

**Е.Ф. Шнюков<sup>1</sup>, В.П. Коболев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Отделение морской геологии и осадочного рудообразования НАН Украины

<sup>2</sup> Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины

## **ГАЗОГИДРАТЫ ЧЕРНОГО МОРЯ – ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)**

---

*В статье приведен аналитический обзор современного состояния газогидратных исследований за рубежом и непосредственно в Черном море. Показано, что в пределах глубоководной части Черного моря существуют необходимые условия для аккумуляции газогидратов. Особый интерес при этом представляет континентальный склон северо-западного шельфа Черного моря, где были обнаружены сейсмические признаки наличия газогидратных скоплений.*

**Ключевые слова:** газогидраты, Черное море, миграция, залежь.

### **Введение**

Истощение месторождений природного газа и широкое распространение прогнозных нетрадиционных ресурсов газа в земной коре, выдвигают на первый план вопрос об их промышленном освоении в ближайшем будущем. Одной из перспективных возможностей увеличения ресурсной базы углеводородов, наряду с угольным метаном, сланцевым газом и газом плотных коллекторов, является поиск, разведка и разработка скоплений природных газогидратов [1; 2; 9; 12; 28; 40; 41; 42; 68 и многие др.].

Последние два десятилетия характеризуются информационным бумом по проблеме газогидратов. Это связано, прежде всего, с тем, что газогидраты (1) представляют повышенный экономический интерес (не только в контексте добычи нетрадиционных ресурсов, но и в плане транспортировки на мировой рынок традиционного газа) и (2) в результате дестабилизации они могут способствовать глобальному потеплению (метан является гораздо более эффективным парниковым газом, чем CO<sub>2</sub>). Об этом свидетельствуют многочисленные международные конференции, симпозиумы и рабочие совещания.

© Е.Ф. ШНЮКОВ, В.П. КОБОЛЕВ, 2017

Начиная с 1993 г. регулярно, каждые три года, проводятся международные конференции, посвященные всем аспектам исследований газогидратов. Результаты этих исследований в рамках международных и национальных программ по экспериментальному изучению природных газогидратов широко представлены в научной периодике [46]. Полное представление о всех современных направлениях газогидратных исследований и непосредственно об эволюции взглядов на формирование и стабильное существование аквамариновых скоплений в течение последних 25 лет изложено в статье Эрвина Зюсса [Suess, 2011]. Вопросам газогидратообразования и технологиям разработки природных залежей посвящена монография отечественного авторского коллектива [6].

**Общие сведения.** Впервые гидрат сернистого ангидрида ( $\text{SO}_2$ ) был случайно получен в лаборатории в 1778 г. Дж. Пристли (Priestley). В 1811 г. ученые Хамфри Дэйви и Майкл Фарадей экспериментировали с водными растворами хлора. Как только смеси охладилась, ученые заметили формирование твердых образований при температурах выше нормальной точки замерзания воды. Последние получили название газогидраты, или клатраты [75].

В течение последовавшего столетия была проведена каталогизация молекул различных веществ, которые могли формировать клатратные соединения, а также были экспериментально изучены условия, при которых каждое вещество было устойчивым. Ввиду того, что существование гидратов в естественных условиях не было известно, предмет их изучения оставался в значительной степени в области академических интересов.

Газовые гидраты образуются посредством включения молекул газов (молекулы-гости, или гостевая подсистема) в полости подобного льду каркаса, построенного водородно-связанными молекулами воды (каркас хозяина, или подсистема хозяина) без формирования химической связи между молекулами гостей и хозяина. Стабилизация водных клатратных каркасов, термодинамически менее стабильных, чем гексагональный лед (при  $T < 273 \text{ K}$ ) или жидкая вода (при  $T > 273 \text{ K}$ ) обеспечивается за счет ван-дер-ваальсовых взаимодействий гость-хозяин [25].

Газогидраты существуют в виде двух основных структур (КС-I и КС-II), в зависимости от количества молекул воды в каркасе. Существует также гибридная структура (H), сочетающая в себе элементы двух основных структур. Гидраты являются нестабильными и, как правило, быстро диссоциируют в связи с наличием больших пустых полостей в основе их структуры. Добавление одной или нескольких молекул газа (например диоксида углерода, сероводорода и др.) внутрь полости может стабилизировать гидратную структуру, поэтому гидраты носят имя этого газа. Метан ( $\text{CH}_4$ ) на сегодняшний день является наиболее часто встречающимся в природных клатратах или гидратах природного газа [72].

Гидраты природных газов, образованные из многокомпонентных углеводородных смесей, в зависимости от состава газовой фазы могут реализовываться в обоих типах структур. Природные газы чисто газовых месторождений (содержание пропана и изобутана менее 0,3–0,6%), а также газы, содержащие значительное количество неуглеводородных компонентов (сероводорода и диоксида углерода), образуют гидраты КС-I, а для природных газов газоконденсатных месторождений характерно образование гидратов КС-II [25].

**Исследования природных газогидратов.** Исследования природных газогидратов начали активно развиваться в тридцатые годы прошлого столетия. Е.Г. Хаммер-

шмидт описал гидраты в газопроводах, расположенных в среде с отрицательными температурами. Главным направлением этой работы было (и остается) развитие различных методов, предотвращающих формирование гидрата, а также поиск химических добавок ингибирующих процесс гидратообразования [75].

В 1940-е годы советский учёный Иван Стрижов высказал предположение о возможности существования газогидратов в газоносных пластах при пониженных температурах и повышенных давлениях в северных нефтегазоносных районах России. Возможность образования и существования гидратов в природных условиях нашла свое подтверждение экспериментальными исследованиями Ю.Ф. Макогона [29; 30]. В 1971 г. Комитет по делам изобретений и открытий СССР зарегистрировал открытие советскими учеными А.О. Трофимуком, М.В. Черским, В.Г. Васильевым, Ю.Ф. Макогоном и Ф.А. Требиным прежде неизвестного свойства естественных газов образовывать залежи в твердом состоянии. Убедительным подтверждением этого открытия явилась первая в мире промышленная добыча метана из газогидратов в толще пород вечной мерзлоты Енисейско-Ханганского прогиба на северо-западе Западной Сибири в пределах Мессояхского газового месторождения [36]. Следует все же отметить, что последние результаты комплексного изучения этого уникального объекта несколько понизили оптимизм по поводу значимой роли газогидратов в его ресурсном потенциале [15].

С тех пор в мире были развёрнуты широкомасштабные исследования природных газогидратов, которые начинают рассматриваться как потенциальный источник энергии. Лидирующее положение в этих исследованиях занимают страны с ограниченными традиционными углеводородными ресурсами, такие как Япония, Китай, Индия и Корея [68]. Правительства Японии и Индии почти одновременно, соответственно в 1995 и в 1996 гг., создали свои национальные программы исследования субмаринных газогидратов [66; 70]. В число стран, которые рассматривают возможность правительственной поддержки подобных программ или которые недавно приступили к их реализации, входят Малайзия, Норвегия, Вьетнам и Мексика.

В последние годы значительный интерес к исследованиям гидратов природного газа проявляют страны Европейского союза, который в 2000-е годы профинансировал две исследовательские программы: «Техника оценки метаногидратов на европейском шельфе» (HYDRATECH) и «Геологическая оценка газогидратов в Средиземном море» (HYDRAMED). По результатам геофизических исследований признаки газогидратных скоплений были обнаружены у побережья Норвегии [67].

Такое внимание к газогидратам обусловлено их декларируемыми огромными глобальными запасами. Однако сложность проведения исследований газогидратов и ограниченный по регионам и представительности фактический материал породил весьма неоднозначные оценки как в отношении их распространения в земной коре, так и масштабов их ресурсного потенциала. Глобальные оценки запасов метана, содержащегося в газогидратах, варьируют в широких пределах, от явно завышенных ( $3 \times 10^{18} \text{ м}^3$ ), проведенных без учета определенных геолого-геохимических ограничений, до минимальных ( $2 \times 10^{14} \text{ м}^3$ ), полученных с учетом ограничивающих гидратообразование факторов [2; 10; 41; 48 49; 53; 62; 68]. При этом отмечается тенденция снижения величины этих оценок по мере поступления новой информации и детализации исследований. Но все исследователи схо-

дятся в одном — ресурсы метана в газогидратной форме огромны и почти на два порядка превышают остающиеся извлекаемые запасы традиционного природного газа. В донных осадках морей и океанов в виде твердых газогидратных отложений находятся огромные объемы метана, потенциальные запасы которого в среднем на наш взгляд можно оценить величиной  $2 \times 10^{16} \text{ м}^3$ .

Вместе с тем, газовые гидраты до последнего времени оставались единственным, все еще не разрабатываемым нетрадиционным источником природного газа на Земле. Природные газогидраты могут составить реальную конкуренцию традиционным углеводородам в силу наличия огромных ресурсов, широкого распространения на планете, неглубокого залегания и весьма концентрированного состояния ( $1 \text{ м}^3$  природного газогидрата содержит около  $164 \text{ м}^3$  метана в газовой фазе и  $0,87 \text{ м}^3$  воды).

Известно, что 98% природных газогидратов сосредоточены на шельфе Мирового океана. Впервые крупномасштабные исследования гидратов метана в донных отложениях морей и океанов были выполнены США в рамках программы глубоководного бурения морского дна «DSDP» (Deep Sea Drilling Program) в 1963–1985 гг. (НИС «Гломар Челленджер») и программы бурения на морском шельфе «ODP» (Oceanic Drilling Program), начатой в 1985 г. (НИС «Резолюшн») [58]. В ходе выполнения этих программ было исследовано около 360 млн. кв. км акваторий морей и океанов, большое количество возможных мест сосредоточения гидратов метана, пробурено скважин общей длиной 250 км [71]. В период с 1982 по 1991 гг. эти исследования были активно поддержаны Министерством энергетики США, что дало возможность обнаружить месторождения гидратов метана на Аляске [51].

Глубоководным бурением газогидраты были вскрыты юго-восточнее и западнее США, вблизи Канады, Перу, Коста-Рики, Гватемалы и Мексики, у берегов Японии, в Мексиканском заливе. Они обнаружены также в Средиземном, Черном, Каспийском, Южно-Китайском морях, у берегов Калифорнии, Южной Кореи, Индии и в других местах. К настоящему времени установлено, что примерно 10% акваторий Мирового океана являются потенциально газогидратоносными [1].

Среди южных морей Евразии наиболее перспективным является Черное море, обладающее, с одной стороны, значительными потенциальными ресурсами гидратного газа, а, с другой — расположено в регионе, близком к экспортным потребителям углеводородов. По разным оценкам, прогнозные запасы газа в газогидратах Черного моря могут варьировать от 20 до 49 трлн.  $\text{м}^3$  [5; 23; 37].

Проблема газогидратов вызывает большой интерес на государственном уровне многих промышленно развитых стран (США, Япония, Китай, Индия, Южная Корея и др.), которые рассматривают природные газогидраты в качестве реального нетрадиционного источника углеводородов. В таблице приведены масштабы финансирования газогидратных программ за рубежом (Макогон, 2009). На первом месте по объему финансирования ( $\$825$  млн.) стоит Япония, промышленная индустрия которой испытывает острую потребность в собственных источниках энергии. Второе место занимает Китай, первая программа которого стартовала позже других стран (2004 г.), но с внушительным объемом финансирования в размере  $\$200$  млн. Три программы по разведке субмаринных газогидратов (1996, 2001 и 2007 гг.) были профинансированы правительством Индии ( $\$85$  млн.). И, наконец, США, которые в принципе являются первооткрывателями субмарин-

ных газогидратов в рамках Программы глубоководного бурения морского дна, профинансировали три газогидратные программы (1982, 2002 и 2008 гг.) в объеме \$58 млн. долларов США. Следует отметить, что США свою первую целевую газогидратную программу профинансировали спустя только 13 лет после начала Мессояхской добычи. Затем еще 13 лет прошло до начала первой газогидратной программы Японии (1995 г.).

Таблица. Объемы финансирования газогидратных программ за рубежом [31]

№	Годы	Программы, страны	Объем финансирования (млн. долларов США)
1	1982	Первая Программа США	8
2	1995	Первая Программа Японии	25
3	1996	Первая Программа Индии	5
4	1999	Первая Программа Южной Кореи	5
5	2001	Вторая Программа Японии	300
6	2001	Вторая Программа Индии	40
7	2002	Вторая Программа США	35
8	2004	Первая Программа Китая	200
9	2005	Вторая Программа Южной Кореи	40
10	2007	Третья Программа Индии	40
11	2008	Третья Программа США	15
12	2009–2015	Третья Программа Японии	500
13	2010–2014	Россия (план)	500 млн.руб.
14	2017	Украина	не финансиров.

В целом, газогидраты обнаружены, по меньшей мере, на трех площадях в районах вечной мерзлоты и в 20-ти акваториях в осадках Мирового океана [68]. К настоящему времени в мире открыто более 250 месторождений газогидратов метана, прогнозные запасы которых в энергетическом эквиваленте превышают все разведанные на Земле суммарные запасы угля, нефти и газа. Однако лишь небольшое число газогидратных месторождений изучено более-менее детально. К ним относится, прежде всего, месторождение газогидратов хребта Блейк на юго-восточной атлантической континентальной окраине США у побережья Флориды [57], где в двухсотметровой газогидратной толще, как полагают, содержится 1500 млн. м<sup>3</sup> газа на км<sup>2</sup>, в то время как на Гидратном хребте (Каскадия) – 467 млн. м<sup>3</sup> газа на км<sup>2</sup> [78]. В целом, запасы метана на хребте Блейк по предварительным расчетам составляют 37.7 трлн. м<sup>3</sup> метана в гидратной форме и 19.3 трлн. м<sup>3</sup> свободного подгидратного газа [54].

В настоящее время США продолжают разведку и отработку технологий наземной добычи на северном склоне Аляски, где запасы газогидратного газа по предварительным оценкам составляют около 16 трлн. м<sup>3</sup> [49; 69]. Кроме того, в 2009 г. стартовала двухлетняя программа исследований в Мексиканском заливе. По оценкам, запасы газогидратного газа в Мексиканском заливе могут достигать астрономических цифр – 600 трлн. м<sup>3</sup> [54].

Существование природных гидратов подтверждено бурением на месторождении Малик в устье реки Маккензи на севере Канады. Материалы разведочного

бурения свидетельствуют, что на глубине приблизительно 800–1100 м залегает пласт гидратов метана мощностью 110 м, при этом мощность вечномерзлых пород составляет 640 м. Запасы газа в гидратном состоянии оценены в 0,189 трлн. м<sup>3</sup> газа [52]. На месторождении Маллик на одном квадратном километре содержится около 5 млрд. м<sup>3</sup> газа и подобные огромные объемы метана, связанные с газогидратами, предполагаются в районах вечной мерзлоты на Аляске, в Сибири и на Канадском Арктическом архипелаге [64]. Однако следует отметить, что на месторождении Маллик только в 17% (25 из 146) скважин были обнаружены газогидраты [76]. На тихоокеанской окраине Канады закартированы скопления газогидратов на общей площади 6000 км<sup>2</sup>, запасы метана в которых оцениваются в 2.87 трлн. м<sup>3</sup> газа [32].

С 1995 г. правительство Японии проводит масштабные сейсморазведочные работы 2D и 3D в Тихом океане в прогибе Нанкай [56; 65]. Здесь в первых шести скважинах, пробуренных в 1999–2000 гг., были обнаружены три мощных гидратных пласта. Предварительные расчеты по оценкам на 2001 г. показали, что месторождение содержит до 60 трлн. м<sup>3</sup> метана [48].

В 2000 г. в Токио был основан Исследовательский консорциум по ресурсам гидратов метана, а в 2001 г. правительство приняло вторую газогидратную программу на период до 2009 г. (\$300 млн.). В 2001–2002 гг. сейсмические исследования были продолжены, а в 2004 году было пробурено уже 32 скважины на 16 участках. Всего было обнаружено 14 залежей газогидратов с общими запасами до 100 трлн. м<sup>3</sup>, из которых 60 трлн. м<sup>3</sup> находится в пределах прогиба Нанкай [43; 66].

В 2009 г. в рамках третьей газогидратной программы (\$500 млн.) в Японии началась подготовка пилотного проекта по добыче газогидратов. С этой целью в 2012 г. в 50 км к востоку от острова Хонсю началось бурение опытно-эксплуатационной скважины. 12 марта 2013 г. стартовала первая опытная добыча метана из подводных залежей газогидратов. За шесть дней было извлечено 120 тыс. м<sup>3</sup> газа.

Проведенная опытно-экспериментальная добыча продемонстрировала с одной стороны принципиальную возможность получения нового углеводородного ресурса, а с другой – выявила новые экономические и технологические проблемы. Прежде всего, это касается себестоимости добычи метана из газогидратов, которая была оценена в \$540. Были обнаружены также технологические проблемы, требующие своего решения. Оказалось, что выделяемый метан существенно охлаждает вмещающую среду, в том числе и сами газогидраты, тем самым затрудняет извлечение газа. Кроме того, обозначились изъяны используемого оборудования – поднимающийся на поверхность вместе с газом песок привел к нарушению режима работы насосов, что и послужило основной причиной прекращения работ. Япония к 2018 г. планирует усовершенствовать технологию добычи и приступить к промышленной полномасштабной эксплуатации газогидратных залежей.

Таким образом, в гонке за новым источником энергии лидерство до самого последнего времени принадлежало Японии. И вот, 18 мая 2017 г. в интернете появилось сенсационное сообщение об успешной добыче китайскими нефтяниками «горючего льда», или гидрата природного газа на площади Шенху (Shenhu) в Южно-Китайском море [80]. В заявлении на сайте Народного правительства КНР отмечается, что «добыча осуществлялась с глубины 1266 метров в 285 километрах от Гонконга. В период с 10 мая китайские нефтяники добыли 120 ты-

сяч кубометров «горючего льда», который содержит 99,5% метана». Несмотря на отсутствие информации об использованной технологии добычи, этот факт свидетельствует о том, что Китай добился беспрецедентных успехов в области геолого-геофизических исследований газогидратов, разработки соответствующих технологий добычи и создания специального оборудования.

Залежи газогидратов на северном континентальном склоне Южно-Китайского моря на площади Шенху (Shenhu) в Южно-Китайском море залегают в богатых фораминиферами глинистых отложениях мощностью 10–25 метров, расположенных примерно 200 м ниже морского дна. Анализы керна показали насыщение гидратами в диапазоне 26–48% с полным преобладанием метана (> 99%). Геофизические данные позволили выявить границу BSR на площади 15 км<sup>2</sup>, что позволило предварительно оценить общее количество метана на этом месторождении в объеме 160×10<sup>3</sup> м<sup>3</sup> при 50% вероятности [79]. Обнаруженные в Южно-Китайском море залежи газогидратов открывают огромный источник, эквивалентный как минимум 35 млрд. тонн нефти, этого достаточно, чтобы обеспечить Китай газом на 90 лет. Исторический прорыв Китая способен привести к энергетической революции во всем мире, подобной произошедшей ранее в США – сланцевой.

Южная Корея, начиная с 1999 г., осуществляет геолого-геофизические разведочные газогидратные исследования в южной части бассейна Уллеунг в Японском море, на расстоянии 135 км от побережья страны. Проведенные в 2000–2004 гг. геолого-геофизические исследования подтвердили значительные потенциальные ресурсы газогидратов в этом бассейне, которые в пересчете на природный газ оцениваются более чем в 1 трлн. м<sup>3</sup>. Это предположение основано на многих признаках, которые включают газовые сипы на континентальном склоне и связанные с ними такие структуры, как ложбины и купола. Образцы газогидратов были отобраны с глубины 7,8 м ниже морского дна при глубине моря около 2000 м. В глинистых отложениях был обнаружен 2-х метровый слой газогидратов с 99% содержанием метана [68].

В 2005 г. в Южной Корее была принята десятилетняя Национальная программа исследования гидратов (\$40 млн.), в рамках которой в 2007 году была осуществлена первая геологоразведочная экспедиция в упомянутом бассейне Уллеунг. На трех из пяти исследованных участков было пробурено пять скважин. В этом же году Южная Корея официально сообщила об обнаружении крупных скоплений газогидратов, которые могут обеспечить ее потребность в газе на протяжении 30 лет. Три года спустя, в 2010 г. была проведена вторая экспедиция, в ходе которой на 11 участках было пробурено 18 скважин. Согласно государственной программе развития нефтегазодобывающей отрасли Республики Корея, начало добычи газа из гидратов в бассейне Уллеунг планировалось на 2015 г. К сожалению этого не произошло.

В 2004 г. природные газогидраты были обнаружены, по меньшей мере, в 12 шестиметровых гравитационных трубках на глубинах от 714 до 283 м на Атлантической окраине островов Тринидада и Барбадос. При исследовании грязевого вулканизма в акватории островов Тринидада и Барбадос на сейсмических разрезах были обнаружены отражающие границы BSR, которые свидетельствуют о наличии гидратосодержащих отложений. Последующий детальный анализ трехмерных (3D) сейсмических данных на их восточной окраине также показал

наличие нескольких положительных признаков, которые позволяют предположить наличие гидратов природного газа в этой акватории. Геофизическими исследованиями в зоне перехода между континентальным шельфом и склоном в бассейне Колумбус были обнаружены границы BSR на общей площади 516,8 км<sup>2</sup>, что составляет около 29% всей изученной акватории [47].

В августе 2006 г. была успешно завершена 4-месячная международная экспедиция по поиску и разведке залежей газогидратов в окраинных бассейнах Индии. Были обнаружены их значительные скопления, в том числе в одном из самых богатых в мире морских газогидратных месторождений бассейна Кришна-Годавари, а также выявлен гидратосодержащий слой вулканического пепла на 600-метровой глубине в Андаманском море [51].

В России, владеющей огромными запасами традиционного газа, интерес к газогидратному источнику углеводородного сырья начал проявляться только в 2000-е годы. В 2003 г. «Газпром» инициировал прикладные исследования по определению газогидратного потенциала России. Согласно предварительным оценкам, сделанным ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ресурсы газогидратов России достигают 1,1 квадрил. м<sup>3</sup>. Перспективными районами для их поиска и разведки были определены Ямбургское и Заполярное месторождения, а также шельфы Черного и Охотского морей. Еще одним перспективным регионом является дальневосточный шельф. По оценкам Дальневосточного геологического института РАН, потенциальные запасы метаногидрата на шельфе Курил достигают 87 трлн. м<sup>3</sup>.

Но наибольших успехов удалось добиться на Байкале. Предположения о наличии газогидратов на дне озера, высказанные еще в конце 1970-х годов, были подтверждены в 2000 г. российско-бельгийской экспедицией [26]. Гидраты природного газа были обнаружены в придонных отложениях в районе подводного грязевого вулкана Санкт-Петербург, а год спустя они были найдены в поверхностном слое донных отложений. Запасы газогидратов в Байкале были оценены в 1 трлн. м<sup>3</sup>. [13; 18]. После этого поиски гидратов на Байкале прекратились почти на десятилетие и были возобновлены только в 2013 г. Экспедиция, в которой приняли участие ученые из Иркутска, Новосибирска и Японии, начала поиск и комплексное изучение газовых гидратов на южном и среднем Байкале. Были осуществлены геохимические исследования донных отложений в районе выхода газа и грязевых вулканов. К настоящему времени изучено всего 15% территории Байкала, где зафиксированы выходы метана из толщи воды. Северная часть озера, которая пока остается не исследованной, может значительно увеличить прогнозные ресурсы данного сырья.

Примечательно, что в Украине, которая входит в число пионеров изучения аквамариновых газогидратов, еще в 1993 г. правительством было принято постановление о государственной программе «Газогидраты Черного моря», в которой был предусмотрен большой объем геолого-геофизических исследований и работ по созданию технологии и конструкции газодобывающего комплекса. Однако бюджетные средства для этого выделены не были. Морские геолого-геофизические исследования газогидратов Черного моря осуществлялись эпизодически в рамках целевых междисциплинарных программ НАН Украины. Но в последние годы ввиду известных событий и эти работы были прекращены.

**Исследование газогидратов в Черном море.** Первая документально зафиксированная находка газогидратов в Черном море относится к 1972 году. При исследовании



довании донных отложений на НИС «Московский университет» в районе палеодельты реки Дунай в одной из колонок, поднятой с глубины порядка 2000 м, в 6,5 м от поверхности дна, были обнаружены микрокристаллические образования, «похожие на изморозь и исчезающие на глазах» [14]. Эти образования были диагностированы как природные твердые газовые гидраты.

В 1988 году экспедицией СО АН СССР на НИС «Евпатория» в донных осадках олигоцен-миоценового (майкопского) возраста прогиба Сорокина в семи грунтовых трубках, поднятых с глубины 2050 м, были обнаружены кристаллы газовых гидратов размером от нескольких миллиметров до первых сантиметров [7].

В 1990 г. экспедицией Отделения морской геологии и осадочного рудообразования НАН Украины на НИС «Михаил Ломоносов» в пределах континентального склона северо-западной части Черного моря с глубины 950 м была поднята колонка предельно газонасыщенных илов. В последних на интервале 0,44–0,60 м от поверхности дна в кавернах наблюдались «быстро исчезающие белесые кристаллики» газогидратов [38].

На протяжении 1989–1991 гг. НПО «Южморгеология» были выполнены специальные геолого-геофизические исследования газогидратного потенциала Черного моря. Образцы газогидратов отобраны в грязевых вулканах МГУ, Вассоевича, академика Страхова и Безымянном [3]. Экспедициями МГУ и НПО «Южморгеология» на НИС «Феодосия» и «Геленджик» сделаны аналогичные находки в районах грязевых вулканов глубоководной котловины Черного моря [3; 22].

Образец белого мономинерального газогидрата (5–7 см) обнаружен в колонке донных отложений на глубине 2,85 м от поверхности дна на грязевом вулкане в пределах континентального склона Гиресунской впадины совместной экспедицией НПО «Южморгеология» и Британской нефтяной компанией в 1992 г. [61].

Впоследствии находки газогидратов неоднократно фиксировались отдельными международными экспедициями НАН Украины, МГУ, НПО «Южморгеология» и Гамбургского университета на НИС «Профессор Водяницкий», «Метеор» и «Геленджик» в пределах грязевых вулканов: адмирала Митина, Двуреченского, Одесса, Севастополь, Ялта и во впадине Сорокина [Ivanov, Limonov, van Weering, 1997; Bohrman, Schenck, 2002; Вассилев, Димитров, 2002; Kruglyakova et.al., 2004; Шнюков, Коболев, 2004].

В целом, на фоне более чем 40-летних усилий крупных научных коллективов, число находок газогидратов на дне Черного моря относительно невелико. Следует также отметить, что в пределах российского сектора Черного моря до настоящего времени не было обнаружено ни одной находки газогидратов, несмотря на тысячи выполненных опробований с помощью ударных гравитационных трубок [24].

Первые тематические газогидратные исследования в северо-западной части Черного моря были выполнены в производственной организации «Одесморгеология» (г. Одесса). Анализ более 5000 км временных разрезов многолетних сейсморазведочных исследований методом общей глубинной точки (ОГТ), выполненный А.Ф. Коморным и А.И. Самсоновым, свидетельствуют о широком распространении характерных для зон гидратообразования (ЗГО) и подгидратных залежей углеводородов (ПГЗ УВ) аномалий волновых полей. Но так как природу аномалии псевдодонного рефлектора (BSR) не всегда удавалось связать с ЗГО и ПГЗ УВ, во внимание принимались такие характерные для ЗГО и ПГЗ УВ аномалии, как амплитудно-скоростные (VAMP'S), «пагода-структуры», интерваль-

ных и эффективных скоростей, яркого пятна и др. На их основе был разработан ряд надежных поисковых критериев, которым, по мнению авторов, на континентальном склоне северо-западной части Черного моря полностью удовлетворяет только одна площадь, расположенная приблизительно в районе акватории палеодельты Днепра [21].

Сейсмические аномалии BSR, фиксирующие подошву зон газогидратообразования, были также обнаружены на восточном склоне Туапсинского прогиба [23].

В последнее десятилетие газогидраты стали объектом пристального внимания при исследовании акватории Черного моря многочисленными мультидисциплинарными международными и отечественными экспедициями. Особый интерес при этом представляет континентальный склон северо-западного шельфа Черного моря, где, как уже отмечалось выше, впервые в приповерхностных донных отложениях палеорула Дуная, были обнаружены образцы газогидратов [14]. Структура осадочных отложений на этой акватории характеризуется наличием двух крупных турбидитовых систем: Дунайским и Днепровским глубоководными конусами выноса обильно грязевых осадков. По существу, они состоят из системы ячеек каналов и валов, сформированных в ходе последовательных понижений уровня моря [73].

Наличие газогидратов на этих акваториях на основании выделения границы BSR было подтверждено независимыми международными экспедициями почти одновременно. В южной части Дунайского конуса выноса сейсмические исследования проводились в 1998 и 2002 гг. [59; 73]. Выполненные многоканальные и широкоугольные сейсмические наблюдения с использованием донных океанических сейсмометров и гидрофонов во время экспедиционных исследований на НИС «Профессор Логачев» в 2001 г. позволили в первом приближении оконтурить достаточно мощное скопление газогидратов в районе палеодельты Днепра [63].

В 2011–2013 гг. на этом полигоне Институтом геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины были выполнены на НИС «Профессор Водяницкий» опытно-методические комплексные геофизические ресурсно-ориентированные на газогидратные залежи исследования. Комплекс геофизических исследований включал сейсмические, гравимагнитометрические, геотермические и электрометрические наблюдения. Полученные результаты позволили однозначно подтвердить наличие газогидратной залежи на акватории палеодельты Днепра, существенно уточнить ее размеры и мощность. Если предположить, что газогидраты находятся в виде гидратосцементированных осадков на всей этой площади, то при минимальной их пористости вычисленное количество метана, пространственно ограниченного этим слоем, составит  $16 \pm 3 \times 10^{11} \text{ м}^3$  [20]. Эта площадь была рекомендована в качестве первоочередной для проведения бурения разведочной параметрической скважины.

**Термодинамические условия гидратообразования в Черном море.** Необходимыми условиями образования и существования природных газогидратов является наличие требуемых для этого давления (Р) и температуры (Т), а также достаточное количество воды и свободного (либо растворенного в воде) газа. Газы, попадая в соответствующие термодинамические условия и соединяясь с водой, образуют зону скопления газогидратов. Физические параметры этой зоны, установленные экспериментальным путем, не всегда выдерживаются в естественных условиях. Это зависит от газонасыщенности, состава газа и минерализации воды [34; 36].

Выполненные теоретические расчеты глубины залегания и мощности зоны гидратообразования показывают, что на большей части Черноморской впадины в придонном слое осадков существует благоприятная термобарическая обстановка для формирования и стабильного существования газогидратов [27]. Однако она является необходимым, но недостаточным условием. Несмотря на первые оптимистические утверждения о том, что дно Черного моря в своей глубоководной части (глубже 600–700 м) как бы устилается слоем газогидратов метана мощностью до 200м, проблема газогидратообразования в условиях Черноморской мега-впадины представляется нам гораздо более сложной. Прежде всего, это касается источников и механизма формирования газогидратных скоплений.

Фазовое равновесие газогидратов очень чувствительно к изменению температуры. При градиенте давления 1–2 МПа/К изменение температуры на 1°С сопровождается изменением мощности гидратного слоя на 50–100 м. Поэтому при оценке положения границ зоны гидратообразования 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. 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 [27].

В 61-ом рейсе НИС «Профессор Водяницкий», непосредственно после подъема донных отложений, проводились измерения температуры по всей длине колонки с шагом 10 см. Наличие газогидратов в отдельных горизонтах четко фиксировалось резким ее снижением на 5–8°С, что использовано в качестве диагностического признака присутствия газогидратов в керне [27].

Крайне неравномерное пространственное распространение скоплений газогидратов в осадочных отложениях Черного моря, на наш взгляд, можно объяснить недостаточными масштабами биохимической генерации метана из органического вещества осадков для формирования крупных газогидратных скоплений. В интервале зоны стабильности газогидратов отсутствуют и условия для крупномасштабной латеральной миграции углеводородов, т.е. отсутствуют так называемые нефтегазосборные площади. Поэтому, формирование крупных скоплений газогидратов представляется возможным только в результате масштабных вертикальных локализованных потоков углеводородов из глубинных очагов [4; 10; 34].

Наиболее мощным источником газа и флюида для формирования газогидратных скоплений в осадках является фильтрация флюида и газа в зону термобарических условий стабильности газовых гидратов. Так как в естественных условиях формирования осадочных структур процесс фильтрации к поверхности насыщающих флюидов и газа определяется уплотнением накапливающихся осадков, то и история аккумуляции газовых гидратов, в свою очередь, зависит от истории накопления и уплотнения осадков.

В.А.Соловьевым и Г.Д. Гинзбургом достаточно убедительно показаны три типа фильтрационных моделей механизма формирования газогидратных скоплений (эллизионная, грязевулканическая, газоструйная), которые реализуют механизм

поставки как водорастворенного, так и свободного газа в зоны гидратообразования [7; 34]. Однако остается главный нерешенный вопрос, касающийся происхождения такого большого количества углеводородных газов, необходимых для образования столь мощного предполагаемого слоя газогидратов. По современным представлениям, он может быть биогенной или катагенной природы. В первом случае он генерируется в осадочной толще непосредственно в зоне образования гидратов, а во втором — имеет глубинную природу, поступая в зону гидратообразования из больших глубин. Но каждая из этих гипотез встречается с определенными трудностями при попытке обосновать скопления больших объемов газа [35].

Большая часть газа биогенного происхождения теряется еще в процессе отложения осадков. Интенсивное образование углеводородов в результате диагенеза органического материала происходит только при температуре свыше 80°C, которые в осадках Черного моря достигаются на глубинах, превышающих 2 км, т. е. за пределами зоны гидратообразования.

Кроме того, следует отметить, что благоприятные условия для образования углеводородных газов существуют лишь в областях высоких скоростей седиментации, в которых органические остатки не успевают расходовать свой углеводородный потенциал в результате окислительных процессов. Если принять также во внимание относительную бедность Черноморской впадины органическим веществом, то, видимо, следует согласиться с мнением В.А. Горчилина и Л.И. Лебедева (1991) о том, что зоны газогидратообразования, обусловленные процессом диагенеза, имеют более скромные размеры.

Как правило, находки газогидратов в Черном море приурочены в основном к континентальному склону и его подножию. 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 [8]. С другой стороны, прямые наблюдения газогидратов в большинстве случаев пространственно находятся в границах газогрязевулканических полей, что может свидетельствовать об их тесных генетических истоках. Еще в 1938 году И.М. Губкин на фактическом материале показал, что залежи углеводородов и грязевые вулканы Крымско-Кавказской геологической провинции связаны с процессом формирования диапировых структур. Однако, несмотря на оптимистические утверждения многих исследователей, что проявления грязевого вулканизма можно рассматривать в качестве прямого признака нефтегазоносности, за редким исключением значительных промышленных запасов углеводородов в районах их развития до настоящего времени разведано не было. Тем не менее, можно достаточно уверенно констатировать, что грязевые вулканы обнаруживают непосредственную связь с наличием неотектонических движений, служащих главным фактором инициации газоводяных флюидов, характерных для всего Азово-Черноморского региона.

Из геохимической модели коровых волноводов [16] вытекает существование их автоколебательного режима и периодически восходящих и нисходящих флюидных потоков. При этом если в зоне восходящих флюидных потоков попадают глинистые осадочные толщи, нарушенные системой разломов, то могут возникать грязевые вулканы. Если флюиды попадают в коллекторы с изолированным

верхним покрытием, то, по мнению авторов разработанной модели, образуются обычные нефтяные и газовые месторождения [17].

Приведенные соображения хорошо согласуются с принципиальным выводом исследований последних десятилетий о дискретности и миграционной природе газогидратов [32]. При этом их формирование и концентрация происходят преимущественно в четвертичных осадках. Более древние, неогеновые образования попадают в интервал зон газогидратообразования лишь на восточном склоне Туапсинского прогиба и над сводами диапировых структур в осадках Сорокинской впадины [23], что, по-видимому, обусловлено здесь меньшей величиной теплового потока.

Характерной особенностью большей части сейсмических аномалий, фиксирующих подошву газогидратных систем, является их непосредственная близость к тектоническим нарушениям, уходящих своими корнями в палеогеновые осадки [23]. 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 [19]. 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 [23].

**Проблемы и перспективы освоения Украиной газогидратов Черного моря.** Интенсивная долгосрочная эксплуатация традиционных газовых месторождений Украины не могла не отразиться на общем уровне отечественных запасов природного газа. Это обстоятельство поставило Украину в зависимость от России, о чем наглядно свидетельствовали перманентные газовые кризисы в отношениях между нашими странами на протяжении 2009–2014 гг. Таким образом, вопрос о поиске альтернативных решений энергетической проблемы Украины остается актуальным. Одним из перспективных решений этой проблемы является изучения ресурсного потенциала гидратов метана в Черном море и их использования для добычи природного газа, как мощного и перспективного типа месторождений газа. К сожалению, специализированных исследований с целью промышленной оценки возможности добычи газа из природных газогидратных скоплений в Украине пока не проводилось.

Но следует ли считать газогидраты завтрашним днем украинской газовой промышленности или это очень отдаленная перспектива, которая может так никогда и не стать актуальной? В ответе на этот вопрос ключевую роль играют три фактора: экономический, технологический и экологический.

Как уже было отмечено, первый из них сводится к себестоимости извлечения сырья, которая зависит от ряда обстоятельств, в первую очередь от геологических условий и применяемой технологии. Приведенные выше результаты первых попыток промышленной добычи метана из подводных залежей газогидратов затрудняют точную ценовую оценку добытого газа, которая очень сильно варьирует. Так, на упомянутом выше месторождении Маллик себестоимость составила \$195–230/тыс. м<sup>3</sup> для газогидратов, расположенных над свободным газом, и \$250–365 для гидратов, находящихся над свободной водой. Как было

указано выше, еще более безрадостная картина в прогибе Нанкай (Япония), где себестоимость добычи оценена в \$540. Можно лишь предположить, что разработка месторождений газогидратов обойдется не дешевле, чем освоение залежей традиционного газа.

Во вторых следует иметь в виду, что эффективные промышленные технологии добычи метана из аквамариновых газогидратов, разработкой которых сегодня интенсивно занимаются ученые многих стран, появятся не раньше середины нынешнего десятилетия. В Украине специалисты Одесской государственной академии холода под руководством Леонарда Смирнова 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. При этом благодаря техническому прогрессу, созданные в будущем новые методы и технологии должны будут 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.

С точки зрения экологии, наибольшие опасения вызывает не применение ингибиторов при извлечении гидратов, а нарушение поверхностного слоя донных отложений вместе с населяющим его бентосом, что может привести к необратимым нарушениям экологического равновесия.

Исходя из вышеизложенного, следует все же рассматривать газогидраты как не такое уж далекое будущее мировой энергетики. Об этом в частности свидетельствует оптимистический прогноз Геологической службы США, которая ожидает, что промышленная эксплуатация газогидратных месторождений начнется не ранее 2022 года в зоне вечной мерзлоты (на канадском месторождении Маллик). А начало разработки глубоководных месторождений в Японии возможно не ранее 2025 года.

Таким образом, говорить о том, что Украина в обозримом будущем сможет достичь энергетической независимости благодаря разработке Черноморских газогидратов, было бы преждевременным. Прежде всего, это касается необходимости целенаправленных исследований по поиску и разведке месторождений газогидратов в Черном море с целью определения реальных запасов метанового газа. Украина, рано или поздно, все равно обратится к этой проблеме. Однако к тому времени должен быть создан подобающий фундамент, основы которого необходимо закладывать сегодня на фоне развития аналогичных исследований за рубежом. В этой связи представляется целесообразным при подготовке новой Государственной программы развития газовой отрасли Украины на ближайшую перспективу уделить более обстоятельное внимание газогидратам. Возможно, Украине надо последовать примеру Китая и Японии и начать собственные пилотные проекты в данной сфере. Конечно, для этого сейчас не самое благоприятное время.

Не следует также путать энергетическую независимость с энергетической безопасностью. Энергетическая независимость Украины в обозримом будущем является неосуществимой, в то время как энергетическая безопасность может быть укреплена за счет разумного ограничения энергопотребления, расширения и диверсификации внутренних источников снабжения энергией, развития прикладных разработок с целью привлечения нетрадиционных источников энергии (сланцевый газ, газогидраты и пр.).

Черное море – область экономических интересов шести прибрежных государств. Несмотря на то, что работа по делимитизации границ акватории Черного моря приостановлена, можно ориентировочно оценить запасы гидратного метана в пределах, существовавших до 2014 г. границ исключительно Украинской экономической зоны. Принимая во внимание суммарный ресурс газа в газогидратах акватории Черного моря в 25 трлн. м<sup>3</sup>, эти запасы ориентировочно составят 7–10 трлн. м<sup>3</sup> метана. Годовая потребность Украины в естественном газе в 2016 г. составила немногим более 32 млрд. м<sup>3</sup> метана, из которых лишь около 20 млрд. м<sup>3</sup> – собственное производство. Если для упрощения расчетов примем Украинскую часть за 8 трлн. куб. м метана, то газогидраты Черного моря смогут в перспективе обеспечить Украину природным газом приблизительно на 300 лет. Таким образом, газогидраты Черного моря, вопреки пессимистическим ожиданиям, могут сыграть важнейшую роль в будущем отечественной энергетики.

### **Выводы**

Черное море является природным объектом, сочетающим в себе необходимый набор факторов и условий для стабильного существования газогидратов. Это развитие достаточно мощных осадочных толщ, миграция газонасыщенных потоков (преимущественно метана) к поверхности Морского дна и широкое распространение газовых сипов, приуроченность скоплений газогидратов к зонам тектонических нарушений, а также их наличие в грязевых вулканах либо морфоструктурах морского дна и геодинамическая активность, которая проявляется в повышенной сейсмичности Азово-Черноморского региона. Именно последние факторы определяют возникновение и затухание подводной газогрязевой разгрузки и связанных с ней аномальных концентраций метана в донных осадках и водной толще. В пределах глубоководной части Черного моря существуют необходимые условия для аккумуляции природных углеводородов в твердой (газогидраты) и газовой фазах: достаточно низкие температуры придонного слоя воды, необходимые давления, чередование в разрезе пористых и глинистых отложений, региональная нефтегазоносность акватории.

Полученный к настоящему времени фактический материал позволяет с оптимизмом судить о перспективах газогидратных скоплений Черного моря, оценить прогнозные ресурсы гидратного газа, а также наметить полигоны для проведения специализированных поисково-разведочных и опытно-экспериментального бурения.

В заключение следует отметить, что Черное море может являться эталонным объектом для изучения газогидратов. С этой целью представляется целесообразным создание стационарного опытного полигона на перспективной акватории палеодельты Днепра для отработки методики их поисков и разведки, а также отработки технологий добычи этого сырья будущего.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анфилатова Э.А. Аналитический обзор современных зарубежных данных по проблеме распространения газогидратов в акваториях мира. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2008. (3). URL: [http://www.ngtp.ru/9/44\\_2008.pdf](http://www.ngtp.ru/9/44_2008.pdf).

2. Басниев К.С., Сухоносенко А.А. Перспективы освоения ресурсов газогидратных месторождений. *Газовая промышленность*. 2010. №1. С. 22–23.
3. Бяков Ю.А., Круглякова Р.П. Газогидраты осадочной толщи Черного моря – углеводородное сырье будущего. *Разведка и охрана недр*. 2001. №8. С. 14 – 19.
4. 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 Газоим. И.М. Губкина, Москва, 17-18 ноября 2009 г.
5. Василев А., Димитров Л. Оценка пространственного распределения и запасов газогидратов в Черном море. *Геология и геофизика*. 2002. 43, №7. С. 672 – 684.
6. Бондаренко В.І., Витязь О.Ю., Зоценко М.Л. та ін. Газогідрати. Гідратоутворення та основи розробки газових гідратів. Дніпропетровськ: «Літограф», 2015. 219 с.
7. Гинзбург Г.Д., Кремлев А.Н., Григорьев М.И., Ларкин Г.В., Павленкин А.Д., Салтыкова Н.А. Фильтрогенные газовые гидраты в Черном море (21 рейс НИС «Евпатория»). *Геология и геофизика*. 1990. №3. С. 10 – 20.
8. Горчилин В.А., Лебедев Л.И. О признаках газогидратов в осадочной толще Черного моря и возможном типе ловушек углеводородов. *Геол. журнал*. 1991. №5. С. 75 – 81.
9. Григорьев Г.А., Афанасьева Т.А. Перспективы промышленного освоения нетрадиционных ресурсов газа в России. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2012. 7. №2. URL: <http://www.ngtr.ru/rub/9/29-2012.pdf>.
10. Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. Флюидогеодинамические и генетические аспекты гидратоносности разреза осадков дна Мирового океана. *Геодинамика и нефтегазоносные структуры Черноморско-Каспийского региона*. 2002. С. 58–59.
11. Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. Распространение и ресурсы метана газовых гидратов. *Наука и техника в газовой промышленности*. 2004. №1–2. С. 5–13.
12. Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е. Газогидраты морей и океанов – источник углеводородов будущего. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2006. 287 с.
13. Дучков А.Д. Газогидраты метана в осадках озера Байкал. / Рос. хим. журнал.- 2003. – Т. XLVII, № 3. – С. 91–100.
14. Ефремова А.Г., Жижченко Б.П. Обнаружение кристалл-гидратов газов в осадках современных акваторий. *ДАН СССР*. 1974. 214. №5. С. 1179–1181.
15. Жагрин А., Шленкин С., Кулишкин Н., Харахинов В., Попова О., Коняев Д. Уникальная Мессояха. Новые данные об известном нефтегазоконденсатном объекте. *Oil & Gas Journal, Russia*. 2010. №7–8. С. 70–73.
16. Каракин А.В. Модель движения флюидов в земной коре за геологические отрезки времени. *Математическое моделирование*. 1990. 2, №3. С. 31–42.
17. Каракин А.В., Каракин С.А., Камбарова Г.Н. Геолого-геофизический анализ грязевого вулканизма. *Физика Земли*. 2001. №8. С. 76–85.
18. Клеркс Я., Марк Де Батист, Гранин Н., Земская Т., Хлыстов О. Газогидраты пресноводного «Океана». *Геология озера Байкал*. 2007. С. 82–91
19. Коболев В.П. Геодинамическая модель Черноморской мегавпадины. *Геофиз. журнал*. 2003. 25, № 2. С. 15–35.
20. 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.
21. Коморный А.Ф., Самсонов А.И. Сейсмический метод поисков газогидратов на акватории Черного моря. *Геофиз. журнал*, 1996. 18, №2. С. 70–76.
22. Конюхов А.И., Иванов М.К., Кульницкий Л.М. О грязевых вулканах и газовых гидратах в глубоководных районах Черного моря. *Литолог. и полезн. ископаемые*. 1990. № 3. С. 12–23.
23. Корсаков О.Д., Ступак С.Н., Бяков Ю.А. Черноморские газогидраты – нетрадиционный вид углеводородного сырья. *Геол. журнал*. 1991. № 5. С. 67–75.
24. 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.



25. Кузнецов Ф.А., Истомин В.А., Родионова Т.В. Газовые гидраты: исторический экскурс, современное состояние, перспективы исследований. *Рос. хим. журнал*. 2003. XLVII, №3. С. 5–18.
26. Кузьмин М.И., Калмычков Г.В., Дучков А.Д. и др. Гидраты метана в осадках озера Байкал. *Геол. рудн. месторожд.* 2000, 42, №1, С. 25 – 37.
27. Кутас Р.И., Коболев В.П., Цвященко В.А., Кравчук О.П., Бевзюк М.И. Геотермические аспекты образования газогидратов в Черноморской впадине. *Геофиз. журнал*. 1996. 18, № 3. С. 20–27.
28. Мазуренко Л.Л., Соловьев В.А., Матвеева Т.В. Газовые гидраты Мирового океана. *Газовая промышленность, спецвыпуск «Газовые гидраты»*. 2006. С. 2–6.
29. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М.: Недра, 1974. 208 с.
30. Макогон Ю.Ф. Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование. М.: Недра, 1985. 232 с.
31. Макогон Ю.Ф. Природные газогидраты: результаты и перспективы. Матер. междунар. конф. «Перспективы освоения ресурсов газогидратных месторождений» РГУ Нефти и Газа им. И.М. Губкина, Москва, 17–18 ноября 2009 г.
32. Матвеева Т.В., Соловьев В.А. Геологический контроль скоплений газовых гидратов на хребте Блейк-Аутер, Северная Атлантика. *Геология и геофизика*. 2004. 43, № 7. С. 662–671.
33. Соловьев В.А. Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое. Газовые гидраты. *Российск. хим. журнал*. 2003. 47, № 3. С. 59–69.
34. Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д. Геотермические исследования в Мировом океане в связи с изучением газогидратности. *Литология и полезн. ископ.* 1987. № 5. С. 121–125.
35. Стадницкая А.Н., Беленькая И.Ю. Состав и происхождение углеводородных газов и их влияние на диагенетические карбонатообразования (прогиб Сорокина, СВ часть Черного моря). *Геология Черного и Азовского морей*. К.: Гносис, 2000. С. 155–163.
36. Трофимук А.А., Макогон Ю.Ф., Толкачев М.В., Черский Н.В. Особенности обнаружения, разведки и разработки газогидратных залежей. *Геология и геофизика*. 1984. № 9. С. 3–10.
37. Шнюков Е.Ф. Газогидраты метана в Черном море. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2005. №2. С. 41–52.
38. Шнюков Е.Ф., Иванников А.В., Безбородов А.А. и др. Результаты геологических исследований 51-го рейса в Черном море на НИС «Михаил Ломоносов». К.: Препр. ИГН. №90-8. 1990. 49 с.
39. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. Геолого-геофизические исследования в 61-ом рейсе НИС «Профессор Воляницкий» в Черном море. *Геофиз. журнал*. 2004. 26. №6. С. 185–189.
40. Шнюков Е.Ф., Старостенко В.И., Коболев В.П. Газогидратоносность донных отложений Черного моря. *Геофиз. журнал*. 2006. 28, № 6. С. 29–40.
41. Щebetов А. Месторождения газогидратов: ресурсы и возможные методы разработки. *Технологии ТЭК*. 2006. С. 12–16.
42. Якушев В. Природные газогидраты: газовые ресурсы и геологическая угроза. *Oil & Gas Journal, Russia*. 2008. №6. С. 12–16.
43. Baba, K., Yamada, Y. BSRs and associated reflections as an indicator of gas hydrate and free gas accumulation: an example of accretionary prism and forearc basin system along the Nankai Trough, off central Japan. *Resour. Geol.* 54. 2004. PP. 11–24.
44. Bohrman G., Schenck S. Marine gas hydrates of the Black Sea (MARGASCH). RV Meteor Cruise M52/1. *Geomar Rep.* Kiel. 2002.
45. Boswell R. Is Gas Hydrate Energy Within Reach?. *Science* 325, 2009. PP. 957–958.
46. BP Global, Statistical Review of World Energy 2010. URL: <http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>, 2010.
47. Brooks J.M., Bernard B., Summer N.S. Gas Hydrates in Seabed Sediments Offshore Trinidad/ Barbados. In *Proceedings of AAPG Annual Meeting*, Dallas, TX, USA, 18–21 April 2004.
48. Collett T.S. Natural Gas Hydrate as a Potential Energy Resource. In *Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments, Coastal Systems and Continental Margins*; Max, M.D., Ed.; Kluwer: Dordrecht, The Netherlands, 2003. PP. 123–136.
49. Collett T.S. Natural Gas Hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River Area, North Slope, Alaska. *AAPG Bulletin* 1993. 77. PP. 793–812.

50. Collett T.S. Energy resource of natural gas Hydrates. *Bull. AAPG*, 2002. **86**, 11. PP. 1971–1992.
51. Collett T.S. International Team Completes Gas Hydrate Expedition in the Offshore of India. URL: [www.usge.gov/newsroom](http://www.usge.gov/newsroom) (accessed on 29 August 2007).
52. Dallimore S.R., Uchida, T., Collett, T.S. Summary. In Scientific Results from JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada; GSC: Ottawa, Canada. / 1999. PP. 1–10.
53. Dawe R.A., Thomas S.A. Large Potential Methane Source – Natural Gas Hydrates. *Energy Sources*, 2007. A 29. P. 217–229.
54. Dillon W.P., Max M.D. Oceanic Gas Hydrate. In Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments, Coastal Systems and Continental Margins. Dordrecht, The Netherlands, 2003. PP. 61–76.
55. Dillon W.P., Nealon J.W., Taylor M.H., Lee M.W., Drury R.M., Anton C.H. Seafloor collapse and methane venting associated with gas hydrate on the Blake Ridge – causes and implications to seafloor stability and methane release, in: C.K. Paull, W.P. Dillon (Eds.). *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection*, American Geophysical Union, Washington, DC, 2001. PP. 211–233.
56. Foucher J.P., Nouzÿ H., Henry P. Observation and tentative interpretation of a double BSR on the Nankai slope. *Mar. Geol.* 187, 2002. P. 161–175.
57. Holbrook W.S. Seismic studies of the Blake Ridge: implications for hydrate distribution, methane expulsion and free gas dynamics. In: Paull, C.K., Dillon, W.P. (Eds.), *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution and Detection*. Geophysical Monographs. American Geophysical Union, 2001. P. 235–256.
58. Hyndman R.D., Foucher J.P., Yamano M., Fisher A., and Scientific Team of Ocean Drilling Program Leg 131, Deep sea bottom simulating reflectors: Calibration of the base of the hydrate stability field as used for heat flow estimates. *Earth and Planetary Science Letters*. 1992. **109**. P. 289–301.
59. Ion, G., Lericolais, G., Nouzÿ, H., Panin, N., Ion, E., 2002. Seismoacoustic evidence of gases in sedimentary edifices of the paleo-Danube realm. *CIESM Workshop Series*, **17**, PP. 91–95.
60. Ivanov M.K., Limonov A.F., van Weering Tj.C.E. Comparative characteristics of the Black Sea and Mediterranean Ridge mud volcanism. *Marine Geology*. 1997. **132**. P. 253–271.
61. Kruglyakova R.P., Byakov Y.A., Kruglyakova M.V., Chalenko L.A. and Shevtsova N.T. Natural oil and gas seeps on the Black Sea floor. *Geo-Marine Letters, An International Journal of Marine Geology*. – Springer-Verlag: 2004. 10.1007/s00367-004-0171-4.
62. Kvenvolden K.A., Lorenson T.D. The global occurrence of natural gas hydrate. In: C.K. Paull, W.P. Dillon (Eds.), *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection*. American Geophysical Union, Washington, DC, 2001. PP. 3–18.
63. 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, PP. 182–193.
64. Majorowicz J.A., Osadetz K.G. Gas hydrate distribution and volume in Canada. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 85, 2001. PP. 1211–1230.
65. Matsumoto, R., Masuda, M., Foucher, J., Tokuyama, H., Ashi, J., Tomaru, H. Double BSR in the eastern Nankai Trough: fact or artifact. *AGU 2000 Western Pacific Geophys. Meeting*, 2000. URL: <http://www.agu.org/meetings/waiswp00.html>.
66. Matsuzawa M., Umezu S., Yamamoto K. Evaluation of Experimental Program 2004: Natural Hydrate Exploration Campaign in the Nankai-Trough Offshore Japan. *IADC/SPE Drilling Conference*, Miami, FL, USA, 21–23 February 2006; IADC/SPE 98960.
67. Mienert, J., Vanneste, M., Вьнз, S., Andreassen, K., Haflidasson, H., Sejrup, H.P. Ocean warming and gas hydrate stability on the mid-Norwegian margin at the Storegga Slide. *Mar. Pet. Geol.* 22, 2005. P. 233–244.
68. Moridis G.J., Collett T.S., Boswell R., Kurihara M., Reagan M.T., Koh C., Sloan E.D. Towards Production from Gas Hydrates: Current Status, Assessment of Resources, and Model-Based Evaluation of Technology and Potential. *Unconventional Reservoirs Conference*, Keystone, CO, USA, 10–12 February 2008; SPE 114163.

69. Moridis G.J., Reagan M.T., Boyle K., Zhang K. Evaluation of a Deposit at the PBU L-106 Site, North Slope, Alaska, for a Potential Long Term Test of Gas Production From Hydrates. *SPE Western Regional Meeting*, Anaheim, CA, USA, 27–29 May 2010.
70. Nischal T.S., Kumar A. Natural Gas Scenario in India—The Recent Upswings, Concerns, and the way Forward. *SPE APOGCE*, Perth, Australia, 20–22 October 2008; SPE 115700.
71. Paull CK, Matsumoto R, Wallace PJ and the ODP Leg 164A Shipboard Scientific Party. Initial Reports of the Ocean Drilling Program Leg 164A. College Station, Texas, Ocean Drilling Program. 1996.
72. Pellenbarg R.E., Max M.D. Introduction, physical properties, and natural occurrences of hydrate, in: M.D. Max (Ed.), *Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments*, Kluwer Academic, Dordrecht, 2000. PP. 1–8.
73. Popescu, I., Lericolais, G., Panin, N., Wong, H.K., Droz, L., 2001. Late Quaternary channel avulsions on the Danube deep-sea fan. *Mar. Geol.* 179, 25–37.
74. Popescu I., De Batist M., Lericolais G. et al. Multiple bottom-simulating reflections in the Black Sea: Potential proxies of past climate conditions. *Marine Geology*. 227 (2006) 163–176.
75. Sloan, E.D. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Marcel Dekker, Inc, New York, 1990. 641 p.
76. Smith S.L., Judge A.S. Estimates of Methane Hydrate Volumes in the Beaufort-Mackenzie Region, Northwest Territories. In *Current Research*; GSC: Ottawa, Canada, 1995. PP. 81–88.
77. Suess E. Marine gas hydrate research: changing views over the past 25 years. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011)*, Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17–21, 2011.
78. Suess E., Torres M.E., Bohrmann G., Collier R.W., Rickert D., Goldinger C., Linke P. Sea floor methane hydrates at Hydrate Ridge, Cascadia Margin, in: C.K. Paull, W.P. Dillon (Eds.), *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution and Detection*, American Geophysical Union, Washington, DC, 2001. PP. 87–89.
79. Wu N., Yang S., Zhang H., Liang J., Wang H., Lu J. Gas Hydrate System of Shenhu Area, Northern South China Sea: Wireline Logging. *Geochemical Results and Preliminary Resources Estimates*. In *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Houston, TX, USA, 3–6 May 2010.
80. ULR: [http://news.xinhuanet.com/english/2017-05/18/c\\_136295598.htm](http://news.xinhuanet.com/english/2017-05/18/c_136295598.htm).

Статья поступила 10.10.2017

Є.Ф. Шнюков, В.П. Коболєв

#### ГАЗОГІДРАТИ ЧОРНОГО МОРЯ – ПОТЕНЦІЙНЕ ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ (АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД)

В статті приведено аналітичний огляд сучасного стану газогідратних досліджень за кордоном і безпосередньо в Чорному морі. Показано, що в межах глибоководної частини Чорного моря існують необхідні умови для акумуляції газогідратів. Особливий інтерес при цьому представляє континентальний схил північно-західного шельфу Чорного моря, де було виявлено сейсмічні ознаки наявності газогідратних скупчень.

**Ключові слова:** газогідрати, Чорне море, міграція, поклад.

E.F. Shnyukov, V.P. Kobolev

#### GAS HYDRATES OF THE BLACK SEA – POTENTIAL SOURCE OF ENERGY (ANALYTICAL OVERVIEW)

The article gives an analytical review of the current state of gas hydrate research abroad and directly in the Black Sea. It is shown that within the deep-water part of the Black Sea, there are necessary conditions for the accumulation of gas hydrates. Of special interest is the continental slope of the north-western shelf of the Black Sea, where seismic signs of the presence of gas hydrate accumulations were discovered.

**Keywords:** gas hydrates, Black Sea, migration, deposit.