

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ДОСТИЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ СУБАКВАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ РОССИИ

Е. А. Логвина, Т. В. Матвеева, А. В. Бочкарев, А. А. Семенова, О. В. Назарова

Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. академика И. С. Грамберга (Санкт Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 9 июня 2020 г.

Современный этап стратегического развития экономических и научных интересов России характеризуется изучением и последующим освоением углеводородных ресурсов континентального шельфа и дна Мирового океана. При этом особое внимание уделяется акваториям арктических морей, экологические и климатические изменения которых взаимосвязаны с деградацией подводной многолетней мерзлоты и связанными с ней газовыми гидратами. Для изучения последних необходимо специализированное оборудование, позволяющее отбирать неизменные пробы природных газовых гидратов. Проанализированы технические характеристики и аналитические возможности современных пробоотборников и анализаторов и оценены возможности их использования для исследования гидратосодержащих отложений в арктических морях.

Ключевые слова: газовые гидраты, арктические моря, океаническая криолитозона, геологический пробоотбор, герметизирующие пробоотборники, герметичные пробоанализаторы.

Введение

Северный Ледовитый океан занимает особое место в ряду океанов Земли, так как в пределах арктических акваторий развита субмаринная реликтовая мерзлота. Это создает предпосылки для образования гидратов природного газа не только в относительно глубоководных областях, но и в недрах мелководных шельфов (рис. 1). Ни на каких шельфах, кроме арктического, нет условий для формирования подводных скоплений газовых гидратов мерзлотного генезиса. Арктический шельф России является самым обширным, что подразумевает масштабность обсуждаемых здесь процессов и явлений.

Ввиду огромного интереса к Северному Ледовитому океану, обусловленного геополитическими и экономическими предпосылками, развитием техник и технологий, а также экологическими проблемами, изучение газовых гидратов во всем мире постепенно переходит из области фундаментальных в область прикладных исследований и становится особенно актуальным для арктических морей [1—3].

Согласно морфоструктурной принадлежности и геолого-тектоническим условиям на арктическом шельфе может образовываться несколько генетических типов скоплений гидратов газа. Во-первых, криогенные, образующиеся при охлаждении недр в ходе формирования многолетней мерзлоты. Такие скопления гидратов могут формироваться за счет трансформации уже существующих залежей газа, часть которого переходит в форму гидратов [4]. Во-вторых, реликтовые, сформированные давно и сохранившиеся в холодном климате за счет эффекта самоконсервации [5]. Третий генетический тип — фильтрогенные гидраты, образующиеся в результате восходящей миграции газа или газонасыщенных вод. Для их образования требуются другие условия, в первую очередь давление столба воды, т. е. определенная глубина моря [6].

Таким образом, существует ряд условий, различных для формирования того или иного генетического типа скоплений. В зоне арктического шельфа благодаря ее морфоструктурным и термобарическим условиям — отрицательным температурам дна и небольшим глубинам вод — имеются условия,

© Логвина Е. А., Матвеева Т. В., Бочкарев А. В., Семенова А. А., Назарова О. В., 2020

наиболее благоприятные для образования криогенных скоплений. Именно наличие на арктических шельфах субмаринных многолетнемерзлых пород [8—14] наряду с низкими (отрицательными) температурами дна определяет существование термобарической зоны стабильности гидратов газа при небольших шельфовых глубинах [4; 6; 7].

Практическая значимость изучения гидратов арктических морей связана с потенциальными антропогенными и природными опасностями, которые могут возникнуть как в связи с климатическими изменениями, так и в ходе эксплуатации добывающих скважин, проходящих горизонты гидратонасыщенных отложений. Остается открытым вопрос и о ресурсах газа в скоплениях субмаринных гидратов Арктики. Для выяснения значения гидратов как полезного ископаемого необходимы достоверные сведения о залегании, концентрации и ресурсах газа в гидратных скоплениях. Без этого не могут быть решены вопросы освоения Арктической зоны Российской Федерации. Для их изучения необходима организация специализированных морских экспедиционных работ, включающих геофизические, геологические и геотермические методы исследования, с целью документального обоснования теоретических расчетов, а также разработка методик и специализированного оборудования для извлечения из недр запасов газа, находящихся в гидратной форме.

Изучение природных гидратов сопряжено с определенными трудностями. Газовые гидраты метастабильны. При неравновесных условиях и при изменении температурных и барических условий они подвергаются немедленному разложению на газ и воду, а физические и механические свойства вмещающих их отложений меняются. Поэтому очень важно сохранить гидраты в стабильном состоянии при геологическом пробоотборе. До-

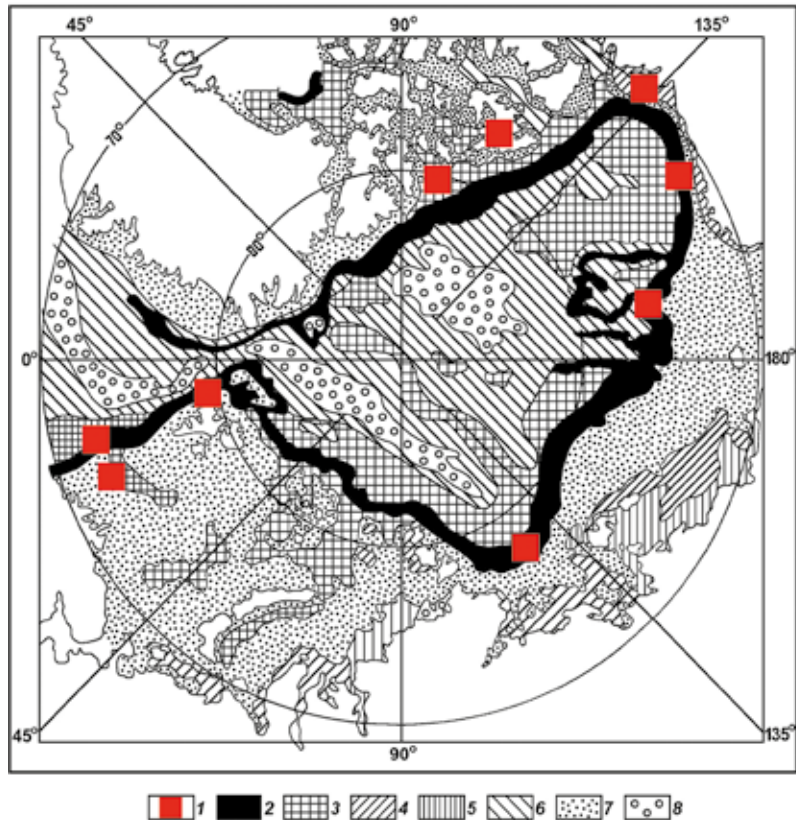


Рис. 1. Карта условий газогидратности арктических морей: 1 — районы наблюдений гидратов или их признаков; 2–6 — области, где возможны скопления газовых гидратов: 2 — фильтрогенного и седиментогенного типов на континентальных склонах, 3 — фильтрогенного типа, 4 — фильтрогенного и криогенного типов, 5 — фильтрогенного типа преимущественно из биохимического газа на шельфе, 6 — фильтрогенного типа преимущественно из биохимического газа в глубоководье; 7, 8 — области, в которых гидраты углеводородных газов не могут существовать в связи с отсутствием: 7 — необходимых термобарических условий, 8 — достаточного количества газа. Из [7] с дополнениями

Fig. 1. Map of the conditions of gas hydrate content of the Arctic seas: 1 — areas, where gas hydrates or their signs are documented; 2–6 — areas, where accumulations of gas hydrates are possible: 2 — the ones of filterogenic and sedimentogenic types on the continental slopes, 3 — of filterogenic type, 4 — of filterogenic and cryogenic types, 5 — of filterogenic type, mainly from biochemical gas on the shelf, 6 — of filterogenic type mainly from biochemical gas in deep water; 7, 8 — areas where hydrocarbon gas hydrates cannot exist due to the absence of: 7 — the necessary thermobaric conditions, 8 — a sufficient amount of gas. From [7] with additions

стичь этого возможно при сохранении и поддержании термобарических условий стабильности гидратов соответствующими их значениям *in situ* (лат. на месте естественного залегания). С начала 1980-х годов решением этого вопроса занимаются ведущие международные инженерно-технические группы. Разработаны, произведены и активно применяются различные виды специализированных пробоотборников и аналитических комплексов, способных сохранять гидратосодержащие керны в неизменном состоянии на всех этапах исследований.

В связи с растущим интересом к природным газовым гидратам как к потенциально возобновляемому источнику углеводородов и переходом от фундаментальных исследований к их экспериментальной разработке представляется, что передовые технологические разработки в области отбора и изучения этого перспективного вида природного газа будут интересны самому широкому кругу специалистов.

В нашем обзоре систематизированы и обобщены технические и аналитические возможности различных видов герметичных пробоотборников и пробоанализаторов, отмечены наиболее значимые результаты исследований, проводившихся в рамках национальных гидратных программ. По результатам проведенного анализа предложены их комбинации, оптимальные для проведения специализированных исследований гидратосодержащих отложений в арктических морях.

Обзор средств отбора и анализа герметичных гидратоносных кернов

Первый герметизирующий пробоотборник (ГПО) (англ. PCB — Pressure Core Barrel — пробоотборник под давлением) прошел успешные испытания в 1982 г. в 76-м рейсе глубоководного бурения программы DSDP (Deep Sea Drilling Project — проект глубоководного бурения). Гидратосодержащие керны извлекались в буровом снаряде, оснащенный независимой герметизирующей камерой. Герметизация проводилась автоматически при закрытии двух шаровых клапанов. При общей длине снаряда более 10 м максимальный выход герметизированных отложений составлял 5,8 м. Верхние 1,8 м отложений отбирались негерметизированными. Наибольшая глубина моря для работы PCB составляла 6,1 км. Вследствие ограничения максимального давления герметизирующей камеры (34,4 МПа) избыточное давление автоматически сбрасывалось в ходе подъема керна на борт судна [15].

В 1990 г. на Уренгойской площади в скважине P-720 успешно прошел испытания герметичный керноприемник КГТ-190/40. Перед бурением гидратосодержащего интервала (395—399 м) керноприемник заполнялся охлажденным до -35°C керосином, что предохраняло пластовые гидраты от разложения при подъеме керноприемника в среде теплого ($5\text{—}10^{\circ}\text{C}$) хлоркальциевого бурового раствора [16].

В те же годы в СССР был запатентован пробоотборник, позволяющий отбирать газонасыщенные и гидратосодержащие отложения с сохранением структуры осадка без сохранения давления [17], но он так и остался прототипом. На следующие десять лет разработка и производство ГПО в нашей стране были приостановлены.

К вопросу герметизации кернов страны бывшего СССР вернулись только в начале 2000-х годов. Один из запатентованных приборов был предназначен для бурения скважин с отбором герметизированного керна в районах распространения многолетнемерзлых пород на суше [18].

В. К. Чистяков с коллегами подошли к вопросу сохранения гидратов с другой стороны, предложив использовать в качестве герметизирующего параметра температуру, позволяющую достичь эффекта самоконсервации. Если гидратосодержащие породы имеют естественную отрицательную температуру, то способ основывается на использовании эффекта самоконсервации гидратов, если положи-

тельную — применяют эффект их принудительной консервации. Перед извлечением из скважины керн принудительно должен охлаждаться в керноприемнике до отрицательной температуры в диапазоне $-10\text{...}-2^{\circ}\text{C}$, а при использовании эффекта принудительной консервации — в диапазоне $-25^{\circ}\text{C...}-15^{\circ}\text{C}$. В 2009 г. был запатентован, а в 2011 г. усовершенствован снаряд для бурения, позволяющий консервировать газогидратосодержащий керн [19; 20].

На этапе разработки ГПО еще в конце прошлого века после отбора гидратоносных отложений в герметичные пробоотборники обычно производилась разгерметизация проб с учетом количества выделяемого газа. Метод получил название «изометрическая дегазация». Его суть состояла в том, что сразу после извлечения из пробоотборника проба гидратосодержащего осадка известного объема помещалась в герметичный термостатированный контейнер, выполненный из нержавеющей стали и оснащенный датчиком давления и газовыпускным клапаном. Порционный отбор газа из герметичного пробоотборника и одновременное наблюдение за изменением в нем давления были названы изометрическим разгазированием. Постоянство давления или его восстановление после уменьшения свидетельствовало о присутствии гидратов в отложениях. Эффективность метода зависела от проницаемости испытываемой пробы [4]. Полученные данные позволяли на основе балансовых расчетов оценить фазовый состав веществ, насыщающих поровое пространство в условиях естественно залегания. Контролируемая разгерметизация проб использовалась для определения присутствия гидратов в отложениях. Данный способ и сейчас реализуется во всех типах ГПО.

Появление государственных (национальных) программ по изучению природных газовых гидратов во многих странах, прежде всего в США, Канаде, Японии, Китае и Индии, привело к разработкам новых и усовершенствованию существующих конструкций ГПО. Основные этапы технологической эволюции приборных комплексов для изучения субаквальных газовых гидратов представлены на рис. 2, из которого видно, что развитие научно-технологического прогресса в области изучения газовых гидратов в XXI в. обеспечивается не только разработкой, усовершенствованием и автоматизацией герметичных пробоотборников, но и стремительной эволюцией инструментов исследования гидратоносных кернов при низких (отрицательных) температурах с сохранением постоянного давления как в условиях полевых работ, так и в стационарных лабораториях.

Полуавтоматические системы, оснащенные подключаемыми модулями, позволяют минимизировать время обработки проб, повысить точность исследований и сохранить целостность гидратоносных отложений. Они получили общее название герметичных пробоанализаторов (ГПА). Производством ГПА занимаются в частности в рамках программы Европейского союза морских наук и технологий (European Union's Marine Science and Technology

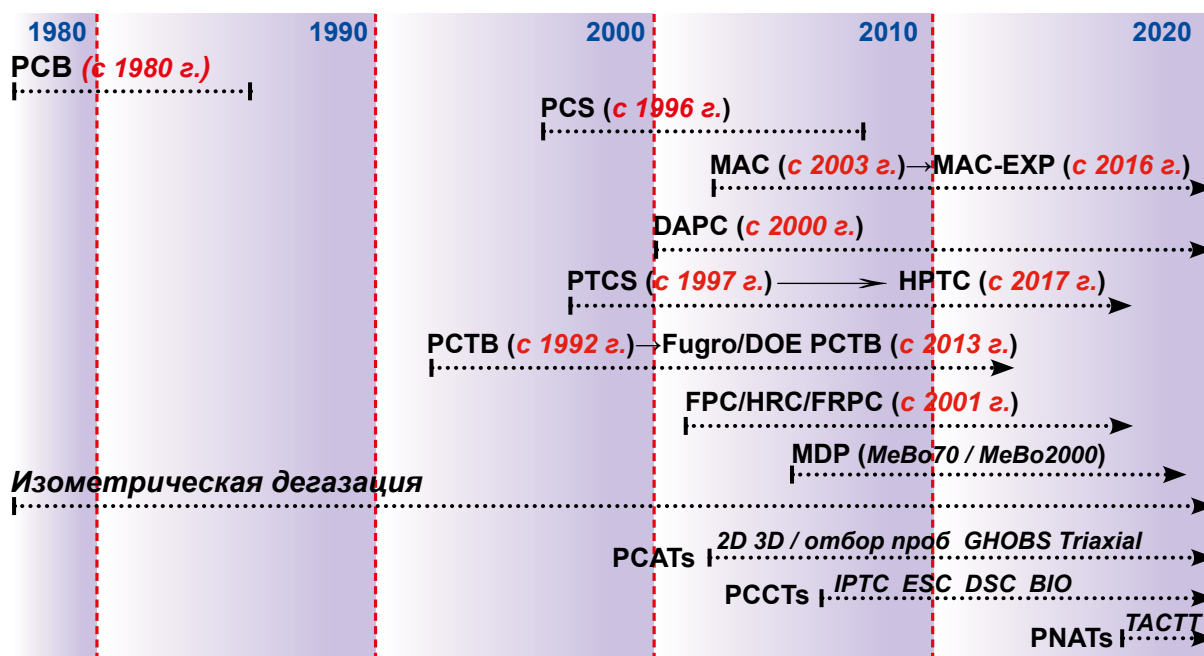


Рис. 2. Этапы модернизации технических средств и методов изучения морских гидратоносных отложений: PCB – Pressure Core Barrel [15], PCS – Pressure Core Sampler [21], MAC – Multiple Autoclave Corer [22], MAC-EXP – Multiple Autoclave Corer Experiment [23], DAPC – Dynamic Autoclave Piston Corer [22], PTCS – Pressure Temperature Corer System [24], HPTC – High Pressure Temperature Corer [25], PCTB – Pressure Core Tool with Ball valve [21], Fugro/DOE PCTB – Pressure Corer Tool with Ball valve coring system [26], FPC – Fugro Pressure Corer [27], HRC – HYACE Rotary Corer [27], FRPC – Fugro Rotary Pressure Corer [27], MDP – MeBo-Druckkern-Probennehmer [28], PCATs – Pressure Core Analysis and Transfer System [29], PCCTs – Pressure Core Characterization Tools [30], PNATs – Pressure-core Nondestructive Analysis Tools [31]

Fig. 2. Stages of modernization of technical means and methods for studying marine hydrate-bearing deposits: PCB – Pressure Core Barrel [15], PCS – Pressure Core Sampler [21], MAC – Multiple Autoclave Corer [22], MAC-EXP – Multiple Autoclave Corer Experiment [23], DAPC – Dynamic Autoclave Piston Corer [22], PTCS – Pressure Temperature Corer System [24], HPTC – High Pressure Temperature Corer [25], PCTB – Pressure Core Tool with Ball valve [21], Fugro / DOE PCTB – Pressure Corer Tool with Ball valve coring system [26], FPC – Fugro Pressure Corer [27], HRC – HYACE Rotary Corer [27], FRPC – Fugro Rotary Pressure Corer [27], MDP – MeBo-Druckkern-Probennehmer [28], PCATs – Pressure Core Analysis and Transfer System [29], PCCTs – Pressure Core Characterization Tools [30], PNATs – Pressure-core Nondestructive Analysis Tools [31]

Program), Международной программы исследования океана (International Ocean Discovery Program — IODP) и др.

Герметизирующие пробоотборники. К началу 2020 г. насчитывалось около 20 различных типов ГПО. Их отличительная особенность — сохранение давления, соответствующего его значениям *in situ*, после извлечения пробоотборника из грунта. Некоторые разновидности ГПО оснащены сосудом Дьюара с жидким азотом, наличие которого позволяет сохранить отрицательную температуру отбираемых отложений путем быстрой криозаморозки пробы при ее перемещении в герметизирующую камеру. Эффект самоконсервации газовых гидратов достигается при понижении температуры от -2°C до -10°C . Более низкие температуры, как показали экспериментальные исследования, изменяют микростроение гидратосодержащего ядра и сильно снижают его качественные показатели [32]. По этой причине криозаморозка используется все реже.

При изучении гидратоносных отложений пробоотборники могут быть также оснащены дополнительными встраиваемыми измерителями температуры, давления, электро- и теплопроводности и др., а так-

же различными датчиками (как контактными, так и бесконтактными). Возможности их применения ограничиваются не только размерами пробоотборника, но и частотой поломки датчиков при внедрении снарядов в отложения, так как они крепятся на их внешней поверхности. Поэтому их используют довольно редко. Например, для проведения геотермических исследований применяют специально разработанные зонды, а для определения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн, прочностных свойств, электросопротивления и температуры отложений используют датчики контактного типа [33], для измерения гамма- и рентгеновского излучений и скоростей продольных волн и др. — бесконтактного [26; 22]. Для ГПО применяются гравитационные, гравитационные поршневые, ротационные колонковые, а также вдавливаемые конструкции. В основе запирающего механизма используются шаровые или обратные клапаны.

В зависимости от комплектации и модификации ГПО минимальная длина колонки нелигитифицированных отложений составляет 0,6 м (ГПО MAC), а максимальный выход ядра ограничивается возможностями буровой установки и количеством сменных



Рис. 3. Процедура перемещения герметизированных проб из пробоотборника в аналитические модули ГПА
 Fig. 3. The procedure for moving sealed samples from the sampler to the analytical modules of sealed sample analyzers (SSA)

снарядов, оснащенных герметизирующими камерами. Диаметр отбираемых проб определяется размером затворного клапана (шарового или обратного) и изменяется от 0,43 (ГПО PCS) до 10 см (ГПО MAC). Рабочее давление в герметизирующей камере варьируется в пределах от 14 МПа (ГПО MAC) до 69 МПа (ГПО PCS). Избыточное давление сбрасывается через специальный клапан до подъема снаряда на палубу.

Герметичные пробоанализаторы. Спецификация ГПА представлена в табл. 1. Конструкционной особенностью ГПА является сохранение эквивалентного давления при срабатывании клапанов (шаровых и/или игольчатых) при обработке керна и наличие отдельных модулей, стыкующихся между собой. Сменные модули позволяют провести измерения физических, химических и механических свойств гидратов и вмещающих их отложений.

Отбор ненарушенных проб на борт судна осуществляется посредством ГПО. Затем производится стыковка герметичного пробоотборника с пробоанализатором. При этом для балансовых расчетов, определения величины гидратонасыщенности и условий гидратообразования очень важно сохранить целостность герметично отобранного газогидратоносного керна (рис. 3). На этапе I охлажденный в морозильной камере ($-5 \pm 2^\circ\text{C}$) герметизирующий отсек ГПО соединяется с транзитной камерой ГПА. Давление в камере и пробоотборнике приводится в соответствие с его величиной в герметизирующем снаряде. Далее, на этапе II, керн перемещается в герметичную транзитную камеру и герметизируется посредством шарового клапана. Герметичный отсек отсоединяется; давление в нем сбрасывается. На завершающем III этапе к герметичной транзитной камере присоединяется герметичная аналитическая камера (модуль), оснащенная режущим инструментом. Давление в обеих камерах выравнивается. Производится нарезка керна. На всех этапах перемещения керна из модуля в модуль и отбора проб давление в системе сохраняется соответствующим *in situ*.

По сравнению с газо- и гидратосодержащими отложениями газонасыщенные отложения и собственно гидраты обладают рядом особых признаков. В частности, они характеризуются специфическими акустическими, упругими, электрическими свойствами и теплофизическими параметрами. Изменения, вызванные наличием гидратов, фиксируются проявлениями специфических гидратообусловленных аномалий.

Мультисенсорные модули, входящие в комплект всех разновидностей ГПА, позволяют изучать акустические, электрические и петрофизические характеристики гидратоносных отложений (см. табл. 1). Так, плотность отложений измеряется гамма-гамма плотностным методом, пористость и проницаемость — через удельное электрическое сопротивление, скорости продольных и поперечных волн и акустический импеданс. Рентгенографические исследования позволяют выявить неоднородности отложений и учесть влияние анизотропии осадков на изменение их акустических свойств. Структурные особенности отложений оцениваются по результатам съемки керна в инфракрасной камере и датчиками спектрометрического гамма-излучения. Важно отметить, что при всех перечисленных процедурах сохраняется целостность гидратов и вмещающих их отложений.

В последние годы за рубежом проявилась четко выраженная ресурсная направленность изучения гидратоносных отложений. Поэтому основной целью комплексных исследований с помощью ГПА является определение величины гидратонасыщенности отложений S_h . Наиболее часто применяемыми методами расчета S_h являются так называемые акустический (по модели эффективной трехфазной среды или модели Био [35]) и электрический (по формуле Дахнова — Арчи [36; 37]).

Набор аналитических исследований зависит как от поставленных задач, так и от используемой системы ГПА. До окончания полевых работ пробы хранятся в морозильных камерах на борту судна, а после — в стационарных лабораториях. Все типы ГПА

Таблица 1. Спецификация и назначение герметичных пробоанализаторов

Целевое назначение модуля	ГПА, основные параметры			
	PCATS [29], T от 4°C, P до 35 МПа, длина керна до 3,5 м	PCCTs [30], T от 4°C, P до 35 МПа, длина керна до 1,2 м	PNATs [31], T от 4°C, P до 35 МПа, длина керна до 1,2 м	Независимые модули [34]
Перемещение	± 0,1 мм	Менее 0,1 см (манипулятор MAN)	± 0,1 см	—
Разделение	Режущий инструмент — пластинчатый лезвийный, размер пробы 5 см — 3,5 м	Режущий инструмент — дисковый линейный и круговой (модуль CUT)	Режущий инструмент — пластинчатый лезвийный, размер пробы до 1 см	—
Исследование внутреннего строения	2D — компьютерная томография (КТ), 3D — рентгено-КТ (РКТ, ± 0,1°)	2D — КТ	2D — КТ	—
Мультисенсорное изучение керна	MSCL (Multi-Sensor Core Logging) — измерение V_p и V_s , плотности, пористости, солености поровых вод; акустического импеданса; спектрометрический γ -каротаж, рентгенофлуоресцентная спектрометрия; съемка ИК-камерой с линейной разверткой высокого разрешения	IPTC (Instrument Pressure Testing Chamber) — камера с двумя комплектами четырех диаметрально противоположных пар портов. Первая высверливает отверстия, вторая вводит измерительные зонды. Измерение V_p и V_s , прочностных свойств, электропроводности, T ; отбор поровых вод	Измерение V_s , порнищаемости	MSCL (Multi-sensor Standard Core Logging) — геохимические параметры, физические свойства
Инженерные свойства грунтов	PCATS Triaxial — испытания на трехосное сжатие грунта	DSC (Direct Shear Chamber) — определение пиковых и остаточных значений прочности на сдвиг (максимальное смещение 0,15 см)	TACTT (англ. Triaxial Testing System) — испытания на трехосное сжатие грунтов (P до 10 МПа)	—
Симулятор параметров <i>in situ</i>	GHOBS (Gas Hydrate Ocean Bottom Simulator) — поддержание P - T условий (P до 25 МПа) с измерением V_p и V_s , вертикальной деформации и электрического сопротивления	ESC (Effective Stress Chamber) — поддерживает стабильные P - T условия и восстанавливает эффективное давление до параметров <i>in situ</i>	—	—
Биологические исследования	—	BIO (Sub-sampling Tool for Bio-Studies) — оценивает биологическую активность в биореакторе с сохранением P - T условий <i>in situ</i>	—	—
Камера изотермической дегазации	—	CDC (Controlled Depressurization Chamber)	—	ADS (Autoclave Degassing System)

Примечание. P — давление, T — температура, V_p — скорость распространения продольных волн, V_s — скорость распространения поперечных волн.

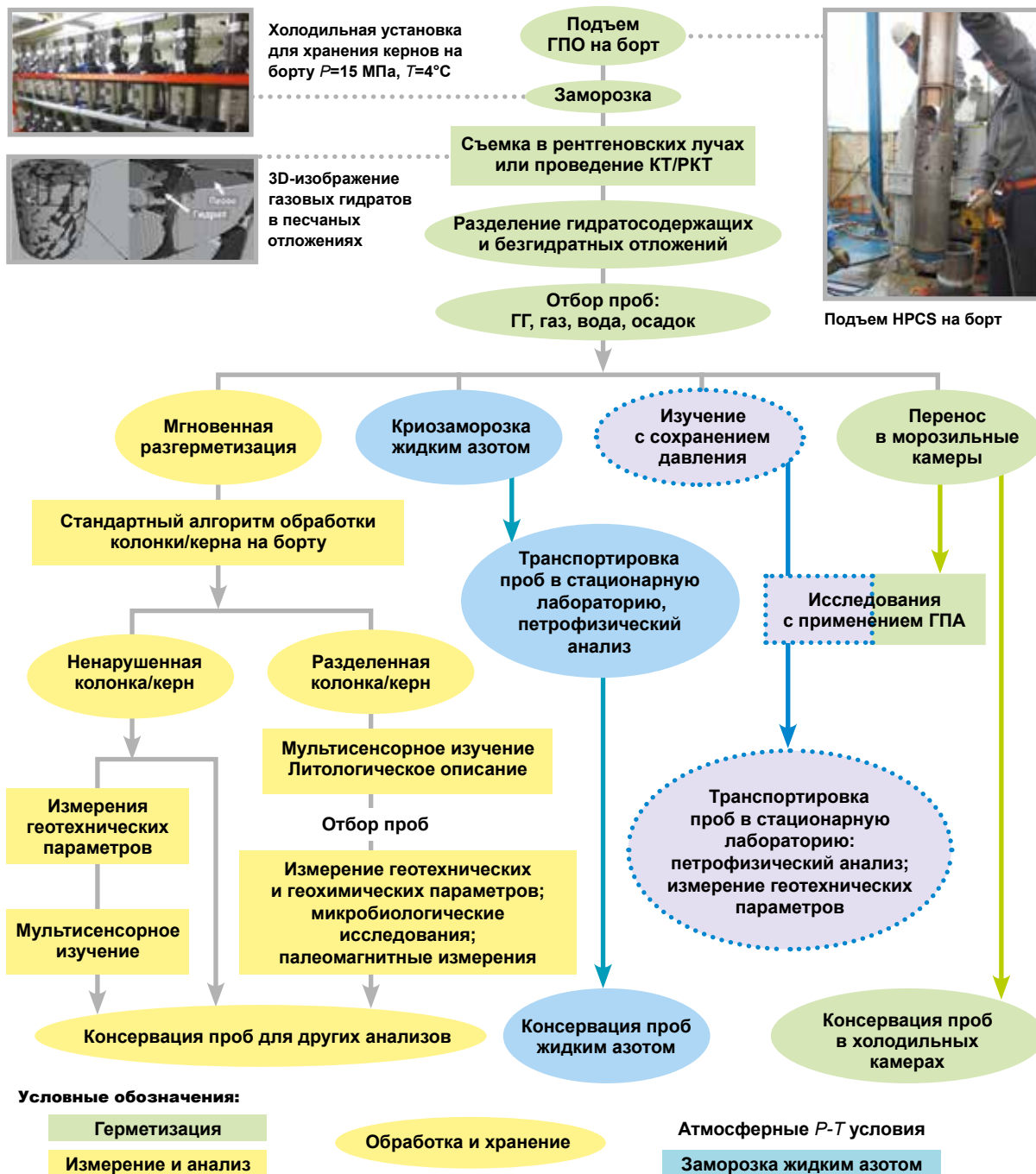


Рис. 4. Последовательность пробоподготовки герметично отобранных проб. По [38–41] с изменениями. Фото из [42–44]
 Fig. 4. The sequence of sample preparation of sealed samples. According to [38–41] with changes. Photo from [42–44]

позволяют в полуавтоматическом режиме переносить, разделять, отбирать и анализировать пробы при постоянных температуре и давлении, не нарушая условия стабильности гидратных проб.

Применение модулей ГПА. Отбор гидратосодержащих отложений посредством ГПО и последующая подготовка их к анализу производится в определенной последовательности, показанной на рис. 4. Важнейшими этапами пробоотбора являются:

(1) снижение избыточного давления, превышающего предусмотренное конструкцией, посредством

срабатывания клапана после подъема пробоотборника на борт;

(2) идентификация гидратов в герметизированном керне посредством модулей с рентгеновским излучением, КТ или РКТ (2D/3D);

(3) разделение гидратосодержащих и безгидратных фрагментов керна;

(4) изучение гидратосодержащих кернов в мультисенсорных модулях, отбор и перемещение проб для дальнейших специализированных исследований в соответствующие модули;

(5) перемещение в хранилища и заморозка.

Результаты многолетних исследований, проводившихся в рамках национальных программ США, Японии, Южной Кореи, КНР, Индии, показали, что наиболее востребованными комбинациями ГПО + ГПА, применяемыми на акваториях, являются FPC и/или FRPC + PCATS или PCSTs. При этом используются и стандартные методы пробоотбора. Таким образом, опыт исследований субаквальных газовых гидратов ведущих «гидратных» держав показал высокую эффективность применения ГПО и ГПА и позволил получить уникальные данные, которые были недоступны исследователям еще 10—15 лет назад.

Оценивая возможность применения существующих ГПО и ГПА при исследованиях в арктических морях, также следует рассматривать их комбинации. Анализ технических характеристик существующих пробоотборников, их совместимость с анализаторами и аналитические возможности последних с учетом климатической специфики арктического региона позволяют выделить оптимальную на сегодня комбинацию ГПО + ГПА: DAPC / FRPC + PCATS / PCSTs. Эта комбинация сочетает возможности опробования гравитационной трубкой (DAPC) и бурением (FRPC) при максимальных аналитических возможностях. Объем аналитических исследований будет определяться комплектацией модулей ГПА, что позволит воссоздать условия гидратонакопления и изучить гидратосодержащие отложения в мерзлоте, которые затруднительно идентифицировать геофизическими методами из-за сходства физических свойств гидрата и обычного льда.

Заключение

Исследование гидратосодержащих отложений непосредственно внутри герметизирующего снаряда стало возможно благодаря созданию революционных технологий изучения газовых гидратов, являющихся, пожалуй, одними из важнейших достижений начала XXI в. Эволюция систем герметичного отбора проб отражает веяние времени. Современные разработки не только сохранили возможности первых ГПО, разработанных еще в начале 1990-х годов, но и преумножили их. Все основные буровые и аналитические операции осуществляются в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Спектр аналитических возможностей, в том числе и на борту судна, значительно расширился. При этом изученные отложения сохраняются максимально неизменными, что позволяет проводить дополнительные исследования обычным способом.

Относительно слабая изученность Северного Ледовитого океана ввиду его положения (отрицательные температуры, сезонный и постоянный ледовый покров, отсутствие развитой инфраструктуры и пр.) вносит определенные трудности в изучение гидратов. Эффективность работы с газогидратоносными кернами в значительной степени зависит как от последовательности операций, так и от оптимального набора инструментов-анализаторов. Для про-

ведения исследований скоплений газовых гидратов в арктических морях оптимальной на сегодня комбинацией ГПО + ГПА является DAPC / FRPC + PCATS / PCSTs в сочетании со стандартным геологическим пробоотбором. Тестирование и выбраковка отдельных технических решений позволит успешно применять ГПО в условиях арктического шельфа.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-17-00226 «Реконструкция механизмов формирования проблематичных аутигенных карбонатов в обстановках диагенеза и катагенеза, связанных с генерацией/окислением углеводов».

Литература/References

1. Vonk J. E., Sánchez-García L., Van Dongen B. et al. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia. *Nature*, 2012, no. 489, pp. 137—140. DOI: 10.1038/nature11392.
2. Overduin P., Schneider von Deimling T., Miesner F. et al. Submarine permafrost map in the Arctic modelled using 1d transient heat flux (SuPerMAP). *J Geophys Res Oceans*, 2019, vol. 124, no. 6, pp. 3490—3507. DOI: 10.1029/2018JC014675.
3. Angelopoulos M., Overduin P. P., Miesner F., Grigoriev M. N., Vasiliev A. A. Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, vol. 31, no. 3, pp. 1—12. DOI: 10.1002/ppp.2061.
4. Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А. Субмаринные газовые гидраты. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. — 194 с.
5. Ginsburg G. D., Soloviev V. A. Submarine gas hydrates. St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 1998, 216 p.
6. Истомин В. А., Якушев В. С., Махонина Н. А. и др. Эффект самоконсервации газовых гидратов // Газовая пром-сть. — 2006. — С. 36—47.
7. Istomin V. A., Yakushev V. S., Makhonina N. A., Kvon V. G., Chuvilin E. M. Effekt samokonservacii gazovykh gidratov. [The effect of self-preservation of gas hydrates]. *Gazovaya prom-st'*, 2006, pp. 36—47. (In Russian).
8. Матвеева Т. В. Образование гидратов углеводородных газов в субаквальных обстановках // Мировой океан. — Т. 3: Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты в океане / Отв. ред. Л. И. Лобковский, Г. А. Черкашёв. — М.: Науч. мир, 2018. — С. 586—697.
9. Matveeva T. V. Obrazovanie gidratov uglevodorodnykh gazov v subakval'nykh obstanovkakh. [Formation of hydrates of hydrocarbon gases in subaqueous environments]. *Mirovoi okean. Vol. 3. Tverdye poleznye iskopaemye i gazovye gidraty v okeane. Otv. red. L. I. Lobkovskii, G. A. Cherkashev. Moscow, Nauch. mir, 2018, pp. 586—697. (In Russian).*
10. Соловьев В. А., Гинсбург Г. Д., Телепнев Е. В., Михалюк Ю. Н. Криогеотермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого океана. — Л.: ПГО «Севморгеология», 1987. — 150 с.
11. Solov'ev V. A., Ginsburg G. D., Telepnev E. V., Mikhalyuk Yu. N. Kriogeotermiya i gidraty prirodno go gaza v ne-

- drakh Severnogo Ledovitogo okeana. [Cryogeothermy and natural gas hydrates in the bowels of the Arctic Ocean]. Leningrad, PGO "Sevmorgeologiya", 1987, 150 p. (In Russian).
8. Portnov A., Mienert J., Serov P. Modeling the evolution of climate-sensitive Arctic subsea permafrost in regions of extensive gas expulsion at the West Yamal shelf. *J. of geophysical research: Biogeosciences*, 2014, 119, pp. 2082—2094. DOI: 10.1002/2014JG002685.
9. Rekant P., Bauch H. A., Schwenk T. et al. Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea. *Arktos*, 2015, vol. 1, no. 11. DOI: 10.1007/s41063-015-0011-y.
10. Overduin P. P., Haberland C., Ryberg T. et al. Submarine permafrost depth from ambient seismic noise. *Geophys Res Lett.*, 2015, vol. 42, no. 18, pp. 7581—7588. DOI: 10.1002/2015GL065409.
11. Overduin P. P., Wetterich S., Günther F. et al. Coastal dynamics and submarine permafrost in shallow water of the central Laptev Sea, East Siberia. *Cryosphere*, 2016, vol. 10, no. 4, pp. 1449—1462. DOI: 10.5194/tc-10-1449-2016.
12. Koshurnikov A. V., Tumskoy V. E., Shakhova N. E. et al. The first ever application of electromagnetic sounding for mapping the submarine permafrost table on the Laptev Sea Shelf. *Doklady Earth Sci.*, 2016, vol. 469, pp. 860—863.
13. You Y., Yu Q., Pan X., Wang X., Guo L. Geophysical imaging of permafrost and talik configuration beneath a thermokarst lake. *Permafrost Periglacial Process*, 2017, vol. 28, no. 2, pp. 470—476. DOI: 10.1002/ppp.1938.
14. Sherman D., Kannberg P., Constable S. Surface towed electromagnetic system for mapping of subsea arctic permafrost. *Earth Planet Sci Lett.*, 2017, vol. 460, pp. 97—104. DOI: 10.1016/j.epsl.2016.12.002.
15. Kvenvolden K. A., Barnard L. A., Cameron D. H. Pressure core barrel: Application to the study of gas hydrates, deep-sea drilling project site 533, leg 76. *Initial Reports DSDP*, 1982, vol. 76, pp. 367—375.
16. Якушев В. С., Басниев К. С., Адзынова Ф. А. и др. Признаки наличия на севере Западной Сибири регионально газоносного горизонта нового типа // Нефтяное хоз-во. 2014. — № 11. — С. 100—101. Yakushev V. S., Basniev K. S., Adzynova F. A., Gryaznova I. V., Voronova V. V. *Priznaki nalichiya na severe Zapadnoi Sibiri regional'no gazonosnogo gorizonta novogo tipa*. [Attributes of a regional new-type gas-bearing horizon presence at north of Western Siberia]. *Neftyanoye khoz-vo*, 2014, no. 11, pp. 100—101. (In Russian).
17. Донный пробоотборник: а. с. СССР / С. А. Никищенко, В. Г. Моисеенко, М. А. Гоц, И. В. Бляшин (СССР). — № SU 568861 A1. — 1989. — 3 с. Donnyi probotoobornik. [Bottom sampler]. USSR Author's certificate. SSSR. S. A. Nikishchenko, V. G. Moiseenko, M. A. Gots, I. V. Blyashin (USSR). No. SU 568861 A1, 1989, 3 p. (In Russian).
18. Карасевич А. М., Сторонский Н. М., Хрюкин В. Т. и др. Керногазонаборник. — Патент RU 2209922 C1. — 2003. — 12 с. Karasevich A. M., Storonskij N. M., Khrjukin V. T., Kejbal A. V., Barantsevich S. V. *Kernogazonabornik*. [Core and gas sampler]. Invention, RU 2209922 C1, 2003, 12 p. (In Russian).
19. Чистяков В. К., Маляренко Е. В., Вишневецкий Н. А. Способ получения керна из гидратосодержащих пород и устройство для его осуществления. — Патент RU 2369719 C1. — 2009. — 9 с. Chistjakov V. K., Maljarenko E. V., Vishnevskij N. A. *Sposob polucheniya kerna iz gidratosoderzhashchih porod i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya*. [Method of recovery of core out of hydrate containing rock and facility for implementation of this method]. Invention, RU 2369719 C1, 2009, 9 p. (In Russian).
20. Чистяков В. К., Вишневецкий Н. А., Мальцев Н. А. Устройство для получения керна из гидратосодержащих пород. — Патент RU 2425952 C1. — 2011. — 6 с. Chistjakov V. K., Vishnevskij N. A., Mal'tsev N. A. *Ustroistvo dlya polucheniya kerna iz gidratosoderzhashchikh porod*. [Device for obtaining core from hydrate-containing rocks]. Invention, RU 2425952 C1, 2011, 6 p. (In Russian).
21. Pettigrew T. L. The design and operation of a wireline pressure core sampler (PCS). *ODP Technical Note* 17, 1992, 2 p.
22. Abegg F., Hohnberg H. J., Pape T., Bohrmann G., Freitag J. Development and application of pressure-core-sampling systems for the investigation of gas- and gas-hydrate bearing sediments. *Deep Sea Res., Pt. I. Oceanogr Res Pap*, 2008, vol. 55, no. 11, pp. 1590—1599. DOI: 10.1016/j.dsr.2008.06.006.
23. Jackson K., Witte U., Chalmers S., Anders E., Parkes J. A system for retrieval and incubation of benthic sediment cores at in situ ambient pressure and under controlled or manipulated environmental conditions. *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, vol. 34, no. 5, pp. 983—1000.
24. Rack F. "Preliminary Evaluation of Existing Pressure/Temperature Coring Systems". From in-situ sampling and characterization of naturally occurring marine hydrate using the D/V JOIDES resolution. *Joint Oceanographic Institutions*. Oct. 2001.
25. Schultheiss P., Holland M., Roberts J., Bigalke N., Mimitz M. Advances in wireline pressure coring, core handling, and core analysis related to gas hydrate drilling investigations. 9th International Conference on Gas Hydrates. Denver, Colorado USA, 2017, 14.
26. Schultheiss P. J., Francis T. J. G., Holland M., Roberts J. A., Amann H., Thjunjoto Parkes R. J., Martin D., Rothfuss M., Tyunder F., Jacksonl P. D. Pressure coring, logging and subsampling with the HYACINTH system. *New Techniques in Sediment Core Analysis*. G. Rothwell (eds.). *Geol. Soc. London. Spec. Pub.*, 2006, vol. 267, pp. 151—163. DOI: 10.1144/GSL.SP.2006.267.01.11.
27. Collett T., Bahk J., Frye M., Goldberg D., Husebo J., Koh C., Malone M., Shipp C., Torres M. Historical methane hydrates project review. Report prepared for the U.S Department of Energy — national Energy Technology Laboratory by the Consortium for Ocean Leadership. Part 1:110; Part 2:32; Part 3:42. 2013.

28. Pape T., Hohnberg H.-J., Wunsch D., Anders E., Freudenthal T., Huhn K., Bohrmann G. Design and deployment of autoclave pressure vessels for the portable deep-sea drill rig MeBo (Meeresboden-Bohrgerät). *Science Drilling*, 2017, vol. 23, pp. 29—37. DOI: 10.5194/sd-23-29-2017.
29. Geotek Ltd. (UK). Available at: <https://www.geotek.co.uk/>.
30. Santamarina J. C., Dai Sh., Jang J., Terzariol M. Pressure core characterization tools for hydrate-bearing sediment. *Scientific Drilling*, 2012, vol. 14, pp. 44—48. DOI: 10.2204/iodp.sd.14.06.2012.
31. Nagao J., Yoneda J., Konno Y., Jin Yu. Development of the Pressure-core Nondestructive Analysis Tools (PNATs) for methane hydrate sedimentary cores. *Geophysical Research Abstracts*. EGU General Assembly 2015, vol. 17, EGU2015-8345.
32. Истомин В. А., Якушев В. А. Исследование газовых гидратов в России // Газовая пром-сть. — 2001. — № 6. — С. 49—53.
- Istomin V. A., Yakushev V. A. Issledovanie gazovykh gidratov v Rossii. [Research of gas hydrates in Russia]. *Gazovaya prom-st'*, 2001, no. 6, pp. 49—53. (In Russian).
33. Yun T. S., Narsilio G. A., Santamarina J. C., Ruppel C. Instrumented pressure testing chamber for characterizing sediment cores recovered at in situ hydrostatic pressure. *Mar. Geol.*, 2006, vol. 229, no. 3-4, pp. 285—293. DOI: 10.1016/j.margeo.2006.03.012.
34. Yang S., Lei Y., Liang J., Holland M., Schultheiss P., Lu J., Wei J. Concentrated gas hydrate in the Shenhu area, South China Sea: Results from Drilling Expeditions GMGS3 & GMGS4. *Proceedings of 9th International Conference on Gas Hydrates*. Denver, 2017. Paper no. 105.
35. Lee M. W. Collett T. S. Gas Hydrate Saturations Estimated from Fractured Reservoir at Site NGHP-01-10, Krishna-Godavari Basin, India. *J Geophys Res*, 2009, vol. 114, pp. 1—13.
36. Дахнов В. Н. Интерпретация каротажных диаграмм. — М.; Л., 1941. — 496 с.
- Dakhnov V. N. Interpretaciya karotazhnykh diagramm. [Interpretation of well logs]. Moscow, Leningrad, 1941, 496 p. (In Russian).
37. Archie G. E. The Electrical Resistivity Log as Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME*, 1942, 146, pp. 54—62.
38. Suzuki K., Schultheiss P., Nakatsuka Y., Ito T., Egawa K., Holland M., Yamamoto K. Physical properties and sedimentological features of hydrate-bearing samples recovered from the first gas hydrate production test site on Daini-Atsumi Knoll around eastern Nankai Trough. *Mar Pet Geol*, 2015, vol. 66, no. 2, pp. 346—357. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.02.025.
39. Nagano Yu, Lin Weiren, Yamamoto K. In-situ stress analysis using the anelastic strain recovery (ASR) method at the first offshore gas production test site in the eastern Nankai Trough, Japan. *Mar Petr Geol*, 2015, vol. 66, no. 2, pp. 418—424. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.02.027/.
40. Yamamoto K. Overview and introduction: Pressure core sampling and analyses in the 2012-2013 MH21 offshore test of gas production from methane hydrates in the eastern Nankai Trough. *Mar Petr Geol*, 2015, vol. 66, no. 2, pp. 296—309. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.02.024/.
41. Yamamoto K., Inada N., Kubo Fujii T., Suzuki K., Konno Y. Shipboard Scientists for the Methane Hydrate Offshore Production Test. Pressure Core sampling in the eastern Nankai Trough. *Methane Hydrate Newsletter*, 2012, vol. 12, no. 2, pp. 1—9.
42. Konno Y., Jin Y., Yoneda J., Kida M., Egawa K., Ito T., Suzuki K., Nagao J. Effect of methane hydrate morphology on compressional wave velocity of sandy sediments: Analysis of pressure cores obtained in the Eastern Nankai Trough. *Mar Petr Geol*, 2015, vol. 66, pp. 425—433. DOI: 10.1016/J.MARPETGEO.2015.02.021.
43. Zhao J., Yang L., Liu Yu., Song Y. Microstructural characteristics of natural gas hydrates hosted in various sand sediments. *Physical chemistry chemical physics*. *Phys Chem Chem Phys*, 2015, vol. 17, pp. 22632—22641. DOI: 10.1039/c5cp03698d.
44. Inada N., Yamamoto K. Data Report: Hybrid Pressure Coring System tool review and summary of recovery result from gas-hydrate related coring in the Nankai Project. *Mar Petr Geol*, 2015, 6 (2), pp. 323—345. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.02.023.

Информация об авторах

Логвина Елизавета Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, отдел мониторинга недропользования геолого-разведочных работ на нефть и газ, ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (190121, Россия, Санкт-Петербург, Английский просп., д. 1), e-mail: liza_logvina@mail.ru.

Матвеева Татьяна Валерьевна, кандидат геолого-минералогических наук, ученый секретарь, заведующая сектором, отдел мониторинга недропользования геолого-разведочных работ на нефть и газ, ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (190121, Россия, Санкт-Петербург, Английский просп., д. 1), e-mail: tv_matveeva@mail.ru.

Бочкарев Алексей Викторович, заведующий сектором, отдел геологического картирования, ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (190121, Россия, Санкт-Петербург, Английский просп., д. 1), e-mail: bochkarev_alex@inbox.ru.

Семенова Анастасия Андреевна, научный сотрудник, отдел мониторинга недропользования геолого-разведочных работ на нефть и газ, ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (190121, Россия, Санкт-Петербург, Английский просп., д. 1), e-mail: vniio_semenova@mail.ru.

Назарова Ольга Викторовна, инженер 1 категории, отдел мониторинга недропользования геолого-разведочных работ на нефть и газ, ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (190121, Россия, Санкт-Петербург, Английский просп., д. 1), e-mail: nazarova-vniio@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Логвина Е. А., Матвеева Т. В., Боцкарев А. В. и др. Анализ технологических и технических достижений в области изучения субаквальных газовых гидратов и возможность их применения в арктических морях России // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 4 (40). — С. 66—76. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-66-76.

ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL AND TECHNICAL ADVANCES IN THE STUDY OF SUBAQUEOUS GAS HYDRATES AND THE POSSIBILITY OF THEIR APPLICATION IN THE ARCTIC SEAS OF RUSSIA

Logvina E. A., Matveeva T. V., Bochkarev A. V., Semenova A. A., Nazarova O. V.

FSBI "All-Russian Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean named after academician Igor Gramberg" (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on June 9, 2020

Abstract

The current stage of strategic development of Russia's economic and scientific interests is characterized by the study and subsequent development of hydrocarbon resources of the continental shelf and the bottom of the World Ocean. At the same time, special attention is paid to the waters of the Arctic seas, the ecological and climatic changes of which are interconnected with the degradation of underwater permafrost and associated gas hydrates. To study the latter, specialized equipment is needed to take unmodified samples of natural gas hydrates. The paper analyzes the technical characteristics and analytical capabilities of modern samplers and analyzers and evaluates the possibilities of their use for studying hydrate-containing sediments in the Arctic seas.

Keywords: *gas hydrates, Arctic seas, oceanic cryolithozone, geological sampling, sealed samplers (SS), sealed sample analyzers (SSA).*

The Russian Science Foundation supported this work; grant no. 19-17-00226 "Reconstruction of the mechanism of problematic authigenic carbonates formation in diagenetic and catagenetic environments associated with the generation/oxidation of hydrocarbons".

Information about the authors

Logvina Elizaveta Aleksandrovna, PhD of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Department of Monitoring of Subsoil Use and Exploration for Oil and Gas, FSBI "VNIIOkeangeologia" (1, Angliyskiy av., St. Petersburg, Russia, 1190121), e-mail: liza_logvina@mail.ru.

Matveeva Tatiana Valerievna, PhD of Geology and Mineralogy, Scientific Secretary, Sector Manager, Department of Monitoring of Subsoil Use and Exploration for Oil and Gas, FSBI "VNIIOkeangeologia" (1, Angliyskiy av., St. Petersburg, Russia, 1190121), e-mail: tv_matveeva@mail.ru.

Bochkarev Aleksey Viktorovich, Sector Manager, Department of Geological Mapping, FSBI "VNIIOkeangeologia" (1, Angliyskiy av., St. Petersburg, Russia, 1190121), e-mail: bochkarev_alex@inbox.ru.

Semenova Anastasiya Andreevna, Researcher, Department of Monitoring of Subsoil Use and Exploration for Oil and Gas, FSBI "VNIIOkeangeologia" (1, Angliyskiy av., St. Petersburg, Russia, 1190121), e-mail: vniio_semenova@mail.ru.

Nazarova Olga Viktorovna, First Category Engineer, FSBI "VNIIOkeangeologia" (1, Angliyskiy av., St. Petersburg, Russia, 1190121), e-mail: nazarova-vniio@yandex.ru.

Bibliographic description

Logvina E. A., Matveeva T. V., Bochkarev A. V., Semenova A. A., Nazarova O. V. Analysis of technological and technical advances in the study of subaqueous gas hydrates and the possibility of their application in the Arctic seas of Russia. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 4 (40), pp. 66—76. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-66-76. (In Russian).

© Logvina E. A., Matveeva T. V., Bochkarev A. V., Semenova A. A., Nazarova O. V., 2020