УДК 550.84: 549.905.

# ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА В ИНЖЕНЕРНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ НА МОРСКОМ ДНЕ

**А.И. Обжиров, А.В. Болобан, А.Л. Веникова**

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН[1]

В процессе газогеохимических исследований, выполненных с 1985 по 2015 г. в Охотском море, было обращено внимание на участие потоков газа, газогидратов, зон разломов в нарушении поверхности дна. В воде и донных осадках определялись метан, тяжелые углеводороды ($C_2$-$C_4$), углекислый газ, кислород, азот, гелий и водород. По изменению концентраций газовых компонентов и их количества отмечено, что существуют периоды сейсмотектонической активизации и стабилизации. В Дальневосточном регионе сейсмическая активизация по газогеохимическим критериям началась с 1990 г., и она продолжается в настоящее время. В период с 1990 по 2015 г. в Охотском море возникло более 500 потоков пузырей метана в связи с сейсмотектонической активизацией. Именно в районе выходов пузырей газа (преимущественно метана) и газогидратов нарушается поверхность дна, появляются ямы, бугры ниже или выше поверхности дна на 10–20 м, в осадке появляются слои и фрагменты газогидратов, карбонатные конкреции, поля бентоса и другие изменения. Кроме того, важно помнить, что потоки метана являются взрывоопасными (в смеси с воздухом около 9% метана). При инженерном проектировании эти особенности необходимо изучать и учитывать. В настоящее время все больше требуется выполнение инженерного проектирования строительства на морском дне: прокладка трубопроводов, установка буровых платформ, строительство прибрежных портов, терминалов и других сооружений. Для инженерного проектирования необходимо знать ряд геологических критериев, которые следует учитывать для выбора безопасного участка строительства на морском дне. В работе рассматриваются некоторые геологические, газогеохимические критерии – потоки пузырей метана, газогидраты, зоны разломов, землетрясения, которые требуется изучать при инженерном проектировании и строительстве на морском дне. Надежность и эффективность изучения морского дна заложена в выполнении комплекса исследований. Важными являются геофизические, газогеохимические, гидроакустические, батиметрические измерения. Обычно они выполняются на научно-исследовательских судах. Более детальные и точные характеристики дна можно получить с использованием робототехники. Совместные исследования геологическими и робототехническими методами дают возможность находить безопасные инженерные решения для проектирования строительных объектов.

## ВВЕДЕНИЕ

Лаборатория газогеохимии ТОИ ДВО РАН с 1984 года выполняет изучение распределения природных газов в воде и на морском дне в морях Мирового океана. Первоначально газогеохимические исследования проводились в Охотском море, главной целью которых было использование газогеохимических данных как индикаторов прогноза и поиска залежей углеводородов. К этому времени сейсмическими работами на шельфе Сахалина в Охотском море было обнаружено несколько десятков структур, перспективных на поиски нефти и газа. Но успех поискового бурения на нефть и газ не превышал 50%, то есть половина скважин не открывала залежей углеводородов. Тогда трест «Дальморнефтегеофизика» в г. Южно-Сахалинске предложил лаборатории газогеохимии выполнить газогеохимическую съемку, чтобы использовать дополнительный критерий для повышения эффективности поиска залежей углеводородов. Нами были сделаны тестовые измерения распределения углеводородных газов в воде и донных осадках в районе уже открытой нефтегазовой залежи на Одоптинской структуре. Аномалии метана, превышающие фоновые концентрации в 10–100 раз, были обнаружены в придонном слое воды и в донных осадках над этой структурой. Но в донных осадках трудно было от-

[1] 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. E-mail: obzhirov@poi.dvo.ru.

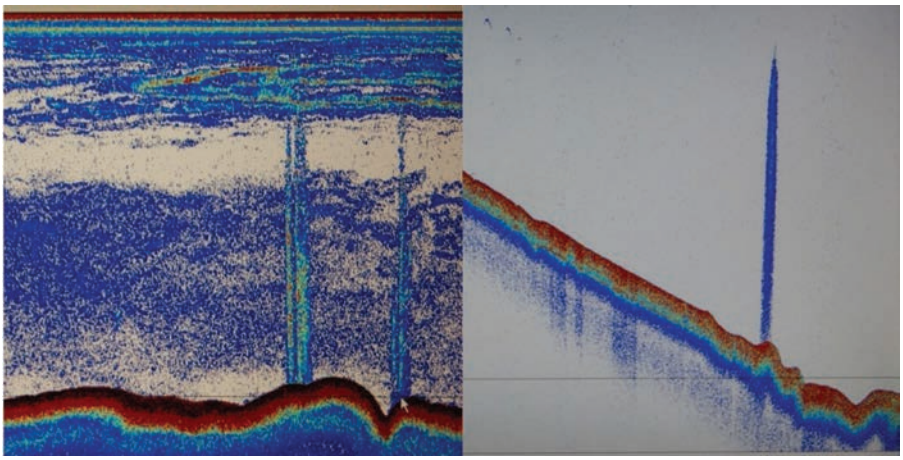

*Рис. 1.* Потоки пузырей метана из донных отложений в воду (вертикальные стволы) в Охотском море. Гидроакустическая запись сделана А.С. Саломатиным [2]

личить подток метана из нефтегазосодержащих пород структуры от метана, который образуется в результате современного процесса метанобразующих бактерий. Поэтому придонный слой воды был выбран как основной индикаторный слой для прогноза перспективности структур на поиск нефти и газа. В придонном слое воды определялись углеводородные газы (метан, этан, пропан, бутан, их гомологи, углекислый газ, гелий, водород, кислород и азот) [1]. Газ из воды извлекался на дегазационной установке и анализировался на хроматографах.

В результате совместного использования геологических, геофизических и газогеохимических исследований был увеличен успех открытия залежей углеводородов бурением – до 85 % и более. Кроме этого были обнаружены аномальные газогеохимические поля в районах, где еще не были выполнены детальные геофизические работы. В дальнейшем нефтегазопоисковые работы подтвердили перспективность этих площадей на поиски нефти и газа [1]. Важно отметить, что в процессе газогеохимических исследований в 1988 г. был обнаружен первый поток пузырей метана из донных отложений на Сахалинском склоне Охотского моря на глубине 700 м. С каждым годом открывались новые потоки метана, и к 2015 г. их количество достигло 700, причем, как правило, дно в районе выходов пузырей метана нарушено (рис. 1).

На многих площадях с потоками пузырей метана были обнаружены газогидраты. Эти открытия повысили интерес к газогеохимическим исследованиям в Охотском море и в других дальневосточных и арктических морях. В процессе исследований были обнаружены важные закономерности изменения поверхности морского дна в районе потоков газа (преимущественно метана) и газогидратов, знание которых является важным и необходимым для проектирования строительства сооружений на морском дне, в том числе буровых платформ, трубопроводов и других устройств.

## Инженерно-геологические характеристики морского дна в районе аномальных полей газа и газогидратов

После публикаций [4] открытия потоков пузырей метана из донных отложений в воду и газогидратов в верхнем слое осадков в Охотском море интерес к продолжению исследований по изучению геологических условий формирования потоков газа и газогидратов в Охотском море возрос как у российских, так и зарубежных ученых. В 1998 году был подписан договор о сотрудничестве между ТОИ ДВО РАН и институтом ГЕОМАР (Геология морей) г. Киль, Германия. На основе договора был составлен международный Российско-Германский проект КОМЕКС 1998–2004 гг. В рамках проекта выполнялись международные экспедиции в Охотском море по поиску и выяснению условий формирования потоков метана и газогидратов. Применялся комплекс исследований, который включал следующие направления – геологическое, геофизическое, гидроакустическое, газогеохимическое, гидрологическое, батиметрическое, сонарная съемка дна [2]. Благодаря этому комплексу были обнаружены закономерности, которые показали, что нарушения поверхности морского дна происходят в районе распространения газогидратов, потоков пузырей метана из донных отложений в воду и зон разломов.

В результате комплекса исследований было обнаружено следующее.

1. Поверхность дна нарушается в районе потока пузырей метана. На поверхности дна образуются ямы и бугры высотой и глубиной около 10–20 м (относительно линии поверхности дна) (рис. 2). Диаметр таких нарушений дна достигает 500–1000 м (рис. 3).

Эти неровности дна хорошо зафиксированы сонарной съемкой (рис. 3) [2] и обитаемым подводным аппаратом «Мир» в районе потока метана на склоне о-ва Парамушир в Охотском море, изученным сотрудниками Института океанологии им. П.П. Ширшова, РАН. Как на Сахалинском, так и на

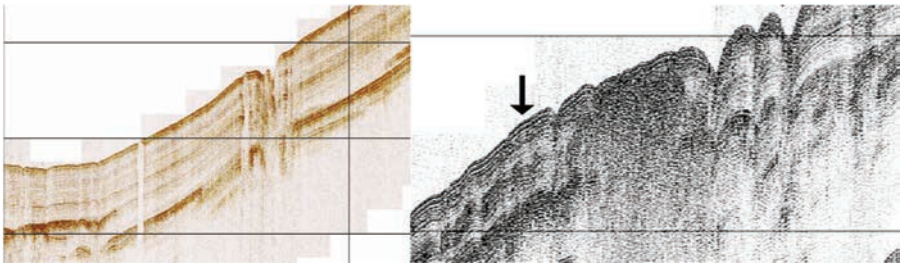

*Рис. 2.* Нарушение поверхности дна и нижележащих слоев осадков в районе потоков газа (метана) из недр к поверхности. На сейсмическом разрезе выделяются вертикальные стволы отсутствия отражений слоев, которые являются каналами миграции газа. Сейсмическая запись с использованием спаркера сделана В.Т. Прокудиным [2]

Парамуширском склоне Охотского моря, где обнаружены потоки пузырей метана и газогидраты, в верхних слоях донных осадков нарушается дно.

2. После завершения проекта КОМЕКС с институтом ГЕОМАР (г. Киль, Германия) поступило предложение от Технологического института (г. Китами, Япония) и Института полярных исследований (г. Инчхеон, Республика Корея) продолжить комплекс исследований в Охотском море по изучению закономерностей формирования потоков метана и газогидратов и разработке методов их поиска. В 2003 г. был подписан международный Российско-Японско-Корейский проект ХАОС (2003–2006) по изучению газогеохимических полей и газогидратов в Охотском море. По окончании этого проекта стороны решили продолжить исследования и подписали новый международный проект САХАЛИН (SSGH, Sakhalin Slope Gas Hydrate, 2007–2012), который был продлен до 2013–2017 гг.

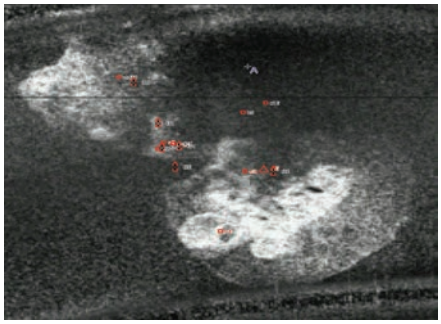

*Рис. 3.* Результат сканирования поверхности морского дна в Охотском море в районе выходов пузырей метана из донных отложений в воду. Белым цветом отражен район с нарушением поверхности дна в виде ямок и бугров с углублением и возвышением относительно поверхности дна на 10–20 м. Красные точки – станции отбора проб воды и осадков, в керне некоторых из которых обнаружены газогидраты. Диаметр нижнего круга с нарушением поверхности дна достигает 1 км [2]

Каждый год в Охотском, а с 2012 года в Охотском и Японском морях выполнялись международные экспедиции, в которых использовался следующий комплекс исследований:

- гидроакустический метод позволял искать потоки пузырей метана и обнаруживать изменения поверхности дна;
- высокочастотная сейсмическая съемка (спаркер) способствовала изучению геологических структур до глубины 100–150 м от поверхности дна в районе потоков метана и газогидратов;
- газогеохимические измерения толщи воды и донных осадков позволяли оценить источники потока пузырей метана и участие газовой составляющей в геологических, биологических, экологических и инженерно-геологических процессах;
- батиметрическая съемка обнаруживала неровности поверхности дна;
- сонарная съемка сканировала дно и выявляла мелкие неровности дна, которые формируются в районе потоков газа, газогидртов и зон разломов.

3. Благодаря многолетним комплексным исследованиям в Охотском и Японском морях выяснилась очень важная закономерность. Потоки пузырей метана и газогидраты в основном приурочены к зонам разломов. Причем выяснено, что с 1988 г. в Охотском море стала увеличиваться сейсмотектоническая активность [3]. Результаты исследований показали, что сейсмическая активность возрастала до 1998 г., и в этот период произошло катастрофическое Нефтегорское землетрясение в 1995 г. Затем сейсмическая активность то возрастала, то стабилизировалась, но общий фон сейсмической активности увеличивался как в Охотском море, так и в других морях Дальневосточного региона. Особенно сильные землетрясения магнитудой около 7–8 по шкале Рихтера произошли в районе г. Невельск (2007 г.), Японское море, и в районе г. Тахото (АЭС «Фукусима», 2011 г.) на побережье Тихого океана Японии, которое сопровождалось катастрофическим цунами.

В чем важность этой закономерности? Зоны разломов являются путями миграции газа из недр Земли к поверхности [4]. Сейсмическая активизация расширяла трещины в зонах разломов, что способствовало увеличению поступления газа (метана) из недр к поверхности. При наличии в осадочных отложениях нефтегазсодержащих пород они являются источниками метана, который по зонам разломов мигрирует к поверхности дна. При этом в зоне стабильности газогидратов при низкой температуре и высоком давлении на глубинах моря более 400 м в донных осадках формируются газогидраты (рис. 4).

4. Именно зоны разломов и сейсмические активизации являются важными характеристиками, требующими изучения при инженерно-геологических изы-

*Рис. 4.* Газогидрат в пульпе донных осадков. Донные осадки становятся неустойчивыми при разрушении газогидратов. Вверху – горит метан, который выделяется из газогидрата при температуре в лаборатории около 20 С°

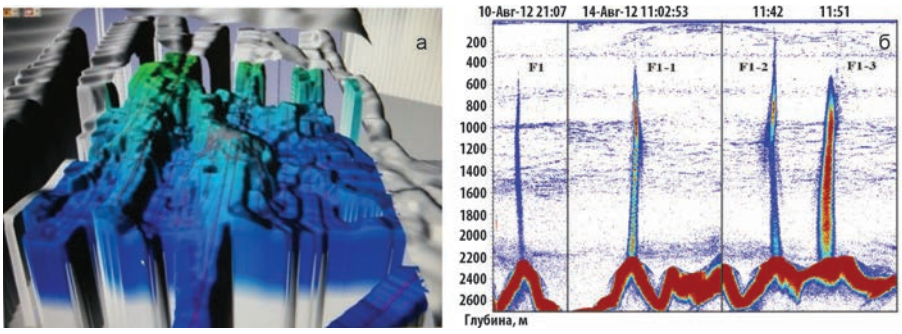


*Рис. 6.* Структура западного склона Курильского бассейна Охотского моря (а), где обнаружен грязевый вулкан на глубине 2200 м (структура составлена на основе данных батиметрической съемки А. Коптевым [2]), и самый высокий в Мировом океане поток пузырей газа из дна в воду, высотой 2100 м в районе грязевого вулкана (б). Гидроакустическая запись сделана А.С. Саломатиным [2]

сканиях. При проектировании и строительстве инженерных сооружений на морском дне необходимо оценить возможные опасности разрушения инженерных построек. Чем зоны разломов опасны для строительства на суше и морском дне в зонах разломов геологам и инженерам известно. Но кроме общего понимания механического движения в зоне разломов есть еще важные факторы – сейсмические активизации и увеличение потоков пузырей газа (метана) в этих зонах. При этом потоки газа расширяют трещины, формируют воздушную подушку и способствуют резкому перемещению блоков земной коры относительно друг друга и возникновению землетрясений и цунами. В этих районах в донных осадках происходят нарушения верхних осадочных слоев и пород. Образуются газогидраты, которые при формировании внедряются в осадок, поднимая слои к поверхности на высоту 10–20 м (рис. 5). При изменении условий стабильности газогидрата, увеличении температуры и (или) снижении давления происходит диссоциация газогидрата с выделением большого количества метана и других газов. В 1 см$^3$ газогидрата содержится 160 см$^3$ метана. При этом бугры становятся ямами глубиной 10–20 м. В зоне разломов появляются не только потоки пузырей газа (в основном метана), но и структуры грязевых вулканов (рис. 6). Эти характеристики очень важно знать при проектировании и строительстве инженерных сооружений.

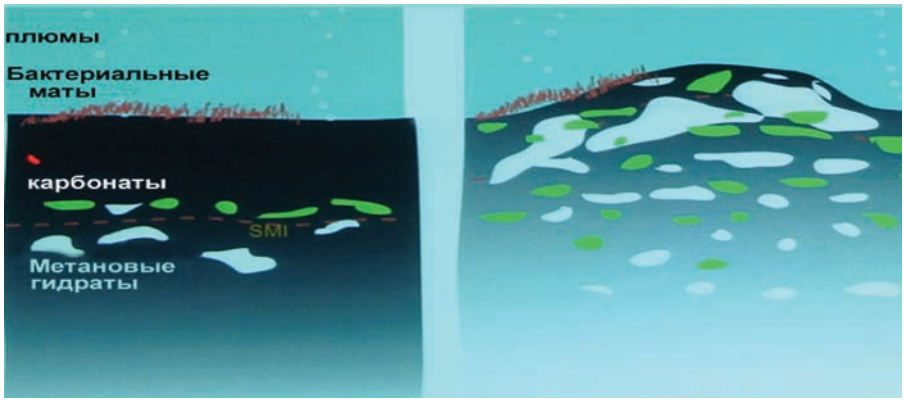


*Рис. 5.* Изменение поверхности дна в процессе формирования газогидратов. Слева – начальный этап образования газогидратов, карбонатов, бактериальных матов в районе потоков пузырей метана из донных отложений в воду, справа – нарушение (вспучивание) поверхности дна слоями газогидратов при внедрении их в осадок

В период повышения температуры и (или) уменьшения давления газогидраты разрушаются, превращаясь в газ и воду, а на поверхности дна образуются провалы, схожие с процессом оттаивания многолетней мерзлоты.

## Использование робототехники при инженерно-геологических изысканиях в целях определения безопасного участка дна для строительства на морском дне

В районах, где геолого-геофизическим комплексом обнаружены активные процессы, влияющие на нарушение поверхности дна (потоки пузырей метана, газогидраты, зоны разломов), требуются более детальные инженерные исследования дна с использованием робототехнических средств. Для этих целей могут использоваться как обитаемые, так и автономные подводные аппараты. Например, использование подводного обитаемого аппарата «Мир» в изучении газогидратов на оз. Байкал дало возможность открыть газогидраты, которые залегали на поверхности склона, не прикрытые осадком, на глубине около 1400 м (рис. 7). Это открытие подтвердило, что поверхность осадка нарушается в районе обра-

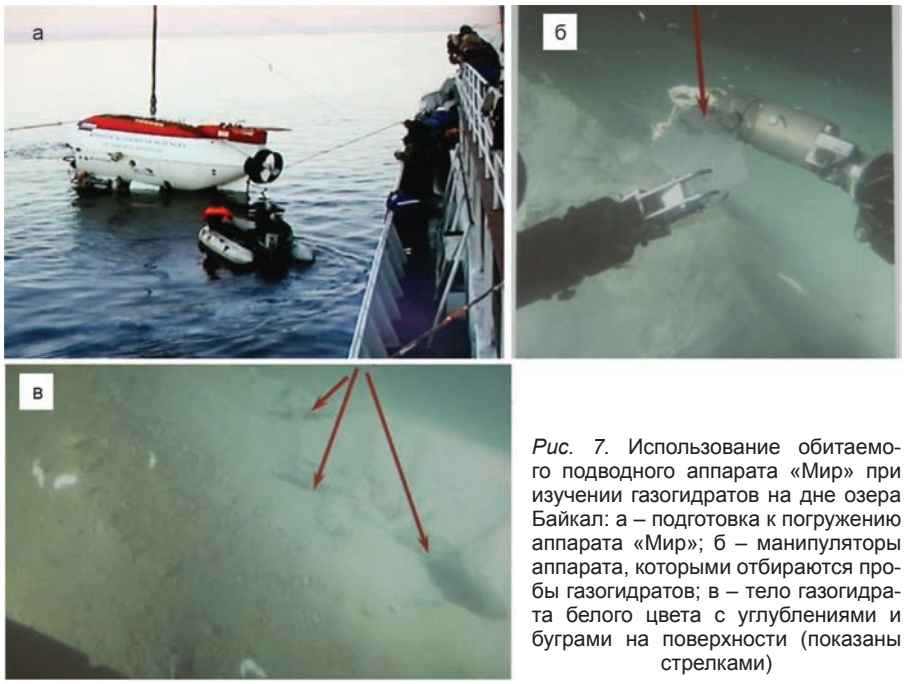


*Рис. 7.* Использование обитаемого подводного аппарата «Мир» при изучении газогидратов на дне озера Байкал: а – подготовка к погружению аппарата «Мир»; б – манипуляторы аппарата, которыми отбираются пробы газогидратов; в – тело газогидрата белого цвета с углублениями и буграми на поверхности (показаны стрелками)

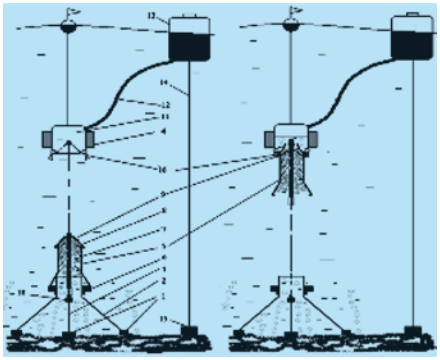

*Рис. 10.* Принципиальная схема сбора газа под куполом (Патент № 2386015) [7]

зования газогидрата и может размываться, обнажая газогидрат.

Автономные робототехнические средства детально передают по телеканалу нарушения поверхности дна, состояние его поверхности, возможные оазисы бентосных организмов, например раковин калиптоген (рис. 8), которые быстро размножаются, используя метан как энергетический материал благодаря реакциям хемосинтеза и микробного потребления метана.

В осадке наблюдается переслаивание слоев с ракушками и слоев илистых осадков общей мощности около 5 м. Это связано с пульсационным режимом потока метана, когда поток прекращается, бентосные организмы погибают, происходит осаждение илистых осадков, затем снова активизируется поток метана и происходит рост бентоса [5].

В работе [6] подробно описывается необходимость использования робототехники для изучения состояния донной поверхности при инженерном проектировании строительства на дне. Для этих целей подводные роботы используются во многих странах Европы (Англия, Италия, Германия, Франция), а также в Японии, Австралии. Основной задачей использования робота являлась проверка поверхности дна для прокладки трубопровода и наблюдения за его исправностью (рис. 9).

Подводная робототехника нужна для постановки на морское дно устройств по отбору метана из потоков пузырей метана и газогидратов. Одним из методов извлечения метана из газогидратов является использование установки (рис. 10), предложенной в работе [7].

*Рис. 8.* Оазис роста бентосных организмов в районе выходов пузырей метана из донных отложений в воду и газогидратов. Впадина Дерюгина, Охотское море, глубины 700–1100 м

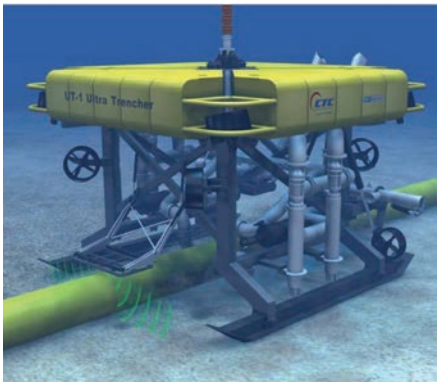


*Рис. 9.* Подводный аппарат, изучающий поверхность дна и состояние трубопровода на дне

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря многолетнему периоду (1984–2015 гг.) выполнения комплекса геологического, геофизического, газогеохимического, гидроакустического, гидрологического, батиметрического, сонарного направлений исследований в Охотском и Японском морях, в том числе по международным проектам КОМЕКС (Россия-Гемания, 1998–2004), ХАОС и SSGH (Россия-Япония-Корея, 2003–2006, 2007–2012–2017) стало возможным:

- определить закономерности формирования потоков пузырей метана из донных отложений в воду и частично в атмосферу;
- изучить процесс образования газогидратов;
- выполнить картирование зон разломов, которые являются

путями миграции газов, в основном метана, из нефтегазсодержащих пород к поверхности.

В этих зонах образуются газогидраты, которые формируют на поверхности дна в осадке бугры высотой 10–20 м. При повышении температуры и (или) уменьшении давления газогидраты разрушаются с выделением большого количества метана, и на поверхности дна образуются ямки глубиной 10–20 м. Эти характеристики являются важными критериями для безопасного выбора площадок под проектирование и строительство на морском дне. Детальные исследования поверхности дна, необходимые при инженерном проектировании строительства на дне различных объектов, в том числе при прокладке трубопроводов, установке буровых платформ, научно-исследовательской аппаратуры, требуют использования робототехнических средств.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-05-06638А и программы «Дальний Восток» 15-1-1-017

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Obzhirov A.I. Method to search methane fluxes and gas hydrate in the Okhotsk sea // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. №4. Спец. вып. 13. С. 30–35.

2. Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate (SAKHALIN) Project 2011, R/V Akademik M.A. Lavrentiev Cruise 56 (2012) / H. Shoji, Y.K. Jin, A.Obzhirov and B. Baranov; New Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology. Kitami, 2012. 140 p.

3. Обжиров А.И. Увеличение газовой составляющей при сейсмотектонической активизации участия газа в возникновении землетрясений (Охотское море) // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32, № 2 (2). С. 86–89.

4. Обжиров А.И., Казанский Б.А., Мельниченко Ю.И. Эффект звукорассеивания придонной воды в краевых частях Охотского моря // Тихоокеанская геология. 1989. Т. 8, № 2. С. 119–121.

5. Обжиров А.И., Телегин Ю.А., Болобан А.В. Потоки метана и газогидраты в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1 (19). С. 56–63.

6. Schultheiss G.F. Development in underwater robots. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Institut fur Anlagentechnik, Max-Planck-Strasse. D-2054 Geesthacht, Germany.

7. Технологический комплекс для разработки газогидратных залежей в открытом море: пат. 2386015 C1 Российская Федерация / А.И. Обжиров, А.А. Тагильцев. № 3.2008149316; заявл. 15.12.2008; опубл. 2010.04.10, Бюл. № 10.