

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 553.041

DOI 10.25587/2587-8751-2024-4-83-94

*Е.Д. Волох¹, Н.А. Алексеенко², А.А. Медведев²*¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия² Институт географии РАН, Москва, Россия

✉ evolokh000@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ ГАЗОГИДРАТОВ МИРОВЫМ СООБЩЕСТВОМ В XX-XXI ВВ

Аннотация. Актуальность исследования газогидратов обусловлена их потенциальной ролью как альтернативного источника энергии и важного элемента в изучении климатических изменений. Цель данного научного обзора заключается в систематизации существующих методов обнаружения газогидратов, а также анализе их эффективности и применимости в различных условиях. Задачи исследования включают оценку современных технологий, таких как сейсмическое зондирование, геофизические методы, химический анализ проб, использование данных дистанционного зондирования Земли, различные варианты моделирования. В ходе исследования был проведен анализ ряда публикаций на основании таких баз данных, как GoogleScholar, GeoRef, ResearchGate, посвященных методам обнаружения газогидратов, с акцентом на их технологические аспекты и практическое применение. Используемые методы включают сравнительный анализ, мета-анализ данных, а также оценку результатов полевых исследований. В результате было выявлено, что наиболее эффективными являются комбинации геофизических методов, которые позволяют повысить точность локализации газогидратов. Также в последние годы на первый план выходят методы дистанционного зондирования, которые являются эффективным инструментом для выявления источников выбросов метана, обычно связанных с месторождениями гидратов. Основные выводы показывают, что несмотря на достижения в области обнаружения газогидратов, существует необходимость в разработке более чувствительных и экономически эффективных технологий. Перспективы дальнейшего исследования включают интеграцию новых сенсорных технологий и моделирования для улучшения точности предсказаний месторождений газогидратов. Направления будущей работы могут охватывать как теоретические аспекты, так и практическое внедрение новых методов в полевые условия.

Ключевые слова: обнаружение газогидратов, бурение, моделирование, идентификация залежей, альтернативные источники энергии, многолетнемерзлые породы, рентгеновская дифракция, рамановская спектроскопия, сейсмическая разведка, метан

Для цитирования: Волох Е.Д., Алексеенко Н.А., Медведев А.А. Исследования возможностей обнаружения залежей газогидратов мировым сообществом в XX-XXI вв. *Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле»*. 2024, № 4. С. 83–94. DOI: 10.25587/2587-8751-2024-4-83-94

E.D. Volokh¹✉, N.A. Alekseenko², A.A. Medvedev²¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia² Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ evolokh000@gmail.com

THE RESEARCH ON THE POSSIBILITIES OF DETECTING GAS HYDRATES BY THE WORLD COMMUNITY IN THE 20TH – 21ST CENTURIES

Abstract. The relevance of gas hydrates studying is defined to their potential role as an alternative energy source and an important element in the research of climate change. The main purpose of this literature review is to systematize existing methods for detecting gas hydrates, as well as to analyze their effectiveness and applicability in various conditions. The research objectives include the assessment of modern technologies such as seismic sensing, geophysical methods, chemical analysis of samples, the use of remote sensing data, and various modeling options. A number of publications based on such databases as GoogleScholar, GeoRef, and ResearchGate on methods for detecting gas hydrates, with an emphasis on their technological aspects and practical applications were found. The used methods include comparative analysis, meta-analysis of data, and evaluation of field research results. As a result, it was revealed that the most effective methods are represented by combinations of geophysical methods that allow to increase the accuracy of localization gas hydrates localization. Moreover, remote sensing methods are becoming more popular as an effective tool for identifying sources of methane emissions, usually associated with hydrate deposits. The main findings show that despite the advances in gas hydrate detection, there is a need in developing more sensitive and cost-effective technologies. The prospects for further research include the integration of new sensor technologies and modelling to improve the accuracy of predictions of gas hydrate deposits. The areas of future researches may cover both theoretical aspects and practical implementation of new methods in the field.

Keywords: detection of gas hydrates, drilling, modeling, identification of deposits, alternative energy resources, permafrost, X-ray diffraction, Raman spectroscopy, seismic exploration, methane

For citation: Volokh E.D., Alekseenko N.A., Medvedev A.A. The research on the possibilities of detecting gas hydrates by the world community in the 20th – 21st centuries. *Vestnik of NEFU. Earth Sciences*. 2024, № 4. Pp. 83–94. DOI: 10.25587/2587-8751-2024-4-83-94

Введение

На современном этапе развития общества вопрос энергетических ресурсов является крайне важным. Запасы нефти и газа относятся к иссекаемым невозобновляемым природным ресурсам, поэтому внимание мирового сообщества на сегодняшний день приковано к различным альтернативным источникам энергии. В том числе таким источником энергии могут являться газогидраты.

Газогидраты представляют собой ледяные соединения низкомолекулярных газов (чаще всего метана), заключенные в водородную структуру из молекул воды. Обычно они образуются неглубоко в Земле в порых осадочных пород. При повышении температуры и уменьшении давления гидрат разлагается на газ и воду с поглощением большого количества теплоты. Разложение гидрата в замкнутом объеме либо в пористой среде (естественные условия) приводит к значительному повышению давления. Область их существования приурочена к морским донным осадкам и к областям многолетнемерзлых пород.

На сегодняшний день газогидраты являются объектом исследования ученых по всему миру. Исследования ведутся на Аляске, в Китае, России и других государствах. Положение о возможности использования газогидратов в качестве альтернативного источника энергии, а также об их колоссальных залежах уже не подвергается сомнению. Именно поэтому в рамках данной работы была сформулирована следующая цель: провести анализ и систематизацию литературы, посвященной исследованиям газогидратов.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- Поиск литературы по заявленной тематике;
- Изучение и анализ методов обнаружения залежей газогидратов;
- Систематизация и классификация выявленных методов обнаружений залежей газогидра-

тов по ряду признаков.

В результате сформирована сводная таблица мировых исследований, направленных на обнаружение залежей газогидратов с их основными положениями. Краткое описание выбранных исследований приведено в следующих разделах.

Материалы и методы исследования

На основании баз данных отбирались статьи, посвященные непосредственно обнаружению залежей газогидратов. С точки зрения временного диапазона ограничений наложено не было, однако, в силу специфики изучаемого объекта, большинство статей написаны в XXI веке.

Проведенный анализ показал, что наиболее активный интерес к исследованию газогидратов наблюдается в научной среде с конца XX века, что характеризуется большим количеством крайне разнородных исследований. На основании изученной литературы все исследования можно разделить на две крупные группы, исходя из методов обнаружения и исследования изучаемых объектов: некартографические исследования, включающие в себя бурение, использование сейсмических данных, Рамановскую спектроскопию, CSEM (морской управляемый электромагнитный источник излучения), химический анализ, биосратиграфию и другие, а также картографические исследования, включающие в себя разные виды моделирования, а также методы дистанционного зондирования[1].

Результаты

На основании проведенного анализа литературы составлена сводная таблица, содержащая основную информацию об используемых на сегодняшний день методах обнаружения газогидратов (табл.).

Таблица – Основные результаты и методы изучения газогидратов
Table – Main results and methods of studying gas hydrates

Район исследования	Год публикации	Используемые методы и источники данных	Основные результаты
оз. Байкал	2001	Сейсмические данные; высокоамплитудное моделирующее дно отражение с обратной поляристостью; бурение	Произведена приблизительная оценка объема гидратов и углерода, хранящихся в отложениях Байкала, на основании чего был сделан вывод, что газогидратные запасы Байкала не являются перспективным энергетическим ресурсом
оз. Байкал	2003	Сейсмические данные	Конфигурация зоны запаса газогидратов и их стабильность сложнее, чем первоначально предполагалось
дельта р. Маккензи	2006	Бурение; Рентгеновская дифракция	Большое количество гидратов природного газа было успешно извлечено из различных песчаных и гравийных отложений
Кадисский залив	2009	ГИС-моделирование	Разработана модель для картографирования регионального трехмерного распределения стабильных газогидратов в донных отложениях

Мексиканский залив	2010	Рамановская спектроскопия; Рентгеновская дифракция	Подтверждает наличие залежей газогидратных структур по всему миру и закладывает фундамент разработке различных способов оценки их месторождений
Новая Зеландия, о. Северный	2010	CSEM	На базе полученных данных были составлены профили удельного сопротивления подповерхностных донных отложений и одномерные модели
Аляска	2011	Бурение	Подтверждено наличие по меньшей мере двух больших скоплений газогидратов на северном склоне; впервые провели приблизительные расчеты того, сколько газа может быть извлечено из газогидратов.
Термокарстовое озеро на Аляске	2012	БПЛА; Полевые измерения; данные радиолокационной съемки в L-диапазоне	Оптическое дистанционное зондирование является мощным инструментом для картографирования выбросов метана, идентификации их интенсивности и оценки их пространственно-временной изменчивости; Съемка в L-диапазоне может быть использована для количественной оценки выбросов метана в термокарстовых озерах
Каспийское море-озеро	2017	Математическое моделирование	Результатом исследования явились карты положения верхнего и нижнего пределов образования гидрата метана
Устье р. Чжуцзян, КНР	2017	Химический анализ образцов	Для подавляющего большинства мировых запасов газогидратов характерен бактериальный генезис – результат карбонатного восстановления
Тундровая зона хр. Циляншань			
Континентальный склон о. Тайвань			
оз. Байкал	2019	Биостратиграфическая корреляция; сеймо-стратиграфия; бурение	Генетическая связь между диссоциацией гидрата газа и инициацией эруптивной активности объясняет многочисленные особенности «Байкальского» осадочного вулканизма
Побережье Санрику	2020	Автоматизированный скоростной анализ; Метод моделирования посредством множественных отражений; Кондуктивное моделирование	Разработан комплекс методов, который может быть использован для получения картографических данных о залегании газогидратов высокого пространственного разрешения в зонах субдукции
Южно-Китайское море (северная часть)	2020	Морфометрический анализ отложений; Химический анализ образцов	Химические характеристики воды в порах исследуемого вещества предоставляют возможность рассчитывать на эксплуатационный потенциал образующихся на территории газогидратов

Обсуждение

• Исследования залежей газогидратов в дельте реки Маккензи

В начале 1998 года в дельте реки Маккензи была пробурена исследовательская скважина JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 на глубину 1150 м под зоной вечной мерзлоты. В результате бурения большое количество гидратов природного газа было успешно извлечено из песчаных и гравийных отложений. Также было установлено, что 110 м отложений, содержащих газогидраты, расположены на участке глубиной от 897 до 1100 м. Включения газогидратов встречались

как в виде цельных образований, так и в порах между кристаллами в гранулированных песках. При бурении полученные газогидраты сохраняли в спрессованных обломках породы с использованием технологии рентгеновского КТ-сканера. Количественные оценки концентраций гидратов газа в пробах активной зоны были сделаны на основе значений давления в сосудах, диссоциации и измерений метрических характеристик образцов. В результате добытые образцы газогидратов были разделены на 6 типов. Рентгеновские изображения использовались для характеристики макроскопических форм гидрата газа. Более мелкие зернистые залежи были более трудными для изучения, тем не менее на рентгеновских изображениях можно отличить газогидраты от вмещающей породы [2, 3, 4].

• Изучение смешанных структур газогидратов Мексиканского залива

В первом десятилетии XXI века группа ученых из Германии и США занималась исследованием смешанных газогидратных структур на холме Чапопот в южной части Мексиканского залива. В рамках исследования изучались смешанные структуры газогидратов разных типов: структуры I (гидрат имеет кубическую кристаллическую структуру и состоит из 2-х малых клеток, каждая из которых состоит из 12 плоскостей пятиугольника, и 6 больших клеток) и структуры II (состоит из 16 маленьких и 8 больших клеток, по сравнению с первым типом, они включают в себя 12 пятиугольных структур и четыре шестиугольные, а следовательно, могут включать в себя более крупные молекулы газа).

Для исследования сосуществования различных газогидратных структур были использованы следующие методы: Рамановская спектроскопия; рентгеновскую дифракцию; газовую хроматографию.

Газовые гидраты были обнаружены в цементированной среде и в порах вещества, выступающих на поверхность морского дна. Два из трех исследованных образцов содержали только структуры I типа, состоящие, в основном, из метана. Третий же образец представлял собой соединение структур обоих типов, где примерно четверть массы относилась к структуре II типа, остальные три четверти приходились на I тип. Эти две структуры были тесно связаны в пределах отдельного зерна агломерата. Кристаллиты структуры II типа были значительно больше, чем структуры I типа, что свидетельствует о различной плотности кристаллообразования или различном возрасте кристаллитов. Структурное сосуществование может быть результатом следующих причин: расслоение на две гидратные структуры во время перехода из газообразного состояния в твердое, что обеспечило дополнительную степень свободы для снижения свободной энергии в системе; фракционированная кристаллизация и, как следствие, изменение молекулярного состава; кристаллизация из воды и отделившихся пузырьков газа с разным углеводородным составом; частичное преобразование структуры II в структуру I после формирования гидрата, прекратившееся при достижении термодинамически уравновешенного состояния.

Данное исследование подтверждает наличие залежей газогидратных структур по всему миру и закладывает фундамент разработке различных способов оценки месторождений природных газогидратов [5].

• Исследование газогидратов Бассейна Уллынг Японского моря

Бассейн Уллынг в Японском море известен случаями обрушения подводных склонов вдоль всей прибрежной территории и, как следствие массовых перемещений рыхлых отложений. В рамках ряда исследований выдвигалось предположение, что причиной обрушения склонов является широкое распространение газогидратов в бассейне. Поэтому ученые из Испании и Южной Кореи выявили особенности обрушения склонов, изучив такие объекты, как выступы скальных пород, тела оползней, плоскости скольжения и рыхлые отложения. В качестве источника информации использовался региональный набор многоканальных сейсмических данных. Ряд сейсмических индикаторов газогидратов и сопутствующих потоков газа и жидкости, полученных за счет множественных отражений поверхности дна был пересчитан с учетом имеющихся на территории сейсмических трубок, покмарок, а также аномалий отражения. Зона

залегания газовых гидратов в пределах склоновых отложений была определена по распределению множественных отражений от дна. По результатам эхолотирования наибольший интерес для исследования представляет юго-западный склон.

Высокое значение корреляции между пространственным распределением оползней и сейсмическими характеристиками свободного газа, потоков газа и жидкости и выклинивания зоны стабильности газогидратов могут указывать на то, что избыточное поровое давление, вызванное диссоциацией газогидратов, может являться причиной разрушения склонов [6].

• Исследование газогидратов северной части Южно-Китайского моря

В 2015 году Китайская национальная морская нефтяная корпорация передала группе Китайских ученых керны с участка, закрытого для пробной добычи до 2017 года, содержащие образцы газогидратов для дальнейшего анализа и оценки запасов газогидратов. Были проведены исследования происхождения и состава полученных образцов. Результаты показали, что в составе преобладает метан с незначительным содержанием углекислого газа и других углеводородов. Газ вырабатывается в результате смешано-генетических действий с преобладанием микробного происхождения и присутствием термогенного воздействия. Также были изучены морфология поверхности, химический и гранулометрический состав вмещающих отложений. Химические характеристики воды в порах вещества предоставляют возможность рассчитывать на эксплуатационный потенциал образующихся на территории газогидратов [7].

• Исследование генетических типов газогидратов в Южно-Китайском море и на территории Китайской Народной Республики

В 2016 году Китай провел Четвертую кампанию по бурению газовых гидратов для участка Шеньху Южно-Китайского моря. В результате бурения были получены комплексные данные каротажа и образцы газогидратов. Для данных, полученных с помощью каротажа, характерны высокие показатели электрического сопротивления и скорости звука на различной глубине, что указывает на наличие запасов газогидратов в исследуемой области. Впервые сосуществование газогидратов со структурой I и II типов в Южно-Китайском море было подтверждено на основании Рамановской спектроскопии. Сосуществование обоих структурных типов газогидратов усложняют систему переходов агрегатных состояний вещества (газ-вода-гидрат) [8].

Китайские ученые также исследовали пробы газогидратов, взятые в устье реки Чжуцзян, тундровой зоне хребта Цилиньшань, северной части бассейна Южно-Китайского моря, а также с континентального склона острова Тайвань. Юрские формации газогидратов хребта Цилиньшань в основном имеют нефтяное происхождение и характеризуется самотермогенерацией и самосохранением. Также было обнаружено небольшое количество угольных газов, которые могут поступать из угленосной среднеюрской формации. Пробы газогидратов из устья р. Чжуцзян и с континентального склона о. Тайвань характеризуются преобладанием бактериального происхождения карбонатного восстановления. Также в этих бассейнах было обнаружено незначительное количество газогидратов термогенного происхождения. В рамках исследования ученые собрали геохимические данные о 20 различных бассейнах мира, и пришли к выводу, что термогенные газогидраты обязаны своим происхождением отложениям угля и нефти, но значительно преобладают нефтяные газогидраты. Для подавляющего большинства мировых запасов газогидратов характерен бактериальный генезис – результат карбонатного восстановления. Метаногенез ацетатного брожения характерен только для газогидратов озера Байкал [9].

• Оценка залежей газогидратов в зоне просачивания с использованием электромагнитов морских контролируемых источников

В Новой Зеландии несколько известных точек просачивания газа вдоль восточного побережья были исследованы с помощью морского управляемого электромагнитного источника излучения (CSEM). Нижняя буксируемая электрическая система, работающая по принципу диполь-диполь, была использована для выявления наличия газогидратов и свободного метана, присутствующих в областях просачивания.

Две линии CSEM были проложены вдоль известных участков просачивания у юговосточного побережья Северного острова на берегу Опуаве в районе Вайрапа. На базе полученных данных были составлены профили удельного сопротивления подповерхностных донных отложений и одномерные модели. Аномальные значения сопротивления совпадают с расположением двух газоотводных площадок: Северной и Южной башен на берегу Опуаве. Также причиной аномальных сопротивлений могут являться слой концентрированных газогидратов, расположенный примерно на 100 м глубже поверхности дна, свободный газ и карбонатные корки. Сейсмические данные также могут указывать на распределение газовых гидратов или аутигенного карбоната. Геохимические профили указывают на увеличение потока выбросов метана и образование газогидратов на участке мелководных отложений вокруг участков просачивания [10].

Вертикальные характеристики близко залегающих газогидратов могут быть эффективно разграничены путем инвертирования данных CSEM как статичного донного, так и буксируемого приемников одновременно. Применяемый подход может быть использован для картографирования и мониторинга минерализации донных отложений, пресноводных резервуаров и приповерхностных геотермальных систем [11].

• Исследования газогидратов Байкала

В последнем десятилетии XX века группа ученых из России и Бельгии занималась исследованием частотно-зависимого поведения акустических характеристик метаногидратоносных отложений в озере Байкал. При использовании низкочастотного массива данных основание зоны устойчивости газогидратов наблюдается как высокоамплитудное моделирующее дно отражение с обратной полярностью. Амплитуда и непрерывность высокоамплитудного моделирующего дно отражения (bottom-simulating reflection, BSR) уменьшаются или даже исчезают при использовании средне- и высокочастотных данных, что объясняется вертикальным и горизонтальным разрешением. Увеличение амплитуды отражения BSR с увеличением смещения, вычисленный коэффициент отражения BSR и возникновение усиленных отражений ниже BSR предполагают наличие свободного газа ниже основания зоны стабильности газогидратов. Наблюдение некоторых усиленных отражений, простирающихся выше BSR, может быть интерпретировано в качестве указания на наличие свободного газа совместно с гидратами в зоне их стабильности.

Одноканальные профили пневматического оружия обеспечили сейсмической информацией Байкальский проект бурения (BDP-97). Информация, полученная в результате бурения и сейсмических исследований, позволила произвести приблизительную оценку объема гидратов и углерода, хранящихся в отложениях Байкала, на основании чего ученые сделали вывод, что газогидратные запасы Байкала не являются перспективным энергетическим ресурсом. Однако в более поздних исследованиях было установлено, что конфигурация зоны залегания газогидратов сложнее, чем предполагалось изначально [12, 13]. Полученные результаты также подчеркивают, что генетическая связь между диссоциацией гидрата газа и инициацией эруптивной активности объясняет многочисленные особенности «Байкальского» осадочного вулканизма. В рамках данного исследования ученые говорят о том, что полученные результаты открывают новые перспективы исследования грязевых вулканов во всем мире, а также отмечают, что газовые гидраты не являются одной из общих черт осадочного вулканизма, но могут играть активную роль в качестве механизма запуска самого процесса [14].

• Расчет толщины зоны стабильности газогидратов северного материкового склона Кадисского залива на базе геоинформационных методов

Группа ученых из Испании и Италии разработала в среде ГИС вычислительную модель для картографирования регионального трехмерного распределения стабильных газогидратов в донных отложениях. Модель применялась для расчета толщины зоны стабильности газогидратов на северном материковом склоне Кадисского залива, для которого характерны обильные источники гидратообразования, такие как обширные выходы углеводородов, наличие диапиров

и разломных структур, в сочетании с глубокими подводными течениями и сложной морфологией морского дна. Построенная для залива модель отображает распределение основания зоны стабильности газогидратов как для биогенных, так и для термогенных составляющих газа и объясняет геометрию распределения геологических структур. Данные были получены методом множественных отражений за счет эхолотирования в верхней части континентального склона и отвода газа из месторождения [15, 16].

• Исследование газогидратов в зоне субдукции на примере преддугового бассейна в районе побережья Санрику

В рамках исследования преддугового бассейна в районе побережья Санрику на северо-востоке Японии ученые этой страны применили метод автоматизированного скоростного анализа к трехмерному объему сейсмических данных, чтобы получить модель высокого разрешения для скоростей распространения волн в веществе. Далее данная модель была использована для исследования влияния поведения жидкости на подповерхностное распределение газа. Участки скопления свободного газа были идентифицированы как зоны с низкой скоростью продольных волн. С помощью метода моделирования дна посредством множественных отражений свободные газы были четко разграничены с вышележащими газогидратами, для толщи которых характерна более высокая скорость прохождения продольных волн. На следующем этапе, применяя кондуктивное моделирование, группа исследователей составила карту восходящего теплового потока в исследуемой области. Точкой отсчета послужили данные, полученные из первой модели в результате использования эхолотирования.

Расчетный тепловой поток показывает, что восходящий поток жидкости оказывает значительное влияние на распределение как газогидратов, так и свободного газа. Области высокой температуры соответствуют нижележащим проницаемым геологическим объектам, таким как газовые трубы, разломы и массивы осадочных пород. В рамках исследования было сформулировано предположение, что данная особенность обеспечила пути миграции флюидов из материнской породы на протяжении отрезка времени от эоцена до олигоцена, включая скопления свободного газа и гидратов в вышележащие толщи осадочных пород. Комплекс вышеописанных методов может быть использован для получения картографических данных о залегании газогидратов и скоплениях свободного газа высокого пространственного разрешения для аналогичных глубоководных водоемов в зонах субдукции [17].

• Создание карт образования газогидратов в Каспийском море на основе оценки физико-химической устойчивости гидрата метана

Предварительные исследования Каспийского моря учеными из Ирана позволили сделать предположение о наличии залежей газогидратов в отложениях водоема в силу подходящих физико-химических условий, наличия глинистых отложений и высокой концентрации органического вещества. На основе физико-химического уравнения для стабильности гидрата метана при различных давлении, температуре и солености, исследование было предназначено для расчета потенциала газогидратообразования в бассейне Каспийского моря. С этой целью был проведен анализ данных из более 600 точек на территории водоема, для каждой из которых были рассчитаны верхний и нижний пределы зоны образования гидрата метана. В результате полученные данные были проинтерполированы на всю территорию Каспийского моря, а результатом исследования явились карты положения верхнего и нижнего пределов образования гидрата метана, которые в дальнейшем могут быть использованы для исследования газогидратов, как в качестве альтернативного источника энергии, так для выявления угроз, связанных с добычей газогидратов [18].

• Использование радиолокационной съемки для выявления выбросов метана

Термокарстовые озера являются важным источником атмосферного метана. Как правило, внешним проявлением эмиссии метана является «пузырение» поверхности озера. В результате экстраполяции пространственно ограниченных полевых измерений существуют неопределен-

ности при региональной оценке выбросов метана. Таким образом, возникает необходимость применения подходов, основанных на дистанционном зондировании, для обнаружения и количественной оценки выбросов метана в масштабах крупных объектов. Во втором десятилетии XXI века группа ученых на Аляске занималась изучением взаимосвязи данных, полученных в результате радарной съемки с синтезированной апертурой с данными полевых измерений выбросов метана для 10 озер полуострова Сьюард. В рамках исследования было установлено, что как площадь, так и интенсивность «пузырения» коррелировали с L-диапазоном согласованной горизонтальной поляризации. Данное исследование показывает, что радиолокационная съемка в L-диапазоне ледовой поверхности озер может быть использована для количественной оценки выбросов метана в термокарстовых озерах [19].

• Использование снимков с БПЛА высокого пространственного разрешения для обнаружения выбросов метана

Термокарстовые озера являются важными «излучателями» метана, мощного парникового газа. Тем не менее, существует ряд трудностей при оценке объемов потока метана в силу частой удаленности термокарстовых озер и гетерогенным происхождением «пузырения» поверхности озера. Группа исследователей из США и Германии использовала снимки с беспилотного летательного аппарата с пространственным разрешением 9-11 см на территорию не заснеженной ледовой поверхности термокарстового озера на Аляске. Была обнаружена сильная обратная экспоненциальная связь между процентами поверхности площади озерного льда, покрытой пузырьчатыми пятнами, и расстоянием от активной термокарстовой части озера. Несмотря на то, что оптическая съемка является требовательной к погодным условиям, исследование показывает, что оптическое дистанционное зондирование является мощным инструментом для картографирования выбросов метана к замерзшей поверхности озера, идентификации интенсивности выбросов и оценки их пространственно-временной изменчивости [20].

Заключение

В результате проделанной работы был проведен анализ литературы по заявленной тематике, который показал, что на сегодняшний день методы обнаружения газогидратов можно подразделить на картографические, включающие разные виды моделирования, а также применение дистанционного зондирования, и представляющие мощный, но недостаточно развитый инструмент для исследования газогидратов, и некартографические, включающие наиболее широко используемые сейчас бурение и эхолотирование.

Несмотря на сравнительно недолгий период изучения и существующие риски, на сегодняшний день газогидраты представляют из себя потенциальный альтернативный источник энергии, для обнаружения которого существует широкое разнообразие различных методов, наиболее популярными из которых остаются бурение и использование данных сейсмической разведки. Тем не менее, применение данных методов для крупных водоемов, таких как Байкал, является затратным и малопродуктивным. В таком случае на передний план выходят методы дистанционного зондирования, представляющие из себя мощный инструмент для определения точек выбросов метана, как правило сопутствующих залежам гидратов.

Литература

1. Liu, L. Monitoring and research on environmental impacts related to marine natural gas hydrates: Review and future perspective / B. Ryu, Zh. Sun [et al.] // Elsevier. Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2019. – 65. – P. 82-107. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510019300459>.
2. Collett, T. S. Avena et al, Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope / T. S. Collett, M. W. Lee, W. F. // Elsevier. Marine and Petroleum Geology. – 2011. – 8. – P. 279-294. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817209002177>

3. Uchida, T. Occurrences of Natural Gas Hydrates beneath the Permafrost Zone in Mackenzie Delta / T. Uchida, S. Dallimore, J. Mikami // *Annals New York Academy of Science*. – 2006. – P. 1021-1033. Available from: <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1749-6632.2000.tb06857.x>
4. Weitemeyer, K. A. A marine electromagnetic survey to detect gas hydrate at Hydrate Ridge, Oregon / K. A. Weitemeyer, S. Constable // *Geophysical Journal International*. – 2011. – 187. – P. 45-62. Available from: <https://academic.oup.com/gji/article/187/1/45/563620>
5. Klapp St. A., Mixed gas hydrate structures at the Chapopote Knoll, southern Gulf of Mexico / St. A. Klapp, M. M. Murshed, Th. Pape [et al.] // Elsevier. *Earth and Planetary Science Letters*. – 2010. – 299. – P. 207-217. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X10005625>
6. Horozal, S. Mapping gas hydrate and fluid flow indicators and modeling gas hydrate stability zone (GHSZ) in the Ulleung Basin, East (Japan) Sea: Potential linkage between the occurrence of mass failures and gas hydrate dissociation / S. Horozal, J-J. Bahk, R. Urgeles [et al.] // Elsevier. *Marine and Petroleum Geology*. – 2018. – 80. – P. 171-191. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817216304305>
7. Guo, K. Physical and chemical characteristics analysis of hydrate samples from northern South China sea / K. Guo, Sh. Fan, Y. Wang [et al.] // Elsevier. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2020. – P. 1-10. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510020303309>
8. Wei, J. Distribution and characteristics of natural gas hydrates in the Shenhu Sea Area, South China Sea / J. Wei, Y. Fang, H. Lu [et al.] // Elsevier. *Marine and Petroleum Geology*. – 2018. – 98. – P. 622-628. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817218303064>
9. Jinxiang, D. Genetic types of gas hydrates in China / D. Jinxiang, N. Yunyan, H. Shipeng [et al.] // Online English edition of the Chinese language journal. *PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT*. – 2017. – 44 (6). – P. 887-898. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876380417301015>
10. Schwalenberg, K. Evaluation of gas hydrate deposits in an active seep area using marine controlled source electromagnetics: Results from Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand / K. Schwalenberg, M. Haeckel, J. Poort [et al.] // Elsevier. *Marine Geology*. – 2010. – 272. P. 79-88. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025322709001819>;
11. Attias, E. High-resolution resistivity imaging of marine gas hydrate structures by combined inversion of CSEM towed and oceanbottom receiver data / E. Attias, K. Weitemeyer, S. Holz [et al.] // *Geophysical Journal International*. – 2018. – 133 p. Available from: <https://academic.oup.com/gji/article/214/3/1701/5034952>
12. Vanneste, M. Multi-frequency seismic study of gas hydrate-bearing sediments in Lake Baikal, Siberia / M. Vanneste, M. De Batist, A. Golmshtok [et al.] // Elsevier. *International Journal of Marine Geology, Geochemistry and geophysics*. – 2001. – 172. P. 1-21. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025322700001171>
13. Vanneste, M. Atypical heat-flow near gas hydrate irregularities and cold seeps in the Baikal Rift Zone / M. Vanneste, Jeffrey Poort, M. De Batist [et al.] // Elsevier. *Marine and Petroleum Geology*. – 2003. – 19. P. 1257-1274. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817203000199>
14. Khlystov, O. M. Shallow-rooted mud volcanism in Lake Baikal / O.M. Khlystov, J. Poort, A. Mazzini [et al.] // Elsevier. *Marine and Petroleum Geology*. – 2019. – 102. – P. 580-589. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817219300054>
15. Хлыстов, О. М. Результаты поиска и изучения Байкальских газовых гидратов / О. М. Хлыстов. 2017.
16. Leon, R. A predictive numerical model for potential mapping of the gas hydrate stability zone in the Gulf of Cadiz / R. Leon, L. Somoza, C.J. Gimenez-Moreno [et al.] // Elsevier. *Marine and Petroleum Geology*. – 2009. – 26. – P. 1564-1579. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026481720900021X>
17. Kret, K. Distributions of gas hydrate and free gas accumulations associated with upward fluid flow in the Sanriku-Oki forearc basin, northeast Japan / K. Kret, T. Tsuji, Ch. Chhun [et al.] // Elsevier. *Marine and Petroleum Geology*. – 2020. – 116. – P. 1-15. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026481722030088X>

18. Gerivani, H. Potential map of gas hydrate formation in Caspian Sea based on physicochemical stability evaluation of methane hydrate / H. Gerivani, B. Gerivani [et al] // *Marine Georesources & Geotechnology*. – 2017. – 35 (1). – P. 136-142. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1064119X.2015.1118581>
19. Engram, M. Synthetic aperture radar (SAR) backscatter response from methane ebullition bubbles trapped by thermokarst lake ice / M. Engram, K. W. Anthony, F. J. Meyer [et al] // *Canadian Journal of Remote Sensing*. – 2012. – 38 (6). – P. 667-682. Available from: M. Engram, K. W. Anthony, F. J. Meyer et al, Synthetic aperture radar (SAR) backscatter response from methane ebullition bubbles trapped by thermokarst lake ice
20. Lindgren, P. R. Detection and spatiotemporal analysis of methane ebullition on thermokarst lake ice using high-resolution optical aerial imagery / P. R. Lindgren, G. Grosse, K. M. Walter Anthony [et al.] // *Biogeosciences*. – 2016. – 3. – P. 27-44. Available from: <https://bg.copernicus.org/articles/13/27/2016/>.

References

1. Liu L, Ryu B, Sun Zh et al. Monitoring and research on environmental impacts related to marine natural gas hydrates: Review and future perspective. Elsevier. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2019;65:82-107. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510019300459>;
2. Collett TS, Lee MW, Agena WF et al, Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope. Elsevier. *Marine and Petroleum Geology*. 2011;8:279-294. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817209002177>;
3. Uchida T, Dallimore S, Mikami J. Occurrences of Natural Gas Hydrates beneath the Permafrost Zone in Mackenzie Delta. *Annals New York Academy of Science*. 2006:1021-1033. Available from: <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1749-6632.2000.tb06857.x>;
4. Weitmeyer KA, Constable S. A marine electromagnetic survey to detect gas hydrate at Hydrate Ridge, Oregon. *Geophysical Journal International*. 2011; 187: 45-62. Available from: <https://academic.oup.com/gji/article/187/1/45/563620>;
5. Klapp StA, Murshed MM, Pape Th et al. Mixed gas hydrate structures at the Chapopote Knoll, southern Gulf of Mexico. Elsevier. *Earth and Planetary Science Letters*. 2010;299:207-217. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X10005625>;
6. Horozal S, Bahk J-J, Urgeles R et al. Mapping gas hydrate and fluid flow indicators and modeling gas hydrate stability zone (GHSZ) in the Ulleung Basin, East (Japan) Sea: Potential linkage between the occurrence of mass failures and gas hydrate dissociation. Elsevier. *Marine and Petroleum Geology*. 2018;80:171-191. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817216304305>;
7. GuoK, Fan Sh, Wang Y et al. Physical and chemical characteristics analysis of hydrate samples from northern South China sea. Elsevier. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020;1-10. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510020303309>;
8. Wei J, Fang Y, Lu H et al. Distribution and characteristics of natural gas hydrates in the Shenhu Sea Area, South China Sea. Elsevier. *Marine and Petroleum Geology*. 2018;98:622-628. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817218303064>;
9. Jinxing D, Yunyan N, Shipeng H et al. Genetic types of gas hydrates in China. Online English edition of the Chinese language journal. *Petroleum exploration and Development*. 2017;44(6):887-898. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876380417301015>;
10. Schwalenberg K, Haeckel M, Poort J et al. Evaluation of gas hydrate deposits in an active seep area using marine controlled source electromagnetics: Results from Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand. Elsevier. *Marine Geology*. 2010;272:79-88. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025322709001819>;
11. Attias E, Weitmeyer K, Holz S et al. High-resolution resistivity imaging of marine gas hydrate structures by combined inversion of CSEM towed and oceanbottom receiver data. *Geophysical Journal International*. 2018; 133. Available from: <https://academic.oup.com/gji/article/214/3/1701/5034952>;

12. Vanneste M, Batist M De, Golmshtok A et al. Multi-frequency seismic study of gas hydrate-bearing sediments in Lake Baikal, Siberia. Elsevier. International Journal of Marine Geology, Geochemistry and geophysics. 2001;172:1-21. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025322700001171>
13. Vanneste M, Poort J, Batist MDe et al. Atypical heat-flow near gas hydrate irregularities and cold seeps in the Baikal Rift Zone. Elsevier. Marine and Petroleum Geology. 2003;19:1257-1274. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817203000199>
14. Khlystov OM, Poort J, Mazzini A et al. Shallow-rooted mud volcanism in Lake Baikal. Elsevier. Marine and Petroleum Geology. 2019;102:580-589. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817219300054>
15. Khlystov OM. The results of the search and study of Baikal gas hydrates. 2017; (in Russia)
16. Leon R, Somoza L, Gimenez-Moreno CJ et al. A predictive numerical model for potential mapping of the gas hydrate stability zone in the Gulf of Cadiz. Elsevier. Marine and Petroleum Geology. 2009;26:1564-1579. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026481720900021X>
17. Kret K, Tsuji T, Chhun Ch et al. Distributions of gas hydrate and free gas accumulations associated with upward fluid flow in the Sanriku-Oki forearc basin, northeast Japan. Elsevier. Marine and Petroleum Geology. 2020;116:1-15. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026481722030088X>
18. Gerivani H, Gerivani B et al. Potential map of gas hydrate formation in Caspian Sea based on physicochemical stability evaluation of methane hydrate. Marine Georesources & Geotechnology. 2017;35(1):136-142. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1064119X.2015.1118581>
19. Engram M, Anthony KW, Meyer FJ et al, Synthetic aperture radar (SAR) backscatter response from methane ebullition bubbles trapped by thermokarst lake ice. Canadian Journal of Remote Sensing. 2012;38(6):667-682. Available from: M. Engram, K. W. Anthony, F. J. Meyer et al, Synthetic aperture radar (SAR) backscatter response from methane ebullition bubbles trapped by thermokarst lake ice
20. Lindgren PR, Grosse G, Walter Anthony KM et al. Detection and spatiotemporal analysis of methane ebullition on thermokarst lake ice using highresolution optical aerial imagery. Biogeosciences. 2016; 3: 27-44. Available from: <https://bg.copernicus.org/articles/13/27/2016/>.

Сведения об авторах

ВОЛОХ Екатерина Дмитриевна – аспирант, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. E-mail: evolokh000@gmail.com

VOLOKH Ekaterina D. – postgraduate student, Lomonosov Moscow State University

АЛЕКСЕЕНКО Наталья Анатольевна – к.г.н., доцент, Институт географии РАН. E-mail: valtuz@mail.ru

ALEKSEENKO Natalya A. – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, IG RAS

МЕДВЕДЕВ Андрей Александрович – к.г.н., зав. отд. картографии и дистанционного зондирования Земли, Институт географии РАН. E-mail: a.a.medvedeff@gmail.com

MEDVEDEV Andrey A. – Candidate of Geographical Sciences, Head of the Department of Cartography and Remote Sensing of the Earth, IG RAS