

© В.К. Чистяков, 2008

С.-Петербургский государственный горный институт (технический университет), Россия

ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ ПРИ ПОИСКАХ, РАЗВЕДКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

Процессы, вызывающие нарушение естественного состояния залежи гидратов, имеют экологические последствия: выделение свободного газа в атмосферу в больших количествах может иметь сопоставимое с CO₂ влияние на климат; на морском дне в результате уменьшения прочностных свойств пород могут образоваться оползни.

Природные газовые гидраты являются единственным еще не разрабатываемым источником природного газа на Земле, который в силу огромных ресурсов и широкого распространения может в недалеком будущем составить реальную конкуренцию традиционным месторождениям.

Газовые гидраты — твердые кристаллические соединения типа $M \cdot nH_2O$, в которых низкомолекулярный гидрофобный газ с молекулярной массой M удерживается внутри n молекул воды с помощью водородных связей при определенных термобарических условиях: температура ниже первых десятков градусов и давление до 40 МПа. В природных газовых гидратах 98% газа представлено метаном, в 1 м³ гидрата которого может содержаться до 160 м³ газа при нормальных условиях.

Приоритет в открытии природных гидратов углеводородных газов принадлежит российским ученым: российский специалист-нефтяник И.Н. Стреженев в 1946 г. высказал предположение о существовании газовых гидратов в природных условиях [5]. С середины 60-х годов стали широко развиваться геологические аспекты проблемы природных гидратов, существующих как на суше, так и на дне океанов и морей. В настоящее время ресурсы метана в газогидратном виде оцениваются в $2 \cdot 10^{16}$ м³, что приблизительно в 2 раза превышает запасы всех остальных источников органического углеводорода на Земле [12].

Впервые промышленная газогидратная залежь была открыта в 1964 году в России на Мессояхском газовом месторождении в Западной Сибири (Норильский промышленный район) [7]. Залежь расположена на глубинах около 800 м в сеноманских (K_{2s}) песчаниках, где газовые гидраты составляют порядка 75% всего природного газа при пластовых температурах 8,4°C — 12,5°C и давлениях 7,5 — 8,5 МПа.

Там же на протяжении первой половины 70-х годов проводилась и первая в мире опытная добыча. Только при простой разгрузке добычными скважинами околоствольной зоны залежи до 6,2 МПа их дебит составлял

100 — 150 тыс. м³ газа в сутки. Запасы Мессояхского месторождения оцениваются в 30 млрд. м³. На месторождении уже добыто 14 млрд. м³ природного газа, из которого одна треть — из гидратного слоя.

Исследованиями последней трети XX века на суше России выявлены гидратопроявления на Ямбургском и Бованенковском газоконденсатных месторождениях (Тюменская обл.), в районах Улан-Юрхаской антиклинали и алмазоносной трубки Удачная (Якутия), а также на золотоносных россыпях Колымы и Чукотки (рис. 1) [8].



Рис. 1. Районы континентальных газогидратных проявлений в России [8]. 1. Бованенковское газоконденсатное м-е. 2. Ямбургское газоконденсатное м-е. 3. Мессояхское газовое м-е. 4. Устье р. Оленек. 5. Западная Якутия. 6. Колымо-Индигорская низменность. 7. Север п-ова Чукотка

К началу XXI в. были обнаружены залежи газовых гидратов в донных отложениях Охотского, Каспийского и Черного морей, а также озера Байкал на глубине нескольких сотен метров от поверхности воды. По данным ВНИИгаза [8] ресурсы природного газа в гидратах континентальной и шельфовой части России оцениваются в 100-1000 трлн. м³.

Начиная с 1995 г. в рамках выполнения различных национальных и международных программ в Великобритании, Германии, Канаде, Китае, Индии, России, США, Южной Кореи, Японии и др. было открыто финансирование научно-технических исследований по разведке и освоению ресурсов природных газогидратов.

В естественных природных условиях газовые гидраты сохраняют свою агрегатную стабильность или при очень низких температурах в условиях вечномерзлых пород на суше, или в режиме сочетания низкой температуры и высокого давления. Эти условия определяют зоны стабильности газогидратов (ЗСГ), представляющие собой часть литосферы и гидросферы Земли, термобарический и геохимический режим которой соответствуют условиям их устойчивого существования. Поэтому скопления природных газогидратов располагаются в районах распространения многолетнемерзлых пород, в толщах ледников и ледниковых покровов, в подледниковых отло-

жениях, в придонной части осадочных толщ приполярных бассейнов, а также на материковом склоне и в глубоководных районах Мирового океана.

В районах многолетней мерзлоты толщина пород, в которой существуют газогидратные залежи, может достигать 400-800, а в некоторых случаях превышает 1000 м. В Мировом океане зона гидратообразования начинается от дна и достигает нескольких сотен метров. Субмаринные залежи разведываются на глубоководном шельфе и континентальном склоне (рис 2).

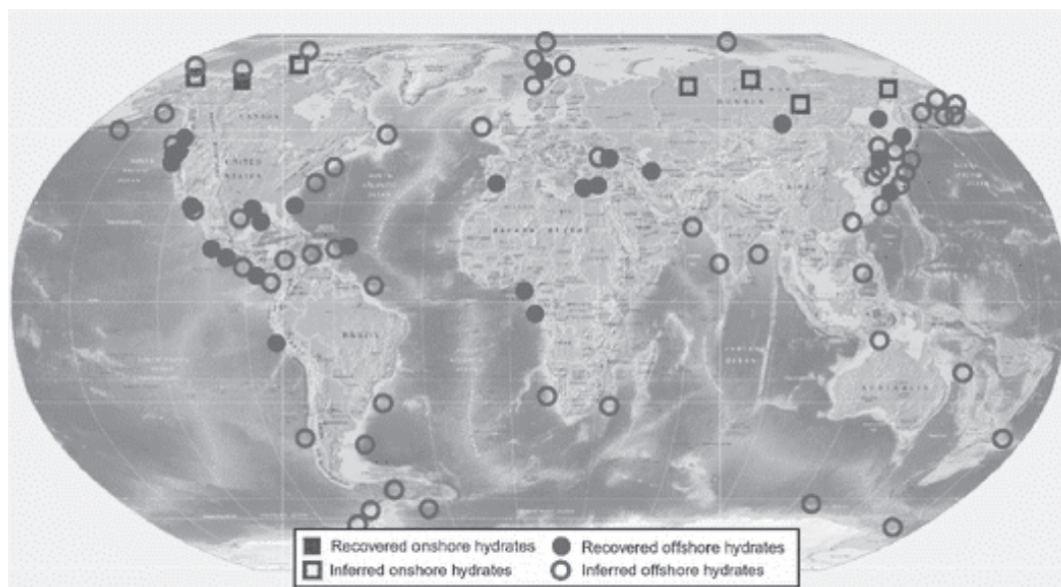


Рис. 2. Месторождения газовых гидратов доказанные бурением и прогнозные [10]

Низкая проницаемость гидратосодержащих пород для молекул воды и газа (ниже проницаемости водонасыщенности глин) делает их естественными флюидоупорами для большинства крупных газовых скоплений, обнаруженных в Западной Сибири и на севере Канады. Более детальные исследования последних лет позволили связать широко распространенные газопроявления при бурении скважин на арктическом побережье Канады и Западной Сибири, на Аляске, в Средней Сибири и др. с наличием газовых гидратов выше кровли зоны стабильности гидратов. Выбросы газа при разбуривании толщ мерзлых пород иногда отличаются высокой интенсивностью и большими дебитами, близкими к промышленным. После испытаний скважин активные газовыделения со стабильным дебитом могут продолжаться в течение нескольких месяцев. Это позволило доказать существование реликтовых газогидратов в многолетнемерзлых отложениях, залегающих существенно выше кровли современной зоны стабильности гидратов. Эта часть разреза многолетнемерзлых пород, находящаяся выше кровли зоны стабильности гидратов, в которой температурный режим пород соответствует условиям существования эффекта самоконсервации газовых гидратов при отрицательных температурах, получила название зона метастабильности газогидратов (рис. 3) [8].

Зона метастабильности, в отличие от зоны стабильности, является не термодинамической, а геологической зоной, где газовые гидраты не обра-

зуются, но могут существовать при сохранении льда в разрезе в законсервированном состоянии геологически длительное время. Таким образом, мощная криолитозона не только расширяет зону стабильности гидратов в геологическом разрезе, но и расширяет возможность существования реликтовых гидратов природных газов в верхних горизонтах на глубинах до 100-150 м.

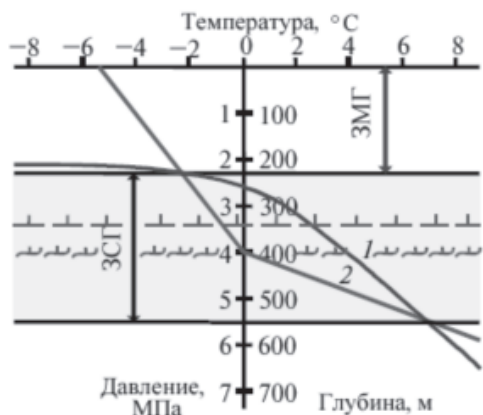


Рис. 3. Графоаналитический метод выделения зоны стабильности и зоны метастабильности газовых гидратов в континентальных условиях [8]: 1 — кривая равновесных условий гидратообразования метана; 2 — распределение температур по разрезу; ЗСГ — зона стабильности газовых гидратов; ЗМГ — зона метастабильности газовых гидратов; ⊥ — подошва многолетнемерзлых пород; ~ — подошва криолитозоны

Как установлено многочисленными буровыми и сейсморазведочными работами в различных частях мира, газовые гидраты образуют скопления только в осадочных толщах, представленных как породами с хорошими фильтрационно-емкостными свойствами (пески, песчаники, трещиноватые и пористые карбонатные и др.), так и слабопроницаемыми отложениями (глины, илы, алевролиты, аргиллиты). В высокопроницаемых породах гидраты скапливаются в поровом пространстве, а в слаболигифицированных и низкопроницаемых они образуют гидратные включения различной формы. При этом удельное гидратосодержание слабопроницаемых пород может быть значительно выше, чем у высокопроницаемых.

Несмотря на привлекательность использования газогидратов в качестве перспективного и экологически чистого топлива, обладающего огромными ресурсами, поиски, разведка и разработка их месторождений сопряжены с трудностями, возникающими при обеспечении технической и экологической безопасности проведения работ. Масштабы возникающих проблем могут изменяться от локальных до региональных и даже глобальных. Поэтому освоение газогидратных ресурсов требует разработки новых, гораздо более эффективных по сравнению с существующими, технологий разведки, добычи, транспортировки и хранения газа. Эти технологии могут эффективно использоваться и на традиционных газовых месторождениях, в том числе на тех, отработка которых сейчас представляет значительные трудности и не рентабельна.

Неизбежное изменение термобарических и геолого-технических условий в горных породах и отложениях, а также в технических системах (скважины, трубопроводы, технологические циркуляционные системы и пр.) вызывает или образование так называемых техногенных гидратов, или диссоциацию существующих природных газогидратов. И в том, и в другом

случаях характер возникающих осложнений имеет много общего с теми, с которыми сталкиваются нефтяники и газовики при проведении разведочных и добычных работ в районах распространения многолетнемерзлых пород [4]. Однако интенсивность и масштабы проявления этих осложнений и их возможных аварийных последствий несравненно выше.

Технические проблемы при бурении, исследовании и эксплуатации скважин, а также при подготовке, транспортировке и хранении углеводородов: образование техногенных газогидратов; диссоциация природных газогидратов.

Экологические проблемы в процессе освоения их ресурсов: диссоциация природных газогидратов.

С проблемой образования техногенных гидратов в технологических процессах впервые столкнулись нефтяники и газовики в 30-х годах прошлого столетия в России, когда основные объемы работ стали неуклонно перемещаться на Север. Образующиеся в благоприятных термобарических условиях (низкая температура и высокое давление) в призабойной зоне и стволах скважин, в шлейфовых и внутрипромысловых коллекторах, в системах промысловой и заводской подготовки газа, а также в магистральных газотранспортных системах техногенные газовые гидраты создают дополнительные сопротивления и пробки при движении нефти и газа. Это снижает проницаемость околоствольной зоны скважин в интервале продуктивного пласта, препятствует проведению качественной цементации обсадных колонн, выводит из строя отдельные элементы технологических циркуляционных систем и пр.

При увеличении глубин бурения, особенно морских скважин, опасность образования техногенных гидратов существенно возрастает в условиях возможного смешивания газа, поступающего в скважину, с водной средой или водной фазой разнообразных по составу буровых растворов. Наиболее вероятные и опасные осложнения связаны здесь с элементами, расположенными в местах с самой низкой температурой и в условиях быстрого охлаждения при прекращении циркуляции: с линиями дроссельными, глушения скважины и обвязкой превентора. В наземных трубопроводных системах для разрушения гидратных пробок в циркуляционных системах создавались большие перепады давления.

При этом возникала реальная опасность для работы обслуживающего персонала. Выход этих систем из строя часто приводил к серьезным авариям и даже к потере скважины. Ликвидация таких аварий — далеко не безопасное мероприятие, она требует больших материальных и временных затрат и, как правило, сопровождается серьезным ухудшением экологической обстановки на месте проведения работ.

Для предупреждения образования техногенных гидратов в настоящее время применяются разнообразные химические, физические и технологические методы, среди которых в отечественной промысловой практике наиболее широко используются химические реагенты — ингибиторы гидратообразования, среди которых исключительное место занимает метанол. Объем

потребления метанола в нефтегазовом производстве России по оценке ВНИИГаз в 2030 году может составить 1 млн. тонн в год [3].

Несмотря на значительные технологические преимущества, метанол обладает существенными недостатками: ядовитость, пожароопасность и высокая стоимость утилизации отходов.

Таким образом, существующие методы предупреждения техногенного гидратообразования связаны с возникновением новых технологических опасностей, для успешной борьбы с которыми требуется разработка более эффективных технологий промысловой и заводской обработки природных газов.

Бурение разведочных и эксплуатационных скважин на месторождениях природных газогидратов, как правило, сопровождается повышенными газопроявлениями, вызванными плавлением гидратов (ледяных каркасов) и распадом твердого газового гидрата на газ и воду. Даже небольшие изменения давления и температуры ведут к быстрой фазовой трансформации водно-газовой смеси, что вызывает в замкнутом пространстве (околоствольная зона скважины) резкое повышение пластового давления, а в проницаемых или свободно перемещающихся средах — интенсивное газопроявление и даже образование газового пузыря, объем которого может в десятки раз превышать первоначальный объем газовых гидратов.

Разложение гидратов в околоствольном пространстве скважины существенно снижает прочностные свойства горных пород, и это в значительной мере ослабляет ее конструкцию и герметичность заколонного пространства. Типичные осложнения, связанные с этим: смятие и разрушение обсадных колонн, затруднения в проведении качественной цементации, межколонные и заколонные перетоки, образование газовых грифонов, проседание колонн и пр. Их предотвращение и ликвидация требуют дополнительных затрат средств и времени, сопровождаются ухудшением условий технической и экологической безопасности проведения работ.

Освоение месторождений севера Западной Сибири столкнулось с проблемой интенсивного газопроявления и внезапных выбросов газа из неглубоких интервалов криолитозоны. Эти выбросы часто приводят к различным аварийным ситуациям на скважинах, включая выбросы бурового раствора и шлама, прихваты бурового снаряда и даже пожары. Так, например, на Бованенковском газоконденсатном месторождении после испытания скважин внутримержлотные газовыделения со стабильным дебитом могли продолжаться в течение нескольких месяцев, а интенсивность газовых потоков достигала $14000 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Проведенные исследования подтвердили связь интенсивных газопроявлений с его газогидратной формой нахождения в толще мерзлых пород как в зоне стабильности существования газовых гидратов (глубины ниже 200 м), так и при значительно меньших глубинах в зонах метастабильного состояния газовых гидратов за счет эффекта самоконсервации при отрицательных температурах [8].

В подобных условиях на первом этапе поисково-разведочных работ в дельте реки Макензи (Канада) при вскрытии скважиной гидратосодержа-

щих отложений в результате внезапного выброса газа погибли 2 канадских буровика [13].

Промышленное освоение шельфовой зоны, связанное с добычей полезных ископаемых и строительством подводных сооружений, делает актуальной проблему устойчивости подводных склонов. Широкое распространение газовых гидратов в донных отложениях морей и океанов требует рассмотрения проблемы метастабильности гидратосодержащих отложений как грунтов основания при обустройстве и эксплуатации морских месторождений. Как правило, присутствие газогидратов в донных отложениях повышает их механическую прочность по сравнению с подстилающими породами, не содержащими гидратов. Так как газогидраты относятся к метастабильным образованиям и существуют в природе в условиях, близких к границе их фазовой устойчивости, то даже при небольших изменениях внешних условий (температуры и давления), связанных с геологической или человеческой деятельностью, в них возникают необратимые процессы разложения с освобождением огромного количества газа и большой массы воды. Этот процесс существенно снижает прочностные характеристики самих гидратосодержащих отложений, что может вызвать их внутреннюю неустойчивость.

Проходка нефтяных и газовых скважин через гидратосодержащие слои под морским дном может вызвать оттаивание гидратов и деформацию стволов скважин, что повышает риск аварийных ситуаций на платформах. В результате разупрочнения грунтов при изменении напряженно-деформированного состояния подводного склона появляется возможность формирования полосы скольжения и быстрого развития оползневого процесса как в толще самих гидратосодержащих отложений, так и по поверхности их контакта с подгидратными отложениями, с возникновением крупных подводных оползней, осадочных блоков и обвалов.

Следует отметить, что эти процессы могут иметь различные масштабы — от локальных до региональных. Они могут возникать даже на склонах с углами наклона менее 5 град. и угрожают не только любому сооружению, расположенному на морском дне, но и могут вызывать катастрофы, связанные с возможностью возникновения цунами при перемещении массива пород. На опасность развития оползней значительное влияние оказывают разнообразные геологические процессы: землетрясения, вулканическая деятельность, понижение уровня Мирового океана, повышение температуры у основания зоны стабильности за счет продолжающегося процесса седиментации и, наконец, деятельность человека. Все это происходит одновременно с диссоциацией газов при разложении скопления гидратов в морских донных отложениях и может спровоцировать образование и развитие оползней в шельфовой зоне. Многие исследователи к такому механизму образования оползней относят оползни в Норвежском море (рис. 4) [11].

Эксплуатация в районах распространения подводных газогидратных залежей, где имеется уклон морского дна, чревато образованием подводных оползней, которые могут уничтожить глубоководную добывающую

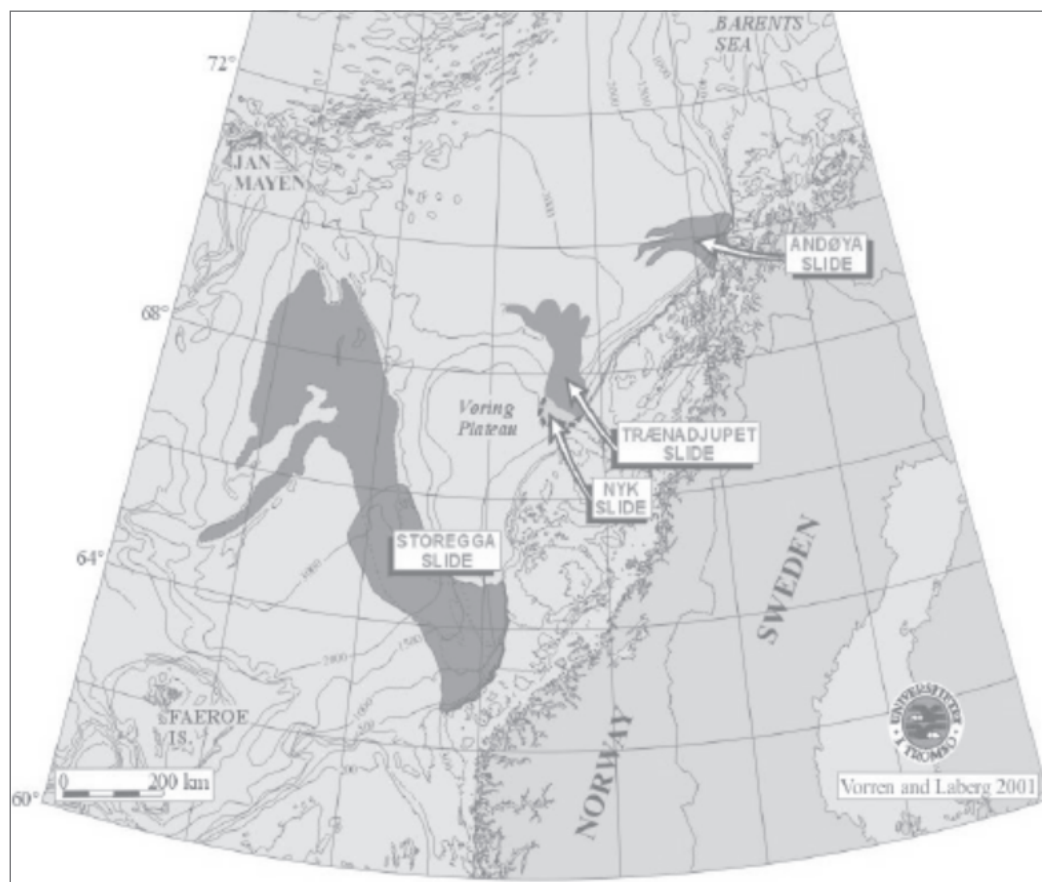


Рис. 4. Оползни ледникового и послеледникового периодов в Норвежском море [11]

платформу. Примером последствий вмешательства человека в мир природных гидратов служат крупнейшие аварии в ходе научно-исследовательских экспедиций. Так, например, в 1989 году компания “Сага петролеум АС” при бурении скважины на севере Норвежского моря по этой причине понесла убытки в размере 90 млн. долларов [2]. Именно высвобождение большого количества газа из скопления газогидратов в морских донных осадках, по мнению ряда исследователей, привело в свое время к разрушению добывающих платформ в Северном и Каспийском морях. Целый ряд аномальных явлений типа “Бермудского треугольника” и др. также может быть связан с дестабилизацией морских газогидратов [11].

Кроме того, метан, являющийся основным компонентом природных газовых гидратов, представляет собой опасность для Земной атмосферы как один из эффективнейших так называемых парниковых газов, изменение концентраций которых в атмосфере может вызвать серьезные климатические проблемы. По своему воздействию на повышение температуры атмосферы он приблизительно в 30 раз опаснее углекислого газа. Существуют гипотезы, которые связывают климатические изменения в ледниковые периоды с разложением и образованием газогидратов [2].

Поэтому в настоящее время за рубежом уделяется большое внимание изучению природных газовых гидратов — и как перспективных источников газа, и как фактора, осложняющего разведку и добычу нефти и газа в результате их диссоциации при изменении естественных термобарических и геолого-технических условий стабильного их существования при проведении разнообразных технологических операций.

Дальнейшее использование ресурсов гидратосодержащих отложений в значительной степени зависит от эффективного решения не только проблем экологической и технической безопасности проведения разведочных и эксплуатационных работ, но и целого ряда связанных с освоением новых энергетических ресурсов геотехнических проблем. Природные газогидраты, располагаясь в приповерхностной геосфере, в отличие от других ресурсов крайне чувствительны к изменениям внешних параметров среды, инициатором которых, помимо разнообразных природных факторов, становится деятельность человека.

Освоение газогидратных ресурсов, как и других сложных природных комплексов, требует проведения большого объема исследовательских работ, комплексного подхода к осваиваемой территории и, что особенно важно, исполнители должны руководствоваться не только высоким профессионализмом, но и принципами геотехники.

Одна из основных проблем геотехники связана с тем, что нынешнее вмешательство человека в природный мир чрезмерно, и ситуация быстро ухудшается. Широкое распространение неустойчивых и крайне неустойчивых природных комплексов определяет в связи с этим необходимость жесткого лимитирования в их пределах хозяйственной деятельности. Геотехнический подход предполагает изменения в политике проведения такой деятельности. Эти изменения должны задействовать базовые экономические, технологические и идеологические структуры. Только тогда ситуация будет серьезно отличаться от существующей.

Теоретические и экспериментальные исследования по изучению свойств и закономерностей строения, образования и разрушения газовых гидратов, условий их концентрации в земной коре и формирования различного типа месторождений; совершенствование методов поиска, оценки и эффективной разработки этих месторождений, прогнозирование возможных экологических и техногенных осложнений должны обеспечить эффективность практической деятельности в этом направлении.

1. Басниев К.С. Природные газогидратные ресурсы, проблемы, перспективы. — Вып. 28 — М.: Нефть и газ, 2003. — 20 с.
2. Дядин Ю.А., Гуцин А.Л. Газовые гидраты. Соровский образовательный журнал. 1998, № 3, с 55-64.
3. Истомина А.Н., Квон В.Г. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа. — М.: ООО «ИРЦ ГАЗПРОМ», 2004.
4. Кудряшов Б.Б., Чистяков В.К., Литвиненко В.С. Бурение скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород. — Л.: Недра, 1991. — 295 с.
5. Макогон Ю.Ф. Природные гидраты: открытие и перспективы. Газовая промышленность, 2001, № 5, с.10-16. Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: рас-

пространение, модели образования, ресурсы. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2003, т. XLVII, № 3, с 70-79.

6. Мельников В.П., Спесивцев В.И. Криогенные образования в литосфере Земли. Новосибирск, НИЦ ОИГГМ СО РАН, изд-во СО РАН, 2000. 343с.

7. Якушев В.С., Истомина В.А., Перлова Е.В. Ресурсы и перспективы освоения нетрадиционных источников газа в России. — М.: ВНИИГАЗ. — 2002. — 86 с.

8. Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А. и др. Газовые гидраты в отложениях материков и островов. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2003, т. XLVII, № 3, с 80-90.

9. Dallimore, S.R., T. Uchida, and T.S. Collett. Scientific Results from JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada, Geological Survey of Canada Bulletin 544, 1999, 403 p (32 articles).

10. Kvenvolden, K.A., 1993. Gas hydrates — geological perspective and global change. *Reviews of Geophysics*, 31, no. 2 (May), 173- 187.

11. Katsube, T.J. Jonasson, I.R. Uchida, T. and Connell-Madore, S., 2004, Possible seal mechanisms in shallow sediments: and their implication for gas-hydrate accumulation: In Proceedings of AAPG HEDBERG CONFERENCE “*Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards*” (Ed: T. Collette and A. Johnson), September 12-16, 2004, Vancouver, BC, Canada, 4p.

12. Makogon, Y.F., Holditch, S.A., Makogon T.Y. *Russian field illustrates gas hydrate production. Oil&Gas Journal, Feb.7, 2005, vol. 103.5, pp. 43-47.*

13. Smith, S.L., and A.S. Judge, 1995. Estimates of methane hydrate volumes in the Beaufort-Mackenzie region, Northwest Territories, in Current Research, 1995-B, Geological Survey of Canada, 81-88 (also Geological Survey of Canada Open File 2746, 1993).

14. Takahashi, H., Tsuji, Y. Japan drills, logs gas hydrate wells in the Nankai Trough. *Oil&Gas Journal, Sept.12, 2005, vol. 103.34, pp. 37-42,*

Процеси, які зумовлюють порушення природного стану покладу гідратів, мають екологічні наслідки: виділення вільного газу в атмосферу в великих кількостях може мати співставний з CO₂ вплив на клімат, на морському дні в результаті зменшення тривких характеристик порід можуть виникнути зсуви.

The gas hydrates are a safety hazard to drilling operation, as they could become unstable under typical wellborn conditions and produce large quantities of gas. The decomposition of natural gas hydrates in porous medium could also induce the subsea landslides and global weather changes. Recent studies show that they might provide an opportunity for CO₂ sequestering. Scales of arising problems can change from local up to regional and even global.