

УДК 548.562
DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art70

ЗАЛЕЖИ ГАЗОГИДРАТОВ МЕТАНА В ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНАХ ЧЕРНОГО МОРЯ

Шнюков Е.Ф.¹, Коболев В.П.²

1 – Отделение морской геологии и осадочного рудообразования НАН Украины;

2 – Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины

E-mail: shuraev@nas.gov.ua

Аннотация. В статье обсуждаются вопросы образования особого грязевулканического типа газогидратных залежей в глубоководной части Черного моря. Сопоставление подводных грязевых вулканов Черного моря с их сухопутными аналогами свидетельствует о возможном накоплении кольцевых залежей газогидратов метана в компенсационных прогибах, аналогичных керченским «компенсационным синклиналиям».

Ключевые слова: газогидратные залежи, грязевые вулканы, компенсационные прогибы, Черное море.

GAS HYDRATE DEPOSITS IN BLACK SEA MUD VOLCANOS

Shnyukov E.F.¹, Kobolev V.P.²

1 – Department of marine geology and sedimentary ore formation, NAS of Ukraine;

2 – Institute of geophysics. S.I. Subbotina NAS of Ukraine

E-mail: shuraev@nas.gov.ua

Abstract. The article discusses the formation of a special mud volcano-type gas hydrate deposits in the deep-water part of the Black Sea. A comparison of the Black Sea underwater mud volcanoes with their land analogs indicates a possible accumulation of ring deposits of methane gas hydrates in compensatory deflections, similar to the Kerch «compensation synclines».

Keywords: gas hydrate deposits, mud volcanos, compensatory deflections, Black Sea.

Черное море является природным объектом, сочетающим в себе необходимый набор факторов и условий для существования зон формирования газовых гидратов. Поскольку геолого-геофизические исследования газогидратов метана достаточно дорогие и сложные работы, необходимы критерии поисков, позволяющие сузить районы исследований. Чаще всего скопления газогидратов приурочены к континентальному склону, зонам разломов, конусам выноса рек. Небезынтересным объектом являются залежи газогидратов метана грязевых вулканов глубоководной части Черного моря.

Образование этого типа газогидратов связывается с фильтрацией газов или газонасыщенных вод через термобарическую зону стабильности в пределах зон грязевулканической разгрузки. Основанием для выделения этого особого подводно-грязевулканического типа скоплений газогидратов послужили их находки в сопочной брекчии грязевого вулкана на дне Южного Каспия [1].

К настоящему времени в глубоководной акватории Черного моря идентифицировано более 60 грязевых вулканов [2]. В донных отложениях с ними часто ассоциируют скопления газовых гидратов, а в водной среде фонтаны пузырей метана. Грязевые вулканы представлены разнообразными в геоморфологическом отношении положительными формами подводного рельефа. Они хорошо выделяются конусообразными поднятиями с диаметром 300–2000 м и высотой ~100 м, хотя встречаются и такие, у которых конус практически отсутствует. В разрезе грязевулканическая постройка обычно имеет вид пологого, часто усеченного конуса. Конус сложен сопочной брекчией, потоки которой могут иметь несколько генераций. В плане описываемые структуры более или менее изометричны, округлой формы. Поперечные размеры грязевых вулканов (диаметр их основания) изменяются в широких пределах - от первых сотен метров до нескольких километров. Высота грязевых вулканов по сравнению с их диаметром относительно небольшая: даже у самых крупных из них она редко превышает 100 м. Поэтому крутизна склонов грязевых вулканов, как правило, не превышает первые градусы. Такое соотношение диаметра и высоты объясняется низкой плотностью сопочной брекчии, способной растекаться на расстояние в несколько километров.

Грязевые вулканы Черного моря - разнообразные по своему строению глубинные структуры. На сейсмических разрезах большинство грязевых вулканов имеют столбообразный подводный канал без каких-либо осложнений его формы. Полученные в последние годы обширные материалы сейсмических исследований, позволяют фиксировать корни грязевых вулканов в мезозое фундамента и даже в верхней мантии. В этой связи совершенно справедливо ставится вопрос Д.Ф. Исмаиловым и др. (2006): «каким образом могут влиять глиняные майкопские диапиры на возникновение грязевых вулканов с корнями в мезозойских отложениях?». По нашему мнению, значительная часть грязевых вулканов Черного моря все-таки связана с глиняными диапирами, но связь эта обратная общепринятой. Глубинные флюиды, проникая сквозь осадочный чехол, как бы

облегчают процесс складкообразования. Иными словами, не диапиры порождают грязевые вулканы, а наоборот, потоки глубинных флюидов, порождающие грязевые вулканы, создают благоприятные условия для возникновения диапиров. Иногда следы движения потоков глубинных флюидов - субвертикальные геологические тела, которые проникают на поверхность по крупным нарушениям сплошности осадочного чехла и создают грязевые вулканы. Таким образом, не вызывает сомнения тот факт, что наиболее интенсивные локализованные разгрузки углеводородных флюидов контролируются инъекционными структурами типа диапиров, разрывных нарушений и грязевых вулканов.

Очевидное участие глубинных процессов в формировании грязевых вулканов ставит вопрос о необходимости уточнения определения этого явления. Вероятно, это определение может звучать примерно так: грязевой вулканизм есть форма проявления на поверхности земли локальных газовых потоков глубинных углеводородов, сопровождающихся выбросами сопочной брекчии, обломочного материала, воды и формирующих своеобразные морфоструктуры рельефа - конусовидные холмы с кратерами на вершинах.

Необходимо также отличать грязевые вулканы от газовых фонтанов, многочисленные проявления которых зафиксированы в ряде регионов на дне акваторий. Грязевые вулканы - это особые морфоструктуры донных отложений, часто имеющие геоморфологически выраженные положительные формы морского дна. Газовые фонтаны – менее значительные выделения газов, обычно приуроченные к тектоническим нарушениям пород и не образующие положительных форм на дне.

Грязевые вулканы встречены во многих крупных геологических структурах Черного моря (рисунок). Следует подчеркнуть, что в если центральной части Западно-Черноморской впадины (ЗЧВ) открыто 11 грязевых вулканов, то непосредственно в пределах Восточно-Черноморской впадины (ВЧВ) подобных проявлений до сих пор не зафиксировано.

Не вызывает сомнения тот факт, что грязевые вулканы приурочены к глубинным разломам, которые имеют определяющее значение в процессе возникновения и развития деформаций земной коры. Грязевые вулканы ЗЧВ расположены в пределах Одесско-Синопской разломной зоны мантийного заложения (рисунок), т.е. в эпицентре активного геодинамического развития Западно-Черноморского рифта. Раздел Мохо под ним характеризуется груботреугольной формой, образуя свод с довольно крутыми (до 25°)

бортами. Лучи этого тройного сочленения в итоге переходят в ранг рифтогенных структур над мантийным плюмом, что подтверждается сейсмотомографическими построениями. На скоростной модели мантии непосредственно под ЗЧВ на глубинах от 2500 до 1700 км четко фиксируется низкоскоростная неоднородность, которая отождествляется с реликтом Черноморского плюма. В то же время, под ВЧВ подобная аномальная зона отсутствует. Внедрение разогретого мантийного вещества с последующим остыванием аномальной линзы может служить возможным объяснением происхождения и эволюции ЗЧВ [5]. В данном случае в ЗЧВ происходило заполнение надрифтового прогиба осадками, оживление разломов и их влияние на фильтрационные процессы и образование газогидратов в придонных отложениях. Периодическая активизация разломных блоков, лежащих в основании, внесла главный вклад в формирование грязевулканических структур ЗЧВ. Таким образом, можно констатировать, что единые корни глубинных процессов, которые приводят к появлению грязевого вулканизма в ЗЧВ, несомненно свидетельствуют об их глубинном происхождении.

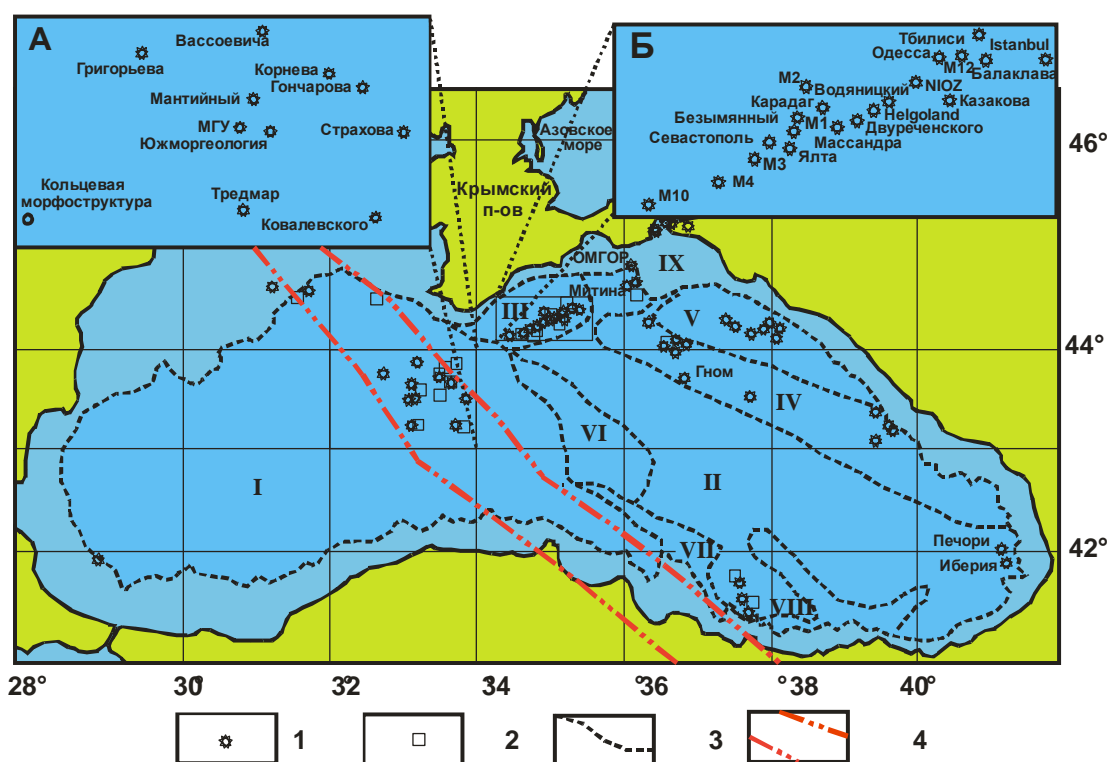


Рис. 1. Распределение по [2] выявленных к настоящему времени грязевых вулканов (1) и газогидратов (2) в акватории Черного моря. 3 - границы тектонических структур: I - Западно-Черноморская впадина, II - Восточно-Черноморская впадина, III - прогиб Сорокина, IV - поднятие Шатского, V - Туапсинский прогиб, VI - хребет Андрусова, VII - хребет Архангельского, VIII - Гиресунская впадина, IX - Керченско-Таманский прогиб. 4 - границы Одесско-Синопской разломной зоны. На вставках расположение грязевых вулканов в Западно-Черноморской впадине (А) и в прогибе Сорокина (Б).

Грязевые вулканы извергают на поверхность большие объемы газов, огромные массы сопочной брекчии и обломочного материала из прорываемых пород. Многие исследователи пришли к выводу о том, что на вершинах антиклинальных структур, пораженных грязевым вулканизмом, возникают ослабленные участки - своеобразный дефицит масс, где гидростатическое давление распределено неравномерно. В условиях подводного извержения накопление осадков в провале или воронке также сопровождается процессом продавливания, в результате роста прогиба увеличивается объем накопившихся в нем осадков. Проседания сопровождают все без исключения грязевулканические извержения.

Следует отметить, что образование компенсационных синклиналей протекает лишь в определенных структурах, предварительно тектонически подготовленных. Поступление глубинных флюидов вызывает насыщение ядра антиклинали большим количеством газов, находящихся под большим давлением. Удаление флюидов, связанное с грязевулканической деятельностью или тектоническими нарушениями, приводит к усадке ядра и сопровождается значительным уменьшением его объема. Следствием этого является образование сводовых грабен и тому подобных структур. Решающим фактором формирования компенсационных синклиналей является грязевой вулканизм.

Почти все современные авторы подчеркивают грязевулканическое происхождение компенсационных прогибов, синклинальное расположение слагающего их комплекса третичных осадков и сопочной брекчии. Широко применявшийся и применяемый многими исследователями Керченского полуострова термин «вдавленная синклиналь», неудачен, так как не отражает особенности генезиса. В этой связи, представляется уместным при общей характеристике структур этого типа использование термина «компенсационная синклиналь» как более универсального и точного [8].

Газогидраты, как метастабильные образования, существуют в природных условиях, близких к границе их фазовой устойчивости. Необходимыми условиями образования и существования природных газогидратов является наличие требуемых для этого давления (P) и температуры (T), а также достаточное количество воды и свободного (либо растворенного в воде) газа. Температура на дне Черного моря за пределами шельфа изменяется от 8.7 до 9.2⁰C, медленно нарастая с глубиной, а геотермический градиент в среднем составляет 50 мК/м. Основываясь на данных геотермических исследований и на результатах изучения равновесия гидратосодержащих систем можно заключить, что *PT*-

условия допускают существование гидратов метанового газа начиная с глубин моря около 600-650 м. С увеличением глубины моря мощность зоны гидратообразования растет и достигает 350-500 м в глубоководной части. Мощность слоя гидратообразования существенно зависит от величины градиента температуры или теплового потока. В зонах с низким тепловым потоком (25-30 мВт/м²) мощность слоя гидратообразования составляет 350-400м, при увеличении теплового потока до 40мВт/м² она уменьшается до 200-250 м, а при значениях потока 60 мВт/м² и более - сокращается до десятков метров. В зонах аномально высоких потоков (80-100 мВт/м²) газогидратный слой, очевидно, полностью отсутствует. Приведенные расчеты показывают, что в глубоководной части Черного моря в придонном слое осадков существует благоприятная термобарическая обстановка для формирования и стабильного существования газогидратов [4].

По данным прямых геолого-геофизических наблюдений оценить гидратонасыщенность осадков в окрестностях подводных грязевых вулканов представляется сложной задачей. Поэтому исследования аквальных залежей газогидратов грязевых вулканов предусматривают использование численного моделирования. В работе Е.И. Суетновой приводятся результаты математического моделирования процесса аккумуляции газовых гидратов в окрестностях подводных грязевых вулканов [7]. При этом следует отметить, что в модели принят лишь фильтрационный механизм накопления газовых гидратов в зоне их термобарической стабильности под поверхностью дна в зоне грязевого вулкана, как наиболее мощный по сравнению с диффузионным. Результаты расчетов свидетельствуют, что максимальная скорость гидратонакопления в этом варианте составляет $\approx 3\%$ порового пространства за 1000 лет (при проницаемости осадков $k_0=10-15\text{м}^2$, градиенте температуры 0.05°м^{-1} , глубине питающего резервуара 1000 м от поверхности дна и глубине моря 1200 м). Полученная скорость гидратонакопления значительно превышает скорость гидратонакопления на акваториях пассивных континентальных окраинах, где гидратонасыщенность составляет только первые проценты и скорости гидратонакопления оцениваются как $\approx 1\%$ в 10^5 лет. Таким образом, скорость накопления гидратов в окрестностях подводных грязевых вулканов только за счет фильтрации газонасыщенного порового флюида над резервуаром питания грязевого вулкана (диапира) достаточна для формирования значительных газогидратных скоплений за период порядка нескольких тысяч лет.

Из многочисленных подводных грязевых вулканов, пожалуй, лучше других изучен грязевой вулкан Хаакон Мосби в Норвежском море [6]. В пределах грязевулканического поля были отобраны образцы донных отложений на 30 станциях, 17 из которых содержали газогидраты. Обнаружена концентрическая зональность развития газогидратов, обусловленная выходящим потоком грязевулканического флюида и созданного им температурного поля. В центре грязевого поля газогидраты отсутствуют, создавая круг радиусом 100 м. В 200 м от центра вулкана содержание гидратов достигает максимальных значений (более 20%). Здесь зафиксировано развитие гидратов прямо у поверхности дна, при этом с глубиной гидратонасыщенность уменьшается. С удалением от центра верхняя граница развития газогидратов углубляется. Внешняя граница газогидратов фиксируется на расстоянии 750 м от центра вулкана и определяется интенсивностью диффундирующего газа.

В большинстве (60%) грязевых вулканов Черного моря, развитых глубже 600-700 м были обнаружены газогидраты в составе сопочной брекчии. По колонкам трубок, поднятых из верхних трех метров сопочных покровов, можно только предполагать относительно невысокие содержания газогидратов. Очевидно, более значительные концентрации локализованы глубже. Возникновение компенсационных прогибов вблизи вулканов вызывает многочисленные нарушения сплошности пород, через которые устремляются газы и флюиды. Именно нарушения сплошности пород вершин антиклиналей, на которых развиты грязевые вулканы, может во многом определять распределение залежей газогидратов - наиболее насыщенных газогидратами участков пород.

По результатам изучения грязевого вулкана Хаакан Мосби можно предполагать существование кольцевых залежей газогидратов и вокруг глубоководных грязевых вулканов Черного моря. Очевидно, они характеризуются нарушениями в местах развития компенсационных прогибов, где мощность залежи или концентрация могут даже возрасти. К сожалению, для Черного моря пока нет никаких данных, позволяющих оконтурить залежи по содержанию газогидратов в породах. Можно только предполагать уменьшение насыщения пород газогидратами по мере удаления от зоны каналов поступления газов грязевых вулканов. Надо помнить, что находка одного агрегата газогидрата - это еще далеко не свидетельство наличия залежи. Можно предполагать развитие кольцеобразных залежей внешним диаметром в первые километры и глубинами

в сотни метров в зависимости от величины теплового потока во многих глубоководных грязевых вулканах Черного моря.

Как уже отмечалось, возникновение просадочных компенсационных прогибов – закономерность развития грязевых вулканов в морской среде. Можно предполагать, что в условиях Черноморского бассейна большая часть вулканов в акватории моря, эпизодически функционирует в течение как минимум неогена, вплоть до настоящего времени. Иными словами, компенсационные прогибы должны быть заполнены теми неогеновыми и четвертичными осадками, в периоды накопления которых, грязевые вулканы активно работали. Трудно предполагать их иной характер деятельности, учитывая наблюдаемые последствия в Керченско-Таманском регионе или в геологической истории Черного моря. Колебания уровня моря были велики, но касались, главным образом, верхних двухсот метров водной толщи. Основная масса ныне наблюдаемых грязевых вулканов оставалась под водой. Глубины моря существенно менялись, но водный покров оставался. Возникновение компенсационных прогибов в случае деятельности грязевых вулканов происходило неизбежно, равно как и накопление осадков в них. Весьма вероятно преобладание в разрезе отложений морских компенсационных прогибов глинистых пород чередующихся с насыщенными гидратами породами. Осадки, очевидно, отразят особенности седиментации в разных районах и зонах палеоморя: в мелководных районах – накопление более грубозернистых, хемогенных или карбонатных, в глубоководной зоне – более тонкозернистых осадков.

Компенсационные прогибы глубоководных грязевых вулканов, скорее всего, могут нести полезную нагрузку. Грязевые вулканы постоянно выбрасывают природные газовые смеси в виде фонтанов где-то в центре или в ослабленных зонах близ вулканов. Компенсационные прогибы являются именно такими ослабленными зонами. Поэтому при глубинах более 600-700 м, когда создавались благоприятные для образования газогидратов давления и температуры, именно в компенсационных структурах вероятнее всего имело место наиболее мощное накопление газогидратов из природной смеси газов – метана, углекислоты, сероводорода. Концентрация газогидратов вероятно повсеместно вокруг грязевого вулкана, но именно в компенсационных прогибах скорее всего происходит самое значительное их накопление, это своего рода ловушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург Г.Д., Грамберг И.С., Гулиев И.С., Гусейнов Р.А., Дадашев А.А., Иванов В.Л., Кротов А.Г., Мурадов Ч.С., Соловьев В.А., Телепнев Е.В. Подводно-грязевулканический тип скоплений газовых гидратов // ДАН СССР. - 1988. - Т. 300, № 2. - С. 416-418.
2. Грязевые вулканы Черного моря (каталог) / Е.Ф. Шнюков, Л.В. Ступина, Е.Н. Рыбак и др. - К.: ГНУ ОМГОР, Логос, 2015. - 259 с.
3. Исмаилов А.Ф., Козлов В.Н., Терехов А.А., Хортов А.В. Глиняный диапиризм и грязевой вулканизм при формировании локальных структур в Российской части Черного моря // Геология, геофизика и разработка нефт. и газовых м-ний. - 2006. - 2. - С. 4-10.
4. Коболев В.П. Термодинамические условия гидратообразования в Черном море // Научный журнал. Геология. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика. - 2014, №1(3). С. 126-141.
5. Коболев В.П. Структурно-тектонические и флюидо-динамические аспекты глубинной дегазации мегавпадины Черного моря // Mining of Mineral Deposits, Volume 11, № 1, 2017. - С. 31-49.
6. Соловьев В.А. Газогидратоносность недр Мирового океана // Газовая промышленность. - 2001. - № 12. - С. 19-23.
7. Суетнова Е.И. Аккумуляция газовых гидратов в окрестности подводных грязевых вулканов // Геофизические исследования. 2016. Т. 17. № 4. С. 39-48.
8. Шнюков Е.Ф. Грязевые вулканы Черного моря как поисковый признак газогидратов метана. Laplambert Academic Publishing, 2017. - 48с.