

УДК 551.46.09:504.42:504.054

ПРОВЕДЕНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Лискин В.А., Егоров А.В., Нерсесов Б.А.

*ФГБУН «Институт океанологии имени П.П. Ширшова» Российской академии наук,
Москва, e-mail: liskin@ocean.ru*

В Карском море выявлены значительные перспективы нефтегазоносности, подтвержденные результатами многократных исследований и количественных оценок. Целью исследований является анализ и обсуждение выполненных геолого-геофизических исследований условий формирования газовых гидратов в арктическом регионе. В результате постановки геолого-геофизических задач исследований, включая исследование условий формирования газовых гидратов, ключевой акцент был сделан на сборе и систематизации существующих данных о донных осадках в акваториях Карского моря, выбранных для проведения испытаний и научных исследований с использованием автономного океанологического комплекса, разработанного в Институте океанологии. В процессе исследований на поверхности дна с помощью пробоотборников обнаружен наилот коричневого цвета, обводненный и окисленный. Ниже залегают осадки с характерной окраской и повышенным уровнем восстанавливаемости, часто содержащие включения гидро-троилита. Все исследования, как правило, проводились с использованием бокс-корера или трубки «Неймисто», что ограничивало глубину отбора проб до 30–40 см ниже поверхности дна. Использование сенсоров метана для непрерывного мониторинга поверхностных вод позволяет осуществлять количественный контроль концентраций метана. Анализ массивов данных, полученных в ходе исследований в Карском море, предоставляет возможность оценки эмиссии метана из водной среды в атмосферу. Основные зоны эмиссии метана включают эстуарии Енисея и Оби, а также прилегающие мелководные участки. По мере удаления от этих зон интенсивность эмиссии метана значительно снижается, и на глубине более 100 м она становится практически незначимой.

Ключевые слова: комплекс, автономный, экологический, мониторинг, углеводородные, проявления, метан

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2024-24.

CONDUCTING GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL STUDIES OF THE FORMATION CONDITIONS OF GAS HYDRATES IN THE ARCTIC REGION

Liskin V.A., Egorov A.V., Nersesov B.A.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science,
Moscow, e-mail: liskin@ocean.ru*

Significant oil and gas potential has been identified in the Kara Sea, confirmed by the results of multiple studies and quantitative assessments. The purpose of the research is to analyze and discuss the performed geological and geophysical studies of the conditions of formation of gas hydrates in the Arctic region. As a result of the formulation of geological and geophysical research objectives, including the study of the conditions of formation of gas hydrates, the key emphasis was placed on collecting and systematizing existing data on bottom sediments in the waters of the Kara Sea, selected for testing and scientific research using an autonomous oceanological complex developed at the Institute of Oceanology. In the process of conducting research on the bottom surface, using samplers, a brown silt was found, watered and oxidized. Below, there are sediments with a characteristic color and an increased level of recoverability, often containing inclusions of hydro-troilite. All studies, as a rule, were carried out using a box corer or a Neimisto tube, which limited the sampling depth to 30–40 cm, below the bottom surface. The use of methane sensors for continuous monitoring of surface waters allows for quantitative control of methane concentrations. The analysis of data arrays obtained during research in the Kara Sea provides an opportunity to assess methane emissions from the aquatic environment into the atmosphere. The main methane emission zones include the estuaries of the Yenisei and Ob rivers, as well as adjacent shallow water areas. As we move away from these zones, the intensity of methane emissions decreases significantly, and at a depth of more than 100 meters, it becomes almost insignificant.

Keywords: complex, autonomous, ecological, monitoring, hydrocarbon, manifestations, methane

The work was carried out within the framework of the State assignment of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences on topic No. FMWE-2024-24.

Введение

В Карском море выявлены значительные перспективы нефтегазоносности, подтвержденные результатами многократных исследований и количественных оценок. В центральной и южной частях Карского

моря обнаружено несколько крупных газоконденсатных месторождений, что указывает на потенциальную перспективность северных областей России. В Северо-Карской впадине выявлены мощные палеозойские отложения с рифовыми фациями, зале-

гающие на доступных глубинах. На Новой Земле и островах Северной Земли зафиксированы битумопроявления. Эти данные свидетельствуют о значительной вероятности обнаружения нефтегазовых ресурсов в северных регионах Карского моря.

Наблюдается фрагментарность изученности акватории Карского моря. Значительный объем сейсмических исследований методом отраженных волн был выполнен только в южной части Карского моря. Глубокое бурение проведено на Русановской площади, а параметрические скважины пробурены на о. Белый и Свердруп. В последние годы отмечена интенсификация геолого-геофизического изучения северного региона Карского моря. В настоящее время активно применяются методы непрерывного сейсмоакустического профилирования и получены новые данные о распределении метана и газовых гидратов.

Ранее проведенные в арктическом регионе исследования позволили выявить крупные месторождения газовых гидратов в прибрежных зонах Шпицбергена. В Норвежском море широко известен газогидратоносный грязевой вулкан Хаакон Мосби. До настоящего времени в шельфовых морях Российской Арктики не наблюдалось проявлений газовых гидратов, поскольку данное направление исследований в Российском секторе Арктики было практически не развито. Для формирования и распространения газовых гидратов необходимы определенные термобарические условия, а именно: наличие достаточного количества газа и воды, а также наличие определенного состава газов, присутствие солей и условий для перемешивания воды и газа. Отметим важное обстоятельство – то, что газогидратоносные структуры тесно связаны с нефтегазоносными объектами.

Информация о температурном поле донных осадков Карского моря, включая тепловой геотермический градиент, который является важным фактором формирования газовых гидратов, недостаточна для проведения детального теплового анализа. На основе данных о температурах, полученных ранее посредством погружных термографов на шельфе, проведены предварительные оценки теплового потока в скважинах, предназначенных для поиска нефти. Поскольку оценка теплового потока на участках глубоководных скважин затруднена, но при этом она необходима, рекомендуется проводить для этих целей мало-глубинные измерения температуры. При проведении анализа следует учитывать, что мало-глубинные данные по температуре являются косвенными, но использование длиннобазовых экстрапо-

ляций позволяет прогнозировать возможное распределение теплового потока.

Выбор районов для проведения исследований в Карском море был обусловлен повышенным содержанием метана в осадочных отложениях под дном и наличием термобарических условий, обеспечивающих стабильность газовых гидратов. На глубоководных участках Карского моря выявлены очаги разгрузки метана, сопровождаемые восходящей миграцией метана по разломам. На основе известных соотношений между тепловым потоком и возрастом геологических структур, а также учитывая то, что Карское море является одной из акваторий Северного Ледовитого океана, в этих областях может быть развита субаквальная многолетняя мерзлота и существует высокая вероятность образования газовых гидратов в его глубоководных областях [1–3].

Цель исследования – анализ и обсуждение выполненных геолого-геофизических исследований условий формирования газовых гидратов в арктическом регионе.

Материалы и методы исследования

В результате постановки геолого-геофизических задач исследований, включая исследование условий формирования газовых гидратов, ключевой акцент был сделан на сборе и систематизации существующих данных о донных осадках в акваториях Карского моря, выбранных для проведения испытаний и научных исследований с использованием автономного океанологического комплекса, разработанного в Институте океанологии.

На основании проведенного анализа выполненных ранее исследований осуществлены поиск, картирование и комплексное изучение очагов разгрузки метана, связанных с наличием газовых гидратов на дне Карского моря. Эти работы имеют как фундаментальное, так и прикладное значение, включая оценку вклада Карского моря в общий годовой бюджет метана в атмосфере, в контексте глобальных климатических изменений и потепления в арктическом регионе. Проведение районирования эмиссии метана по различным зонам Карского моря, включая выделение зоны мелководья с вечной мерзлотой в донных отложениях, позволяет экстраполировать полученные данные на другие арктические моря с целью оценки общей эмиссии метана в арктическом регионе.

Предлагаемый метод исследований основан на использовании сенсора метана в составе разработанной аппаратной системы «Протока». Сенсор функционирует

благодаря изменениям сопротивления полупроводникового материала диоксида олова (SnO_2) при изменениях концентраций метана в атмосфере. Чувствительный элемент сенсора представляет собой тонкую пленку диоксида олова, нанесенную на подложку. Важно отметить, что данный материал не обладает селективностью к метану, а реагирует на широкий спектр углеводородов. Однако в природных условиях концентрация метана часто является доминирующей, что позволяет сенсору преимущественно регистрировать именно этот компонент. Одной из ключевых характеристик диоксида олова является его высокая температурная чувствительность, что требует применения термистора для точного измерения температуры окружающей среды в процессе измерений. Калибровка сенсора проводится при различных температурных условиях и концентрациях для исключения влияния температурных факторов на результаты измерений.

Для проведения измерений содержания метана в водной среде была разработана специализированная система «Протока», включающая сенсор метана. Сенсор устанавливался непосредственно вблизи насосного оборудования в составе системы «Протока». Вода, выходящая из камеры системы «Протока», направлялась по отдельному пластиковому трубопроводу диаметром 3/4 дюйма за пределы судна. В зависимости от концентрации метана в водной среде, протекающей через систему «Протока», изменялся выходной сигнал системы в соответствии с текущей концентрацией метана. Выходной сигнал о текущей концентрации метана передавался далее в универсальный порт компьютера, который осуществлял обработку данных и вычислял фактическую концентрацию метана в проходящей жидкости. Передача данных от системы «Протока» осуществлялась посредством многожильного электрического кабеля длиной около 10 м, который соединял сенсор метана системы «Протока» с последовательным портом персонального компьютера. Оборудование для электропитания и управления, а также персональный компьютер располагались в специально оборудованном лабораторном помещении на борту судна.

Достоверность данных системы «Протока» подтверждается методом сравнения с данными хроматографического анализа проб воды, отобранных из одного и того же источника. При концентрациях метана выше 10 нМ расхождение между данными сенсора метана и хроматографии не превышает 10–20%. Дискретность измерений составляет 1 нМ, что ограничивает точность

определения низких концентраций (порядка 3 нМ) до 30 %. Установлено, что при низких концентрациях метана (около 3 нМ) и наличии интенсивного газовыделения из воды показания сенсора метана могут быть занижены по сравнению с результатами хроматографического анализа. Это связано с инерционностью сенсора, и возникает необходимость, определенной корректировки данных при интерпретации результатов измерений. Экспериментально было определено, что для достижения стабильных показаний сенсора метана в системе «Протока», при измерении фиксированной концентрации метана требуется примерно 15–20 мин, что должно учитываться в дальнейшем, при проведении анализа результатов измерений.

Система «Протока» с сенсором метана продемонстрировала в экспедиции стабильную и надежную работу в течение долгого времени. Регистрируемые значения концентраций метана, текущее время на борту судна и другие параметры записывались синхронно в файл данных с интервалом в 15 с. Выбор интервала в 15 с был обусловлен необходимостью обеспечения соответствия данных о концентрации метана и данных о координатах исследовательского судна, которые также записывались с аналогичной периодичностью другой группой исследователей. Продолжительность записи одного файла данных, как правило, не превышала 12 ч. По завершении записи одного файла автоматически инициировался процесс создания нового файла, что обеспечивало непрерывное накопление данных в виде последовательности относительно небольших файлов данных.

Отбор геологических проб донных осадков с поверхности дна в районе исследований осуществлялся автономным океанологическим комплексом, оснащенным пробоотборными устройствами. После извлечения пробоотборников комплекса на борт исследовательского судна проводились лабораторные исследования полученных проб с детальным литологическим описанием полученных образцов донных отложений. Наиболее подробно были задокументированы профили, полученные с использованием бокс-корера и гравитационного пробоотборника (прямоточной трубы). Осадки, собранные с помощью трубки «Неймисто», описывались формально из-за конструктивных особенностей данного пробоотборника, которые не позволяли корректно охарактеризовать разрез. В ходе выполнения работ на 24 станциях, было отобрано и проанализировано 226 проб донных отложений, на содержание метана и различных

углеводородных газов, включая этан, этилен, пропан, пропилен, изобутан и нормальный бутан [4–6].

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе исследований с помощью пробоотборников на поверхности дна обнаружен наилот коричневого цвета, обводненный и окисленный. Ниже залегают осадки с характерной окраской и повышенным уровнем восстанавливаемости, часто содержащие включения гидротроилита. Исследования, как правило, проводились с использованием бокс-корера или трубки «Неймисто», что ограничивало глубину отбора проб до 30–40 см, ниже поверхности дна. Однако в юго-восточном отроге желоба Святой Анны с помощью гравитационного пробоотборника были подняты колонки с мощностью осадков до 303 см. Это позволило провести предварительную палеогеографическую интерпретацию, так как в разрезе были зафиксированы региональные литологические «уровни» с известными возрастными характеристиками.

Одним из результатов исследований являлось то, что в поверхностной воде р. Енисей и Северная Двина (Енисейский разрез), а также примыкающих к ним акваториях наблюдались повышенные концентрации метана. В отдельных случаях концентрации превышали 100 нМ. Также наблюдались значительные скачки концентраций, что позволило обнаружить несколько концентрационных фронтов, коррелирующих с фронтами солености. В результате полученный профиль концентраций на Енисейском разрезе в области высоких концентраций показывает сильную изменчивость. Совместный анализ данных по содержанию метана и солености показывает их антикорреляцию и то, что воды значительно структурированы по метану и солености.

Большинство показаний концентраций метана связано с областями низкой и высокой солености, что демонстрирует узость главных фронтальных зон морской воды в этом регионе. Были выявлены зависимости величин концентраций метана от величин солености морской воды. В промежуточной области соленостей, где соленость выражается небольшим числом точек, эти зависимости, как правило, линейны и подпадают под закон перемешивания растворов инертных примесей:

$$CH_4 / [CH_4]_0 = 1 - S/S_0,$$

где CH_4 – концентрация метана в смешанной воде, S – соленость смешанной воды, $[CH_4]_0$ – концентрация метана в пресной

исходной речной воде, S_0 – соленость исходной морской воды с низкой концентрацией метана. Представленная линейная модель достаточно точно описывает полученные данные эксперимента, но при этом возможны значительные отклонения от линейных моделей при низких и высоких соленостях морской воды. В этом случае концентрацию метана определяет не простое механическое смешение вод в изучаемом регионе. Еще следует обратить внимание на инертность сенсора метана, которая не позволяет быстро реагировать на меняющиеся концентрации при прохождении фронтальных зон в водной среде.

Проведенные в удаленных от устьев рек районах Карского моря измерения концентраций метана показали отсутствие отклонений от показателей концентраций на границе гидросферы и атмосферы, соответствующих равновесным состояниям. Порядок концентраций метана (3–4 нМ), определенный таким способом, демонстрирует эмиссию метана с поверхности Карского моря в атмосферу на очень низком уровне. Около о. Новая Земля были выявлены относительно опресненные участки с соленостью до 18–20 ‰, но при этом не обнаружено никаких изменений концентраций метана. Наблюдаемое различие свидетельствует о сложном характере процессов в гидросфере, где гидрофизические факторы конкурируют с микробиологическими, а метан является как активным участником таких процессов, так и их индикатором.

Анализ вертикальных профилей метана демонстрирует существенное различие в концентрациях поверхностных и глубинных вод. Есть два исключения – пресные воды на юге Енисейского разреза и воды желоба святой Анны на самых северных частях разрезов. В первом случае воды имеют постоянную от поверхности до дна высокую концентрацию метана (порядка 100 нМ), во втором – низкую, равную равновесному с воздухом значению (4 нМ). Во всех остальных случаях распределение содержания метана по вертикали имеет подповерхностный максимум.

Анализ данных Енисейского разреза показывает, что при движении с юга на север содержание метана в поверхностных водах уменьшается, вплоть до равновесных с воздухом. Содержание метана в подповерхностном максимуме в средней части разреза растет, достигая пятикратного превышения над содержанием метана в речных водах. Это свидетельствует о том, что метан не является пассивной примесью. Вероятнее всего, в толще воды имеются условия для микробной метан-генерации,

а в распресненных поверхностных водах идет преимущественное окисление метана. Глубинные, более соленые воды также преимущественно потребляют метан, однако с меньшей интенсивностью, чем верхние, распресненные. На многих станциях, расположенных далеко от источников пресной воды, содержание метана в поверхностных водах близко к равновесным с воздухом величинам, однако в подповерхностном максимуме содержание метана близко к содержанию в речных водах. Более детальный анализ данных по содержанию метана, с учетом солености и температуры вод на каждой из станций, позволит выявить связь с процессами смешения и трансформации вод.

Анализ содержания метана в осадках Енисейского разреза показал, что в целом не было выхода из зоны слабо восстановленных осадков, характеризующихся невысоким содержанием метана. Там осадки не являются источником метана для водной толщи. В результате содержание метана в осадках с глубиной в целом возрастает, при этом зачастую фиксируются узкие пики концентраций (превышение в 2–4 раза). Тяжелые углеводородные газы на станциях представлены в основном этиленом. Исключение представляет южная станция Енисейского разреза, где отмечено относительно высокое содержание всех углеводородных газов, включая нормальный бутан. Эти осадки пресноводны, однако содержание метана в них так же мало, как и в морских осадках [7, 8].

Заключение

Использование сенсоров метана в составе соответствующих аппаратных комплексов для непрерывного мониторинга поверхностных вод позволяет осуществлять количественный контроль концентраций метана. Анализ массивов данных, полученных в ходе исследований в Карском море, предоставляет возможность оценки эмиссии метана из водной среды в атмосферу. Основные зоны эмиссии метана включают эстуарии Енисея и Оби, а также прилегающие мелководные участки. По мере удаления от этих зон интенсивность эмиссии метана значительно снижается, и на глубине более 100 м она становится практически незначимой. С применением аппаратных средств донного автономного океанологического

комплекса были проведены исследования эволюции донных осадков в пределах Баренцево-Карского шельфа, охватывающие несколько горизонтов позднечетвертичного возраста. В различных зонах Карского моря были выполнены измерения вертикального распределения метана, что позволило выявить структурные особенности, включая наличие приповерхностных максимумов концентрации метана. Обработка полученных научных данных, касающихся метановых проявлений в водной толще и донных отложениях, помимо самостоятельной научной значимости способствует определению направлений совершенствования технических средств и методов поиска залежей углеводородов на морском дне арктического бассейна. Дальнейшие исследования процессов, происходящих в толще морской воды, будут создавать предпосылки для научных изысканий, направленных на изучение эмиссии метана в атмосферу из гидросферы.

Список литературы

1. Зеленько А.А., Вильфанд Р.М., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цирульников М.Д., Свиренко П.И. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей Мирового океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 4. С. 501–513. DOI: 10.7868/S0002351516040143.
2. Лебедев К.В., Филошкин Б.Н., Щепеткин А.Ф. Модельное исследование межгодовой изменчивости водообмена Полярных морей с Атлантическим и Северным Ледовитым океанами // Океанологические исследования. 2020. Т. 48, № 2. С. 34–50.
3. Амбросимов А.К., Ковалев Г.А. Гидрология и течения Карского моря в весенне-летний период 2019 г. (43-й рейс НИС «Академик Николай Страхов») // Экологические системы и приборы. 2020. № 1. С. 49–54.
4. Шрейдер Ал.А., Шрейдер А.А., Клюев М.С., Евсеев Е.И. Высокорастворимая геоакустическая система для геолого-археологического изучения дна // Процессы в геосредах. 2016. № 2. С. 156–161.
5. Степанова С.В., Недоспасов А.А. Особенности гидрофизического и гидрохимического режимов залива Благополучия (Новая Земля) // Океанология. 2017. Т. 57, № 1. С. 75–85.
6. Serebryany A., Khimchenko E., Popov O., Denisov D., Kenigsberger G. Internal Waves Study on Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using Spatial Antenna of Line Temperature Sensors // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8, Is. 11. P. 883.
7. Буренков В.И., Шеберстов С.В., Артемьев В.А., Такаев В.Р. Оценка погрешности измерения показателя ослабления света морской водой в мутных водах арктических морей // Светотехника. 2019. № 2. С. 55–60.
8. Karagianni Evangelia A. Electromagnetic Waves under Sea: Bow-Tie Antenna Design for Wi-Fi Underwater Communications // Progress In Electromagnetics Research. Moscow. 2015. Vol. 41. P. 189–198.