

doi: <https://doi.org/10.15407/gpimo2018.03.005>

Е.Ф. Шнюков¹, В.П. Коболев², С.В. Гошовский³

¹ Центр проблем морской геологии, геоэкологии и осадочного рудообразования
НАН Украины

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

³ Украинский государственный геологоразведочный институт, Киев

ДОРОЖНАЯ КАРТА ОСВОЕНИЯ ЧЕРНОМОРСКИХ ГАЗОГИДРАТОВ МЕТАНА В УКРАИНЕ

Черное море обладает значительными потенциальными ресурсами гидратного газа и расположено в регионе, близком к экспортным потребителям углеводородов. В статье обоснована необходимость целенаправленных исследований по освоению газогидратов в Западночерноморской впадине. С целью изучения масштабов газогидратных скоплений и отработки технологий добычи этого сырья будущего представляется целесообразным создание в ее пределах стационарного опытного полигона на одном из глубоководных грязевых вулканов.

Ключевые слова: *рифт Восточной Африки, Красное море, скоростной разрез, океанизация.*

Введение

В условиях современных трудностей с поставками газа необходимы экстренные меры по освоению альтернативных источников, в частности ресурсного потенциала газогидратных залежей природного газа в Черном море. О его грандиозных масштабах уже многократно писали [1; 19]. Разумеется, опубликованные ранее цифры сугубо предварительны и будут уточнены в будущем. Вместе с тем, полученный к настоящему времени фактический материал позволяет с оптимизмом рассматривать газогидратные скопления Черного моря в качестве одной из перспективных возможностей увеличения ресурсной базы Украины.

Газогидраты являются наименее исследованным и наиболее проблемным типом газовых ресурсов Черного моря. Это касается как оценки принципиальной возможности их вовлечения в промышленный оборот, так и всесторонней характеристики ресурсной базы и, соответственно, оценки масштабов предполагаемой добычи и определения временных рамок ее начала. Поэтому целенаправленные исследования по поиску и разведке месторождений

© Е.Ф. ШНЮКОВ, В.П. КОБОЛЕВ, С.В. ГОШОВСКИЙ, 2018

газогидратов в Черном море с целью определения реальных ресурсов метанового газа являются актуальными.

На большей части Черноморской мегавпадины в придонном слое осадков существует благоприятная термобарическая обстановка для формирования и стабильного существования газогидратов. Однако она является необходимым, но недостаточным условием [6]. Существенными, а может и главными условиями формирования газогидратов являются: (а) наличие достаточного количества свободного метана и (б) пресной воды. Именно эти обстоятельства обуславливают латеральную дискретность зон гидратообразования (ЗГО), установленную многочисленными экспериментальными экспедиционными геолого-геофизическими исследованиями. Поэтому, несмотря на первые оптимистические утверждения о том, что дно Черного моря в своей глубоководной части как бы устилается слоем газогидратов метана, проблема гидратообразования представляется гораздо более сложной.

В своей предыдущей статье [20] мы отмечали наличие в Черном море двух типов залежей газогидратов метана: (а) площадные скопления газогидратов, приуроченные к континентальному склону и связанные с разгрузкой пластовых флюидов на участках вскрытия осадочных толщ эрозией; (б) глубоководные кольцевые залежи в пределах грязевулканических проявлений, где сочетаются условия как для вертикальной миграции газа и газосодержащих флюидов в направлении дна, так и благоприятные РТ-условия для образования гидратов метана.

Для первоочередного изучения и освоения газогидратов метана, по нашему мнению желательно выбрать Западночерноморскую впадину (ЗЧВ). Выбор ЗЧВ продиктован многими обстоятельствами. Это крупная структура, тектонически благоприятная для газонакопления часть Черноморской мегавпадины. Здесь зафиксирован ряд крупнейших грязевых вулканов, которые активны и в настоящее время выбрасывают брекчию и газ. В пределах ЗЧВ выявлены значительные скопления газогидратов на материковом склоне в палеодельтовых областях и находки газогидратов в пределах глубоководных грязевулканических полей.

Термодинамика зон гидратообразования в ЗЧВ

Наиболее приемлемым механизмом формирования газогидратных скоплений в осадках является фильтрация газов или газонасыщенных вод через ЗГО. Газы, попадая в соответствующие термодинамические условия и соединяясь с водой, образуют зону скопления газогидратов. Физические параметры ЗГО, установленные экспериментальным путем, не всегда выдерживаются в естественных условиях. Это зависит от газонасыщенности, состава газа и минерализации воды. В частности, наличие тяжелых углеводородов и CO_2 повышает температуру гидратообразования, а увеличение минерализации воды — снижает на $1\text{--}4^\circ\text{C}$. Фазовое равновесие газогидратов очень чувствительно к изменению температуры. При градиенте давления $1\text{--}2$ МПа/К изменение температуры на 1°C сопровождается изменением мощности гидратного слоя на $50\text{--}100$ м [6].

Поэтому при оценке положения границ ЗГО и ее мощности должны учитываться самые незначительные вариации температуры (включая вариации температуры во времени), обусловленные изменением температуры дна, условий теплообмена в придонном слое воды, осадконакопления и пр. Так как в естественных

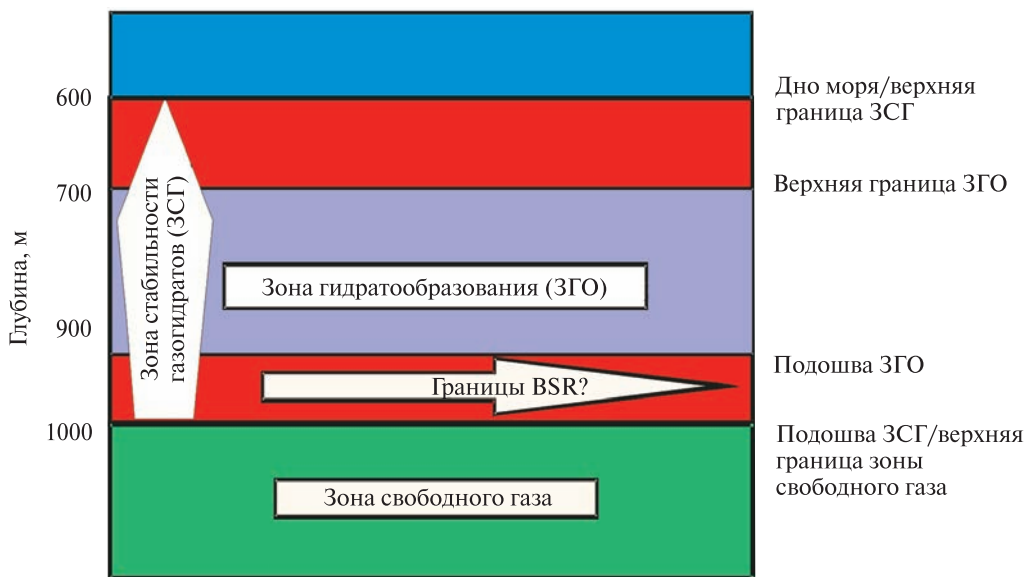


Рис. 1. Принципиальная схема гидратообразования в термодинамических условиях дна Черного моря [6]

условиях формирования осадочных структур процесс фильтрации к поверхности насыщающих флюидов и газа определяется уплотнением накапливающихся осадков, то история аккумуляции газовых гидратов, в свою очередь, зависит от истории накопления и уплотнения осадков. Вместе с тем, непрерывный процесс отложения осадков приводит к уменьшению теплового потока в верхней части осадочной толщи и его повышению в нижней. Изотермы, постепенно смещаясь вверх, должны способствовать разрушению газогидратного слоя снизу и наращиванию его в верхней части. Разрушение гидратов сопровождается поглощением тепла (400–600 кДж/кг в интервале 0–20°С), а образование — соответственно его выделением.

На основании расчета температурной кривой по результатам определений теплового потока и расчетных кривых устойчивости гидрата в системе метан плюс 3,5-процентный раствор NaCl, была произведена оценка глубины залегания и мощности ЗГО в осадочных образованиях ЗЧВ. Здесь наблюдаемые тепловые потоки составляют 20–35 мВт/м², теплопроводность осадков — 0,9–1,1 Вт/(м · К) и, соответственно, геотермические градиенты в них изменяются в диапазоне 20–40 К/км. Сопоставление последних с фазовой диаграммой стабильности газогидратов позволяет определить параметры ЗГО. Расчеты показывают, что благоприятные РТ-условия для образования гидратов метана в ЗЧВ появляются при глубине моря 600–650 м (рис. 1).

С увеличением глубины моря мощность ЗГО в ЗЧВ растет и достигает 350–400 м. Следует отметить, что мощность ЗГО существенно зависит от величины градиента температуры или теплового потока. В зонах с низким тепловым потоком (25–30 мВт/м²) мощность ЗГО составляет 350–400 м, при увеличении теплового потока до 40 мВт/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) ЗГО отсутствует [6].

Площадные скопления газогидратов на материковом склоне северо-западной части Черного моря

Как правило, находки газогидратов в Черном море приурочены в основном к материковому склону. Это обусловлено, прежде всего, огромными оползневыми перемещениями, что, вероятно, должно приводить к увеличению скорости реакции гидратообразования, а захоронение образовавшихся гидратов новыми порциями осадков — предохранять их от диффузионного рассеяния [3].

Материковый склон северо-западной части Черного моря характеризуется широким распространением струйных метановых газовыделений. Здесь удалось установить определенные закономерности в распределении метановых сипов и выявить площади дна, характеризующиеся наибольшей флюидной и газовой динамикой. В частности, была установлена ключевая роль разломов, как каналов доставки газов [21]. Как можно видеть на рис. 2, практически подавляющее большинство газовых выходов расположены в полосе шириной 45 км с двух сторон от бровки шельфа, которая пространственно соответствует Циркумчерноморской разломной зоне, по которой произошло значительное смещение фундамента и раздела Мохо, резкое изменение мощности, структуры земной коры и дислоцированности глубоководных осадков [5].

В геоморфологическом отношении струйные метановые газовыделения в основном приурочены к устьевым каньонам палеорек Дуная, Днестра, Днепра и Каланчака, которые, в свою очередь, наследуют простирание разломов консолидированного фундамента субмеридионального простирания. Прежде всего, это касается пространственного наследования палеоруслом Днепра Николаевского глубинного разлома, который в пределах Циркумчерноморского субширотного разлома, примыкает к Одесско-Синопской субмеридиональной разломной зоне глубинного заложения и разделяет два типа подводного рельефа. Структурно-денудационный обрывистый тип рельефа развит к востоку от Николаевского глубинного разлома, в то время как пологий структурно-аккумулятивный характерен для западной части. На последнем было выявлено аномальное сосредоточение газовых проявлений [28].

В целом, структура осадочных отложений Циркумчерноморской переходной зоны в ЗЧВ характеризуется наличием двух крупных турбидитовых систем: Днепровским и Дунайским глубоководными конусами выноса осадков. С начала нынешнего столетия именно эти акватории стали объектами пристального внимания многочисленных международных и отечественных ресурсно-ориентированных на газогидраты экспедиций. Наличие газовых гидратов в глубоководных осадках в южной части Дунайского конуса было установлено на основании выделения границы BSR [26]. В частности, были закартированы три площади проявления BSR, расположенные между изобатами 750 и 1830 м. В пределах палеодельты Днепра скопления газогидратов были также обнаружены на основании сейсмических исследований [27].

Впоследствии, результаты комплексных геофизических исследований, выполненных в 2011—2013 гг. на этой акватории на НИС «Профессор Водяницкий», позволили однозначно подтвердить наличие газогидратной залежи на этой акватории и существенно уточнить ее размеры и мощность [7].

Характерной особенностью большей части сейсмических аномалий, фиксирующих подошву газогидратных систем в рассматриваемой акватории, является

их непосредственная близость к тектоническим нарушениям, уходящим своими корнями в палеогеновые осадки (Корсаков, Ступак, Бяков, 1991). Именно для палеогенового разреза характерна наибольшая мощность осадочных образований Черноморской мегавпадины. Это свидетельствует о быстром погружении территории в это время по Циркумчерноморскому разлому, который послужил основной причиной для образования крутого «обрыва» ее континентального склона [5]. Можно полагать, что Циркумчерноморский разлом с его тектоническим оперением непосредственно явились подводными каналами для газообразных углеводородов. О том же, но косвенно, свидетельствуют интенсивные сейсмические динамические аномалии, которые примыкают к тектоническим нарушениям и простираются на несколько километров по восстанию пластов.

На основании вышеизложенного можно сделать принципиальный вывод о наличии на северо-западном склоне ЗЧВ перспективных площадей на обнаружение газогидратных скоплений в пределах Днепровского и Дунайского глубоководных конусов выноса осадков.

В силу известных политических причин работы на акватории палеodelьты Днепра, примыкающей к аннексированному Крымскому полуострову, в ближай-

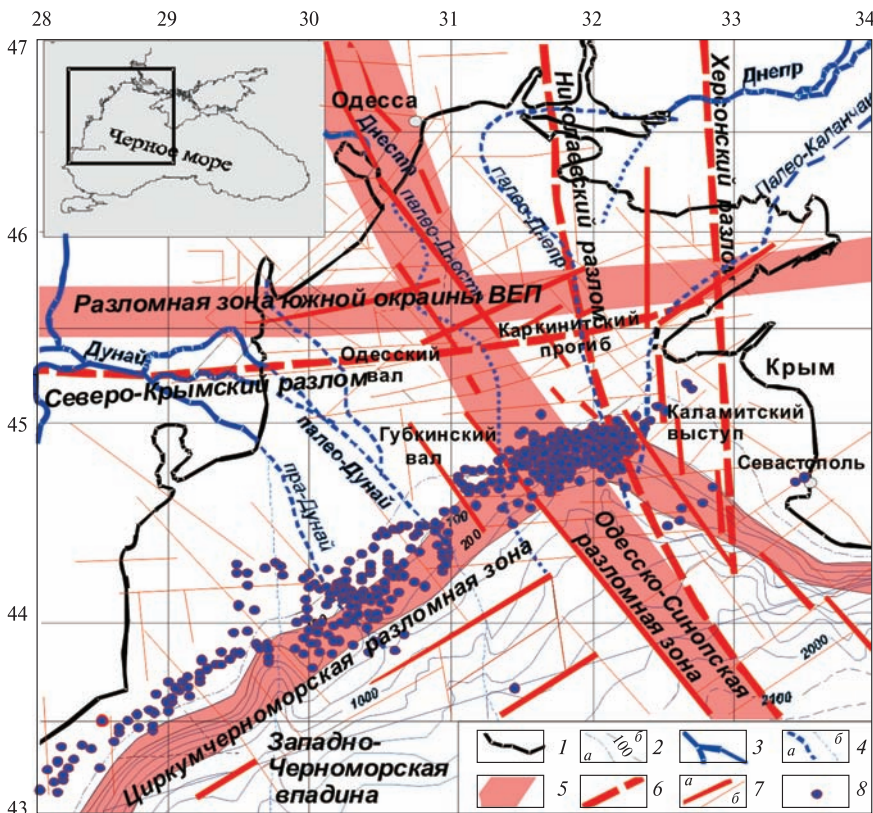


Рис. 2. Распределение газовых сипов на фоне основных геоморфологических и структурно-тектонических элементов северо-западной части Черного моря [20]: 1 — береговая линия; 2 — бровка шельфа (а), изобаты глубины моря (б); 3 — дельты рек; 4 — палео (пра) дельты рек: установленные (а), предполагаемые (б); 5 — разломные зоны мантийного заложения; б — разломы консолидированного фундамента; 7 — тектонические нарушения первого (а) и второго ранга (б); 8 — газовые выходы

шей перспективе не представляются реальными. Нам представляется уместной поставка вопроса о проведении комплексных геолого-геофизических работ в центральной части Черного моря, вне вероятных пределов национальной юрисдикции. В этой связи мы предлагаем сосредоточить усилия на исследованиях особого грязе-вулканического типа газогидратных скоплений в глубоководной части ЗЧВ [20].

Грязевые вулканы как поисковый критерий углеводородного сырья

Еще в тридцатых годах И.М. Губкин на фактическом материале выдвинул идею первоочередного использования грязевых вулканов для поисков углеводородного сырья [14]. Надо полагать его вдохновляли грандиозные извержения азербайджанского вулкана Лок-Батан, на сопочном поле которого в скважине 45 был получен мощный фонтан нефти (20 тонн в сутки) функционировавший в течение месяца. Кстати, этот вулкан, оживший в 1932 г., работал более 70 лет, дал 30 млн. т. нефти и 2 млрд м³ газов и все еще функционирует. При этом сравнительно недавно зафиксированы его новые извержения.

В своем предисловии к сборнику по результатам исследований грязевых вулканов Крымско-Кавказской провинции (1939) И.М. Губкин обращает внимание на значение проблемы грязевого вулканизма и отмечает, что результаты исследований по этому вопросу находят свое отражение в стратегии поисково-разведочных работ. Так, например, самый мощный нефтяной комбинат Советского Союза — «Азнефтекомбинат» — на 1938 г. предусматривал глубокое разведочное бурение на новых площадях исключительно в пределах зон грязевых вулканов. Грязевые вулканы, следовательно, становятся первоочередными на нефть и газ районами. Как свидетельствует Р.Р. Рахманов (1987), эти исследования помогли обнаружить промышленные залежи нефти и газа на поднятиях Кюровдаг, Калмас, Карадаг, Кюрсанга, Мишовдаг и др., осложненных грязевыми вулканами. Из общего количества антиклинальных структур Азербайджана, западной Туркмении, Керченского и Таманского полуостровов почти половина осложнена грязевыми вулканами. Основные нефтегазовые залежи Азербайджана связаны с продуктивной толщей среднего плиоцена. На Керченском полуострове небольшие залежи связаны с майкопом и тортоном. На Мошкаревской, Куйбышевской, Фонтановской, Вулкановской и других площадях установлена нефтегазонасыщенность пород верхнего мела; на Тамани — турон-коньякские отложения, на западной Кубани породы от мела до плиоцена [13]. Как видим, верхние горизонты грязевых вулканов, как и месторождений углеводородов, в Керченско-Таманском регионе могли быть разрушены.

К сожалению, в Крыму эти критерии не сработали. 20 скважин глубиной до 400 м, пробуренных на крупнейшем керченском вулкане Булганак, оказались пустыми. Скважины у вулкана Джау-Тепе тоже. Это было уже в 50-х годах прошлого столетия. По нашему мнению, эти скважины недобурены.

Вместе с тем, можно достаточно уверенно констатировать, что грязевые вулканы сами по себе достаточно интересный объект, обнаруживающий непосредственную связь с тектоническими нарушениями, служащими главными миграционными каналами газовых флюидов, характерных для всего Азово-Черноморского региона.

Глубоководные залежи газогидратов в пределах грязевулканических проявлений ЗЧВ

Помимо находок и обнаружения скопления газогидратов, приуроченных к материковому склону, прямые наблюдения газогидратов в большинстве случаев пространственно находятся в границах грязевулканических полей, что может свидетельствовать об их тесных генетических истоках.

Грязевые вулканы встречаются во многих крупных геологических структурах Черноморской мегавпадины [20]. В пределах ЗЧВ на сегодняшний день зафиксировано 11 грязевых вулканов. По материалам батиметрической съемки Гидрографической службы Черноморского военного флота СССР в ЗЧВ можно предположить открытие еще нескольких грязевых вулканов (рис. 3). Следует подчеркнуть, что в пределах Восточночерноморской впадины подобных проявлений до сих пор не зафиксировано [19].

В условиях глубокого моря ЗЧВ грязевые вулканы отличаются современной активностью. Размеры наиболее крупных грязевулканических построек достигают 4×2 , 2×2 км. Разрезы грязевых вулканов ясно показывают существование своих еще не сглаженных осадками грязевулканических морфоструктур [17]. Надо полагать, рельеф грязевых вулканов сформирован молодыми движениями и извержениями.

Примерно в 60 % грязевых вулканов ЗЧВ были обнаружены газогидраты метана при изучении их трубками и драгами в интервале донных осадков 80—580 см [17]. Результаты анализа газогидратов грязевулканических проявлений показы-

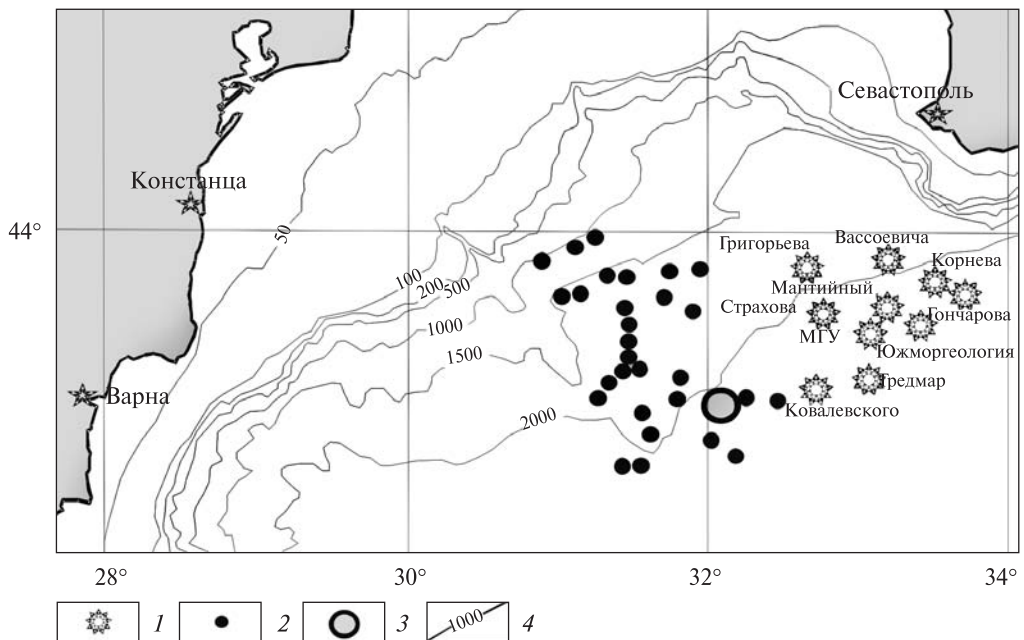


Рис. 3. Распределение грязевых вулканов в акватории ЗЧВ: 1 — выявленные к настоящему времени по [23], 2 — предполагаемые; 3 — кольцевая морфоструктура по [17]; 4 — изобаты дна

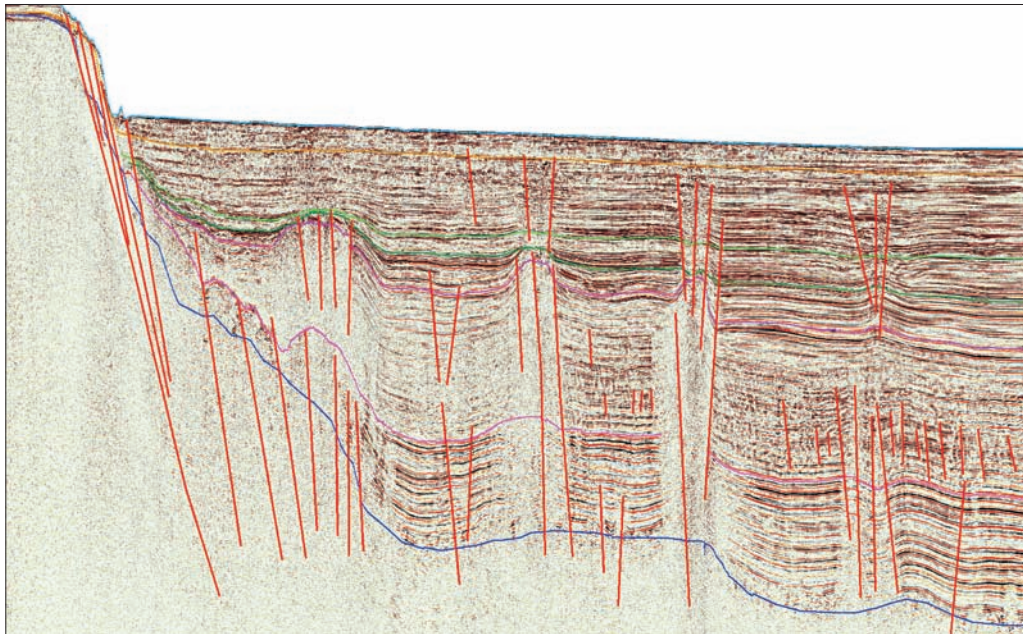


Рис. 4. Пример геологической интерпретации временного разреза по субмеридиональному профилю ЗЧВ по [15]

вают, что их состав часто резко отличается от состава газов биохимического происхождения. По данным А.Ю. Бякова, Р.П. Кругляковой (2001), изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ –61,80 до –63,55 ‰, свидетельствует о смешанной (биохимической и термокаталитической) природе углеводорода. В целом, результаты анализа газогидратов грязевых вулканов показывают, что в их составе отмечается значительное содержание гомологов метана и их производных (до 17 %) и значительное количество (до 12 компонентов) углеводородов выше C_6 (до 4,6 %), которые в биохимических газах обнаружены не были [8].

Крайне неравномерное пространственное распространение скоплений газогидратов в осадочных отложениях Черного моря трудно объяснить недостаточными объемами биохимической генерации метана из органического вещества осадков для формирования крупных газогидратных скоплений. Это касается также отсутствия условий для крупномасштабной латеральной миграции углеводородов в интервале ЗГО. На наш взгляд, следует согласиться с мнением Б.М. Валяева и А.Н. Дмитриевского, что формирование крупных скоплений газогидратов представляется возможным только в результате интенсивных восходящих локализованных потоков углеводородов из глубинных очагов по зонам разрывных нарушений с разгрузкой в ЗГО [2].

В осадочной толще Черноморской мегавпадины существуют многочисленные грязевулканические каналы, а возможно, и другие пути — тектонические нарушения, по которым мощные потоки глубинных газов поступают к поверхности. Если к этому добавить бесчисленные разрывные нарушения различных уровней, то будет понятна схема существования своеобразной «кровеносной системы» осадочного чехла, в котором циркулируют флюиды. В качестве иллюстрации вышесказанного на рис. 4 приведен пример геологической интерпретации

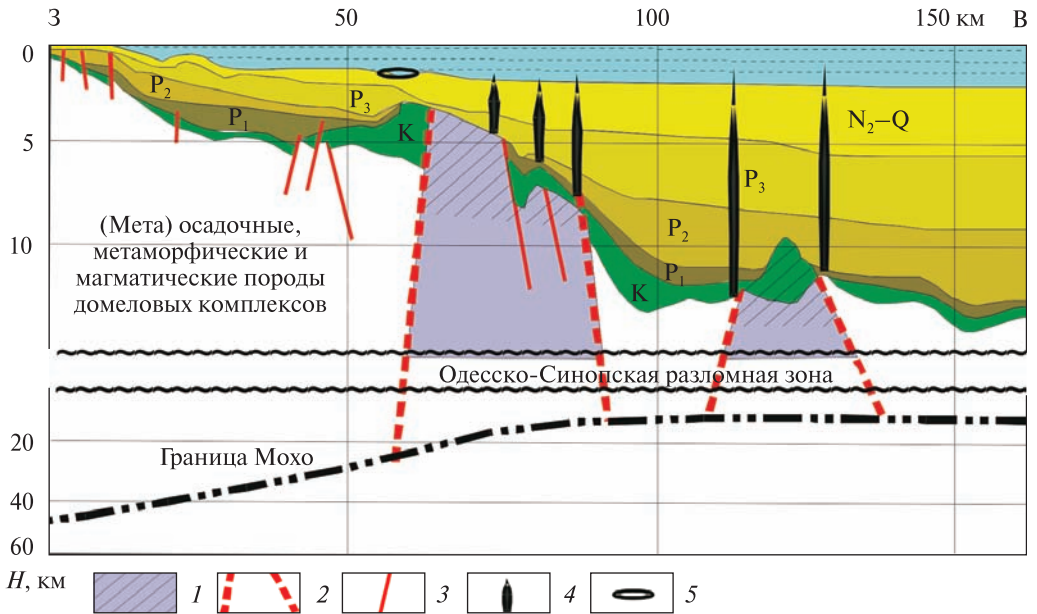


Рис. 5. Схематическое представление связи грязевого вулканизма с морфологией домеловых формаций в ЗЧВ. 1 — массивные залежи УВ в разуплотненных породах массивах по [10] с изменениями и дополнениями; 2 — границы Одесско-Синопской разломной зоны по [29]; 3 — разломы; 4 — грязевые вулканы; 5 — кольцевая морфоструктура по [17]

временного сейсмического разреза по субмеридиональному профилю, пересекающему ЗЧВ. Обилие тектонических нарушений, которые корнями уходят в фундамент, является ярким свидетельством взаимодействия флюидных потоков с осадочным чехлом. Таким образом, не вызывает сомнения тот факт, что наиболее интенсивные локализованные разгрузки углеводородных флюидов контролируются инъекционными структурами типа диапиров, разрывных нарушений и грязевых вулканов.

В ЗЧВ грязевые вулканы наиболее близки к поверхности Мохо, которая залегает на глубине 19 км в области полной редукции «гранитного слоя», ограниченной фрагментами Одесско-Синопской разломной зоны мантийного заложения (рис. 5). Последняя по существу является границей глубоководной котловины ЗЧВ. В условиях глубинной структурной перестройки кристаллического фундамента, Одесско-Синопская разломная зона и оперяющие ее тектонические нарушения второго ранга были местом активного внедрения газифлюидных потоков в ЗЧВ.

Можно предполагать, что рассматриваемая область грязевых вулканов пространственно расположена над одним из крупных выступов домелового фундамента ЗЧВ, вероятно разуплотненных кристаллических и метаосадочных пород [10]. Связь этих выступов с восходящими потоками глубинных флюидов в зависимости от конкретных структурно-тектонических и формационных условий подтверждаются теми или иными признаками их взаимодействия с осадочным чехлом (грязевой вулканизм и различные проявления диапиризма, форми-

рование газогидратных скоплений и др.) [11]. Таким образом, мощные проявления грязевулканических процессов и формирование газогидратных скоплений в осадочной толще ЗЧВ, скорее всего, явились результатом струйной миграции мантийных флюидов в разуплотненные зоны кристаллического фундамента в пределах Одесско-Синопской разломной зоны. Восходящие потоки флюидов, обогащенные углеводородами, устремляются к поверхности, образуя газовые выбросы или грязевые вулканы. Этим можно объяснить расположение грязевых вулканов ЗЧВ в пределах Одесско-Синопской разломной зоны мантийного заложения, где осадочные слои больше всего подвергались разрушению. Следует отметить, что над одним из крупных выступов домелового фундамента, вероятно, пространственно расположена кольцевая морфоструктура [17] (рис. 5).

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. Постепенно все более и более мы приближаемся к мысли о глубинном, возможно мантийном генезисе грязевых вулканов. Об этом говорят отдельные геофизические профили, минералогическое насыщение грязевулканической брекчии. Полученные в последние годы обширные материалы сейсмических исследований позволяют фиксировать корни грязевых вулканов в мезозое фундамента и даже в верхней мантии. В частности, для одной морфоструктуры — вулкана Мантийного — удалось даже установить связь его корней с поверхностью Мохо [22].

Об этом может также косвенно свидетельствовать грязевулканическая и современная сейсмическая активность ЗЧВ по сравнению с ее восточным аналогом. За период 1971—2012 гг. в пределах непосредственно ЗЧВ зарегистрирован ряд землетрясений с магнитудой 4—7, очаги которых находятся на глубинах самых верхов мантии (22—36 км). Напротив, в Восточночерноморской впадине за этот период не зарегистрировано ни одного землетрясения с магнитудой >3 [25]. Как было отмечено выше, в пределах последней до сих пор не зафиксировано признаков грязевулканической деятельности. Надо полагать, что сейсмическая активность ЗЧВ непосредственно связана с разгрузкой напряжений, обусловленной внедрением восходящих газофлюидных глубинных потоков на границе Мохо и последующим нарушением сплошности (мета) осадочных, метаморфических и магматических пород домелового комплекса в пределах Одесско-Синопской разломной зоны.

Термодинамический режим, ограниченное количество биомассы в осадочной толще Черного моря и приуроченность газовых выходов к разломам консолидированной коры и верхней мантии свидетельствуют в пользу абиогенной природы метана. Есть все основания считать, что микробного метагенеза в осадочной толще недостаточно для обеспечения такой мощной газовой разгрузки дна Черного моря. По мере проведения исследований все больше аргументов свидетельствуют в пользу глубинной концепции.

На основе изучения грязевого вулканизма, сейсмичности и газогидратов Черноморско-Каспийского региона Попковым В.И. и др. (2012) предложена де-

газационная модель формирования газогидратов. Им удалось через грязевой вулканизм и сейсмичность продвинуться в понимании роли глубинной дегазации в формировании газогидратов, образование которых они связывают с литрическими разломами, как каналами поступления газа.

Главная идея дегазационной модели формирования углеводородов вообще и газогидратов в частности — это связь их формирования с глубинными или эндогенными процессами. Наиболее полный обзор дегазационных моделей глубинного происхождения углеводородов приведен в монографии под редакцией В.М. Шестопалова «Очерки дегазации Земли» (2018), где нефтидогенез и нефтегазобразование рассмотрены как одно из важнейших проявлений глубинной дегазации. При этом общая идея связи углеводородов с глубинными процессами получила ответы на конкретные вопросы нефтегазовой геологии о местах скопления залежей и месторождений углеводородов, о каналах их миграции до мест скопления и об очагах формирования углеводородов. Таким образом, можно констатировать, что решающая роль в формировании газогидратов принадлежит дегазации Земли.

При разбурировании грязевых вулканов на суше могут вскрываться уцелевшие резервуары и их фрагменты, возникающие близ их каналов в результате глубинной подпитки. В глубоком (более 600 м) море наблюдается усложнение этой схемы. В верхней части сопочной брекчии вулканов возникают газогидраты, постоянно нарастающие из недр. В верхних слоях брекчии мы встречаем единичные обособленные выделения, кристаллы, стяжения газогидратов метана, как это позволяют физико-химические условия. С глубиной плотность слоя газогидратных вкраплений нарастает и при достижении содержания 50—60 % газогидратов порода становится газонепроницаемой. Возникает газогидратная залежь, своего рода газовая шапка, под которой скрыты подгидратные залежи метана. В верхних слоях газовой шапки выделения газогидратов единичны, в глубине слоя — отложения газогидратов шапки, выделения сгущаются до непроницаемой породы. На поверхности газогидратного слоя — на поверхности осадков, газогидраты неустойчивы и разлагаются. Не случайно температура брекчии в точках развития газогидратов метана (0...+20 °С) ниже обычной температуры донных осадков (+80 °С). На поверхности газогидраты разлагаются, снизу нарастают. Мощность слоя газогидратов в ЗЧВ, как было отмечено выше, может достигать 400 м. Газогидраты образуют для грязевулканических газов как бы дополнительную упаковку. При бурении главная задача — вскрыть подгидратные газы. Их сохранению способствует шапка газогидратов.

Немаловажным обстоятельством является тот факт, что газогидратные скопления могут служить также в качестве поискового критерия значительных скоплений подгидратного природного газа в пределах глубоководной части Черного моря. Неоднократно отмечалось, что газогидратные скопления выступают в качестве покрывок, под которыми аккумулируются подгидратные залежи свободного газа [9].

Опыт освоения подгидратных газов имеется. В свое время так осваивали Мессояжское месторождение. В этом направлении работают компании, осваивающие гигантское (396 млрд м³ газа) норвежское месторождение Урман Ланге. Добыча подгидратного газа к 2007 г. здесь должна была достигнуть 71 млн м³/сутки, а в последующем 105 млн м³. По газопроводам, проложенным в плохих погодных

условиях и сложного рельефа дна, при глубине моря в районе месторождения 800—1100 м, газ подается на расстояние многих десятков километров на газоперерабатывающий завод в Ныхамна на западном побережье Норвегии [18].

Предположение о существовании кольцеобразных залежей газогидратов вокруг глубоководных грязевых вулканов ЗЧВ детально рассмотрено в [20]. К сожалению, для ЗЧВ пока нет данных, позволяющих оконтурить залежи по содержанию газогидратов в породах. Можно только предполагать уменьшение насыщения пород газогидратами по мере удаления от каналов поступления газов грязевыми вулканами. Эту задачу можно решить лишь при проведении целенаправленных детальных геолого-геофизических экспедиционных исследований на конкретных грязевулканических участках морского дна. Поэтому, необходимо ставить вопрос о первых практических шагах по освоению глубоководных вулканов ЗЧВ. Необходимо выбрать один из трех крупных грязевых вулканов (МГУ, Южморгео или Тредмар) и поставить на одном из них или на всех трех геолого-геофизические работы по изучению масштабов газогидратных проявлений. По их завершению — выбрать наиболее благоприятный объект для последующего глубоководного бурения. Практически предлагается разбуривать не газогидратную, а подгидратную залежь.

При бурении с целью вскрытия подпитывающей грязевой вулкан подгидратной залежи следует соблюдать чрезвычайную осторожность. Об этом свидетельствуют катастрофические выбросы газов и нефти на буровых платформах глубоководного нефтяного месторождения Маконда (Maconda Prospect) в Мексиканском заливе. После аварийного взрыва и пожара на платформе в апреле 2010 г. газ под высоким давлением (более 88 атм.) фонтанировал высотой до 70 м. Из него сыпались хлопья гидратов метана, образовавшиеся при турбулентном фонтанировании газа, нефти и воды в условиях резкого понижения температуры. Образовавшийся мощный слой газогидратов вблизи устья скважины (глубина моря 1,57 км) существенно затруднил ликвидацию аварии (глубина забоя скважины 3,9 км, давление в продуктивном пласте 600 атм.). Такие процессы, надо полагать, могут происходить при выбросах подводных грязевых вулканов, формирующих на поверхности дна вокруг жерла разномасштабные поля газогидратов [24].

Печальный опыт общения человечества с мантийными залежами углеводородов связан с взрывом платформы на том же месторождении Маконда. По данным Н.А. Жарвина (2013), глубина пробуренной компанией ВР скважины достигала не объявленных 5,6 км, а как писали за месяц до катастрофы — 11,3 км. На этой глубине бур достиг «астеносферной нефти», что вызвало катастрофический выброс газов и нефти. Две автоматические задвижки, рассчитанные на 700 атм. были прорваны мгновенно. Давление намного превышало 700 атм. Бедствие от взрыва нанесло огромный экологический ущерб.

Рассмотренный материал свидетельствует, что при выборе технологий освоения газогидратов необходимо учитывать потенциальную опасность их добычи за счет неизбежных катастрофических выбросов на поверхность газовых пузырей. Освоить залежь газогидратов мы пока не готовы.

Дорожная карта освоения Черноморских газогидратов

Адаптация нефтегазового сектора Украины к новым экономическим условиям проходит непросто. Потенциал запасов на осваиваемых месторождениях в большей степени исчерпан, а потенциал открытия и прироста запасов на новых месторождениях не реализуется ввиду недостаточных объемов финансирования геологоразведочных работ. Учитывая сложившуюся ситуацию просто необходимо попытаться предпринять шаги по практическому освоению Черноморских газогидратов. Находки газогидратных и даже подгидратных залежей свободного газа весьма вероятны. Оконтуривание залежей газогидратов — главная задача.

Учитывая всю сумму факторов, как геологических, так и политических, рациональным представляется сосредоточиться на поисках кольцеобразных газогидратных залежей грязевых вулканов ЗЧВ. Возможными местами локализации их промышленных скоплений можно считать Одесско-Синопскую протяженную разломную зону мантийного заложения, являющуюся источником вертикальной миграции углеводородов из глубинных горизонтов в ЗЧВ.

Для освоения залежей газогидратов и подстилающих скоплений свободного природного газа в ЗЧВ необходимо произвести ревизию и переинтерпретацию прежде всего накопившихся сейсмических материалов а также всего имеющегося банка данных по грязевому вулканизму этой акватории. На втором этапе представляется целесообразным проведение следующих геолого-геофизических поисково-разведочных работ по трем основным направлениям:

1. Геоморфологическое направление включает высокоточную батиметрическую съемку с использованием многолучевого эхолота и гидролокатора бокового обзора для картирования локальных поднятий дна (возможных грязевулканических построек) и зон проявления углеводородных сипов.

2. Геологическое направление:

- геологическое опробование донных осадков на глубину до 6 м с помощью тяжелых ударных гравитационных трубок, а также набортным определением литологии и физических свойств осадков керна;

- газогеохимические исследования с использованием геохимических и гидрофизических зондов, отбором проб придонной воды и осадков с целью определения состава диффундирующих газов и их генезиса.

3. Геофизическое направление:

- сейсмоакустическое профилирование, в том числе в придонном варианте с узколучевым параметрическим и ЛЧМ профилографами (диапазоны частот 0,3—1,5, 2—7 и 8—23 кГц, разрешение 10—50 см, проникновение до 50—200 м под дном, глубина буксировки до 600—1000 м);

- многоканальное сейсмическое профилирование, в том числе придонное (гидропневматический или вибрационный излучатель, 120/240-канальная коса длиной 600—1000 м или 100—300 м в придонном варианте, частотный диапазон 30—700 Гц, разрешающая способность 1—2 м, проникновение подо дном 0,5—1,0 км);

- крестовое и кольцевое сейсмическое зондирование (томография) на отраженных и преломленных волнах с помощью 4-компонентных донных сейсмографов с определением скоростей и динамических характеристик продольных и поперечных волн в придонных осадках;

- геотермические измерения *in-situ* телеметрической системой «Геос» абсолютной температуры и теплопроводности придонных осадков с целью расчета тепловых потоков и построения термобарических моделей формирования ЗГО;

- детальная гравиметрическая и магнитометрическая съемки для уточнения природы аномалий потенциальных полей и картирования зон тектонических нарушений;

- зондирование становлением электромагнитного поля с целью определения параметров проводимости придонных осадков и слоя газогидратов;

- лабораторные экспериментальные термодинамические исследования физических свойств искусственных образцов гидратсодержащих донных отложений.

По завершению геолого-геофизических поисково-разведочных работ необходимо поставить вопрос о проведении параметрического глубоководного бурения на одном из выбранных перспективных грязевых вулканов ЗЧВ.

Выводы

Черное море является природным объектом, сочетающим в себе необходимый набор факторов и условий для аккумуляции природных углеводородов в твердой (газогидраты) и газовой фазах. Это достаточно низкие температуры придонного слоя воды, необходимые давления, чередование в разрезе пористых и глинистых достаточно мощных осадочных отложений, региональная нефтегазонасыщенность акватории. Следует также отметить наблюдаемую вертикальную миграцию газонасыщенных потоков (преимущественно метана) к поверхности морского дна и широкое распространение газовых сипов, приуроченность скоплений газогидратов к зонам тектонических нарушений и грязевым вулканам.

Дискретность зон гидратообразования обусловлена как необходимыми термодинамическими условиями образования и существования природных газогидратов, так и наличием достаточного количества воды и свободного (либо растворенного в воде) искомого объекта — метана. Необходимые термодинамические условия для формирования газогидратов существуют на всей акватории Черного моря, начиная с глубин примерно 600 м.

Целесообразно сосредоточиться на поисках глубоководных кольцевых залежей газогидратов в пределах грязевулканических проявлений ЗЧВ, где сочетаются условия как для вертикальной миграции газа и газосодержащих флюидов в направлении дна, так и благоприятные РТ-условия для образования гидратов метана.

ЗЧВ может служить эталонным объектом для изучения газогидратов. С целью изучения масштабов газогидратных проявлений и отработки технологий добычи этого сырья будущего нам представляется целесообразным в настоящее время создание в ее пределах стационарного опытного полигона на одном из глубоководных грязевых вулканов.

Заключение

Результаты первых попыток промышленной добычи метана из подводных залежей газогидратов затрудняют точную ценовую оценку добытого газа, которая очень сильно варьирует. Так, на месторождении Маллик себестоимость 1 тыс. м³ добытого газа составила ориентировочно \$195—365. Еще более безрадостная картина в прогибе Нанкай (Япония), где себестоимость добычи оце-

нена в \$540. Можно лишь предположить, что разработка месторождений газогидратов обойдется не дешевле, чем освоение залежей традиционного газа. Именно поэтому мы ставим вопрос о разведке подгидратных залежей по примеру освоения Мессояхского и норвежского Урман Ланге месторождений. Это более рациональный путь разведки и освоения газогидратов. По мере истощения подгидратного газа происходит постепенная деградация газогидратов и их переход в категорию подгидратных газов.

Следует иметь в виду, что эффективные промышленные технологии добычи метана из аквамаринных газогидратов, разработкой которых сегодня интенсивно занимаются ученые многих стран, появятся не раньше середины нынешнего десятилетия. В Украине специалисты Одесской государственной академии холода разработали собственную технологию добычи газа из газогидратов, обосновали и запатентовали ее. И хотя технология пока не испытана, ученые считают, что внедрять ее можно уже сейчас. Надо полагать, что созданные в будущем новые методы и технологии смогут обеспечить себестоимость добычи, сопоставимую с себестоимостью традиционного газа, что позволит данному ресурсу вписаться в границы приемлемого ценового коридора. Уже сейчас можно предположить, как это повлияет на мировой газовый рынок. Но это дело будущего.

При подготовке новой Государственной программы развития газовой отрасли Украины на ближайшую перспективу представляется целесообразным уделить более обстоятельное внимание газогидратам. Возможно, Украине надо последовать примеру Китая и Японии и начать собственные пилотные проекты в данной сфере. К сожалению, для этого сейчас не самое благоприятное время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бяков Ю.А., Круглякова Р.П. Газогидраты осадочной толщи Черного моря — углеводородное сырье будущего. Разведка и охрана недр. 2001. № 8. С. 14—19.
2. Валяев Б.М., Дмитриевский А.Н. Масштабы участия глубинных углеводородов в генезисе скоплений газогидратов. Материалы международной конференции «Перспективы освоения ресурсов газогидратных месторождений» РГУ Нефти и Газа им. И.М. Губкина, Москва, 17—18 ноября 2009 г.
3. Горчилин В.А., Лебедев Л.И. О признаках газогидратов в осадочной толще Черного моря и возможном типе ловушек углеводородов. *Геол. журн.* 1991. № 5. С.75—81.
4. Жарвин Н.А. Уровень нефтяной катастрофы в Мексиканском заливе. *Энергия, экономика, техника, экология.* 2013. № 4. С. 63—67.
5. Коболев В.П. Структурно-тектонические и флюидо-динамические аспекты глубинной дегазации мегавпадины Черного моря. *Mining of Mineral Deposit.* 2017. № 1. С. 31—49.
6. Коболев В.П. Термодинамические условия гидратообразования в Черном море. *Науковий журнал. Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика.* 2014. №1(3). С. 126—141.
7. Коболев В.П., Верпаховская А.О. Скопления газовых гидратов в палеодельте Днепра как объект сейсмических исследований на склоне северо-западного шельфа Черного моря. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана.* 2014. №1. С. 81—93.
8. Круглякова Р.П., Круглякова М.В., Шевцова Н.Т. Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводородов в Черном море. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана.* 2009. №1. С.37—51.
9. Леонов С.А., Перлова Е.В., Якушев В.С. Скопления природных газогидратов как индикатор глубокозалегающих залежей нефти и газа. М.: ООО «ИРЦ Газпром». 2007. 70 с.
10. Лукин А.Е. Биогенно-карбонатные постройки на выступах разуплотненных кристаллических пород — перспективный тип комбинированных ловушек нефти и газа. *Геол. журн.* 2006. № 1. С. 13—25.

11. Лукин А.Е. Создание учения о нефтегазоносных кристаллических массивах — насущная проблема геологии XXI века. Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина). М.: ГЕОС, 2011. С. 405—441.
12. Попков В.И., Соловьев В.А., Соловьева Л.П. Газогидраты — продукт глубинной дегазации Земли. *Геология, география и глобальная энергия*. 2012. № 3 (46). С. 56—67.
13. Рахманов Р.Р. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании газонефтеносности недр. М.: Недра, 1987. 174 с.
14. Результаты исследований грязевых вулканов Крымско-Кавказской провинции (под редакцией И.М. Губкина). М.: Изд-во АН СССР, 1939. 198 с.
15. Сенин Б.В., Никишин А.М., Амелин Н.В. и др. Отчет по программе морских научных работ «Изучение геологического строения докайнозойских отложений и глубинной структуры бассейна Черного моря», 139 л. текста, 65 рис., табл. 6/12 л, граф. прил. 38, библи. 78. ОАО «Союзморгео», Геленджик, 2012.
16. Шестопалов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславский А.С. Очерки дегазации Земли. Киев, 2018. 632 с.
17. Шнюков Е.Ф. Грязевые вулканы Черного моря как поисковый признак газогидратов метана. Lap Lambert Academic Publishing, 2017. 48 с.
18. Шнюков Е.Ф., Гожик П.Ф., Краюшкин В.А., Ключко В.П. В трех шагах от субмаринной добычи газогидратов. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2007. №1. С. 32—51.
19. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. Газогидраты Черного моря — потенциальный источник энергии. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2017. №3. С. 5—23.
20. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. Грязевулканические залежи газогидратов метана в Черном море. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2018. №1. С. 5—34.
21. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. О глубинной природе дегазации дна Черного моря. *Геотехнологии*. 2018. №1. С. 1—11.
22. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. Корни Черноморских грязевых вулканов. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2013. №1. С. 87—92.
23. Шнюков Е.Ф., Ступина Л.В., Рыбак Е.Н. и др. Грязевые вулканы Черного моря. Каталог. К.: Логос, 2015. 254 с.
24. Якуцени В.П. Газогидраты — нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и геологические ресурсы. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2013. Т.8. №4. URL: http://www.ngtp.ru/rub/9/50_2013.pdf.
25. Яновская Т.Б., Гобаренко В.С., Егорова Т.П. Строение подкорковой литосферы Черноморского бассейна по сейсмологическим данным. *Физика Земли*. 2016. №1. С. 1—17.
26. Ion, G., Lericolais, G., Nouz?, H., Panin, N., Ion, E., 2002. Seismoacoustic evidence of gases in sedimentary edifices of the paleo-Danube realm. *CIESM Workshop Series*. vol. 17. P. 91—95.
27. Ludmann, T., Wong, H.K., Konerding, P., Zillmer, M., Petersen, J., Fluh, E., 2004. Heat flow and quantity of methane deduced from a gas hydrate field in the vicinity of the Dnieper Canyon, north-western Black Sea. *Geo Mar. Lett.* 24. P. 182—193.
28. Nauds L., Greinert J, Artemov Yu, Staelens P, Poort J., Van Rensbergen P, De Datist M. Geological and morphological setting of 2778 methane seeps in the Dniepr paleo-delta, north-western Black Sea. *Marine Geology*. 2006. 227. P. 177—199.
29. Starostenko V.I., Rusakov O.M., Pashkevich I.K., Kutas R.I., Makarenko I.B., Legostaeva O.V., Lebed T.V., Savchenko A.S. Heterogeneous structure of the lithosphere in the Black Sea from a multidisciplinary analysis of geophysical fields. *Геофиз. журнал*. 2015. 37, № 2. С. 3—28.

Статья поступила 17.08.2018

Є.Ф. Шнюков, В.П. Коболєв, С.В. Гошовський

ДОРОЖНЯ КАРТА ОСВОЄННЯ ЧОРНОМОРСЬКИХ ГАЗОГІДРАТІВ МЕТАНУ В УКРАЇНІ

Чорне море має значні потенційні ресурси гідратного газу і розташоване в регіоні, близькому до експортних споживачам вуглеводнів. У статті обґрунтовано необхідність цілеспрямованих досліджень з освоєння газогідратів в Західночорноморській западині. З метою вивчення масштабів газогідратних скупчень та відпрацювання технологій видобутку цієї сировини майбутнього представляється доцільним створення в її межах стаціонарного дослідного полігону на одному з глибоководних грязьових вулканів.

Ключові слова: чорноморські газогідрати, грязьові вулкани, метан, поклади, Західночорноморська западина.

Ye.F. Shnyukov, V.P. Kobolev, S.V. Goshovskyi

ROAD MAP OF THE DEVELOPMENT OF THE BLACK SEA GAS-HYDRATES METHANE IN UKRAINE

The Black Sea has significant potential resources of hydrated gas and is located in a region close to the export consumers of hydrocarbons. The article substantiates the need for purposeful studies on the development of gas hydrates in the West Black Sea basin. In order to study the scale of gas hydrate clusters and the development of technologies for the extraction of this raw material of the future, it seems expedient to create within its limits a stationary experimental test site in one of the deep-sea mud volcanoes.

Keywords: Black Sea gas hydrates, mud volcanoes, methane, deposits, Western Black Sea depression.