–7; 4. Несерпентинизированная мантия, (СВ) > 8. Положение изотермы 400°C нанесено по данным [Лангсет, Уеда, 1990; Попова, Смирнов, 1985].

По данным этого разреза может быть сделана приблизительная оценка потенциального выхода водорода и метана при серпентинизации перидотитов в данной геодинамической обстановке. Если принять, что условия образования коры “Хессовского типа”, существующей сейчас вдоль современной оси хребта от экватора до 35° с. ш. (см. выше), сохранялись в течение 150 млн. лет, то ее площадь при ширине океана порядка 4000 км и протяженности параллельно оси хребта 3000 км будет равна $12 \cdot 10^6 \text{ км}^2$.

Если среднюю глубину дополнительной серпентинизации принять равной 5 км (рис. 1, 2), а долю перидотитов в составе литосферы на глубине 5–10 км 10%, то при этих допущениях объем слоя потенциальной серпентинизации составит $6 \cdot 10^6 \text{ км}^3$ с выделением $3 \cdot 10^{12} \text{ т H}_2$ и $1,5 \cdot 10^{12} \text{ т CH}_4$, что близко к оценкам, сделанным для открытой рифтовой зоны. Это означает, что общий баланс выхода водорода и метана при формировании литосферы с пассивными окраинами может быть удвоен по сравнению с оценкой для открытой рифтовой зоны.

Однако для этой геодинамической обстановки возникает проблема контакта океанской воды с неизменными перидотитами, так как они перекрыты слоем серпентинитов, метагаббро, метабазальтов и вышележащим чехлом осадков. В этом случае проницаемость коры в сильной степени зависит от наличия в ней трещин и разломов разного масштаба, что контролируется тектоническим режимом океанических плит. Согласно [Мазарович, Соколов, 1999], их формирование сопровождается постоянной сменой тектонических напряжений разного на-

правления, осложненных периодическими проявлениями магматизма. Примерами структур, возникших при тектонической активизации остывшей литосферы, способствующей образованию трещин могут быть, например, хребты Палмер, Барракуда, Маккуори, хребта 90-го градуса. Тектоническая активизация возможна также вблизи контакта океанической и континентальной литосферы с образованием горстовых поднятий типа Иберийской окраины, банки Горриндж, плато Шпицбергена [Bonatti and Michael, 1989].

Роль осадков может быть двойной. С одной стороны, они препятствуют просачиванию воды в фундамент. Однако в случае быстрого образования осадочного чехла вода захороняется вместе с осадками и может поступать в фундамент из осадков.

Особая роль осадочного чехла в этой геодинамической обстановке состоит в том, что он может служить экраном, препятствующим дегазации водорода и метана и способствующим их аккумуляции в осадках, например, в виде газогидратов. Не исключено, что водород будет реагировать с углеродом тонкодисперсных глубоководных осадков с образованием дополнительного объема метана.

В целом данная обстановка не благоприятствует развитию процесса серпентинизации из-за дефицита воды, проникающей в фундамент. Однако именно дефицит воды позволяет предполагать, что если в этой обстановке происходит серпентинизация перидотитов, то она протекает при низком отношении В/П и сопровождается максимальным уровнем генерации водорода и метана.

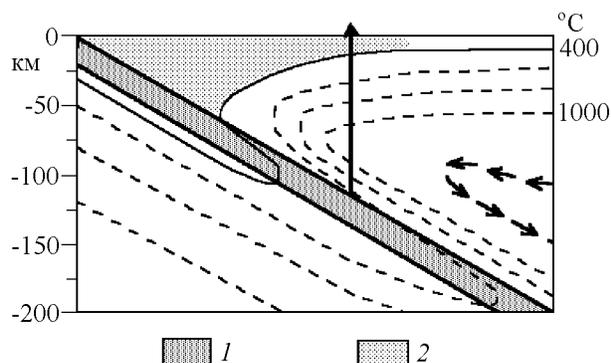


Рис. 3. Схема теплового поля преддугового бассейна по [Schmidt and Poli, 1998], с упрощениями. Обозначения: 1. Субдуцируемая плита; 2. Область потенциальной серпентинизации при условии ограничения изотермой 400°C.

Активные зоны перехода океан-континент

Наиболее благоприятной геодинамической обстановкой для генерации водорода и метана при гидратации перидотитов, по-видимому, является обстановка мантийного клина над зоной субдукции. Здесь область потенциальной серпентинизации с температурой не более 400°C достигает максимальной глубины по сравнению с другими обстановками (рис. 1, 3). Именно здесь возможно глобальное взаимодействие сравнительно свежих перидотитов с небольшим количеством воды, поступающей небольшими порциями из корового субстрата погружающейся пластины при оптимальных температурных условиях в обстановке перманентной тектонической активности.

Именно таким условиям соответствуют минимальные отношения В/П, при которых выход водорода и метана достигает максимума. О низкой величине В/П при серпентинизации перидотитов в этой обстановке свидетельствуют приведенные выше данные по минералогии и геохимии офиолитовых (супрасубдукционных) перидотитов.

Согласно изложенному, продуктивность преддуговых бассейнов по выходу водорода и метана на единицу площади может быть в три раза выше, чем для рифтовых зон и остывшей литосферы океанов с пассивными окраинами.

Генерация водорода и метана и ее возможная связь с происхождением нефти

Данное исследование не претендует на профессиональное обсуждение проблемы происхождения нефти. Однако здесь необходимо отметить, что по-

лученные результаты расчетов могут представлять интерес в связи с этой проблемой.

Как известно, в настоящее время существует две основные гипотезы происхождения нефти – биогенная и абиогенная. Обзор этих гипотез и их сопоставление в связи с вопросами формирования месторождений нефти и газа дается в исчерпывающих работах [Вассоевич, 1988; Доленко, 1986] и в других многочисленных публикациях. Здесь мы выделим лишь два положения, которые лежат в основе данного раздела работы:

1) Несмотря на принципиальные различия, обе гипотезы (биогенная и абиогенная) сходятся на том, что самому начальному этапу генерации нефти и газа предшествует стадия катагенеза с участием водорода и метана.

2) Эта стадия по температуре и давлению вполне соответствует оптимальным условиям серпентинизации, о которых упоминалось выше.

Из этих двух положений следует, что глобальный процесс серпентинизации мантийных гипербазитов океана, приводящий к выделению водорода и образованию метана, можно представить как начало стадии катагенеза, предшествующей сложному пути формирования газ-гидратных, нефтяных и газовых месторождений с участием или без участия органического вещества.

О возможности реализации этого процесса свидетельствует ряд хорошо известных геологических, минералогических и геохимических данных. Коротко остановимся на некоторых из них.

Прежде всего, необходимо отметить, что большинство нефтегазоносных бассейнов юрско-мелового возраста образовалось в геодинамической обстановке пассивных океанических палеоокаин, что уже давно является общепризнанным, например, [Грачев, Николайчик, 1988; Зоненшайн и др., 1990].

Согласно [Klemme and Ulmishek, 1991] почти половина мировых запасов углеводородов (не считая позднюрских и палеозойских) сформировалась в районах, соответствующих палеоаналогам пассивных континентальных окраин океанов, сформировавшихся в условиях медленного спрединга. Вместе с тем, эти авторы подчеркивают, что на флангах Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП) и в примыкающих глубоководных бассейнах, (быстроспрединговый хребет, кора с мощным базальтовым слоем) признаки существенного развития нефте- и газо-материнских отложений и запасов углеводородов средне-мелового и олигоцен-миоценового возраста отсутствуют.

По данным [Галимов, Кодина, 1982] метан и водород обнаружены в глубоководных осадках вблизи фундамента коры Марокканской впадины (кора, сформированная в условиях низкой скорости спре-

динга). Авторами упомянутой работы упоминается, что в образовании метана может участвовать водород.

Присутствие метана и водорода установлено в офиолитовых серпентинитах Омана [Neal and Stanger, 1983], Орегона [Poreda et al., 1990], на Филиппинах [Abrajano et al., 1988] в Марианском преддуговом бассейне [Haggerty, 1991]

Некоторые минералы, образующиеся при низкотемпературной серпентинизации перидотитов (до 350°C) и низком отношении В/П можно рассматривать в качестве катализаторов при образовании высокомолекулярных углеводородов. К их числу, например, относятся аварунит (Ni_3Fe) и продукты его окисления (металло-оксидные “фазы”), а также гидроокислы железа как продукты окисления сульфидов [Базылев, 1998]. Эти минералы установлены в массивных серпентинитах САХ [Базылев, 1997, 1998] и довольно обычны для офиолитовых перидотитов [Poreda et al., 1990].

Заключение

Проведенное исследование показывает, что глобальный процесс серпентинизации мантийных гипербазитов океана сопровождается выделением огромного количества водорода и образованием метана. Этот процесс развивается в условиях, отвечающих начальному этапу генерации нефти и газа.

Выполненные расчеты показывают, что количество этих газов на несколько порядков выше всех мировых запасов нефти [Корчагина, 1999]. Это следует принять во внимание как в связи с проблемой флюидного режима Земли в историческом аспекте, так и при разработке теоретических и прикладных задач геологии нефти и газа, независимо от биогенной или абиогенной гипотез.

Существенная роль в этих исследованиях должна быть отведена целевому геодинамическому районированию на основе комплексного геолого-геофизического подхода с использованием данных спутниковой гравиметрии, материалов по сейсмологии, тепловому и магнитному полям и по сейсмическому зондированию. При развитии этого направления следует уделить особое внимание изучению природы сейсмических границ и их связи с процессами метаморфизма. Особое значение для уточнения приведенных оценок имеет дальнейшее исследование влияния отношения В/П на фугитивность кислорода и состав минеральных ассоциаций серпентинизированных перидотитов.

Благодарности. Авторы признательны Э. М. Галимову, А. Ф. Грачеву, И. Н. Капустину, Л. А. Кодиной и Ж.-Л. Шарлю за полезное обсуждение работы.

Исследование поддержано грантами Министерства Науки РФ по Проекту “Процессы в зоне гребня Срединно-Атлантического хребта”, ФЦП “Мировой океан” 3.2.3., 3.2.6. и РФФИ # 98-05-64212, # 97-05-65-359.

Литература

- Базылев Б. А., *Метаморфизм океанических гипербазитов*, Автореферат дисс. канд. геол.-мин. наук., 21 с., ГЕОХИ, Москва, 1989.
- Базылев Б. А., *Метаморфизм гипербазитов из разломной зоны Атлантик (Атлантический океан): Свидетельство глубокого проникновения воды в океаническую литосферу*, Доклады РАН, 323, (4), 741–743, 1992.
- Базылев Б. А., *Аварунит (Ni_3Fe)-содержащая метаморфическая ассоциация в мантийных перидотитах из зоны разлома 15–20 (Атлантический океан): первая находка в океанической литосфере*, Юбилейная сессия Ученого Совета ГЕОХИ, Тезисы докладов молодых ученых, с. 15–16, ГЕОХИ, Москва, 1997.
- Базылев Б.А., Петрологические факторы проявления аварунит-сульфидной минерализации в океанических мантийных перидотитах, *Проблемы генезиса магматических и метаморфических пород*, Межд. конф. к 100-летию Н. А. Елисеева, Тезисы докладов, с. 66–67, С.-Пб, Май 25–27, 1998.
- Борисов М. В., Изменение горных пород и гидротермального раствора при их взаимодействии (термодинамический расчет), *Тезисы I Всесоюз. совещание “Физ.-хим. моделир. в геохимии и петрологии”*, с. 77–79, Иркутск, 1980.
- Борисов М. В., Рыженко Б. Н., Крайнов С. Р., Влияние кислотно-основных свойств горных пород на состав равновесного водного раствора, *Геохимия*, (5), 705–713, 1984.
- Вассоевич Н. Б., *Нефтегазоносность осадочных бассейнов*, Избранные труды, 260 с., Наука, Москва, 1988.
- Галимов Э. М., Кодиная Л. А., *Исследование органического вещества и газов в осадочных толщах Мирового океана*, 228 с., Наука, Москва, 1982.
- Грачев А. Ф., Николайчик В. В., О природе быстрой фазы пострифтового опускания, *Сб. “Внутриплитные явления в земной коре”*, с. 119–133, Наука, Москва, 1988.
- Гричук Д. В., Борисов М. В., Мельникова Г. Л., Термодинамическая модель гидротермальной системы в океанической коре: оценка эволюции раствора, *Геология рудных месторождений*, (4), 3–23, 1985.
- Дмитриев Л. В., Уханов А. В., Шараськин А. Я., Петрохимические типы перидотитов мантии, *Геохимия*, (8), 1160–1166, 1976.
- Дмитриев Л. В., Соболев А. В., Рейснер М. Г., Мелсон В. Дж., Петрохимические группы закалочных стекол ТОР (толеиты океанических рифтов) и их распределение в Атлантическом и Тихом океанах, кн. *Магматизм и тектоника океана*, Ред. Ю. М. Пушаровский, с. 43–108, Наука, Москва, 1990.

- Дмитриев Л. В., Вариации состава базальтов срединно-океанических хребтов как функция геодинамической обстановки их формирования, *Петрология*, 6, (4), 340–362, 1998.
- Дмитриев Л. В., Соболев А. В., Данюшевский Л. В., Ахметов К. С., Сегментация Срединно-Атлантического хребта и ее связь с давлением кристаллизации и содержанием воды в базальтовых расплавах, Кн. *Нелинейная геодинамика*, Ред. Ю. М. Пуцаровский, с. 26–54, Наука, Москва, 1994.
- Доленко Г. Н., *Происхождение нефти и газа и нефтенакпление в земной коре*, 135 с., Наукова Думка, Киев, 1986.
- Зверев С. М., Главные черты разреза литосферы на АБГТ и их сопоставление с данными других методов и данными о других регионах, *Глубинное сейсмическое зондирование литосферы на Анголо-Бразильском геотраверсе*, с. 131–137, РАН, Москва, 1996.
- Зверев С. М., Косминская И. П., Глубинное сейсмическое зондирование земной коры океанов, *Международный геолого-геофизический Атлас Атлантического океана*, с. 150–151; 170–171, МОК ЮНЕСКО, 1990.
- Зоненшайн Л. П., Кузьмин М. И., Натапов Л. М., *Тектоника литосферных плит территории СССР*, книга 2, 334 с., Недра, Москва, 1990.
- Корчагина Ю. И., Мировые ресурсы нефти в XXI веке, *Литология и полезные ископаемые*, (5), 552–554, 1999.
- Лангсет М. Г., Уеда С., Геотермические исследования дна океана, *Международный геолого-геофизический Атлас Атлантического океана*, с. 96–100, МОК ЮНЕСКО, 1990.
- Мазарович А. О., Соколов С. Ю., Разломы Ангольской котловины, *Российский журнал наук о Земле*, 1 (3), Март, 1999. (Электронная публикация: http://eos.wdcb.rssi.ru/rjes/rjes_r00.htm)
- Попов Н. И., Федоров К. Н., Орлов В. М., *Морская вода*, 327 с., Наука, Москва, 1979.
- Попова А. К., Смирнов Я. Б., Геотермическая активность срединно-океанического хребта, *Геофизические характеристики земной коры Атлантического океана*, Ред. И. С. Грамберг, с. 145–151, Недра, Ленинград, 1985.
- Силантьев, С. А., *Метаморфические породы дна Атлантического океана*, 115 с., Наука, Москва, 1984.
- Силантьев С. А., Базылев Б. А., Удинцев Г. Б., Шенке Г. В., Происхождение и условия формирования гипербазитового комплекса о. Гиббс, Южно-Шетландские острова, Западная Антарктика, *Петрология*, 5, (3), 312–325, 1997.
- Силантьев С. А., Костицын Ю. А., Изотопный состав стронция и концентрация рубидия и стронция в породообразующих минералах амфиболитов разломной зоны 15°20' (Атлантика) в связи с условиями океанического метаморфизма, *ДАН СССР*, 315, (3), 707–711, 1990.
- Силантьев, С. А., Мироненко, М. В., Базылев Б. А., Семенов Ю. В., Метаморфизм, связанный с гидротермальными системами срединно-океанических хребтов: опыт термодинамического моделирования, *Геохимия*, 7, 1015–1034, 1992.
- Симонов В. А., Колобов В. Ю., Пейве А. А., *Петрология и геохимия геодинамических процессов в Центральной Атлантике*, с. 227, Изд. СО РАН, Новосибирск, 1999.
- Сорохтин О. Г., Ушаков С. А., *Глобальная эволюция Земли*, с. 446, Изд. МГУ, 1991.
- Файф У., Прайс Н., Томпсон А., *Флюиды в земной коре*, 436 с., Мир, Москва, 1981.
- Хендерсон П., *Неорганическая геохимия*, 339 с., Мир, Москва, 1985.
- Шваров Ю. В., Алгоритмизация численного равновесного моделирования динамических геохимических процессов, *Геохимия*, (6), 646–652, 1999.
- Штейнберг Д. С., Чащухин И. С., *Сerpентинизация ультрабазитов*, 312 с., Наука, Москва, 1977.
- Abrajano T. A., Sturchio N. C., Bohlke J. K., Lyon G. L., Poreda R. J., and Stevens C. M., Methane-hydrogen gas seeps, Zambales ophiolite, Philippines: deep or shallow origin?, *Chemical Geology*, 71, 211–222, 1988.
- Bonatti, E., and Michael P. J., Mantle peridotites from continental rifts to ocean basins to subduction zones, *Earth and Planetary Science Letters*, 91, 297–311, 1989.
- Bonatti E., Long-lived oceanic transform boundaries formed above mantle thermal minima, *Geology*, 24, 803–806, 1996.
- Bonatti E., Seyer M., and Sushevskaya N. M., A cold sub-oceanic mantle belt at the Earth's equator, *Science*, 261, 315–320, 1993.
- Cannat M., Mevel C., Maia M., Deplus C., Durand C., Gente P., Agrinier P., Belarouchi A., Dubuisson G., Humler E., and Reynolds J., Thin crust, ultramafic exposures, and rugged faulting patterns at the Mid-Atlantic Ridge (22°–24°N), *Geology*, 23, 49–52, 1995.
- Charlou J. L., Bougault H., Appriou P., Nelsen T., and Rona P. A., Different TDM/CH₄ hydrothermal plume signatures: TAG site at 26°N and serpentinized ultrabasic diapir at 15°05' N on the Mid-Atlantic Ridge, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 3209–3222, 1991.
- Charlou J.L., Fouquet Y., Bougault H., Donval J. P., Etoubleau J., Jean-Baptiste P., Dapigny A., Appriou P., and Rona P., Intense CH₄ plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 15°20' N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge, *Geochim. Et Cosmochim. Acta*, 62, (13), 2323–2333, 1998.
- Coleman R. G., and Keith T. E., A chemical study of serpentinization – Burro Mountain, California, *J. Petrol*, 12, 311–328, 1971.
- Donval J. P. et al., High H₂ and CH₄ content in hydrothermal fluids from Rainbow site newly sampled at 36°14' N on the Amar segment, Mid-Atlantic Ridge (diving FLORES cruise, July 1997), Comparison with other MAR sites, *Eos Trans.*, 78, F832, 1997, (abstr.).
- Escartin J., Cannat M., Ultramafic exposures and the gravity signature of the lithosphere near the Fifteen-Twenty Fracture Zone (Mid-Atlantic Ridge, 14°–16.5°N), *Earth Planet. Sci. Lett.*, 171, 411–424, 1999.
- Eugster H. P., and Skippen G. B., Igneous and metamorphic reactions involving gas equilibria, in: *Researches in Geochemistry*, 2, P. H. Abelson (Ed.), p. 492, Wiley, New York, 1967.
- Haggerty J. A., Evidence from fluid seeps a top serpentine seamounts in the Mariana Forearc: Clues for emplacement

- of seamounts and their relationship to forearc tectonics, *Mar. Geol.*, 102, 293–309, 1991.
- Hood A., Gutjahr C. C. M., and Heacock R. L., Organic metamorphism and the generation of petroleum, *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 59, 986–996, 1975.
- Klemme H. D., and Ulmishek G. F., Effective petroleum source rocks of the World: stratigraphic distribution and controlling depositional factors, *AAPG Bulletin*, 75, (12), 1809–1851, 1991.
- Lilley M. D., Butterfeld D. A., Olsomn E. J., Lupton J. E., Macko S. E., and McDuff R. E., Anomalous CH₄ and NH₄ concentrations at an unsedimented mid-ocean ridge hydrothermal system, *Nature*, 364, 45–47, 1993.
- Martin B., and Fyfe W. S., Some experimental and theoretical observations on the kinetics of hydration reactions with particular reference to serpentinization, *Chem. Geol.*, 6, p. 185, 1970.
- Mottl, M.J., Metabasalts, axial hot springs, and the structure of hydrothermal systems at mid-ocean ridges, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 94, 161–180, 1983.
- Neal C., and Stanger G., Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman, *Earth. Planet Sci. Lett.*, 66, 315–320, 1983.
- Poreda R.J., Marti K., and Craig H., Rare gases and hydrogen in native metals, in: *From Mantle to Meteorites*, K. Gopalan et al. (Eds.), pp. 153–172, Indian Ac. Sci., 1990.
- Rona P. A., and Scott S. D., Preface, A special issue on sea-floor Hydrothermal Mineralization: New Perspectives, *Economic Geology*, 88, (5), 1934–1976, 1993.
- Schmidt M.W., and Poli S., Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generations, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 163, 361–379, 1998.
- Snow J. E., Of Hess crust and layer cake, *Nature*, 374, 413–414, 1995.
- Snow J. E. and Dick H. J. B., Pervasive magnesium loss by marine weathering of peridotite, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 59, (20), 4219–4235, 1995.
- Snow, J. E., Reisberg, L., Os isotopic systematics of the MORB mantle: results from altered abyssal peridotites, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 133, 411–421, 1995.
- Vinogradov A. P., Dmitriev L. V., and Udintsev G. B., Distribution of trace elements in crystalline rocks of rift zones, *Phil. Trans. Roy. Soc., London*, A 268, 487–491, 1971.
- Welhan J. A., and Craig H., Methane, hydrogen and helium in hydrothermal fluids at 21°N on the East Pacific Rise, *Hydrothermal Processes at Sea Floor Spreading Centers*, P. Rona et al. (Ed.), 391–409, 1983.
- Wicks F. J., and Plant A. G., Electron-microprobe and X-ray-microbeam studies of serpentine textures, *Can. Mineral.*, 17, 785–830, 1979.

(Поступила в редакцию 25 ноября 1998.)