

А.И. ОБЖИРОВ, Ю.А. ТЕЛЕГИН, Р.Б. ШАКИРОВ, Н.С. СЫРБУ, В.Ю. КАЛГИН, Н.С. ЛИ,
А.Л. ПОНОМАРЁВА, А.И. ЕСКОВА

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия,
obzhirov@poi.dvo.ru, telegin@poi.dvo.ru, ren@poi.dvo.ru, syrbu@poi.dvo.ru, kalgin.vy@poi.dvo.ru,
lee@poi.dvo.ru, ponomareva.al@poi.dvo.ru, eskova.ai@poi.dvo.ru

ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАК МЕТОД ПОИСКА ГАЗОГИДРАТОВ И ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Объясняется широкий круг использования газогеохимических методов в науке, практике и для решения различных геологических и инженерных задач. Разработанный метод представляет комплекс технических решений извлечения газа из воды и донных осадков и определения в газе на газовом хроматографе следующих компонентов: метана (CH_4), его предельных и непредельных гомологов ($\text{C}_2\text{--C}_5$), углекислого газа (CO_2), водорода (H_2), гелия (He), кислорода (O_2) и азота (N_2). Показано, что углеводородные газы и водород служат индикаторами возможного наличия залежей углеводородов, углекислый газ — наличия интрузивной деятельности, гелий показывает подток газа из глубоких горизонтов и мантии. Выявлено, что различные физико-химические обстановки влияют на образование аутигенных и рудных минералов. На основе данных газогеохимических исследований рассчитано количество газогидратов в верхнем слое газогидратной толщи. Показана возможность использования газов для выяснения стратификационных процессов в море. Отмечена важная роль комплексирования газогеохимического метода с другими методами для поиска месторождений нефти и газа, картирования зон разломов, определения их сейсмотектонической активности и других геологических исследований.

Ключевые слова: природные газы, метан, Охотское море, донные отложения, разломы, морская вода.

A.I. OBZHIROV, Yu.A. TELEGIN, R.B. SHAKIROV, N.S. SYRBU, V.Yu. KALGIN, N.S. LEE,
A.L. PONOMAREVA, A.I. ES'KOVA

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
690041, Vladivostok, ul. Baltiiskaya, 43, Russia,
obzhirov@poi.dvo.ru, telegin@poi.dvo.ru, ren@poi.dvo.ru, syrbu@poi.dvo.ru, kalgin.vy@poi.dvo.ru,
lee@poi.dvo.ru, ponomareva.al@poi.dvo.ru, eskova.ai@poi.dvo.ru

GAS GEOCHEMICAL RESEARCH AS A METHOD OF EXPLORING GAS HYDRATES AND DETERMINING HYDROCARBON DEPOSITS

A wide range of applications of gas geochemical investigation in science and practice and for solving various geological and engineering problems are considered in the paper. The method we developed represents a package of technical solutions for extracting gas from water and sediments, and for determining the following gas components on a gas chromatograph: methane (CH_4), heavy hydrocarbon gases ($\text{C}_2\text{--C}_5$), carbon dioxide (CO_2), hydrogen (H_2), helium (He), oxygen (O_2) and nitrogen (N_2). It is shown that hydrocarbon gases and hydrogen are an indicator of the possible presence of hydrocarbon deposits, carbon dioxide — of the presence of intrusive activity, and helium shows the gas flow from deep horizons and the mantle. Based on the data of gas geochemical studies, the amount of gas hydrates in the upper layer of the gas hydrate strata was calculated. The possibility of using gases to clarify the stratification processes in the sea is shown. The important role of combining the gas geochemical method with other methods for searching for oil and gas fields, mapping fault zones, determining their seismic-tectonic activity and other geological studies is noted.

Keywords: natural gases, methane, Sea of Okhotsk, marine sediments, faults, seawater.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных остается вопрос повышения эффективности решения геологических и инженерных задач — прогноза залежей минерального сырья, картирования зон разломов, оценки их сейс-

© 2022 Обжиров А.И., Телегин Ю.А., Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Калгин В.Ю., Ли Н.С.,
Пономарёва А.Л., Еськова А.И.

мотектонической активности, изучения взаимосвязи различных геологических и газогеохимических процессов, в том числе современных, которые дают основание для понимания условий формирования залежей углеводородов, газогидратов, нарушения геологических структур, поверхности дна, процесса сейсмотектонической активизации, выяснения природной составляющей экологического загрязнения окружающей среды. Эффективность прогноза минеральных ресурсов, решения геологических и инженерных задач повышается при выполнении комплекса геолого-геофизических, акустических, газогеохимических, стратиграфических, геоструктурных, сейсмотектонических, океанологических и других направлений исследований, что позволяет понять пространственно-генетическую связь между различными процессами на Земле.

Основная цель данной работы — выделить из этого комплекса газогеохимические исследования, показать их методы, взаимосвязи с другими методами исследований, которые используются для решения научных, геологических, инженерных, экологических, социальных и других задач. Газогеохимические исследования взаимосвязаны и сочетаются со стандартными геологическими подходами — структурными, литолого-фациальными, тектоническими, стратиграфическими, сейсмотектоническими, геофизическими и др. Проводится увязка локальных зон с флюидной и газовой разгрузкой, с контролирующими структурами первого и второго порядков, включая региональные линеаменты. Также рассматривается участие газовой составляющей в повышении проницаемости зон разломов и формировании газовой «подушки» между стенками разломов. Она создает смазку для движения блоков пород относительно друг друга, что способствует их резкому перемещению в вертикальных и горизонтальных направлениях, в результате которого возникают землетрясения, оползни и различные другие, в том числе катастрофические, нарушения.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработка и развитие методов газогеохимических исследований основаны на результатах многочисленных международных и российских экспедиционных исследований в дальневосточных морях. Наиболее детально изучены Охотское и Японское моря [1–3], где обнаружено более 700 потоков газа из недр в донные осадки, воду и частично в атмосферу и открыто более 20 площадей с газогидратами в донных осадках (рис. 1).

Газогеохимический метод представляет собой сочетание методических приемов натурных, лабораторных и теоретических исследований. В его основе лежит технология представительного отбора газовых проб из различных сред — гидросферы, литосферы, атмосферы, газохроматографический анализ и применение комплекса критериев анализа фоновых и аномальных газогеохимических полей, использование данных о поведении стабильных изотопов углерода метана и других углеродсодержащих газов в очагах их разгрузки.

В рамках разработки технологии поиска нефтегазовых и газогидратных залежей и решения различных геологических и инженерных задач в морских условиях [4–6] сконструированы модифицированные геологические грунтозаборные трубки на базе уникальной технологии. Данные трубки способны отбирать керн осадка до поддонной глубины 8–10 м с максимальной сохранностью керна донных осадков. Такие геологические трубки способствуют корректному изучению газоносности и гидратоносности интервалов донных осадков.

Водная толща изучается СТД-зондированием (измерение солёности, температуры в толще воды от поверхности до дна и давления на горизонте измерений). Пробы воды отбираются синхронно с СТД-зондированием батометрами, закрепленными на зонде, на поверхности, на различных глубинах и в придонном слое воды. Определяются температура, солёность и газовый состав отдельных слоев воды, в которых изменялись первые два параметра. Комплекс данных используется для понимания характера и масштаба поступления метана из донных отложений в воду, причем изменение его концентраций в отдельных слоях водной толщи характеризует, в том числе, возможное их перемещение из других регионов. Повышенные концентрации метана, тяжелых углеводородов относительно фоновых значений в придонных слоях воды определяют миграцию данных веществ из нефтегазосодержащих и других источников, что позволяет использовать метан и тяжелые углеводороды как индикаторы для поиска нефтегазовых залежей и газогидратов, а также для решения инженерно-геологических задач. В толще воды аномалии содержания метана обычно формируются благодаря стратификации из-за внедрения слоев воды с шельфа на склон и ложе Охотского моря (рис. 2, 3). Эти слои хорошо фиксируются по составу газа, так как они насыщаются им в районе расположения его источника, например, на шельфе, и несут этот газ в другие районы моря, где его источника нет. Температура и

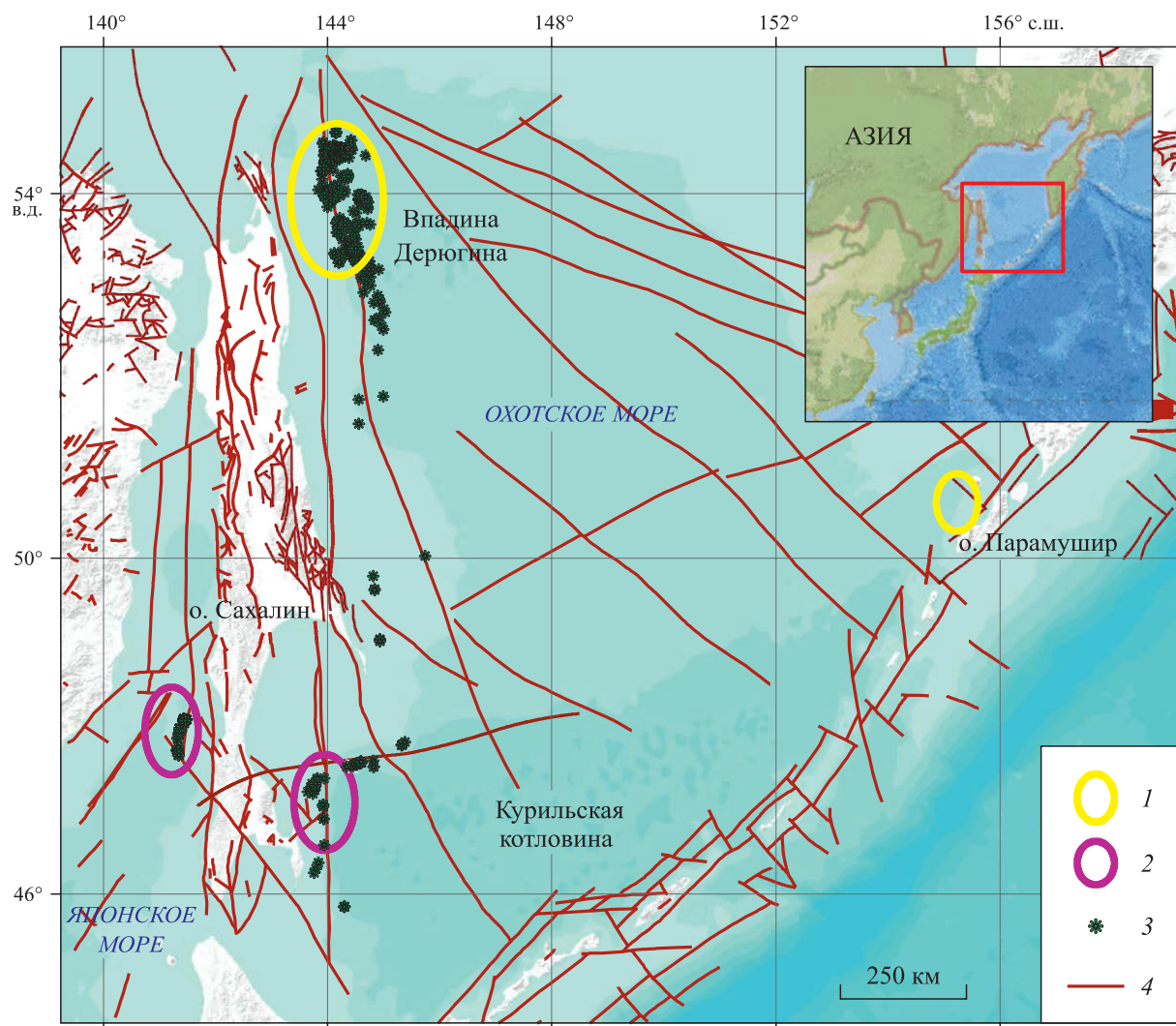


Рис. 1. Районы открытых газогидратов в Охотском и Японском морях с геологическими характеристиками. 1 — провинции газогидратов, открытые ранее; 2 — новые провинции газогидратов; 3 — проявления углеводородных газов; 4 — зоны разломов.

соленость слоев тоже меняются, но газовый состав более информативен для выяснения стратификационных процессов в море. Аномальные концентрации водорода, гелия, углекислого газа в придонном слое воды, часто при наличии метана, трассируют зоны разломов, характеризуют их сейсмическую активизацию. При этом идет синхронное увеличение сейсмической активности и рост выделения газа с возрастанием концентраций метана с некоторым изменением по фазе (возможно, существует определенная инерция выделения газа после окончания сейсмического эпизода) [7]. Также потоки газа с аномальными концентрациями метана, углекислого газа, достигая поверхности моря, поступают в атмосферу, создают парниковый эффект, что влияет на процессы глобального изменения (потепления) климата.

Из проб донных осадков и слоев воды газ извлекается с использованием установки для вакуумной дегазации и равновесным расчетом методом Head Space. Состав извлеченного газа из воды и донных осадков анализируется на газовых хроматографах. Определяются N_2 , O_2 , CO_2 , H_2 , He , CH_4 и тяжелые углеводородные газы (C_2-C_4), иногда ртуть. Газогеохимические измерения выполняются на борту судна. В процессе исследований методика извлечения и анализа газа постоянно совершенствуется.

Для расчета зоны стабильности газогидратов используются термодинамическое равновесие и взаимосвязь между давлением диссоциации гидрата и температурой в пресной и морской воде для широкой области температур (0–25 °C) и соленостей (0–70 ‰). Широкий диапазон параметров об-

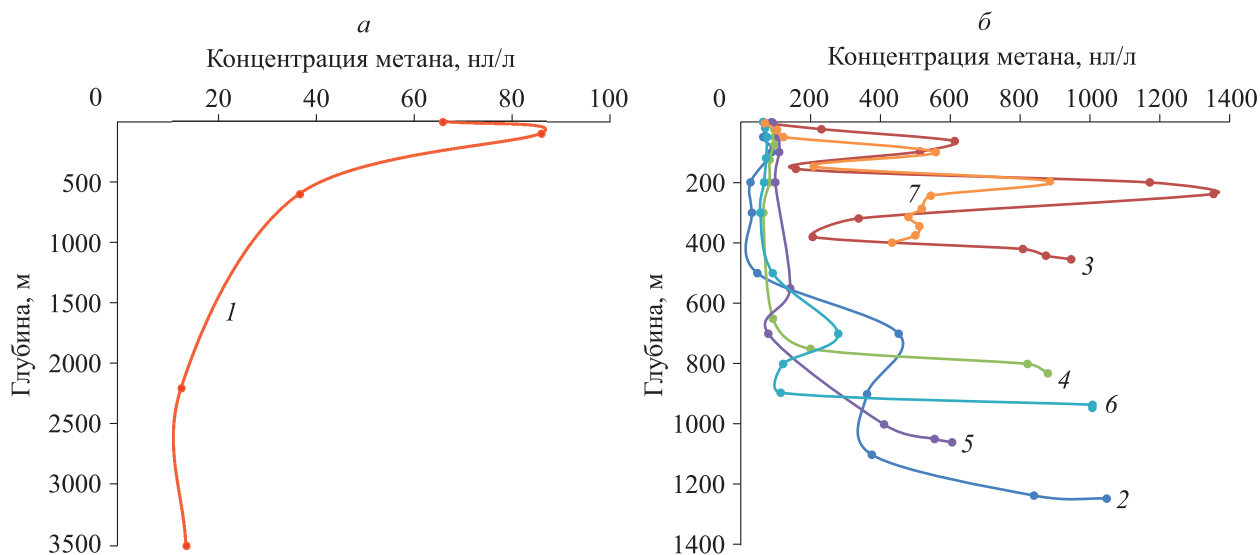


Рис. 2. Распределение метана в водной толще.

Распределение: *a* — фоновое, *б* — с аномалиями на различных горизонтах. *1* — фоновое содержание для Охотского моря. Станции: 2 — LV47-19, 2009 г.; 3 — LV59-12, 2012 г.; 4 — LV36-18, 2005 г.; 5 — OP52-20, 2017 г.; 6 — LV31-20, 2003 г.; 7 — Ge99-18, 1999 г.

условлен необходимостью геофизического моделирования для определения верхней границы зоны стабильности газогидратов, которая, например, в Охотском море располагается на минимальной глубине 350–400 м ниже поверхности моря при температуре придонной воды около 2,5 °С. Зона стабильности газогидрата зависит от термодинамической константы — увеличение температуры должно компенсироваться повышением давления, т. е. образование газогидрата будет проходить на большей поддонной глубине. Результаты термодинамического моделирования для гидрата метана (давление диссоциации и растворимость) обобщаются в форме эмпирических уравнений, которые в дальнейшем применяются для моделирования искусственной диссоциации подводных газогидратов и использования газогидрата как альтернативного вида энергетического сырья и добычи углеводородов. Сейсмическое профилирование донных осадков на северо-восточном сахалинском склоне показывает, что BSR (Bottom Simulating Reflection, отражение подобно дну) в Охотском море не превышает 150–200 м. Это связано с тем, что скоростные характеристики прохождения сейсмических волн в газогидратах почти в два раза выше, чем в осадках, а граница отражает толщу стабильности газогидратов по рав-

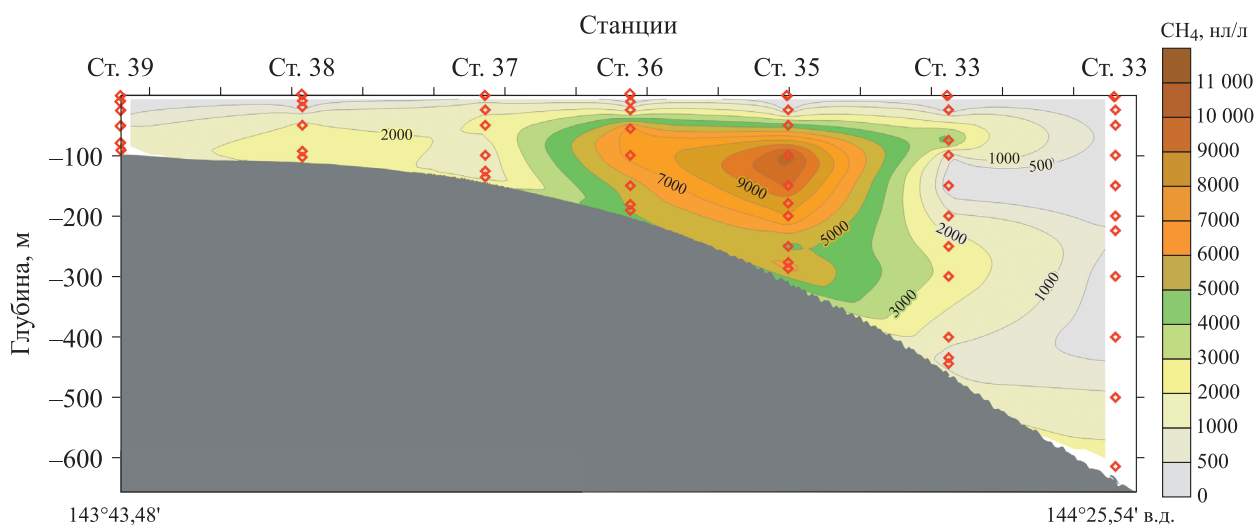


Рис. 3. Широтный газогеохимический разрез, выполненный в рейсе LV56, 2011 г.

ному давлению в сочетании с температурой. В данном случае эта граница пересекает слой, сохраняя давление, которое зависит от глубины, т. е. проходит параллельно поверхности дна. Потоки газа с высокими концентрациями метана со дна, поступающие в водную толщу, соответствуют аномальным концентрациям метана в донных отложениях в районе потоков. При фоновых значениях 0,001 мл/л концентрации на станциях, содержащих газогидраты, доходят до 200 мл/л. При этом рассчитано, что количество газогидратов в верхнем слое газогидратной толщи (5–7 м от поверхности дна) составляет около 20 %.

Для обнаружения проявлений потоков газа, который обычно мигрирует из недр к поверхности по зонам разломов, пронизывая толщи изверженных и осадочных пород и проникая в толщу вод акваторий, используются гидроакустические наблюдения с помощью многолучевого эхолотирования на разных частотах. Гидроакустическое зондирование позволяет обнаружить потоки пузырей газа, которые проявляются в воде в виде вертикальных «столбов». В том числе благодаря рассеиванию акустических волн пузырями газа детально изучаются характеристики дна района исследований. По результатам составляется карта специфических для газовых потоков морфоструктур, определяется количество потоков пузырей газа (метана) и рассчитывается величина эмиссии метана с газогидратных участков. Первый поток газа с высоким содержанием метана, обнаруженный в ходе экспедиции на судне «Морской геофизик» в 1978 г., впоследствии профессором Э. Зюссом (директором Института Геомар, Германия) был назван «факелом Обжирова».

МЕЖДУНАРОДНЫЙ МАСШТАБ ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЯХ

Лаборатория газогеохимии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН) изучает распределение природных газов в воде и донных осадках дальневосточных морей с 1977 г., а с 1998 г. по настоящее время — совместно с коллегами из Германии, Республики Корея, Японии, Вьетнама и других стран. Концентрации метана, тяжелых углеводородных газов (C_2 – C_4), углекислого газа, водорода, гелия, а также их соотношения используются как индикаторы для следующих целей: поиска месторождений нефти и газа; картирования зон разломов, выявления их глубины проникновения и сейсмотектонической активности, прогноза землетрясений и цунами; поиска газогидратов в комплексе с геофизическими и гидроакустическими исследованиями; изучения формирования морфоструктур в донных осадках, которые образуются в районе выходов пузырей газа (метана) из донных отложений в воду. Поверхность дна нарушается, происходят оползни, провалы, бугры. В районе аномальных концентраций метана в придонной воде и в донных отложениях формируется оазис жизни биоты — микробного сообщества, планктона, бентосных организмов, крабов, рыбы. Это связано с ростом метанокисляющих бактерий, которые создают богатую пищу [4, 8–10].

Условия формирования и разрушения газогидратов, возможности моделирования этих процессов изучались в морских международных экспедициях на акваториях Охотского и Японского морей в течение многих лет в рамках международных проектов: Российско-Германского КОМЕКС (1998–2004 гг.), ХАОС (2003, 2005 и 2006 гг.), САХАЛИН (2007–2012, 2013–2015 гг.), Российско-Китайского (2016–2017 гг.). В результате выполненных исследований были обнаружены многочисленные потоки пузырей метана из донных отложений в воду и участки дна, содержащие газовые гидраты в донных осадках [11–13]. Районы залежей газогидратов в осадках в интервале глубин 1–4 м от поверхности дна выявлены в Охотском море в экспедиции рейса LV36 в 2005 г. На девяти станциях отобраны образцы газогидратов [14]. На станциях в районах гидратоносных структур были обнаружены карбонатные конкреции и ракушки. Газогидраты на этих структурах залегают, возможно, на более глубоких горизонтах, глубже 4 м ниже поверхности дна. На эхограммах в районе этих структур зафиксированы потоки пузырьков газа (метана), которые подобны наблюдавшимся ранее.

На структурах, где были открыты потоки пузырей газа и газогидраты, основное внимание было направлено на изучение геологического строения зон разломов, причин и источников возникновения потоков пузырей метана из донных отложений в воду и из воды в атмосферу, поиску и прогнозу местонахождения нефтегазовых залежей. В результате выполненных исследований обнаружены сейсмотектонически активные зоны в дальневосточных морях с разломными участками, по которым газ мигрирует из мантии (из нефтегазосодержащих слоев) к поверхности донных осадков и из них — в воду и атмосферу. В этих зонах формируются провалы, покмарки, оползни. На поверхности донных

осадков образуются газогидраты, при этом возникают деформации — ямы, бугры с глубиной и высотой относительно поверхности 10–20 м и больше. В этих районах в придонном слое воды и в донных осадках отмечаются аномальные концентрации CH_4 , $\text{C}_2\text{—C}_4$, CO_2 , H_2 и He [15–17].

В придонном слое воды, в районе потоков пузырей газа с высоким содержанием метана, концентрация метана достигала 1600–5000 нл/л, что превышает фон в 100 раз и более. При приближении к поверхности концентрация газа в воде снижалась почти до фоновой (60 нл/л), и на поверхности она увеличивалась до 120–150 нл/л. В районе исследований был обнаружен гидрологический феномен. На глубине 150–300 м присутствовал промежуточный слой воды с очень низкой температурой $-0,5\div-1,8^\circ\text{C}$ и очень высокой аномалией метана. Концентрация газа в этом слое достигала 10 000 нл/л, что выше фона в 1000 раз.

При этом нарушается монолитность осадков и пород, газ проникает в зоны разломов, в трещины, расширяет их, создает газовую «подушку», и блоки и слои смещаются по трещинам относительно друг друга. В результате происходят землетрясения, оползни и другие катастрофические явления. Наиболее опасные зоны с потоками газа, газогидратами расположены в прибрежных сейсмотектонически активных районах перехода шельфа в склон и на прибрежных уступах.

ИСТОЧНИКИ МЕТАНА, ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТОВ

Усилиями всех участников многочисленных российских и международных экспедиций в Охотском и Японском морях был разработан комплексный метод поиска и изучения газогидратов [18]. Его основу составляют геологические, геофизические, газогеохимические, гидроакустические, минералогическо-стратиграфические, океанологические, морфоструктурные исследования. Этот комплекс позволяет обнаружить выходы пузырей газа из донных отложений в воду, аномальные поля природных газов, площади газогидратов и обуславливает возможность объяснить их формирование и взаимосвязи. В районе сейсмотектонически активных разломов потоки газа с высоким содержанием метана из донных отложений в воду усиливаются. При этом его пузыри создают звукорассеивающие гидроакустические аномалии на эхограмме эхолота в виде вертикальных тел. Кроме того, высокочастотная сейсмическая съемка позволяет получить разрез верхней толщи осадочного слоя, который на участках газового просачивания показывает газовые каналы и отражает горизонт подошвы газогидратсодержащих пород, маркирующий основание зоны стабильности газовых гидратов [19, 20].

В процессе экспедиционных исследований, а также на международных конференциях часто возникала дискуссия с иностранными коллегами об источнике метана. Этот вопрос очень принципиален. Есть три основных источника метана, обнаруженного в донных осадках и воде моря. Они связаны с соответствующими процессами образования данного газа: микробным, термогенным и мантийным. Иностранные коллеги и некоторые российские ученые настаивают, что источник метана, который встречается в донных осадках, воде и образует газогидраты, возникает благодаря деятельности метанотрофных бактерий в процессе использования ими для жизнедеятельности органического вещества. Многие российские ученые, в том числе специалисты ТОИ ДВО РАН, считают, что метан в потоках газа образован термогенным путем, т. е. при переработке органического вещества при высоких температуре, давлении и при участии катализаторов — глинистых, железистых и других минералов, которые в бескислородной среде представляют собой источники залежей нефти и газа [21]. Третьим источником метана может быть мантийный процесс поступления водорода и соединения его с углеродом в недрах Земли. Иностранные ученые основывают свое мнение о микробном источнике в большей степени на изучении изотопного соотношения $\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Для микробного метана это соотношение равно $-70\div-100\text{‰}$, т. е. присутствует в углероде больше легкого изотопа ^{12}C . Это отношение для термогенного источника метана составляет $-35\div-45\text{‰}$, для мантийного источника $+20\div-10\text{‰}$, но в процессе исследований было доказано [22, 23], что в районе потоков метана метанотрофные микробы активизируются, используют термогенный и мантийный метан в процессе жизнедеятельности и увеличивают в этих источниках количество более легкого изотопа ^{12}C . Поэтому кроме изотопного отношения углерода метана для выяснения его источника следует использовать геологические, геофизические, гидроакустические и другие характеристики, чтобы правильно определить источник газа. Это важно для оценки возможного количества метана, газогидратов, залежей углеводородов в регионе, так как если метан только микробный, залежь будет небольшой.

Результаты многолетних газогеохимических исследований показывают усиление активности метановых эманаций с 1990-х гг. [19]. Первый признак этого — увеличение содержания метана в при-

донном слое воды. В 1984–1988 гг. в районах Сахалинского шельфа и акватории Охотского моря фоновые концентрации метана в воде составляли 20–30 нл/л, а аномальные (обычно ассоциирующие с нефтяными и газовыми месторождениями) — около 3000–4000 нл/л. К 1990 г. фоновые концентрации увеличились, соответственно, до 70–80 нл/л, а аномальные — до 10 000 нл/л. Концентрации метана скачкообразно возросли во время Нефтегорского (1995 г.) и Углегорского (2000 г.) землетрясений. Подобное увеличение содержаний газа в десятки раз наблюдалось в рейсе научно-исследовательской станции «Профессор Богоров» в районе о. Итуруп непосредственно после Кунаширского землетрясения (1994 г.). На сахалинском шельфе аномальные концентрации метана возросли в 10–1000 раз (500–15 000 нл/л). В пределах участка разгрузки концентрации метана превышали 20 000 нл/л, а вблизи них — 1000–3000 нл/л. Содержание метана в донных осадках составило 5–10 мл/л, а в слоях осадков, где содержатся газогидраты, количество метана достигает 200 мл/л. Это означает, что метан проникает в толщу воды через осадок из зоны разлома.

В экспедиции 2011 г. в верхнем слое донных осадков обнаружена новая площадь газогидратов. В этом районе выполнен широтный газогеохимический разрез, состоящий из семи станций (см. рис. 3). На нем обнаружен промежуточный слой воды с низкой температурой ($-0,5 \div -1,5$ °C) и сверхвысоким содержанием метана (10 000–11 000 нл/л), превышающим фон в 100 раз и более. Важно правильно оценивать эти данные в целях использования их для поиска газогидратов, нефтегазовых залежей, оценки экологического влияния аномалий метана на биоценоз донных осадков, водную толщу и для расчета объема поступления метана в атмосферу и его участия в процессе глобального изменения (потепления) климата.

Таким образом, согласно выполненным исследованиям в Охотском море, следует сделать вывод, что основной источник метана в данном регионе — это термогенный метан нефтегазосодержащих слоев нефтегазовых месторождений. Метан по зонам разломов поступает из недр к поверхности, и в зоне термодинамической стабильности (в районе метановых потоков в донных осадках) образуются газогидраты. Изотопный состав углерода метана изменяется (облегчается) в связи с его фракционированием в процессе микробной переработки термогенного метана — окисления и вторичного образования в подповерхностных слоях донных осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Природные газы пронизывают Землю и участвуют в геологических процессах на Земле. Углеводородные газы (CH_4 , $\text{C}_2\text{—C}_4$) образуют в донных осадках морей нефтегазовые залежи, газогидраты, создают восстановительную среду и способствуют возникновению различных аутигенных и рудных минералов, в том числе сульфидов, карбонатов. Углекислый газ помогает образованию окислительной среды, а водород и гелий играют роль индикаторов глубинной миграции газа по зонам разломов и активизации сейсмотектонических явлений. Состав газовых компонентов и их количество используются для решения геологических и инженерных задач.

В результате выполненных газогеохимических исследований в дальневосточных морях в ТОИ ДВО РАН сформирована школа фундаментальных и прикладных газогеохимических исследований на суше и на море, которая активно продолжает изучение газогеохимических полей в литосфере, гидросфере и приземной части атмосферы в настоящее время. Фундаментальность данных исследований состоит в изучении закономерностей распределения природных газов в этих средах, их взаимодействия и взаимосвязи. Практическое направление связано с использованием природных газов как индикаторов: для поиска и прогноза газогидратов, нефтегазовых месторождений, картирования зон разломов, прогноза их сейсмотектонической активизации и, как следствие, землетрясений, цунами, оползней и других геологических и инженерных проявлений. Важным являются обнаружение источников поступления парниковых газов (CH_4 , CO_2) в атмосферу и оценка их участия в процессах глобального изменения (потепления) климата, а также поиск альтернативных источников углеводородов (например, газогидратов), объяснение появления в морях оазисов развития биоты в районе аномальных полей метана и углеводородов, оценка загрязнения окружающей среды и решение различных социальных проблем, связанных с распределением природных и антропогенных газов в различных социальных средах.

Работа выполнена в рамках проектов НИР (AAAA–A19–119122090009–2 и 121021500055–0) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (20–55–500005ЯФ–а и 20–55–12010) и гранта Президента МК–357.2021.1.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Обжиров А.И.** Геологические особенности распределения природных газов на угольных месторождениях Дальнего Востока. — М.: Наука, 1979. — 71 с.
2. **Обжиров А.И.** Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. — М.: Наука, 1993. — 139 с.
3. **Шакиров Р.Б.** Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии. — Москва: ГЕОС, 2018. — 341 с.
4. **Обжиров А.И., Астахова Н.В., Липкина М.И., Верещагина О.Ф., Мишукова Г.И., Сорочинская А.В., Югай И.Г.** Газогеохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря. — Владивосток: Дальнаука, 1999. — 184 с.
5. **Гресов А.И., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б.** Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока России и перспективы ее промышленного освоения. Т. 1: Углеметановые бассейны Приморья, Сахалина и Хабаровского края. — Владивосток: Дальнаука, 2009. — 246 с.
6. **Nikolaeva N.A., Derkachev A.N., Obzhairov A.I.** Lithological, mineral and geochemical indicators of methane emanations and associated gas hydrates in the sediments of NE Sakhalin Slope (Okhotsk Sea) // *Advances in Geosciences*. — 2010. — Vol. 20: Solid Earth (SE). — P. 137–150.
7. **Кулинич Р.Г., Бессонова Е.А., Обжиров А.И.** О корреляции метановых эманаций со структурой фундамента северо-восточного шельфа и склона о. Сахалин и сейсмической активностью региона // *Дальневосточные моря России*. — М.: Наука, 2007. — Кн. 3. — С. 277–285.
8. **Обжиров А.И., Казанский Б.А., Мельниченко Ю.И.** Эффект звукорассеивания придонной воды в краевых частях Охотского моря // *Тихоокеанская геология*. — 1989. — № 2. — С. 119–121.
9. **Карпов И.К.** Физико-химическое моделирование в геохимии. — Новосибирск: Наука, 1981. — 246 с.
10. **Трошин Ю.П., Гребенщикова В.И., Антонов А.Ю.** Летучие компоненты в биотитах и металлогеническая специализация интрузий // *Минералогические критерии оценки рудоносности*. — Л.: Наука, 1981. — С. 73–83.
11. **Matveeva T., Shoji H., Soloviev V., Wallmann K., Obzhairov A., Salomatin A., Biebow N., Poort J.** Geochemistry of gas hydrate accumulation offshore NE Sakhalin Island (the Sea of Okhotsk): Results from the KOMEX-2002 cruise // *Geo-Marine Letters*. — 2003. — Vol. 23, N 3–4. — P. 278–288.
12. **Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А.** Неотектоника и тектонические напряжения Сахалина // *Геодинамика и тектонофизика*. — 2017. — Т. 8, № 1. — С. 182–202.
13. **Соловьёв В.А., Гинзбург Г.Д., Обжиров А.И., Дуглас В.К.** Газовые гидраты Охотского моря // *Отечественная геология*. — 1994. — № 2. — С. 190–197.
14. **Shoji H., Minami H., Hachikubo A., Sakagami H., Hyakutake K., Soloviev V., Matveeva T., Mazurenko L., Kaulio V., Gladysch V., Logvina E., Obzhairov A., Baranov B., Khlystov O., Biebow N., Poort J., Jin Y.K., Kim Y.** Hydrate-Bearing Structures in the Sea of Okhotsk // *EOS: transactions, American Geophysical Union*. — 2005. — Vol. 86, N 2. — P. 1.
15. **Hachikubo A., Sakagami H., Minami H., Nunokawa Y., Shoji H., Krylov A., Matveeva T., Jin Y.K., Obzhairov A.** Isotopic composition of gas hydrates in subsurface sediments from offshore Sakhalin Island, Sea of Okhotsk // *Geo-Marine Letters*. — 2010. — Vol. 30, N 3–4. — P. 313–319.
16. **Minami H., Krylov A.A., Sakagami H., Hachikubo A., Hyakutake K., Tomaru H., Kida M., Takahashi N., Shoji H., Matveeva T.V., Jin Y.K., Obzhairov A.I., Poort J.** Geochemistry of pore waters from gas hydrate-bearing sediment cores retrieved at the Sea of Okhotsk // *Journ. of Geography (Chigaku Zasshi)*. — 2009. — Vol. 118, N 1. — P. 194–206.
17. **Jin Y.K., Kim Y.-G., Baranov B., Shoji H., Obzhairov A.** Distribution and expression of gas seeps in a gas hydrate province of the Northeastern Sakhalin continental slope, Sea of Okhotsk // *Marine and Petroleum Geology*. — 2011. — Vol. 28, N 10. — P. 1844–1855.
18. **Обжиров А.И., Соснин В.А., Салюк А.Н., Верещагина О.Ф., Лучшева Л.Н., Мишукова Г.И., Астахова Н.В., Сорочинская А.В., Захарков С.П., Селина М.С., Шакиров Р.Б., Дружинин В.В., Ли Б.И., Плотников В.В., Мишуков В.Ф., Свининников А.И., Штрайхерт Е.А., Терехова В.Е., Зюсс Э., Бибоу Н., Ламмерс С., Винклер Ж., Ниммергут А.** Мониторинг метана в Охотском море. — Владивосток: Дальнаука, 2002. — 250 с.
19. **Gaedicke C., Baranov B.V., Obzhairov A.I., Lelikov E.P., Belykh I.N., Basov E.I.** Seismic stratigraphy, BSR distribution, and venting of methane-rich fluids West off Paramushir and Onekotan Islands, Northern Kurils // *Marine Geology*. — 1997. — Vol. 136, N 3–4. — P. 259–276.
20. **Obzhairov A., Shakirov R., Salyuk A., Suess E., Biebow N., Salomatin A.** Relations between methane venting, geological structure and seismo-tectonics in the Okhotsk Sea // *Geo-Marine Letters*. — 2004. — Vol. 24. — P. 135–139.
21. **Обжиров А.И., Телегин Ю.А.** Метан нефтегазосодержащих пород — основной источник формирования газогидратов в Охотском море // *Газохимия*. — 2011. — № 1. — С. 44–49.
22. **Леин А.Ю.** Биохимический цикл метана в океане. — М.: Наука, 2009. — 576 с.
23. **Shoji H., Jin Y.K., Obzhairov A.** Operation Report of Sakhalin slope Gas Hydrate Project 2007, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 43. — Kitami: Kitami Institute of Technology, New Energy Resources Research Center, 2008. — 39 p.

Поступила в редакцию 03.09.2020

После доработки 03.03.2021

Принята к публикации 13.10.2021