УДК 556.368:551.465(261-17)

С.М.СУДАРИКОВ, *д-р геол.-минерал. наук, профессор, sergei_sudarikov@mail.ru*
С.С.ФИЛАТОВА, *аспирант, f-ss@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

S.M.SUDARIKOV, *Dr. g.-m. Sci., Professor, sergei_sudarikov@mail.ru*
S.S.FILATOVA, *Post-graduate Student, f-ss@mail.ru*
Saint-Petersburg State Mining Institute (*Technical University*)

РУДООБРАЗУЮЩИЕ ГИДРОТЕРМЫ И ГАЗОГИДРАТООБРАЗОВАНИЕ В ОКЕАНЕ

Сопоставляются геолого-тектонические обстановки и термобарические условия гидротермальной деятельности и образования газогидратов. Сравниваются концентрации и изотопные отношения газовых компонентов в гидротермальных растворах срединно-океанических хребтов с различной мощностью осадочного покрова и окраинно-океанических бассейнов. Анализируется возможное влияние восходящих термальных флюидов на формирование скоплений газовых гидратов и приводятся примеры газогидратообразования, сопряженного с гидротермальным процессом.

***Ключевые слова*:** гидротермы, газогидраты, углеводороды, метан, органическое вещество, спрединг, Мировой океан.

ORE-FORMING HYDROTHERMAL SOLUTIONS AND GAS HYDRATE FORMATION IN THE OCEAN

Geological and tectonic settings and thermobaric characteristics of hydrothermal activity are confronted with those of gas hydrate formation. Hydrocarbon concentrations and isotopic composition in hydrothermal fluids of mid-ocean ridges with different thickness of sediment cover and marginal oceanic basins are compared. The possible influence of rising thermal fluids on gas hydrate accumulations was analyzed and examples of hydrate formation linked with hydrothermal process are given.

***Key words*:** hydrothermal solutions, gas hydrates, hydrocarbons, methane, organic matter, spreading, the World ocean.

На рубеже XX и XXI веков одним из основных направлений в исследовании дна Мирового океана явилось изучение рифтовых зон, где происходит раздвижение океанского дна, подъем глубинного вещества и формирование новой коры. Вулканические процессы в этих районах сопровождаются образованием мощных гидротермальных систем с разнонаправленным движением флюидов, осуществляющих мобилизацию, перенос и отложение многих химических элементов.

С другой стороны, в последнее десятилетие в мире резко возрос интерес к проблеме природных газовых гидратов. Стоит отметить, что впервые они были вскрыты в Черном море в 1974 г. [5] и в Каспийском море в 1979 г. [4]. Газовые гидраты рассматриваются как потенциальное горючее ископаемое, как возможный источник поступления парникового газа в атмосферу, как фактор, влияющий на природную устойчивость континентальных и островных склонов, как компонент среды, осложняющий хозяйственную деятельность при освоении морских природных ресурсов. Пока неясно, каковы действительные масштабы газогидратоносности недр, в первую очередь

субмаринных, поскольку, 98 % ресурсов газа приходится на акватории Мирового океана и только 2 % – на арктические территории [6]. Кроме того, субмаринное гидратообразование обуславливает накопление газа, тогда как в условиях арктической суши образование гидратов за счет трансформации ранее существовавших залежей газа при экзогенном охлаждении недр приводит к уменьшению доли извлекаемых запасов.

Прямые наблюдения говорят о наличии повышенных концентраций углеводородов (УВ) в растворах некоторых гидротермальных полей срединно-океанических хребтов (см. таблицу). При этом образование метана в растворах полей Логачев и Рэйнбоу на Срединно-Атлантическом хребте связано с процессом серпентинизации ультраосновных пород под воздействием гидротермальных растворов [1, 7, 8], а в условиях впадины Гуаймас УВ образуются при переработке высокотемпературными гидротермами органического вещества осадков.

Интенсивная разгрузка флюидов на океанском дне происходит на фоне активных тектонических движений и формирования трещиноватых и разломных структур. Для возможного формирования скоплений УВ особый интерес представляют глубинные разломы и центры спрединга, перекрытые осадочным чехлом. В качестве примера можно привести упоминаемую впадину Гуаймас в Калифорнийском заливе на продолжении Восточно-Тихоокеанского поднятия (см. таблицу). Проникая по разломам, гидротермальные растворы поступают в осадочную толщу, взаимодействуют с органическим веществом и формируют скопления УВ.

Образование залежей УВ и газогидратов в зонах растяжения океанической коры возможно в результате действия двух факторов: тепловой конвекции воды в трещиновато-пористых породах коры и реакции серпентинизации коры [3]. При серпентинизации происходит интенсивное выделение CH_4, H_2 и др., а условия конвекции воды в пористых средах могут способствовать образованию залежей УВ и газогидратов в приповерхностных слоях океанической коры. В процесс образования УВ и газогидратов вовлекается также углекислый газ, растворенный в морской воде.

Первое обобщение мировых данных по распространению субмаринных газовых гидратов было опубликовано в работе [11]. На сегодняшний день более чем в 80 районах Мирового океана наблюдались газовые гидраты или их признаки. Скопления газовых гидратов, расположенные непосредственно вблизи дна и приуроченные к очагам разгрузки флюидов, оказались наиболее многочисленными; они обнаружены в 14 районах Мирового океана и в двух глубоководных озерах (см. рисунок). Скопление газовых гидратов такого типа в прибрежье о.Ванкувер наиболее впечатляющее: более тонны гидратов метана было поднято на борт канадского рыболовного судна донным тралом.

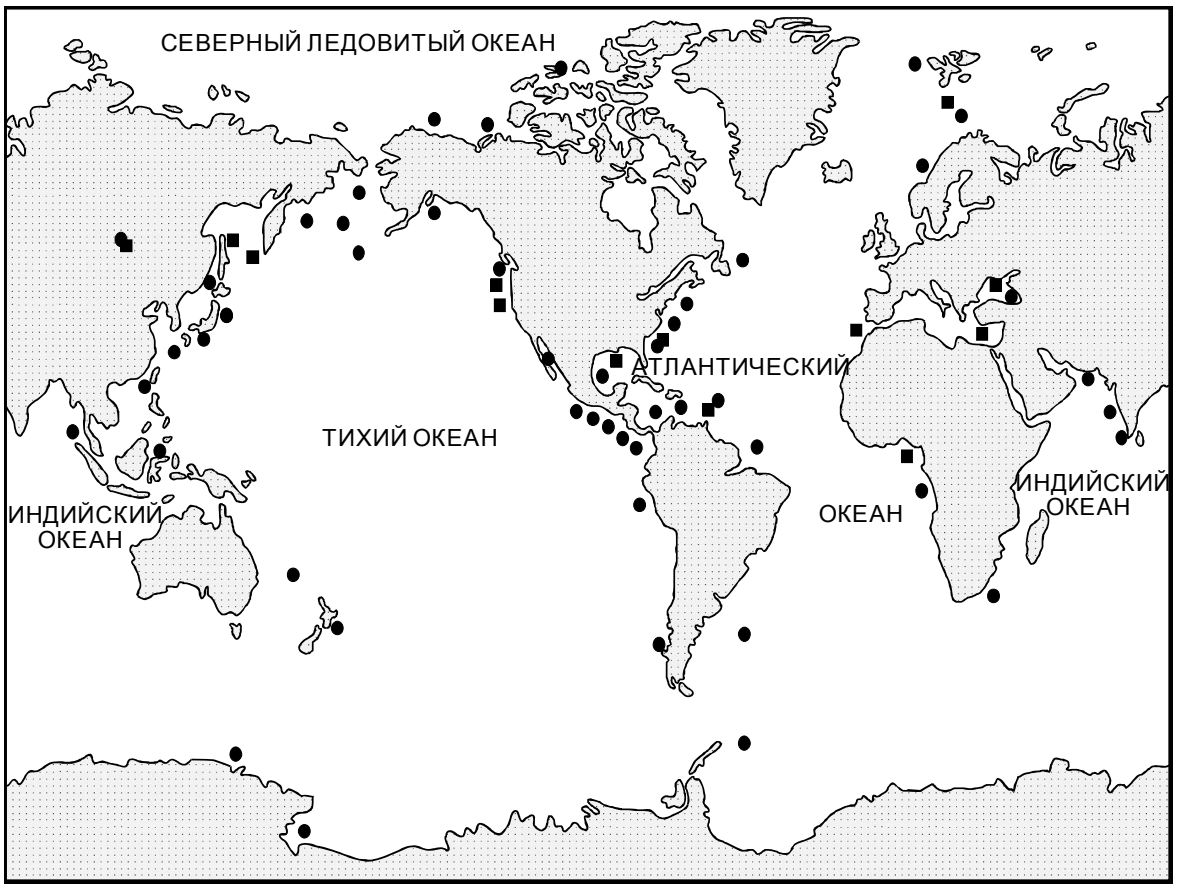
Для решения вопроса о связи гидратообразования с гидротермальной деятельностью имеет смысл остановиться на термобарических условиях, в которых протекают эти процессы.

Газогидраты представляют собой льдоподобную структуру молекул воды, в кристаллической решетке которой физически заключены молекулы газа. Они образуются при сочетании высокого давления с относительно низкой температурой. При высоком давлении газогидраты могут быть стабильными при температуре значительно выше точки замерзания воды. При $P = 10 \div 30$ МПа и $T = 10 \div 20$ °С в осадках на глубине моря 1-3 км формируются газогидраты при условии, что концентрация газа превышает концентрацию, необходимую для насыщения поровых вод [10]. Газогидраты кристаллизуются при охлаждении флюидов и, соответственно, уменьшении растворимости газа. Аналогичные термобарические условия характерны и для большинства современных гидротермальных проявлений.

Метан – основной газовый компонент газогидрата – может быть термогенной, биогенной или смешанной природы. В формировании газогидрата может принимать участие вода из флюидов, а также из окружающих современных осадков.

Концентрации и изотопные отношения газовых компонентов в растворах

Параметр	Трог, Окинава, поле Джейд	Срединно-Алтантический хребет, поле				Восточно-Тихоокеанское поднятие, 21° с.ш.
		Впадина Гуаймас	Логачев	Рэйнбоу	Лаки-Страйк	
T, °C	320	273-315	–	–	–	273-355
pH при 25 °C	4,7	5,9	–	–	–	3,3-3,8
CO_2, ммоль	198	16-24	5,5-5,9	5,7-6,1	25,7-55,4	5,7
CH_4, ммоль	2,4	6,8-2,0	1,66	1,58	0,36-0,70	0,06
H_2S, ммоль	12,4	3,8-6,0	2,5-3,0	8,5-11,0	2,5-3,0	6,6-8,4
He, ммоль	0,82	–	–	–	–	0,9-2,2
$\delta^{13}C_{\text{ÑÎ}_2}$, ‰	–5,0	–	–4,3	–9,0	–	-7,0
$\delta^{13}C_{\text{ÑÍ}_4}$, ‰	–(36,1-40,7)	–(43,2-50,8)	–(13,8-14,6)	–(18,0-19,0)	–	От –15,5 до –17,6
$^3He / ^4He$	6,5	7,0	–	–	–	7,8



Районы наблюдения газовых гидратов и (или) их признаков в Мировом океане. Квадратами показаны районы, в которых обнаружены придонные скопления газовых гидратов, связанные с очагами разгрузки флюидов

Наряду с теоретическими предпосылками имеются многочисленные наблюдения, свидетельствующие о связи формирования газогидратов с повышенным тепловым потоком и гидротермальной деятельностью в некоторых районах Океана. При этом если на срединно-океанических хребтах при отсутствии осадков газогидраты не образуются, то в условиях задугового (вторичного) спрединга могут возникнуть условия, благоприятные для формирования скоплений газогидратов.

Геологическое развитие регионов задугового спрединга обеспечивается тектонической и вулканической деятельностью и формированием трещиноватых и разломных структур. В отличие от спрединга в срединно-океанических хребтах вторичный спрединг осуществляется не напрямую восходящими частями конвективных ячеек в мантии, а вторичными процессами в нисходящих океанических плитах.

При опускании литосферных плит в мантию под действием собственной тяжести в тылу островных дуг возникают напряжения растяжения. Под их влиянием вдоль оперяющих зону поддвига плит разломов может произойти отодвигание тела островной дуги от тыловых частей островодужной плиты. Так в тылу дуги возникает вторичная рифтовая зона. Восходящие потоки мантийного вещества в тыловых зонах раздвигают океаническую кору. Раздвигание «новорожденных» плит приводит к подвиганию островной дуги к океанической плите. Эти процессы приводят к активизации субаэрального и субаквального вулканизма в островных дугах.

Гидротермальные процессы в этих структурах сопровождаются образованием флюидных систем, осуществляющих мобилизацию, перенос и отложение химических элементов [9]. Наличие значительного количества органического вещества в коре делает эти регионы перспективными для образования в них скоплений УВ.

Так, в Японском море газогидраты были обнаружены при бурении скважины глубоководного бурения 796. Скважина 796А (42°53,4' с.ш., 139°24' з.д.; глубина воды 2623 м) приурочена к южной части подводного хр.Окусири [2]. Гидратопроявления скв.796 характеризуются приуроченностью к отложениям гравитационных потоков (многочисленные прослои и пачки обломочного материала) и к участку с высоким тепловым потоком (156 мВт/м^2 при среднем тепловом потоке в котловине 40-50 мВт/м^2) и большим геотермическим градиентом (17,8 °С/100 м).

В Восточно-Китайском море (Окинавский трог) газогидраты метана и некоторых более высоких углеводородов были обнаружены в морских и наземных условиях при высоком давлении и низкой температуре. Наличие гидратов диоксида углерода (CO_2) предполагалось в обогащенных органикой морских осадках, но до 1989 г. в природе не наблюдалось. В процессе подводных погружений 1989 г., проводимых в троге Окинава с целью изучения активного гидротермального поля Джейд, обнаруженного в 1988 г., наблюдалась разгрузка жидкого CO_2, выходы пузырьков из морского дна, формирование гидратов [12, 13]. Гидротермальное поле Джейд приурочено к северо-восточному склону кальдеры Изена в средней части задугового бассейна Окинавского трога (Восточно-Китайское море). В строении поля Джейд, площадь которого составляет 1000 × 200 м, принимают участие активные и неактивные сульфидно-сульфатные трубки, невысокие холмы на глубине 1300-1550 м ниже уровня моря и один черный курильщик. Растворы черного курильщика содержат взвешенные сульфидные частицы и характеризуются температурой 320 °С. Температура чистых растворов, поступающих из других трубок и холмов, не превышает 220 °С. Раствор, поступающий из черного курильщика, содержит 200 ммоль/кг CO_2, 12,4 ммоль/кг H_2S и 14,8 ммоль/кг $CH_4 + H_2$ (в работе [12] приведено содержание CH_4 2,4 ммоль/кг). Флюиды поля Джейд обогащены K и Li.

Выводы

1. На окраинах Океана имеются обширные районы с условиями, благоприятными как для гидротермальной деятельности, так и для образования и сохранения газогидратов.

2. При определенных условиях формирования гидротермальные флюиды могут быть источником поступления углеводородов.

3. Для возможного формирования газогидратов особый интерес представляют глубинные разломы и центры спрединга, перекрытые осадочным чехлом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гидротермальный механизм образования углеводородов в срединно-океанических хребтах / А.Н.Дмитриевский, А.В.Каракин, И.В.Баланюк и др. // Геология нефти и газа. 1997 г. № 8. С.4-17.

2. *Гинсбург Г.Д.* Субмаринные газогидраты / Г.Д.Гинсбург, В.А.Соловьев / ВНИИОкеангеология. СПб, 1994. 199 с.

3. *Дмитриевский А.Н.* Формирование залежей углеводородов в зонах растяжения океанической коры (на примере о.Сахалин) / А.Н.Дмитриевский, И.Е.Баланюк, А.В.Каракин // Газовая промышленность. 2004. № 5. С.50-54.

4. *Ефремова А.Г.* К вопросу о роли газогидратов в формировании газопроизводящих отложений / А.Г.Ефремова, Н.Д.Гритчина // Методы оценки нефте- и газоматеринского потенциала седиментитов. М.: Изд-во МГУ, 1979. С.72-73.

5. *Ефремова А.Г.* Обнаружение кристаллогидратов газов в осадках современных акваторий / А.Г.Ефремова, Б.П.Жижченко // Докл. АН СССР. 1974. Т.214. № 5. С.1179-1181.

6. *Макогон Ю.Ф.* Природные газогидраты: открытие и перспективы // Газовая промышленность. 2001. № 5. С.10-16.

7. Серпентиниты океанической коры – источник образования углеводородов / А.Н.Дмитриевский, И.Е.Баланюк, О.Г.Сорохтин, Л.Ш.Донгарян // Геология нефти и газа. 2002. № 3. С.37-41.

8. Geochemistry of high H_2 and CH_4 vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14'N, MAR) / J.L.Charlou et al. // Chemical Geology 191 (2002). P.345-359.

9. Characteristics of an active vent in the fore-arc basins of the Sunda arc, Indonesia / A.Wiedicke, H.Sahling, G.Delisle et al. // Marine Geology. 2002. V.184. № 1-2. P.121-141.

10. *Katz H.R.* Evidence of gas hydrates beneath the continental slope, East Coast, North Island, New Zealand // New Zealand J. of Geology and Geophysics. 1982. V.25. № 2. P.193-199.

11. *Kvenvolden K.A.* U.S. Hydrates of natural gas: a review of their geological occurrences / K.A.Kvenvolden, M.A.McMenamin // Geol.Surv.Circ. 1980. V.825. P.1-11.

12. Unique chemistry of the hydrothermal solution in the mid-Okinawa Trough backarc basin / H.Sakai, T.Gamo, E.-S.Kim et al. // Geoph. Res. Let. NOV. 1990. V.17. № 12. P.2133-2136.

13. Venting of carbon dioxide-rich fluid and hydrate formation in the Mid-Okinawa Trough backarc basin / H.Sakai, G T.amo, E.-S.Kim et al. // Science. 1990. V.248. № 4959. P.1093-1096.

REFERENCES

1. Hydrothermal mechanism of hydrocarbon formation in the medium-oceanic ridges / A.N.Dmitrievsky, A.V.Karakin, I.V.Balanyuk et al. // Geology of Oil and Gas. 1997. № 8, pp.4-17.

2. *Ginsburg G.D.* Submarine gas hydrates / G.D.Ginsburg, V.A.Soloviov // VNIIOceangeology. Saint Petersburg, 1994. 199 p.

3. *Dmitrievsky A.N.* Formation of hydrocarbon deposits in the tension zones of oceanic crust (on example of the island Sakhalin / A.N.Dmitrievsky, I.E.Balanyuk A.V.Karakin // Gas industry. 2004. № 5, pp.50-54.

4. *Yefremova A.G.* On role of gashydrates in the formation of gas-producing sediments / A.G.Yefremova, N.D.Gritchina // Methods for evaluation of oil and gas-parental potential of sedimentites / M.: Publ. MGU, 1979, pp.72-73.

5. *Yefremova A.G.* Detection of crystalhydrates of gas in sediments of present-day water areas / A.G.Yefremova, B.P.Zhizhchenko // Papers of AS USSR. 1974. Vol.214. № 5, pp.1179-1181.

6. Makogon Yu.F. Natural gas hydrates: discovery and prospects // Gas industry. 2001. № 5, pp.10-16.

7. Serpentinites of the oceanic crust – a source of hydrocarbon formation / A.N.Dmitrievsky, I.E.Balanyuk, O.G.Sorokhtin, L.Sh.Dongaryan // Geology of Oil and Gas. 2002. № 3, pp.37-41.

8. Geochemistry of high H_2 and CH_4 vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14'N, MAR) / J.L.Charlou et al. // Chemical Geology 191, 2002, pp.345-359.

9. Characteristics of an active vent in the fore-arc basins of the Sunda arc, Indonesia / A.Wiedicke, H.Sahling, G.Deliste et al. // Marine Geology. 2002. Vol.184, № 1-2, pp.121-141.

10. *Katz H.R.* Evidence of gas hydrates beneath the continental slope, East Coast, North Island, New Zealand // New Zealand J. of Geology and Geophysics. 1982. Vol.25. № 2, pp.193-199.

11. *Kvenvolden K.A.* U.S. Hydrates of natural gas: a review of their geological occurrences / K.A.Kvenvolden, M.A.McMenamin // Geol.Surv.Circ. 1980. Vol.825, pp.1-11.

12. Unique chemistry of the hydrothermal solution in the mid-Okinawa Trough backarc basin / H.Sakai, T.Gamo, E.-S.Kim et al. // Geoph. Res. Let. NOV. 1990. Vol.17. № 12, pp.2133-2136.

13. Venting of carbon dioxide-rich fluid and hydrate formation in the Mid-Okinawa Trough backarc basin / H.Sakai, G T.amo, E.-S.Kim et al. // Science. 1990. Vol.248. № 4959, pp.1093-1096.