

**КОРИСНІ КОПАЛИНИ ОСАДОВИХ БАСЕЙНІВ;
СУЧАСНІ МЕТОДИ ЛІТОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ /
ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ ОСАДОЧНЫХ БАСЕЙНОВ;
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК (553.981:548.562):620.91](100)

О.Н. Сокур

МИРОВОЙ ОПЫТ ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТОВ КАК ИСТОЧНИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СЫРЬЯ*

O.N. Sokur

WORLD EXPERIENCE IN SOLVING THE PROBLEM OF GAS HYDRATE USE AS AN ENERGETIC RAW MATERIAL

В статті розглядається світовий досвід вирішення проблеми газогідратів як джерела енергетичної сировини. Над проблемою газогідратів в усьому світі працюють тисячі спеціалістів. Вивчення газогідратів є частиною більш обширної проблеми вивчення складу, шляхів міграції глибинних флюїдів, виявлення зон концентрації, впливу на гідратонасичені породи, водну товщу і атмосферу. Існуючі технології виявлення газогідратних покладів ґрунтовані на використанні властивостей гідрату і гідратонасичених порід. В світі на теперішній час виявлено приблизно 200 газогідратних покладів. За сейсмічними даними, в Чорному морі скупчення газогідратів утворюють потужні поклади. В північно-західній частині Чорного моря на підставі геофізичних, сейсмічних досліджень, а також переінтерпретації даних минулих років було виявлено три зони гідратуоутворення похованих газогідратів які залягають в діапазоні глибин 400–1600 м від дна моря з імовірними запасами за мінімальними підрахунками 50–60 трл. м³ газу. Одна багат шарова структура Голубина або Альфа (глибина моря 80 м) детальними дослідженнями підготовлена до постановки бурових робіт. Очікувані запаси тільки з одного горизонту при коефіцієнті видобутку 0,1, за нашими підрахунками, становитимуть 40–60 млрд. м³ газу.

Ряд країн мають Національні програми по вивченню і промислового освоєнню природних газогідратів. Проблема виявлення і освоєння газогідратних покладів дуже актуальна. Розробка ресурсів природних газогідратів сприятиме економічному розвитку країн.

Ключові слова: газогідрати, умови формування, флюїди, глибинна речовина.

В статье рассматривается мировой опыт решения проблемы газогидратов как источника энергетического сырья. Над проблемой газогидратов во всем мире работают тысячи специалистов. Изучение газогидратов является частью более обширной проблемы изучения состава, путей миграции глубинных флюидов, выявления зон концентрации, влияния на гидратонасыщенные породы, водную толщу и атмосферу. В мире к настоящему времени выявлено около 200 газогидратных залежей. По сейсмическим данным, в Черном море скопления газогидратов образуют мощные залежи. В северо-западной части Черного моря на основании геофизических, сейсмических исследований, а также переинтерпретации данных прошлых лет было выявлено три зоны гидратообразования погребенных газогидратов которые залегают в диапазоне глубин 400–1600 м от дна моря с возможными запасами за минимальными подсчетами 50–60 трлн. м³ газа. Одна многослойная структура Голубиная, или Альфа (глубина моря 80 м) детальными исследованиями подготовлена к постановке буровых работ. Ожидаемые запасы только с одного горизонта при коэффициенте добычи 0,1, по нашим подсчетам, составят 40–60 млрд. м³ газа.

Ряд стран имеют Национальные программы по изучению и промышленному освоению природных газогидратов. Проблема выявления и освоения газогидратных залежей весьма актуальна. Разработка ресурсов природных газогидратов будет способствовать экономическому развитию стран.

Ключевые слова: газогидраты, условия формирования, флюиды, глубинное вещество.

The author considers the world experience of solving the problem of gas hydrates as a source of energetic raw material. Today, thousands of specialists in the world deal with the problem. Gas hydrates are the part of the wider problem: study of composition and migration ways of deep-originated fluids, recognition of concentration zones, influence over the hydrate-saturated rocks, water masses and atmosphere. The existing technologies for recognition of gas hydrate accumulations use the properties of hydrates and hydrate-saturated rocks. Till now, about 200 gas hydrate deposits have been discovered in the world. By seismic evidence, gas hydrate accumulations in the Black Sea form reach deposits. Proceeding from geophysical and seismic evidences and re-interpretation of former data as well, in the NW part of the Black Sea three zones where buried gas hydrates form have been recognized in the depth range between 400–1600 m from the sea bottom with minimum possible reserves 50–60 trln m³ of gas. One multilayer structure Golubinaya (Alpha, sea depth 80 m) after detail investigation is ready to drilling. As we calculate, expected reserves of one horizon only will be 40–60 bln m³ of gas (recovery coefficient 0.1). Some countries have National Programs on investigation and commercial development of natural gas hydrates. The problems of recognition and development of gas hydrate accumulations is very topical. The recovery of natural gas hydrate will promote the economical development of countries.

Keywords: gas hydrates, condition of formation, fluids, deep matter.

*Рецензент и редколлегия не разделяет представлений автора о P-T условиях существования газогидратов.

© О.Н. Сокур, 2010

ВВЕДЕНИЕ

В ряде стран на сегодняшний день импорт энергии превышает 98% (Япония, Корея и др.) и число стран-импортеров энергии будет возрастать. Энергетическая проблема может быть решена за счет природных газовых гидратов. В Мировом океане и в недрах Земли существуют практически неограниченные ресурсы природного газа в твердом гидратном состоянии, доступные большинству стран мирового сообщества. Потенциальные ресурсы гидратированного газа оцениваются специалистами в $1,5 \times 10^{16} \text{ м}^3$ [4].

Ряд стран имеют Национальные программы по изучению и промышленному освоению природных газогидратов. Проблема выявления и освоения газогидратных залежей весьма актуальна. Разработка ресурсов природных газогидратов будет способствовать экономическому развитию стран.

РАЙОН РАБОТ, МЕТОДЫ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В Арктическом секторе Западно-Сибирского бассейна выявлено первое газ-газогидратное Мессояхское месторождение, которое в январе 1970 г. введено в промышленную разра-

ботку. На основании комплексных геофизических исследований, выполненных в скважинах, было установлено, что в верхней части залежи газ находится в гидратном состоянии, а нижележащая, подстилающая, часть залежи содержит газ в свободном состоянии. Это месторождение сыграло свою роль в развитии исследований природных газовых гидратов, а также явилось подтверждением не только наличия газогидратных залежей, но и реальной возможности их промышленного освоения. На фоне крупных месторождений Мессояхское месторождение с запасами менее 30 млрд. м^3 было небольшим, однако на крупнейшем в Заполярье металлургическом комбинате это месторождение обеспечило замену дорогостоящего привозного угля на высокоэкологичный дешевый природный газ (рис. 1) [3].

В настоящее время над проблемой газовых гидратов, как промышленных, так и природных, работают тысячи высококвалифицированных специалистов во многих странах мира. Каждые три года проводятся международные конференции по проблемам природных и промышленных газогидратов.

Газовые гидраты — соединения включения, в которых молекулы газа заключены в кристал-

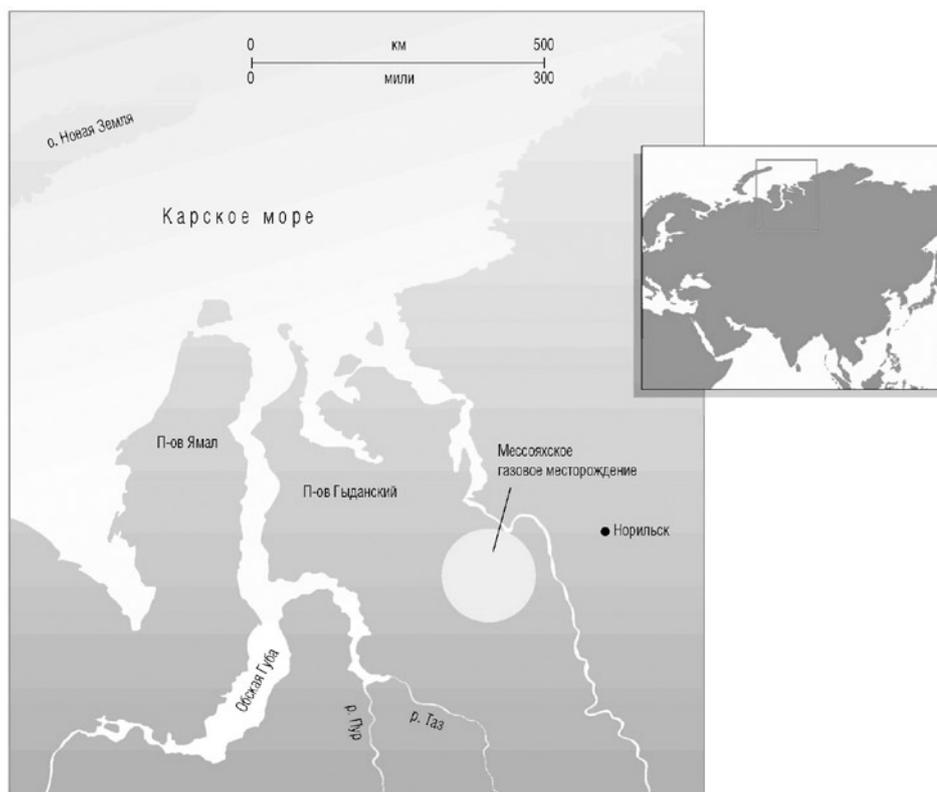


Рис.1. Мессояхское месторождение [4]

лические ячейки, состоящие из молекул воды, удерживаемых водородной связью. Газовые гидраты могут образовываться и стабильно существовать в широком интервале давлений и температур (для метана от $2 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^3$ МПа при температуре от 70 до 350 К). Некоторые свойства гидратов уникальны. Например, один объем воды связывает в гидратное состояние ~160 объемов метана. При этом ее удельный объем возрастает на 26% (при замерзании воды ее удельный объем возрастает на 9%). Структура газогидратов $5^{12}6^2$ в увеличенном виде показана на рис. 2, б (рис. 2).

Разложение гидрата в замкнутом объеме сопровождается значительным повышением давления. Процесс образования газогидрата происходит с выделением тепла, а его разложение — с поглощением тепла. На разложение природных гидратов в пласте необходимо затратить от 6 до 12% энергии, содержащейся в гидратном газе. Кристаллогидраты газа обладают высоким электросопротивлением и высокой акустической проводимостью. Они практически непроницаемы для молекул воды и газа.

Механизм формирования газогидратных залежей определяется многими факторами: термодинамическим режимом разреза пород в регионе, интенсивностью генерации и миграции углеводородов, составом газа, степенью газонасыщенности и минерализации пластовых вод, структурой пористой среды, литологической характеристикой разреза, геотермическим градиентом в зоне гидратообразования и в подстилающих породах, фазовым состоянием гидратообразователей и др.

Генезис углеводородов в осадочном чехле земной коры и формирование газогидратных залежей в акваториях Мирового океана неразрывно связаны, так как большая часть генерируемых углеводородов в донных осадках не рассеивается, диффундируя в придонные воды, а накапливается в виде гидратов в непосредственной близости от дна, независимо от наличия литологических покрышек. С точки зрения Макогона Ю.Ф. накопление отдельных компонентов природного газа в твердой фазе происходит уже на первых стадиях превращения органического вещества при его биохимическом преобразовании, если этот процесс осуществляется в зоне гидратообразования [4].

Формирование газогидратных залежей в зоне гидратообразования в период осадконакопления происходит как со стороны верхней

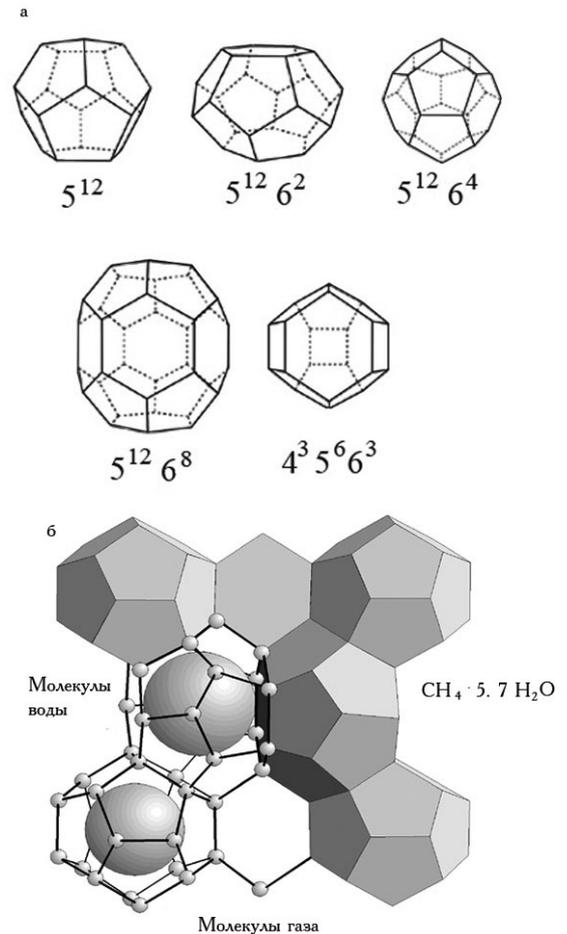


Рис. 2. Структуры газогидратов [3]

границы зоны за счет поступления новых порций органического вещества в начальный период превращения органического вещества, так и со стороны нижней границы — за счет газов, образующихся в последующие периоды заглупления и дальнейшего превращения органического вещества, а также за счет газов, поступающих из глубинных недр Земли. При вертикальной миграции газы поступают из высокотемпературных зон в зону гидратообразования, увеличивая толщ залежей снизу. Известны примеры залежей нефти непосредственно под гидратонасыщенными пластами, служащими непроницаемой покрышкой для них.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Существующие технологии выявления газогидратных залежей основаны на использовании свойств гидрата и гидратонасыщенных пород. Такими свойствами являются высокая акустическая проводимость, высокое электросопротивление, пониженная плотность, низкая теп-

лопроводность, низкая проницаемость для газа и воды. Выявление газогидратных залежей может быть осуществлено путем сейсмического зондирования, гравиметрическим методом, измерением теплового и диффузионного потоков над залежью, изучением динамики электромагнитного поля в исследуемом регионе и др.

Исследования условий образования, стабильного существования и свойств гидратов в природных условиях позволяют уверенно прогнозировать их наличие в различных регионах Мирового океана. Для образования газогидратов необходимо высокое содержание органического вещества в породах (от 0,5 до 4% и выше), активная генерация и миграция углеводородов в зону образования гидрата. Огромные перспективные газогидратные залежи выявлены в пределах полярных акваторий на глубинах вод от 200 м, в районах Атлантического, Индийского и Тихого океанов — на глубинах от 500–700 м. Только в пределах Мексиканского залива выявлено более 70 залежей газогидратов. В акватории Австралии, в районе Новой Каледонии сейсмическая разведка обнаружила газогидратную залежь общей площадью более 80 тыс. км² на глубине воды от 1 до 4 км. Запасы газа в гидратном состоянии здесь могут быть от 20 до 200 трлн. м³.

Первые оценки для районов распространения вечной мерзлоты дали величину $37 \cdot 10^{12}$ м³ — в бывшем СССР и $57 \cdot 10^{12}$ м³ — для мировых запасов. Были и другие оценки, в частности — $31,1 \cdot 10^{12}$ м³. На IV Канадской конференции по вечной мерзлоте, проходившей в Калгари в 1981 г., потенциальные мировые ресурсы газогидратов были оценены в $1,5 \cdot 10^{16}$ м³. В дальнейшем были даны уточнения — $1,8 \cdot 10^{16}$ м³; и $2,1 \cdot 10^{16}$ м³.

В мире к настоящему времени выявлено около 200 газогидратных залежей. Только для Северо-Американского континента, по данным Департамента геологической службы США, ресурсы газа в газогидратных залежах, выявленные путем сейсмического зондирования и глубокого бурения с отбором керна и полным комплексом геофизических исследований, превышают $9 \cdot 10^{15}$ м³. Относительно небольшая газогидратная залежь в жёлобе Нансей, в акваториях Японии при наличии трех пластов общей толщиной в 17 м и коэффициенте гидратонасыщения от 40 до 80 % содержит более $6 \cdot 10^8$ м³/км² метана, а суммарные запасы превышают $20,7 \cdot 10^{12}$ м³. В акваториях Японии уже выявлено 14 газогидратных залежей (рис. 3) [5].

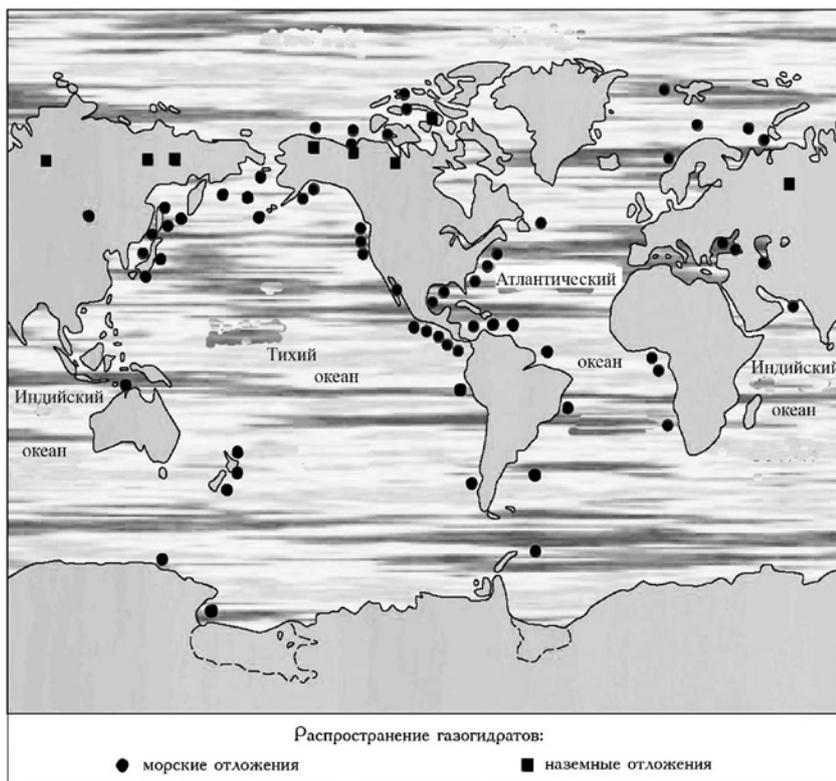


Рис. 3. Распространение газогидратов [5]

Для определения эффективности освоения газогидратных залежей недостаточно знать потенциальные ресурсы, необходимо знать величину извлекаемых запасов в конкретных условиях данного региона. Извлекаемые запасы гидратированного газа зависят от множества факторов, наиболее важными из которых можно назвать коэффициент гидратонасыщенности порового пространства продуктивных пластов залежи; размер залежи и суммарные потенциальные запасы газа в залежи; удельное газосодержание в регионе ($\text{м}^3/\text{км}^2$); эффективность применяемой технологии разработки залежи; степень переохлаждения газовых гидратов. Освоение газогидратных залежей в условиях акваторий при глубинах воды от 0,7 до 2 км можно считать рациональным при коэффициенте гидратонасыщенности свыше 30–50%. Коэффициент извлечения газа из газогидратных залежей, находящихся в различных геологических условиях, в зависимости от используемой технологии, может изменяться от 10 до 60%. В среднем он составляет 15–17% потенциальных ресурсов. Экономические показатели разработки газогидратных ресурсов также зависят от конкретных геологических и термодинамических условий. В целом решение проблемы

освоения газогидратных залежей требует индивидуального подхода для каждого конкретного региона, для каждой отдельной структуры.

Потенциал энергии, сосредоточенный в природных газогидратах, может обеспечить мир экологически чистой энергией не менее, чем на 200 лет. Природные газогидраты более равномерно распределены на планете, чем источники нефти и газа.

Для разработки газогидратных залежей могут быть успешно использованы существующие технологии поиска и разведки, бурения и добычи углеводородных энергоресурсов при их незначительных усовершенствованиях. Экономические показатели освоения морских газогидратных залежей могут быть даже более эффективными, чем в случае месторождений нефти и природного газа.

Некоторые обитатели морского дна могут служить своего рода индикаторами, указывающими на месторождения газогидратов. Там, где из недр выделяется метан, обнаружены специфические микроорганизмы, питающиеся углеводородами. Их, в свою очередь, поглощают моллюски, которые сами тоже служат пищей для некоторых других видов морской фауны. Измерив, содержание изотопа углерода ^{13}C в

Просачивание вулканического CO_2 в прогибе Окинава



Полевое исследование образования гидратов и просачивание CO_2 с морского дна

Рис. 4. «Оазисы жизни» на больших глубинах в местах просачивания CH_4 и CO_2 с морского дна [5]

панцире моллюсков отметим, что его такое же количество, как и в газогидратных залежах в этом месте (рис. 4) [1].

Интерес для Украины по изучению газогидратов представляет Азово-Черноморский бассейн. Проблема черноморских газогидратов напрямую связана с изучением потоков глубинного вещества, в частности углеводородных газов, что нашло свое отражение в работах В. Х. Геворкьяна и Ю. Г. Чугунного [1]. Сами газогидраты являются частным случаем более общей проблемы выяснения состава, путей миграции глубинных флюидов, выявления зон их концентрации и влияния на вмещающие породы, водную толщу и атмосферу.

По сейсмическим данным, в Черном море скопления газогидратов образуют мощные залежи. В северо-западной части Черного моря на основании геофизических, сейсмических исследований, а также переинтерпритации данных прошлых лет было выявлено три зоны гидратообразования погребенных газогидратов которые залегают в диапазоне глубин 400–1600 м от дна моря с возможными запасами за минимальными подсчетами 50–60 трлн. м³ газа. Одна многослойная структура Голубиная, или Альфа (глубина моря 80 м) детальными исследованиями подготовлена к постановке буровых работ. Ожидаемые запасы только с одного горизонта при коэффициенте добычи 0,1, по нашим подсчетам, составят 40–60 млрд. м³ газа.

Учитывая данные сейсморазведки, была дана оценка прогнозных запасов метана в Черноморских газогидратных месторождениях, выразившаяся цифрой 35 трлн. м³ только для глубоководной части моря, а в мелководной области примерно 60 трлн. м³ газа [2].

Анализ реальной термобарической обстановки по всей акватории, сопоставление её с экспериментальными данными, а также имеющиеся у нас данные о прямых находках газогидратов на малых глубинах и многочисленные косвенные признаки, сопутствующие газогидратным залежам и их поведению в конкретной геологической ситуации, позволяют значительно расширить область с условиями, благоприятными для формирования газогидратов. На основании детальных геологических исследований прямые находки газогидратов и сопутствующих им явлений свидетельствуют, что мелководная зона шельфа, находящаяся под юрисдикцией Украины, площадью примерно

100 тыс. км² является гидратоносной с потенциальными запасами газогидратного сырья не ниже, чем глубоководной части акватории.

Экспериментально было установлено, что чистый метан в присутствии воды при температуре +3° С и давлении 2 МПа образует клатрат метана (метановый газогидрат) [3]. Эти параметры соответствуют глубинам Чёрного моря 200 и более метров. Смесь газообразных углеводородов, соответствующая природному газу, при этой же температуре образует клатрат уже при давлении 0,5 МПа. Природный газ, являющийся смесью преимущественно метана и некоторого количества его гомологов, образует газогидраты уже на глубинах моря 300–350 м. При повышении температуры до 10° С начало процесса гидратообразования из чистого метана и воды смещается в область давлений свыше 7 МПа, а при температуре 20° С — более 20 МПа, однако смесь углеводородных газов (при преобладании метана) в этом случае требует также более низких давлений — 1,3 и 8,0 МПа соответственно.

Однако несмотря на тяжелую ситуацию с обеспечением Украины газом многочисленные правительства не предпринимали никаких конкретных мер по увеличению собственной добычи углеводородов. Вместо этого составлялись программы и планы, которые с успехом были провалены. Так, программами «Нефть и газ Украины до 2010 года» и «Углеводородные ресурсы Азово-Черноморского региона», над которыми работал огромный коллектив специалистов производственных и научных организаций, на основе анализа реальных возможностей геолого-разведочных и эксплуатационных организаций, планировалось уменьшение зависимости от внешних поставок по крайней мере в два раза с дальнейшим наращиванием производства. Эти программы, введенные в ранг Национальных, практически не финансировались.

Следует отметить, что конкретные материалы относительно решения газогидратной проблемы практически исчезли из научных изданий.

Несмотря на ограниченное финансирование, в ИГН НАНУ проведены теоретические исследования по выявлению генетических особенностей газогидратных залежей Черного моря, установлены некоторые особенности их распространения. Для этой цели, впервые в практике отечественных геологических работ, были использованы методы космических

исследований. На основании альтиметрической информации, полученной от Европейского Космического агентства, была разработана принципиально новая карта потенциально нефтегазоносных и гидратоносных структур северо-западного шельфа Черного моря, разработаны другие дистанционные и прямые поисковые критерии. Сейсмическими методами установлено, что в пределах шельфа существует новый тип «погруженных» газогидратных залежей.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Мы предлагаем такие методы поисков газогидратных залежей:

1. Сейсмические — основываются на выделении сигналов псевдодонного отражения BRSV и аномалий волнового поля VAMP.

2. Сейсмоакустические — применяется метод отражения волн, основанный на регистрации упругости волн, отраженных от литологических и тектонических границ в земной коре. Детальная сейсмоакустическая съемка позволяет получать объемные модели глубинных геологических структур.

3. Газогеохимические — аномалии удержания газа метана в осадках.

4. Биологические — изучают метаниспользующие бактерии, которые используют метан (и его гомологи) как источник углеводородного питания. Выявлена связь с районами газовыделений и полями концентрации метанооксилирующих бактерий.

5. Визуальные наблюдения с ПА за донными газовыделяющими структурами.

6. Геохимические — физические и химические закономерности поведения вещества в

разнообразных термодинамических условиях, данные о содержании и распределении химических элементов и их изотопов в разнообразных объектах (водах, газах, живых организмах в земной коре и Земле в целом).

Полученные данные основываются на геологической характеристике объекта, методах определения содержания и состояния элементов в минеральном, газообразном и живом веществе.

Газогидраты являются углеводородным резервом, который может обеспечить потребность Украины в энергоносителях на долгое время. Имеющийся научный и производственный потенциал позволяет обеспечить решение проблемы освоения газогидратных залежей в кратчайшие сроки.

1. *Геворкьян В.Х., Чугунный Ю.Г., Сорокин А.Л. и др.* Геологические аспекты биологической продуктивности океана. — Мурманск, Мурманское книжное из-во, 1990. — 185 с.
2. *Корсаков О.Д., Бяков Ю.А., Стулак С.Н.* Газовые гидраты Черноморской впадины // Сов. геология. — 1989. — №12. — С. 3–9.
3. *Макогон Ю. Ф.* Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование — М.: Недра, 1985. — 232 с.
4. *Макогон Ю. Ф.* Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева), — 2003. — Т. XLVII, — № 3, — С. 70–79.
5. *Соловьев В. А.* Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое // Российский хим. журн. — 2003. — Т. 47, — № 3, — С. 59–69.

Институт геологических наук НАН Украины, Киев
E-mail: bytit@ukr.net

Рецензент — *акад. НАН Украины Е.Ф. Шнюков*