УДК 622.06
DOI: 10.17277/voprosy.2026.02.pp.046-057

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕТАНА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГАЗОГИДРАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЮЖНО-КИТАЙСКОМ МОРЕ

© Чжэньсинь Сяо[1]✉, А. Н. Гульков[1]

[1] *ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Российская Федерация*
✉ syao.ch@dvfu.ru

Ключевые слова: гидрат природного газа; добыча гидратов; метан; окружающая среда; холодный источник (cold-seep); экология.

Аннотация: Установлено, что подводные холодные источники (cold-seep) широко развиты в водах Южно-Китайского моря и являются ключевой областью для обогащения гидратов природного газа и утечки метана. Вытекающий метан и другие вещества питают микроорганизмы, способные к синтезу, и таким образом создается уникальная глубоководная экосистема холодных источников (cold-seep). На основе проведенного анализа отмечены основные методы глубоководной добычи гидратов природного газа, применяемые в настоящее время, – понижающий метод, методы нагрева и замещения. Аналитической обзор показал, что такие страны, как США, Япония и Китай, провели пробную добычу глубоководных гидратов природного газа с хорошими результатами. Вскрыта острая проблема – как безопасно и эффективно добывать гидраты природного газа, не нанося ущерба морской экологии, поскольку добыча глубоководных гидратов природного газа нанесет определенный ущерб экологии морского дна.

Предпосылки исследования и техническая структура

Предпосылки развития холодных источников (cold-seep) в Южно-Китайском море

Воды Южно-Китайского моря богаты осадочными породами и имеют превосходные геологические условия для добычи нефти и газа. Согласно данным сейсморазведки, глубинная формация богата природными газогидратами и слоями обогащения органическим веществом высокой степени зрелости [1]. Таким образом, когда региональная тектоническая активность вызывает образование системы трещин, природный газ и органические флюиды, образующиеся в глубинных породах-источниках углеводородов, мигрируют вдоль тектонического канала, и в конечном итоге на морском дне образуется система холодных источников (*далее* cold-seep) (табл. 1).

Таблица 1

Основные типы cold-seep в Южно-Китайском море

Название холодного источника (cold-seep)	Географическое положение	Основной состав жидкости	Типичные биомы
Линшуй	Бассейн реки Циондун	CH_4 (основной), небольшое количество H_2S	Небольшое количество красных трубчатых червей
Хайма	Центральная рифтовая зона бассейна реки Чондун	CH_4 (основной), содержащий C_2H_6, C_3H_8, H_2S	Глубоководные мидии, ныряющие панцирные креветки, трубчатые черви и т.д.
Site F	Горный хребет F в юго-западной части Тайваньской котловины	CH_4 (основной), небольшое количество H_2S	Ныряющие панцирные креветки, глубоководные мидии и т.д.

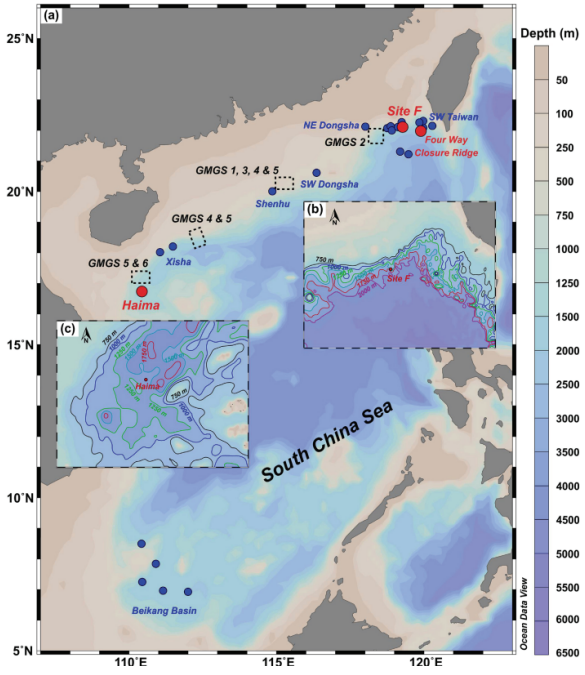

Рис. 1. Места известных точек утечки в Южно-Китайском море [3]

Основные районы с cold-seep в Южно-Китайском море демонстрируют очевидные эволюционные различия в составе жидкости и биомах (рис. 1). Cold-seep Линшуй расположен в юго-восточной части бассейна реки Цион. Жидкость в основном состоит из метана и содержит небольшое количество сероводорода. Биологическое сообщество простое, и здесь мож-

но увидеть лишь небольшое количество красных трубчатых червей. Cold-seep Гиппокампус также расположен в юго-восточной части бассейна Ционг, но состав жидкости в нем более сложный. Помимо метана и сероводорода, он также содержит этан и пропан. Биологическое сообщество здесь самое богатое, и оно широко распространено в глубоководных мидиях, ныряющих панцирных креветках и трубчатых червях. Cold-seep Site F расположен в юго-западной части Тайваньской котловины. Жидкость в основном состоит из метана и небольшого количества сероводорода, и в ней развиваются ныряющие панцирные креветки и глубоководные мидии [2].

Содержание исследования и техническая структура

В данном исследовании изучаются преимущества глубоководных газовых источников и добычи газовых гидратов в Южно-Китайском море. Проводится систематический анализ по четырем направлениям. *Во-первых*, анализируются утечки метана и других углеводородных газов и их экологические последствия для выяснения процесса образования и причин возникновения газовых источников. *Во-вторых*, исследуется влияние утечек метана из районов газовых источников на организмы, анализируется влияние систем газовых источников на биологическую среду морского дна для определения необходимости биологической среды вблизи таких систем. *В-третьих*, анализируются и обобщаются основные существующие методы глубоководной добычи газовых гидратов. *В-четвертых*, анализируется влияние глубоководной добычи газовых гидратов на биологические системы газовых источников.

Экологический эффект подводных cold-seep

Утечки и экологические эффекты метана и других углеводородных газов

Утечка метана и других газов на морское дно формирует уникальный ландшафт морского дна, и на этот процесс влияют такие факторы, как поток и природа протекающей жидкости. Вообще говоря, быстрая миграция пластичных жидкостей с высокой текучестью приводит к образованию более крупных грязевых насыпей или впадин на морском дне; сходящиеся жидкости и диффузионные потоки, возникающие в результате их расширения, приводят к образованию ям на морском дне [4]. Газ проходит через зону стабилизации гидратов, поддерживая стабильность гидратных отложений или просачиваясь в морскую воду, образуя экосистему cold-seep. Миграция углеводородных газов, таких как метан, и утечки, которые происходят на морском дне, сформировали уникальную топографию морского дна, изменили физические и химические свойства и состав донных отложений и способствовали формированию уникальных биомов системы cold-seep. Они являются активными носителями информации о холодных источниках на морском дне и являются основой для натурных наблюдений за cold-seep и изучения гидратов на морском дне [5].

Влияние метана на биологию в зоне утечки cold-seep

Холодные источники (cold-seep) – это в основном жидкость, состоящая из воды, метана, сероводорода и мелкозернистых отложений. Их температура низкая, близкая к температуре глубоководной морской воды. Метан, выделяющийся при разложении природного газа или гидратов под морским дном, мигрирует и выходит вверх по тектонической поверхности или трещинам в осадочных породах, образуя зону утечки холодного источника(cold-seep). Выделяющийся метан служит источником углерода и энергии для химического автотрофного производства, которое может поддерживать большие сообщества животных посредством химического симбиоза или взаимодействие питательных веществ. Зоны утечки подводных холодных источников (cold-seep) часто сопровождаются большим количеством автогенных карбонатных пород, биомов, грязевых вулканов, карьеров и других более макроскопических геологических явлений. Выброс метана с морского дна приведет к образованию карбонатных обнажений, что увеличит сложность биологической среды обитания на морском дне, а в дальнейшем приведет к увеличению биоразнообразия, биомассы, крова и пищи на морском дне, что способствует формированию экосистем с cold-seep (рис. 2).

В среде с высокой концентрацией метана и сульфатов бактерии, анаэробно окисляющие метан и бактерии, восстанавливающие сульфаты, вступают в реакцию анаэробного окисления метана, что обеспечивает источник углерода и энергии для роста биомов, синтезирующих химическую энергию. Они являются основными производителями экосистем холодных источников (cold-seep). На основе первичных производителей существуют первичные потребители, такие как трубчатые черви, моллюски, морские звезды и анемоны, и вторичные потребители – рыба и крабы.

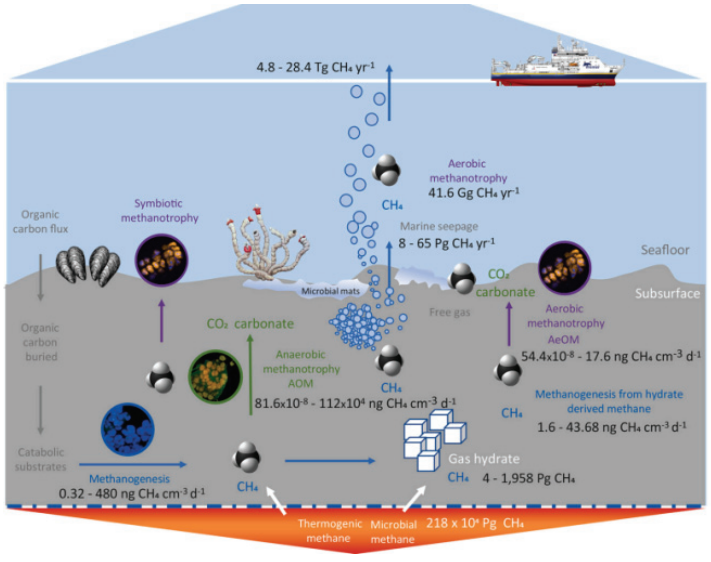

Рис. 2. Концептуальная схема биогеохимических процессов, происходящих в водной среде на краю континента [6]

В конечном итоге они будут разлагаться нематодами и возвращаться в природу, образуя таким образом полноценную экосистему холодных источников (cold-seep). Продукты, образующиеся в результате реакции анаэробного окисления между первичными производителями и метаном, служат источником энергии и материалов для первичных потребителей, а вторичные потребители получают энергию, необходимую для роста и развития, за счет потребления первичных потребителей. Таким образом, метан является источником энергии для всего живого в зоне утечки холодного источника (cold-seep) [7]. Если утечка метана в районе колдспринг прекратится, подавляющее большинство первичных потребителей не смогут поддерживать свою жизнь и погибнут. В результате вторичным потребителям также грозит вымирание из-за нехватки продовольствия, и в конечном итоге экосистема холодного источника (cold-seep) рухнет.

Анализ ситуации с добычей гидратов природного газа

Основные принципы методов добычи

Среди методов добычи газовых гидратов на больших глубинах метод депрессизации является морской технологией добычи газовых гидратов, которая ускоряет разложение газовых гидратов за счет снижения пластового давления, тем самым увеличивая суточную добычу. В настоящее время технология депрессизации протестирована во многих странах со значительными результатами. Испытательная добыча доказала, что технология обладает огромным потенциалом для индустриализации и очевидными преимуществами в плане технологических запасов [8]. Однако, согласно результатам испытательной добычи, перед коммерциализацией метода депрессизации все еще остаются некоторые проблемы, которые необходимо решить, главным образом, с точки зрения эффективности добычи и технологического совершенствования. Во-первых, с точки зрения эффективности добычи существуют такие проблемы, как короткий производственный цикл, недостаточная добыча из одной скважины и как эффективно укрепить пласт. С точки зрения технологического совершенствования существуют технические проблемы, такие как поддержание стабильности ствола скважины и смягчение снижения добычи, вызванного песчаными и ледяными пробками. Эти проблемы серьезно повлияли на стабильность коммерческой эксплуатации добычи газовых гидратов на больших глубинах. Поэтому использование метода депрессизации в качестве основного метода добычи в сочетании с другими также является предметом текущих исследований.

Метод нагрева направлен на ускорение разложения газовых гидратов путем изменения температуры окружающей среды. Это достигается путем закачки высокотемпературного пара или жидкости в месторождение газовых гидратов или путем прямого нагрева месторождения с использованием электромагнитных технологий, что позволяет изменить температуру окружающей среды и получить свободные гидраты для добычи. Такая технология проста и эффективна, но она дорогостоящая, энергоемкая,

имеет низкую скорость разложения и требует определенного уровня пористости пласта. В настоящее время метод нагрева эволюционировал от первоначального метода гидротермальной закачки до различных методов энергоснабжения, таких как нагрев электромагнитными волнами, микроволновый нагрев и солнечный нагрев, но все еще находится на стадии исследований и разработок.

Метод вытеснения основан на различии характеристик фазового равновесия между гидратом диоксида углерода и гидратом метана. Во время закачки диоксида углерода в пласт происходит образование гидрата диоксида углерода, который вытесняет молекулы метана. Преимущество метода вытеснения заключается в том, что он позволяет извлекать природный газ, одновременно связывая диоксид углерода, важный парниковый газ. Однако существующие технологии слишком сложны и незрелы, а эффективность вытеснения ограниченно низкая [9].

Анализ пробной добычи гидратов природного газа в мире

Японская организация по безопасности металлов и энергетики (JOGMEC) совместно с NETL провела долгосрочные испытания по добыче газовых гидратов в зоне вечной мерзлоты на северном склоне Аляски. Испытания длились 315 дней и были прекращены по собственному желанию. В целом японская индустрия добычи газовых гидратов в настоящее время находится на стадии комплексной проверки технологии добычи и базового завершения исследований морских пилотных районов. На основе этих долгосрочных испытаний Япония планирует провести исследования целесообразности добычи газовых гидратов в море примерно в 2026 году [10].

В 2012 году США подтвердили возможность замены природных газовых гидратов на Северном склоне Аляски. Весь процесс полевых испытаний проводился на фазовом равновесии гидратов CH_4, а конечная суммарная добыча газа составила приблизительно $2{,}4 \times 10^4$ м^3 [11].

В 2002 году на Северном склоне Аляски Канада, Япония и другие страны совместно осуществили две пробные разработки гидратов. В ходе первой пробной разработки в основном проводилась мелкомасштабная поэтапная разработка местных пластов скважин, что подтвердило целесообразность и экономичность участка; во время второй пробной разработки в основном были завершены пять дней подряд добычи с закачкой тепла, и в итоге было добыто около 470 м^3 природного газа, который впервые подтвердил целесообразность добычи гидратов природного газа с использованием теплового инжектора [12] (табл. 2).

В 2020 году Китай провел 30-дневные испытания по снижению давления в районе Шэньху в Южно-Китайском море. Эти испытания стали первыми, в которых использовались горизонтальные скважины. С точки зрения конечного эффекта добычи газа суммарная добыча газа в ходе этих испытаний составила $8{,}614 \times 10^5$ м^3, а среднесуточная – $2{,}87 \times 10^4$ м^3, что является значительным улучшением по сравнению с результатами первых испытаний в Китае по добыче гидратов [12].

Таблица 2

Анализ ситуации с пробной добычей газовых гидратов в различных странах

Страна	Год	Местоположение	Метод добычи	Продолжительность, дни	Совокупный объем производства, $м^3$
Япония	2023–2024	Залив Прадхо-Бей на Северном склоне Аляски	Снижение давления	216	Не разглашается
США	2012	Северный склон Аляски	Замещение CO_2 + + снижение давления	30	$2{,}4 \times 10^4$
Канада	2002	Дельта Малика	Нагрев	5	470
Китай	2020	Шэньху в Южно-Китайском море	Снижение давления	30	$8{,}614 \times 10^5$

Анализ влияния горнодобывающего проекта на окружающую среду

Влияние на горнодобывающие проекты

Природные газовые гидраты относительно стабильны при низких температурах и высоком давлении. В процессе глубоководной добычи природного газа тепло, выделяемое в результате многократного трения между буровым оборудованием и пластом вблизи дна скважины, приводит к повышению температуры природных газовых гидратов. Сила взаимодействия между буровым инструментом и стенкой скважины может разрушать структуру пласта, что приводит к недостаточному пластовому давлению на морском дне. Поэтому в таких условиях высоких температур и низкого давления природные газовые гидраты очень легко разлагаются [13]. Гидростатическое давление природных газовых гидратов в зоне их хранения на морском дне высокое. Несмотря на то что в это время природные газовые гидраты не могут быстро разлагаться, когда добытые продукты попадают в скважину, давление внутри скважины увеличивается. Под воздействием чередования бурового раствора и внешних условий низких температур образуются новые гидраты. Вновь образовавшиеся гидраты очень легко закупоривают скважину, что влияет на эффективность добычи.

Влияние на морскую среду

Геологическая среда, в которой хранятся гидраты природного газа, относительно стабильна. Однако с развитием глубоководной добычи полезных ископаемых стабильная окружающая среда и геологическое состояние изменились, что привело к разложению гидрата природного газа и выделению большого количества газообразного метана, так как метан – мощный парниковый газ, его парниковый эффект намного превышает воз-

действие углекислого газа. Часть метана попадает в атмосферу непосредственно через океан, а другая часть растворяется в морской воде и постепенно превращается в углекислый газ под действием морских микроорганизмов.

Метан и углекислый газ, которые первыми попадают в атмосферу, вызывают парниковый эффект. Вызванное этим потепление морской воды повлияет не только на температуру мелководья, но и на глубоководные районы. Это также окажет определенное воздействие. Повышение температуры непосредственно влияет на взаимоотношения между кораллами и симбиотическими водорослями, вызывает альбинизм и ослабляет структуру и функции экосистем коралловых рифов. Высокомобильные виды, такие как рыбы, вынуждены мигрировать в высокие широты или глубоководные районы, что приводит к образованию свободных мест в первоначальных экологических нишах и восстановлению видового состава, что влияет на распределение и стабильность рыбных ресурсов [14]. Беспозвоночные, такие как антарктический криль, очень чувствительны к перепадам температур, и сокращение их популяции еще больше повлияет на хищников с более высоким уровнем питательных веществ. Морские млекопитающие сталкиваются с двойным давлением – сжатием среды обитания и разрывом пищевой цепочки, показатели их размножения и выживаемости снижаются.

Углекислый газ вступает в реакцию с морской водой и вызывает подкисление океана, прямым следствием которого является снижение содержания карбоната кальция в морской воде. Карбонат кальция – основное вещество, из которого кораллы, моллюски и многие планктонные организмы строят раковины или кости. Снижение насыщенности означает, что этим организмам необходимо потреблять больше энергии для формирования и поддержания своих оболочек, а в зонах сильного подкисления их оболочки не смогут нормально расти, поскольку скорость растворения превышает скорость синтеза [15]. С уменьшением численности этих кальцифицированных организмов виды, использующие их в качестве среды обитания или источника пищи, потеряют убежище и питание, что приведет к разрушению структуры среды обитания и эрозии фундамента пищевой сети. Такой разрушительный эффект распространяется от мельчайших планктонных бактерий до крупных морских млекопитающих, которые могут испытывать трудности с выживанием из-за сокращения добычи.

Заключение

Южно-Китайское море обладает богатыми запасами газовых гидратов, и над этими богатыми глубоководными месторождениями газовых гидратов часто образуются холодные источники (cold-seep), которые питают уникальные экосистемы в этом районе. Вопрос о том, как безопасно и эффективно коммерчески добывать газовые гидраты, остается ключевым направлением исследований. Однако, если добыча не будет осуществляться безопасно и эффективно, это может нанести серьезный ущерб окружающей экосистеме и потенциально привести к геологическим опасностям, таким как обрушения морского дна и оползни. Будущие исследова-

ния должны быть сосредоточены на разработке точных технологий идентификации и контролируемой добычи, создании системы оценки экологического воздействия холодных источников (cold-seep) и достижении синергетического взаимовыгодного решения для использования ресурсов и защиты окружающей среды.

Список литературы

1. Чен Ян. Исследование и размышления о биомаркерах симбиотических макроорганизмов в глубоководных гидротермальных системах холодных источников / Ян Чен, Хунсян Гуань, Санчжун Ли // Морская геология и четвертичная геология. – 2025. – Т. 45, № 6. – С. 80–92. doi: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2025110801

2. Чжун Сун. Исследование метода культивирования и процесса анаэробного окисления метана анаэробными окисляющими микроорганизмами в отложениях холодных источников [D] / СунЧжун // Гуандунский технологический университет. – 2025. doi: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2025.000099

3. Сюйдун Ван. Макроэкология холодных источников в Южно-Китайском море / Ван Сюйдун, Гуань Хунсян, Цю Цзянь-Вэнь, Сюй Тин, Пекманн Йорн, Чен Дуофу, Фэн Дун // Геосистемы и геосреда. – 2022. – Т. 1, № 3. – С. 100081. doi: 10.1016/j.geogeo.2022.100081

4. Ма Лян. Рамановское наблюдение in situ ключевых процессов взаимодействия между глубоководными природными газовыми гидратами и морской средой [D] / Лян Ма // Университет Китайской академии наук (Институт океанологии Китайской академии наук). – 2025. doi: 10.27551/d.cnki.gzkhs.2025.000012

5. Ли Цаньпин. Прогресс исследований холодных просачиваний и пузырьковых шлейфов природных газовых гидратов / Цаньпин Ли, Сюэвэй Лю, Луочэнь Чжао // Прогресс геофизики. – 2013. – Т. 28, № 2. – С. 1048 – 1056. doi: 10.6038/pg20130259

6. Ливио Руффин. Экологические проблемы, связанные с разложением метановых гидратов в условиях изменения климата и антропогенной деятельности: современное состояние, потенциальные последствия и решения для мониторинга / Руффин Ливио, Тан Ань Минь, О'Нил Ник, Тоффин Лоран, Пари Жан-Даниэль, Ян Цзиньхай, Георгиев Валентин, Фиетцек Пир, Джустиниани Микела, Тинивелла Умберта // Обзоры наук о Земле. – 2023. – Т. 246. – С. 104578. doi: 10.1016/j.earscirev.2023.104578

7. Лю Нинхуа. Исследование микробного разнообразия и метаболических характеристик в особых глубоководных районах [D] / Нинхуа Лю // Шаньдунский университет. – 2024. doi: 10.27272/d.cnki.gshdu.2024.000081

8. Сяо Чанвэнь. Исследование эволюции фазовых переходов и характеристик просачивания в процессе добычи морских газовых гидратов [D] / Чанвэнь Сяо // Тяньцзиньский университет. – 2024. doi: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2024.000071

9. Ляо Юцян. Исследование новых методов добычи морских газовых гидратов с использованием геотермальной энергии и депрессуризации [D] / Юцян Ляо // Китайский университет нефти (Восточный Китай). – 2022. doi: 10.27644/d.cnki.gsydu.2022.000032

10. У Линьцян. Опыт Японии и ее уроки для развития индустрии газовых гидратов / Линьцян У // Китайская нефтехимическая информационная сеть. – 2025. – URL : http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2025-03/12/content_7120938.html (дата обращения: 30.04.2026)

11. Чжу Юхай. Потенциал ресурсов газовых гидратов Китая и прогресс опытной добычи / Юхай Чжу, Шоуцзи Пан, Пинкан Ван // Седиментология и тетическая геология. – 2021. – Т. 41, № 4. – С. 524–535. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.12001

12. Ли Цинпин. Состояние исследований и перспективы технологий добычи газовых гидратов / Цинпин Ли, Шоувэй Чжоу, Цзяфэй Чжао // Китайская инженерная наука. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 214 – 224.

13. Чжан Гэн. Исследование закономерностей многофазного течения в скважине при твердотельной флюидизационной добыче морских поверхностных газовых гидратов [D] / Гэн Чжан // Китайский университет нефти (Пекин). – 2023. doi: 10.27643/d.cnki.gsybu.2023.000261

14. Шан Сунхуа. Процессы углеродно-серного цикла и численное моделирование утечки метана из холодных источников в донных отложениях [D] / Сунхуа Шан // Цзилиньский университет. – 2023. doi: 10.27162/d.cnki.gjlin.2023.007016

15. Хэ Ванин. Исследование глубоководной экосистемы холодных источников на основе микро-Рамановской спектроскопии [D] / Ванин Хэ // Университет Китайской академии наук (Институт океанологии Китайской академии наук). – 2023. doi: 10.27551/d.cnki.gzkhs.2023.000126

References

1. Chen Yang, Guan Hongxiang, Li Sanzhong. [Research and reflection on biomarkers of symbiotic macroorganisms in deep-sea cold seep hydrothermal systems], *Morskaya geologiya i chetvertichnaya geologiya* [Marine Geology and Quaternary Geology], 2025, vol. 45, no. 6, pp. 80-92. doi: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2025110801 (In Chinese)

2. Zhong Song. [Study on the cultivation method and anaerobic oxidation process of methane anaerobic oxidizing microorganisms in cold seep sediments] [D]. Guangdong University of Technology, 2025. doi: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2025.000099 (In Chinese)

3. Wang Xudong, Guan Hongxiang, Qiu Jian-Wen, Xu Ting, Peckmann Jörn, Chen Duofu, Feng Dong. [Macro-ecology of cold seeps in the South China Sea], *Geosistemy i geosreda* [Geosystems and Geoenvironment], 2022, vol. 1, no. 3, 100081. doi: 10.1016/j.geogeo.2022.100081(In Chinese)

4. Ma Liang. [Raman in-situ observation of key processes of interaction between deep-sea natural gas hydrates and marine environment] [D]. University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2025. doi: 10.27551/d.cnki.gzkhs.2025.000012 (In Chinese)

5. Li Canping, Liu Xuewei, Zhao Luochen. [Research progress on cold seeps and bubble plumes of natural gas hydrates], *Progress geofiziki* [Progress in Geophysics], 2013, vol. 28, no. 2, pp. 1048-1056. doi: 10.6038/pg20130259 (In Chinese)

6. Ruffine Livio, Tang Anh Minh, O'Neill Nick, Toffin Laurent, Paris Jean-Daniel, Yang Jinhai, Georgiev Valentin, Fietzek Peer, Giustiniani Michela, Tinivella Umberta. Environmental challenges related to methane hydrate decomposition from climate change scenario and anthropic activities: State of the art, potential consequences and monitoring solutions, Obzory nauk o Zemle [Earth-Science Reviews], 2023, vol. 246, 104578. doi: 10.1016/j.earscirev.2023.104578 (In Eng.)

7. Liu Ninghua. [Study on microbial diversity and metabolic characteristics in deep-sea special regions] [D]. Shandong University, 2024. doi: 10.27272/ d.cnki.gshdu.2024.000081 (In Chinese)

8. Xiao Changwen. [Study on phase transition evolution and seepage characteristics during marine natural gas hydrate production] [D]. Tianjin University, 2024. doi: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2024.000071 (In Chinese)

9. Liao Youqiang. [Study on a new method for marine natural gas hydrate production using geothermal energy and depressurization] [D]. China University of Petroleum (East China), 2022. doi: 10.27644/d.cnki.gsydu.2022.000032 (In Chinese)

10. Wu Linqiang. [Japan's experience and enlightenment in promoting the development of natural gas hydrate industry] [EB/OL]. China Sinopec News Network, 2025. Available at: http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2025-03/12/content_7120938.html (accessed 30 April 2026). (In Chinese)

11. Zhu Youhai, Pang Shouji, Wang Pingkang. [Natural gas hydrate resource potential and trial production progress in China], *Sedimentologiya i teticheskaya geologiya* [Sedimentary Geology and Tethyan Geology], 2021, vol. 41, no. 4, pp. 524-535. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.12001 (In Chinese)

12. Li Qingping, Zhou Shouwei, Zhao Jiafei. [Research status and prospects of natural gas hydrate production technologies], *Kitayskaya inzhenernaya nauka* [Strategic Study of Chinese Academy of Engineering], 2022, vol. 24, no. 3, pp. 214-224. (In Chinese)

13. Zhang Geng. [Study on multiphase flow characteristics in wellbore during solid fluidization production of marine shallow surface natural gas hydrates] [D]. China University of Petroleum (Beijing), 2023. doi: 10.27643/d.cnki.gsybu.2023.000261 (In Chinese)

14. Shang Songhua. [Carbon-sulfur cycling processes and numerical simulation of methane cold seep leakage in seafloor sediments] [D]. Jilin University, 2023. doi: 10.27162/d.cnki.gjlin.2023.007016 (In Chinese)

15. He Wanying. [Study on deep-sea cold seep ecosystem based on micro-Raman spectroscopy technology] [D]. University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2023. doi: 10.27551/d.cnki.gzkhs.2023.000126 (In Chinese)

Analysis of the Environmental Impact of Methane During Gas Hydrate Deposits Development in the South China Sea

© Zhenxin Xiao[1]✉, A. N. Gulkov[1]

[1] *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation*
✉ syao.ch@dvfu.ru

Keywords: natural gas hydrate; hydrate production; methane; environment; cold-seep; ecology.

Abstract: It has been established that underwater cold-seep vents are widespread in the waters of the South China Sea and are a key area for natural gas hydrate enrichment and methane leakage. The escaping methane and other substances feed microorganisms capable of synthesis, thus creating a unique deep-sea cold-seep ecosystem. Based on the analysis, the main methods of deep-sea natural gas hydrate production currently in use are identified: the step-down method, heating, and displacement methods. The analytical review revealed that countries such as the United States, Japan, and China have conducted trial production of deep-sea natural gas hydrates with good results. A pressing issue is how to safely and efficiently

extract natural gas hydrates without harming the marine environment, as deep-sea natural gas hydrate production will cause some damage to the seafloor ecology.

Сведения об авторах

Сяо Чжэньсинь – аспирант департамента энергетических систем, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Приморский край, Владивосток, Российская Федерация; ORCID 0009-0000-8128-484X; e-mail: syao.ch@dvfu.ru

Гульков Александр Нефедович – доктор технических наук, профессор департамента нефтегазовых технологий и нефтехимии, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Приморский край, Владивосток, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-5207-7921; e-mail: gulkov.an@dvfu.ru

About the author

Xiao Zhenxin – Postgraduate Student, Department of Energy Systems, Far Eastern Federal University, Primorsky Krai, Vladivostok, Russian Federation; ORCID 0009-0000-8128-484X; e-mail: syao.ch@dvfu.ru

Gulkov Alexander Nefedovich – D. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Oil and Gas Technologies and Petrochemistry, Far Eastern Federal University, Primorsky Krai, Vladivostok, Russian Federation; ORCID 0000-0001-5207-7921; e-mail: gulkov.an@dvfu.ru,

© Сяо Чжэньсинь, Гульков А. Н., 2026. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/