

Геологические условия формирования газогеохимических полей, в том числе гелия и водорода, в воде и осадках привьетнамской части Южно-Китайского моря

Н.С. Сырбу^{1*}, Д.Х. Кыонг², Т.С. Якимов¹, А.О. Холмогоров¹, Ю.А. Телегин¹, У. Тсуногай³

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

²Институт морской геологии и геофизики Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам

³Университет Нагоя, Нагоя, Япония

В статье представлены результаты комплексной совместной Российско-Вьетнамской геолого-геофизической и океанографической экспедиции в Южно-Китайском море (НИС «Академик М.А. Лаврентьев», рейс 88, 2019), а также связанных с ней совместных Российско-Вьетнамских морских и сухопутных исследований в районе северного и южного Вьетнама по серии локальных грантов Дальневосточного отделения РАН (ДВО РАН) – Вьетнамская академия наук и технологий (ВАНТ). Организаторами морской экспедиции являются Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева (ТОИ ДВО РАН) и Институт морской геологии и геофизики ВАНТ. По сравнению с Японским и Охотским морями можно отметить, что зоны активной дегазации дна на привьетнамском шельфе и склоне имеют локальный характер распространения, хотя интенсивность газогеохимических аномалий в них сопоставима с аналогичными зонами в Дальневосточных морях. В толще воды Южно-Китайского моря впервые найдены аномальные поля метана (до 5000 нл/л), которые сравнимы с аномалиями на нефтегазоносном шельфе и газогидратоносном склоне о-ва Сахалин. В южной части острова Катба (залив Тонкин) впервые обнаружены метаморфизованные осадочные и вулканические породы, что говорит о внедрении эндогенного тела в осадочную толщу и ее дальнейшее преобразование. В связи с открытием в 2020 г. крупного газового месторождения Кен Бау на южном окончании осадочного бассейна Красной реки был подтвержден прогноз ученых ТОИ ДВО РАН о наличии значительных запасов углеводородов в этом районе.

Работы выполнены в рамках совместной Российско-Вьетнамской лаборатории по морским геонаукам (ТОИ ДВО РАН и Институт морской геологии и геофизики ВАНТ). Экспедиция НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (88 рейс) входит в состав серии экспедиций в соответствии с Десятилетием ООН, посвященным изучению Мирового океана в интересах устойчивого развития.

Ключевые слова: водород, гелий, углеводородный потенциал, бассейн Нам Кон Сон, бассейн Фу Хань, бассейн Красной реки, Южно-Китайское море

Для цитирования: Сырбу Н.С., Кыонг Д.Х., Якимов Т.С., Холмогоров А.О., Телегин Ю.А., Тсуногай У. (2021). Геологические условия формирования газогеохимических полей, в том числе гелия и водорода, в воде и осадках привьетнамской части Южно-Китайского моря. *Георесурсы*, 23(3), с. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.16>

Введение

Южно-Китайское море является одним из ключевых в понимании геофизических, геологических, океанографических, климатических и биоресурсных процессов, происходящих в западной части Тихого океана. Его изучению посвящены работы российских, вьетнамских, немецких, французских, японских ученых, а также ряда международных научных и производственных организаций. В результате, современная геологическая структура, условия и история формирования этого бассейна, перспективы нефтегазоносности и особенности океанографии в общих чертах известны.

Несмотря на хорошую изученность мелководного шельфа, ряд важнейших вопросов, тесно связанный с природными георесурсами акватории Вьетнама, до сих пор остается слабоизученным или недостаточно разработанным.

В частности, наибольший интерес в настоящее время вызывает район осадочного бассейна Красной реки (бассейны Шон Хонг и Кионгнан), включая шельф и континентальный склон, район центрального привьетнамского шельфа и склона (бассейн Фу Хань), где были зафиксированы признаки газопроявлений и юго-западная часть Южно-Китайского моря в районе бассейна Нам Кон Сон. Эти районы характеризуются положительными признаками обнаружения углеводородных и других полезных ископаемых, их комплексное изучение даст возможность сопоставить современное состояние морского дна и толщи вод по сравнению с данными, полученными ранее, и Дальневосточными морями РФ.

В связи с интересом к углеводородным ресурсам северного Вьетнама, вопрос генезиса и закономерностей формирования фоновых и аномальных газогеохимических полей становится особо актуальным (Шакиров, 2018; Duong Quoc Hung et al., 2019). Знание газогеохимических и тектонических особенностей региона может быть использовано для прогнозирования и поисков залежей углеводородов. Для этих целей в настоящее время

* Ответственный автор: Надежда Сергеевна Сырбу
e-mail: syrbu@poi.dvo.ru

© 2021 Коллектив авторов

возобновлены комплексные геолого-геофизические экспедиции Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН (ТОИ ДВО РАН) на шельфе Вьетнама (Шакиров и др., 2020).

Взаимосвязь распределения газовых потоков и современных геодинамических процессов не вызывает сомнений (Кравцов и др., 1967). Геодинамически активные глубинные разломы являются каналами дегазации Земли, которые в условиях моря выражаются в виде газогеохимических полей с аномально повышенными концентрациями гелия, водорода, метана и других газов в толще воды и донных отложениях. Временная изменчивость газогеохимических полей отражает динамику тектонических процессов, сейсмичность (Войтов, Добровольский, 1994).

Сейсмическая активность может быть триггером газовых потоков в привьетнамском районе Южно-Китайского моря (Tuuyen et al., 2018). Фазы тектонических деформаций контрастно проявлены на островах залива Тонкин (Phi et al., 2018), где обнаружены высокие концентрации углеводородных газов, углекислого газа, гелия и водорода в подземных водах (Syrbu et al., 2020).

Целью работы является выявление основных особенностей распределения полей концентраций водорода, гелия, метана и других газовых компонентов в районе северного привьетнамского шельфа Южно-Китайского моря.

Материалы и методы

В статье представлены результаты серии комплексных Российско-Вьетнамских экспедиций в районе северного шельфа Вьетнама, включая залив Тонкин. В 2019 году состоялась первая за последние 30 лет крупная геолого-геофизическая и океанографическая экспедиция на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в исключительной экономической зоне Социалистической Республики Вьетнам (СРВ) (рис. 1). В экспедиции получены новые данные в области газогеохимии, геофизики, геомикробиологии, литологии, палеогеографии, гидрооптики, гидрологии, минералогии и другим направлениям на привьетнамском континентальном шельфе. В частности, на станциях в пределах шельфа северного Вьетнама в осадочных отложениях обнаружены газогеохимические аномалии и группы микроорганизмов, которые являются индикаторами углеводородных скоплений. Нужно отметить, что наличие углеводородных ресурсов на шельфе Вьетнама прогнозировалось учеными ТОИ ДВО РАН еще в конце 80-х годов (Кулинич, Обжиров, 1985; Обжиров, 1993).

В проведении комплексных исследований в Южно-Китайском море на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (88 рейс) приняли участие 24 научных сотрудника из ТОИ ДВО РАН и 10 ученых из Института морской геологии и геофизики Вьетнамской академии наук и технологий (ИМГТ ВАНТ), Института морских ресурсов и окружающей среды, Института океанографии и Института геологии ВАНТ, сотрудник из Центра планирования и исследования морских ресурсов МПР СРВ (Министерство природных ресурсов и окружающей среды СРВ) и сотрудник Центра мониторинга морской окружающей среды Военно-морского флота СРВ.

Интерес к поискам нефти и газа Вьетнама был обусловлен открытием в 1988 г. крупной нефтяной залежи

Рис. 1. Карта района исследований. I – районы исследований экспедиции НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 88 рейс): I – Южный полигон, бассейн Нам Кон Сон; II – Центральный полигон, бассейн Фу Хань; III – Северный полигон, бассейн Красной реки; 2 – район исследований на северном шельфе Вьетнама, залив Тонкин и острова Катба, Кото и Бать Лонг Ви; 3 – разломные зоны

в гранитоидном фундаменте месторождения Белый Тигр (Арешев и др., 1997). В дальнейшем были открыты залежи нефти на месторождениях Дракон, Рубин, Дайхунг, Золотой Лев и др. Все эти открытия связаны со структурами шельфа Южного Вьетнама. В настоящее время наибольший интерес в аспекте газогеохимических исследований вызывают осадочные бассейны Северного (бассейн Шонг Хонг, Тонкинский залив) и Центрального Вьетнама (бассейн Фу Хань), считавшиеся ранее мало перспективными в отношении поиска углеводородов.

В результате исследований в рамках совместной лаборатории ТОИ ДВО РАН – ИМГТ ВАНТ в Тонкинском заливе и осадочном бассейне Красной реки получены изотопные и газогеохимические данные, на основе которых сделаны выводы о наличии газа и конденсата в недрах бассейна Красной реки (Обжиров, 1993; Шакиров и др., 2015; Le Duc Anh et al., 2018; Duong Quoc Hung et al., 2019; Shakirov et al., 2019).

Фундаменты бассейна Шонг Хонг (Красной реки) и северной части бассейна Фу Хань имеют двухъярусное строение. Нижний ярус (кристаллический фундамент) не вскрыт на акватории и выделяется по данным геофизических исследований и на побережье. На суше докембрийские и нижнепалеозойские породы образуют массивы Шонг Хонг, Шонг Ло, Контум и др. Они сложены комплексами магматических и метаморфических пород гнейсов, амфиболитов, кварцитов, вулканитов, гранитоидов и др. (Шнип, 2012).

Исследуемые районы шельфа Северного Вьетнама находятся в зоне влияния рифта Красной реки (рис. 2), который формировался в обстановке сжатия отчасти

сдвиговых напряжений на фоне общего быстрого неотектонического поднятия территории, ставшей крупной горной страной.

В ходе морских экспедиций проведены газогеохимические исследования содержания метана, углеводородных газов и углекислого газа, гелия и водорода в глубинных, поверхностных и подповерхностных слоях водной толщи, а также в донных отложениях осадочных бассейнов Нам Кон Сон, Фу Хань и Красной реки (включая залив Тонкин).

При отборе проб воды с борта использовалась 6-позиционная система «Rosette» (США) комбинированная с CTD-зондом (Conductivity, Temperature and Depth – Проводимость, Температура и Глубина).

Зондирующий комплекс оснащался кассетой батометров системы NISKIN (6 батометров). Отбор проб воды проводился на отдельных горизонтах с учетом вертикального распределения температуры, солености и других гидрологических параметров в ходе CTD-зондирования. Для детального изучения распределения концентраций метана в водной колонке опробовались горизонты, характеризующиеся значительными градиентами океанографических параметров (температуры, солености, мутности). Отбор проб производился на шести горизонтах. Среди них, как правило, стандартными являлись 0 (поверхность), 20, 50, 200 и 600 метров. Для газохроматографического анализа воды использовался метод равновесных концентраций «HeadSpace». Для более точного и детального анализа концентраций метана и ряда его гомологов (этана, пропана, бутана) в морской воде также параллельно производился отбор проб для получения газовой фазы методом вакуумной дегазации.

Отбор проб донных осадков проводился с помощью гравитационного пробоотборника длиной 6 метров (в заливе Тонкин длина пробоотборника составляла 3 метра), и внутренним диаметром до 120 мм. Отбор проб для газогеохимического анализа происходил с помощью шприцов объемом 12 мл с обрезанными носиками в склянки 43 и 68 мл, заполненные насыщенным раствором NaCl с добавлением консерванта (0.5 мл хлоргексидинабиглюконата 0.05 %). При отборе проб учитывались литологические особенности колонок осадочных отложений.

Анализ геологических образцов выполнялся с помощью микроанализатора Jeol JXA-8100 в аналитическом центре Дальневосточного геологического института (ДВГИ ДВО РАН).

Анализ стабильных изотопов углерода метана и углекислого газа выполнен на масс-спектрометре Finnigan MAT – 252 по системе CF-IRMS в Университете Нагойя, Япония (Tsunogai et al., 2010). Значения (δ) были рассчитаны как отношение $R_{\text{проба}}/R_{\text{стандарт}}$, где R – это отношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ как для исследуемой пробы, так и для стандарта VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite).

За время работ в районе вьетнамского шельфа совместно с коллегами из Института морской геологии и геофизики ВАИТ получен представительный фактический материал (табл. 1). Подавляющее число проб и образцов носят уникальный характер ввиду труднодоступности районов и их небольшой изученности в газогеохимическом и геологическом аспекте.

Анализ углеводородных газов, азота, кислорода и углекислого газа выполнен на двухканальном газовом

Рис. 2. Карта района работ и схема тектонического строения системы разломов Красной реки (Geological map of Vietnam, 1986). 1 – породы плиоцен-четвертичного возраста; 2 – отбор проб на островах; 3 – разломы установленные (а) и предполагаемые (б); 4 – осадочный бассейн Красной реки; 5 – терригенные формации доплиоценового возраста; 6 – профили морских геолого-геофизических и газогеохимических работ, 2013 г.

Объект	Количество проб			Год опробования
	осадки	морская вода (пов.)	морская вода (дно)	
Залив Тонкин	37	36	74	2014
	80	43	45	2016
Привьетнамский шельф, НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (рейс 88)	499	101	204	2019

Табл. 1. Количество проб, отобраанных в районе исследования

хроматографе «КристалЛюкс 4000М» с датчиками потока ионизации и теплопроводности, чувствительностью 10^{-5} %. Для анализа гелия и водорода применялся газовый хроматограф «Хроматэк-Газохром 2000» (ОАО «Хроматек», г. Йошкар-Ола) с датчиками теплопроводности повышенной чувствительности (1–2 ppm по гелию и водороду), а также вакуумная дегазационная установка. Длительность анализа углеводородных газов – 20 мин, гелия и водорода – 5 мин. При определении фоновых концентраций газов применялись методы, регламентированные действующими нормативными указаниями установления фоновых концентраций веществ (газов) и имеющимися методическими вероятностно-статистическими опубликованными источниками (Шакиров, 2016; Нормативно-методическое обеспечение..., 1995; Поротов, 1977; Смирнов, 1983). Лаборатория газогеохимии Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН имеет Свидетельство Росстандарта № 41 к паспорту лаборатории ПС 1.047–18.

Результаты и обсуждение

Распределение гелия и водорода в заливе Тонкин

В районе работ в заливе Тонкин в 2013 году (рис. 3) были отобраны поверхностные донные отложения и морская вода на 97 станциях по 6 профилям, глубины в точках пробоотбора от 7.5 м до 53.3 м (Шакиров и др., 2015).

Район работ расположен в осадочном бассейне Бейбуван, занимающем мелководье с глубинами от 20 до 70 м. Бассейн образовался в результате полициклических рифтогенных процессов в мезозое и кайнозое и разбит разломами северо-восточного направления. В заливе развиты тектонические депрессии северо-восточного и, более глубокие, западного простирания. Бассейн пересечен разломами субширотного и субмеридионального простирания, и разломы северо-восточного–юго-западного направления преобладают и являются более глубокими. Разломы субмеридионального простирания более мелкие, но встречаются чаще (Шакиров и др., 2015).

По результатам серии газохроматографических анализов во всех пробах осадка установлено наличие метана в концентрациях 45.1–357 нМ/дм³. Высокие фоновые концентрации метана в осадках (156 нМ/дм³) зафиксированы по всей площади залива, что указывает на диффузионное просачивание. В 80% проб обнаружены пропан и бутан.

Известно, что водород и гелий – характерные газы для зон глубинных разломов и сейсмически активных зон. Максимальные концентрации этих газов в осадках и придонной воде приурочены к зоне рифта реки Красная: в осадке Н₂ – до 102 ppm при фоне – 4–6 ppm, He – до 20 ppm при фоновых значения – 10–11 ppm; в воде Н₂ – до 300 ppm при фоне – 5–6 ppm, He – до 13 ppm при фоновых значения – 9 ppm (Акуличев и др., 2015), что говорит о тектонической активности разломной зоны.

Распределение повышенных концентраций метана в донных отложениях, придонной и поверхностной морской воде относительно равномерное, что, вероятно, обусловлено сетью трещин, секущих поверхность дна.

На побережье северного Вьетнама (залив Тонкин) расположены месторождения антрацита. Антрацит может быть дополнительным источником водорода, что может объяснять обнаружение аномально высоких концентраций водорода в регионе. В морской воде вблизи о. Кото обнаружены (Syrbu et al., 2020) высокие концентрации водорода (до 3540 ppm).

Вероятно, в заливе Тонкин также определен вклад в формирование аномалий водорода вносит и другой источник, который сопряжен с очагом генерации углеводородных газов. В 2013 году в районе работ были зарегистрированы землетрясения, которые довольно редки для данной территории (Tuyen et al., 2018). Сейсмическая активность могла быть дополнительным фактором поступления углеводородных газов и водорода из недр на поверхность дна и водную толщу.

При различных источниках генерации, гелий и водород, вероятно, стали спутниками углеводородных газов при прохождении по общим глубинным каналам фильтрации. Если для гелия источник образования, возможно, земная кора, то для водорода, в нашем случае, транзит от очагов генерации углеводородных газов.

В работе (Шакиров и др., 2015) были сопоставлены содержания водорода и гелия с интерпретированным



Рис. 3. Карта района комплексных геолого-геофизических исследований в заливе Тонкин, 2013 г. (Шакиров и др., 2015). 1 – профиль работ и его номер, 2 – разломы рифта Красной реки, 3 – изобаты, 4 – станции отбора проб воды на суше. На врезке квадрата показано положение района работ на карте Вьетнама.

разрезом непрерывного сейсмического профилирования, где отчетливо видны пики повышенных концентраций водорода над приповерхностными разломами, при этом максимум зафиксирован над разломами, секущими морское дно, а аномалии меньшей интенсивности зафиксированы над разломами, не выходящими на поверхность дна.

По результатам исследований в заливе Тонкин установлено, что повышенные содержания водорода в осадке до 100 ppm (профиль V), аномалии водорода в придонном слое морской воды до 700 ppm (профиль IV) и в поверхностном слое до 300 ppm (профиль I, III и V) приурочены к условной границе восточного борта рифта Красной Реки и обусловлены миграцией газов по тектоническим разломам из глубоких горизонтов недр района. Газогеохимический режим с повышенными содержаниями водорода является отражением флюидопроницаемости недр. Перед началом работ на территории залива Тонкин зафиксированы землетрясения до 3 баллов по шкале Рихтера (Nguyen Nhu Trung, 2013). Как известно, водород в большинстве случаев присутствует в газах глубинных разломов и также является индикатором сейсмически активных зон.

В работе (Долгинов и др., 2010) установлен трансформный характер системы трещин северо-восточного направления, пересекающих все структуры района в заливе Тонкин, что обусловлено их проникновением в осадочные комплексы триасовых, меловых и кайнозойских рифтов из более древних погребенных комплексов. Таким образом, выявленная система флюидопроводящих зон обусловлена сетью разрывных структур региона. В этих зонах существуют наиболее благоприятные условия для субвертикального транзита газов и флюидов в верхнюю часть земной коры, в данном случае в чехол осадочных отложений прогиба Шонг Хонг, включая морские песчано-глинистые отложения. Системы трещин в геодинамически активных рифтовых структурах триаса, мела и кайнозоя способствуют миграции глубинного флюида (Перевозчиков, 2012). Таким образом, связь газогеохимических аномалий и тектоники отражает повышенную газофлюидопроводимость в районе Северного Вьетнама.

По результатам изотопных анализов воды из гидрогеологических скважин на острове Катба ($\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$

–25.5...–40.2%) выявлены газы термогенного и метаморфогенного генезиса. Метан с подобным изотопным составом углерода, например, характерен для Южно-Сахалинского грязевого вулкана (о-в Сахалин) (Ершов и др., 2010). Поток газов из нижних горизонтов складчатого фундамента проявляется также высокоинтенсивными аномалиями метана (до 1052 мкл/л) и углекислого газа (до 25%) в подземных водах на островах Тонкинском залива. При низкой сейсмической активности района эти показатели указывают на высокий углеводородный потенциал недр (Шакиров и др., 2017).

Изотопный состав углерода метана и углекислого газа позволяет предположить наличие очага эндогенного воздействия на карбонатные толщи на острове Катба. Этот очаг был впервые обнаружен в 2019 г., когда были найдены образцы метаморфизованных пород в зоне проявления эндогенных процессов на площади не менее 6 км² (Syrbu et al., 2020). Кроме этого в этой зоне на острове впервые обнаружен кварц в аллювиальных отложениях реки (табл. 2). Все полученные факты дают основания предполагать наличие неизвестного магматического очага в недрах района острова Катба (Шакиров и др., 2020).

Также на юге острова обнаружено проявление метаморфизованных осадочных и вулканических пород, где по данным (Syrbu et al., 2020) встречаются наиболее интенсивные аномалии водорода. Породы, слагающие обнажение, представлены окварцованными вулканитами и сланцами, химический состав, полученный на микроанализаторе, представлен в таблице 3.

На рисунке 4 видны две генерации кварца: вулканическое стекло (Qz1 gen – кварц первой генерации) и чистый кварц (Qz2 gen – кварц второй генерации). Чистый кварц отмечен пунктиром на рисунке. Qz2 gen заполняет собой трещины в окварцованном вулканите, что может говорить о происходившем метасоматозе, после образования вулканитов.

Элемент	%	+/- 2σ
Al	1.75	0.19
Si	44.95	0.22
Элемент	ppm	+/- 2σ
S	650	150
Cl	1.748	0.033
K	4260	82
Ca	1056	36
Ti	470	180
Mn	387	29
Fe	3899	62
Ni	16	7
Cu	11	5
Zn	20	3
As	3	1
Rb	3	1.0
Sr	2	1
Y	3	2
La	85	54
LE	50.47	0.22

Табл. 2. Химический анализ кварца, обнаруженного в аллювиальных отложениях реки на о. Катба (2019 г.)

Вулканические породы располагаются в южной части острова Катба и представляют собой окварцованные кислые вулканиты в контакте с серицит-альбит-кварцевыми сланцами (рис. 5). В сланце обнаружены цирконы и фосфаты. Фосфаты имеют две генерации, они отличаются наличием калия.

Рис. 4. Снимок вулканита из обнажения на о. Катба (залив Тонкин), 2019 г. Снимок сделан на электронно-зондовом микроанализаторе Jeol JXA-8100 (ДВГИ ДВО РАН): а) миндалекаменная структура; б) зона дробления с привнесенным кварцем; в) зона дробления с привнесенным кварцем. Qz 1 gen – кварц первой генерации, Qz 2 gen – кварц второй генерации.

№	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Ti ₂ O	FeO
Сланец	0.92	6.97	73.44	2.33	0.73	0.65
Окварцованный вулканит	1.92	16.87	53.33	6.97	0.59	1.91

Табл. 3. Химический состав образцов (%), полученный на микроанализаторе Jeol JXA-8100

Безкалийный фосфат образовался позже, чем с калием. Наличие метаморфических пород, а также вулканических образований может говорить о внедрении магмы в осадочную толщу и ее дальнейшее преобразование в серицит-альбит-кварцевые сланцы. Возможно, внедрение магмы происходило в несколько этапов, что привело к окварцовыванию вулканитов. Эндогенные процессы, возможно, способствовали генерации метана и углекислого газа с «тяжелым» изотопным составом углерода, а также аномалиям водорода и гелия, которые проявлены в водных источниках и подпочвенных газах. Дальнейшие морские работы на привьетнамской части Южно-Китайского моря, включая бассейн Красной реки, были продолжены в 2019 г., что позволило расширить представления о генезисе и распределении газогеохимических полей гелия, метана и других газовых компонентов в районе привьетнамского шельфа.

Распределение гелия и водорода на привьетнамском шельфе Южно-Китайского моря

В ходе проведения морских исследований основной отбор проб производился в трех районах: Нам Кон Сон (Южный полигон), Фу Хань (Центральный полигон), бассейн Красной реки (Северный полигон) (рис. 1). Всего поднято и проанализировано 49 колонок осадочных отложений на Южном, Центральном и Северном полигонах.

Водород выявлен во всех пробах, отобранных из донных отложений в концентрации от 0.01 ppm (бассейн Красной Реки) до 93 ppm (бассейн Фу Хань).

Наиболее яркие аномалии концентраций гелия и водорода обнаружены в Центральном и Южном районах: южная часть бассейна Фу Хань, станции LV88-16GC (2220 м), LV88-17GC (2300 м), LV88-20/1GC (2400 м) в глубоководной части шельфа и северной части бассейна Нам Кон Сон, станция LV88-15GC (236 м) (рис. 6).

Наибольшие концентрации водорода и гелия зафиксированы в районе глубоководной части бассейна Фу Хань, далее на юг наблюдается тенденция к плавному снижению концентраций в кернах осадка. В центральном районе обнаружены признаки «локальных» зон флюидной разгрузки в его северной и южной части.

Рис. 5. а) выветрелый вулканит; б) слабоокатанный кварц, найденный в ручье в 2 км от источника предполагаемого вулканизма

Для глубоководных станций центрального шельфа Вьетнама характерны повышенные концентрации гелия и водорода по всей длине керна от поверхности до забоя (рис. 7). Это, вероятно, объясняется тем, что осадки с аномалиями гелия и водорода были отобраны в зоне сдвига разломной зоны Туи Хоа, расположенной к юго-западу от бассейна Фу Хань, которая выражена как область с разломами высокой амплитуды. Зона сдвига ориентирована в направлении СЗ-ЮВ аналогично системе разломов Красной реки, которая простирается к северу от материковой части Вьетнама.

Результаты серии изотопных анализов (14 образцов) бассейна Фу Хань показали, что значения стабильного изотопа углерода метана лежат в пределах -27.7 и -66.6 ‰, а углекислого газа -15.4 и -25.9 ‰ (табл. 4), что свидетельствует о преимущественно термогенном генезисе газа (глубины более 2 км) с присутствием газов микробного происхождения. Наиболее «тяжелый» изотопный состав углерода метана и углекислого газа

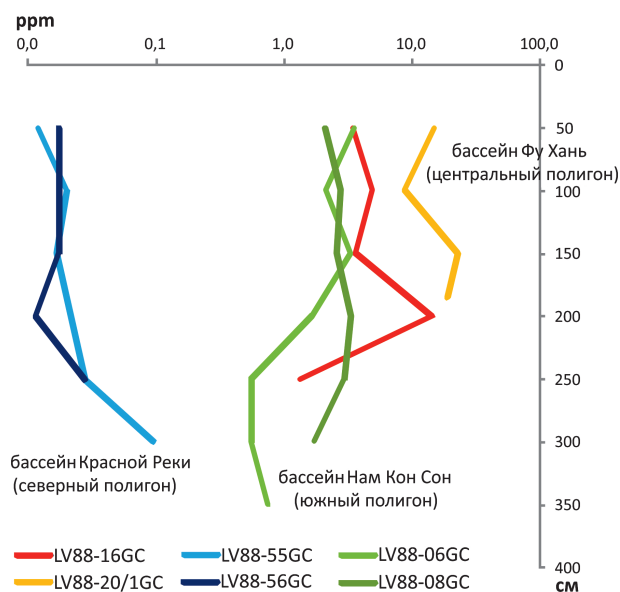


Рис. 7. Распределение концентраций водорода в кернах осадка (НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2019, станции LV88)

обнаружен в осадках глубоководной части бассейна Фу Хань и северной части бассейна Нам Кон Сон, на этих же участках зафиксированы аномальные концентрации гелия и водорода в осадках (рис. 6), что доказывает происхождение газа при термокаталитическом разложении органического вещества.

В сложных условиях смешения газов информативность изотопного метода может быть значительно повышена, если изотопный состав метана рассматривать в комплексе с другими газовыми показателями, к числу которых можно отнести метан и его гомологи, а также концентрации гелия и водорода.

Рис. 6. Концентрации водорода (а) и гелия (б) в кернах осадков на шельфе Вьетнама, НИС «Академик М.А. Лаврентьев», рейс №88, 2019

В бассейне Фу Хань изотопный состав $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ –66‰ на станции LV88-27GC и $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ –66.6 ‰ на станции LV88-43GC (табл. 4) указывает на преобладание доли микробного газа в потоке метана. Это связано в первую очередь с тем, что при наличии интенсивного восходящего потока природного газа создаются благоприятные условия для развития микробных процессов, и изотопное соотношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ термогенного метана может маскироваться добавлением значительной доли микробного газа из верхних горизонтов осадка. В осадках бассейна Фу Хань установлены высокие концентрации метана (до 666.4 нМ/дм³) и наличие гомологов метана до пропана, включительно. В осадках ближайших станций содержания метана в осадке еще более высокие – до 3422 нМ/дм³.

В таких случаях попутные измерения гелия и водорода необходимы для распознавания природы газового потока.

Наименьшие концентрации гелия и водорода были установлены на севере в районе осадочного бассейна Шонг Хонг. Профиль представлен мелководными станциями до 60 метров глубины.

Низкие концентрации водорода в осадках бассейна Красной Реки, вероятно, объясняются нахождением станций отбора в осадочном бассейне и удаленностью от разломов. Так, в наиболее проницаемых зонах – каналах быстрой вертикальной миграции эндогенных газов – свободные водород и гелий мигрируют в виде газовых струй. Такими высокопроницаемыми зонами являются рифты – океанические и континентальные, региональные глубинные разломы, а также зоны современного вулканизма.

Из глубинных разломов максимально проницаемыми и, следовательно, наиболее перспективными на водород и гелий будут активизированные в неотектонический этап, ограничивающие зоны интенсивного современного тектонического прогибания (впадины типа трогов или грабен) с сокращенной мощностью земной коры (Кудрин и др., 2006).

Рифт Красной Реки является потенциально гелий- и водородоносным не на всем своем протяжении, а, по-видимому, только на отрезках с максимальным тепловым потоком. Согласно принципу Ле-Шателье в неоднородном тепловом поле Земли в зонах с аномально высокими температурами концентрируются газы с высокой удельной теплоемкостью – в первую очередь, водород и гелий (а также азот, метан, оксид углерода), а на периферии этих аномалий – газы с низкой удельной теплоемкостью (сероводород, пары воды, диоксид углерода и др.). По данным (Pollak et al., 1991) в районе рифта Красной Реки установлено значение теплового потока 80–100 мВт/м². Многочисленные измерения теплового потока в регионе показывают, что наиболее высокие значения (свыше 100 мВт/м²) соответствуют глубоководным впадинам, что свидетельствует об активных процессах, протекающих в мантии, выражающихся на поверхности в проявлении аномальных газогеохимических полей гелия, водорода и метана.

Этот вывод подтверждается также закономерностями в распределении CO₂ в районе рифтовой системы Красной Реки (северный полигон). На станциях LV88-56GC и LV88-55GC зафиксированы максимальные концентрации углекислого газа 137606 нМ/дм³ (LV88-55GC горизонт 275 см), и идёт увеличение концентрации с глубиной и

№ станции	№ пробы	CO ₂ , %	$\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$, ‰	CH ₄ , %	$\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, ‰
Северный полигон (бассейн Красной Реки)					
LV88-55GC	84	1.49	-23.7	0.0053	-46.0
LV88-56 GC	87	1.88	-23.8	0.0040	-40.4
LV88-55GC	105	0.02	-18.3	0.0013	-64.0
LV88-55GC	104	0.15	-17.4	0.0010	-60.2
Центральный полигон (бассейн Фу Хань)					
LV88-18GC	30	2.44	-24.4	0.0039	-27.7
LV88-22GC	36	1.78	-15.9	0.0027	-40.3
LV88-22GC	37	2.33	-25.9	0.0095	-43.7
LV88-22GC	47	0.14	-20.2	0.0067	-51.1
LV88-23GC	48	0.07	-17.9	0.0039	-59.6
LV88-27GC	42	2.59	-23.4	0.0076	-40.7
LV88-27GC	51	0.23	-15.4	0.0097	-66.0
LV88-31GC	52	1.03	-22.9	0.0015	-29.1
LV88-31GC	59	0.32	-22.4	0.0021	-58.7
LV88-37GC	67	0.01	-20.4	0.0021	-57.0
LV88-42GC	67	0.42	-23.9	0.0005	-46.5
LV88-43GC	69	0.06	-24.5	0.0006	-48.4
LV88-42GC	80	0.03	-20.6	0.0286	-49.8
LV88-43GC	83	0.02	-16.8	0.0021	-66.6
Южный полигон (бассейн Нам Кон Сон)					
LV88-02/1GC	6	0.03	-18.9	0.0042	-64.6
LV88-12GC	29	0.15	-19.7	0.0115	-25.7
LV88-5GC	3	0.11	-17.6	0.0151	-28.0
LV88-12GC	20	1.10	-24.8	0.0032	-29.4

Табл. 4. Изотопный состав углерода метана и углерода углекислого газа в осадках привьетнамской части Южно-Китайского моря (выполнен в Университете Нагойя под руководством профессора Urumi Tsunogai)

после горизонта 200 см. Данные точки опробования лежат в удалении от глубинного разлома, но находятся в зоне влияния рифтовой системы Красной реки.

Углекислый газ на этом полигоне имеет отрицательную корреляцию с метаном и углеводородными газами. На горизонте 200 см (станции LV88-56GC и LV88-55GC) наблюдается резкое уменьшение концентраций метана, углеводородов и увеличение углекислого газа. Все это дает основание полагать, что в пределах глубинной разломной зоны аномалии гелия и водорода будут иметь локальный характер и проявляться на отрезках с максимальным тепловым потоком, то есть ближе к зоне глубинного разлома.

Различия в дегазации гелия, водорода и углеводородных газов находят свое отражение в геологических особенностях бассейна Шонг Хонг: северо-западная часть бассейна включает в себя Ханойский трог и многочисленные разломы залива Тонкин, которые составляют сложные складчатые структуры, сопровождаемые тектонической инверсией миоцена; центральная часть бассейна Шонг Хонг представляет собой структурно сложный район с тектонически стабильным фундаментом, где мощность осадков превышает 14 км. В южной части наблюдается сужение осадочного бассейна при его выходе на континентальный склон, который контролируется разломными зонами (рис. 8).

В этом районе в 2020 году специалистами вьетнамской нефтяной компании было открыто крупное месторождение газа и конденсата – Кен Бау. В 88 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в окрестностях этого месторождения были выполнены ряд станций (рис. 8), на которых обнаружены повышенные концентрации гелия, проявление аутигенных сульфидов и геомикробиологические признаки

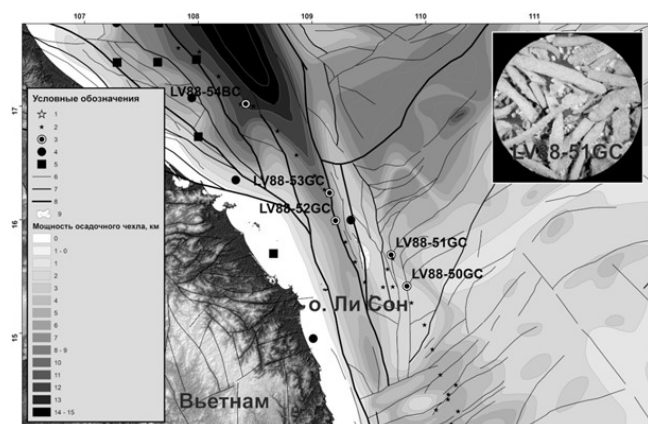


Рис. 8. Карта станций экспедиции на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (рейс №88) на тектонической схеме южной части осадочного бассейна Красной реки. 1 – отбор проточной воды; 2 – отбор поверхностной воды; 3 – станции отбора осадков; 4–5 станции отбора придонной воды (Обжиров, 1993); 6 – разломы третьего порядка; 7 – разломы второго порядка; 8 – разломы первого порядка, 9 – контуры месторождения Кен Бау. На врезке фотография под биноклем сульфидов со станции LV88-51GC (бинокляр ЛОМО ХС 1349, увеличение x3).

газовой миграции (Еськова и др., 2020). На врезке (рис. 8) представлена фотография сульфидов со станции LV88-51GC под биноклем.

По сравнению с Японским и Охотским морями можно отметить, что зоны активной дегазации дна на привьетнамском шельфе и склоне имеют локальный характер распространения, хотя интенсивность газогеохимических аномалий в них сопоставима с аналогичными зонами в Дальневосточных морях.

Аномалии водорода на нефтегазоносном шельфе и газогидратоносном склоне острова Сахалин по данным (Шакиров и др., 2016) сравнимы с установленными аномалиями на привьетнамском шельфе Южно-Китайского моря.

Механизм концентрации в земной коре свободных (или водорастворенных) водорода и гелия, по-видимому, близок механизму концентрации метана и углеводородных газов – в структурных, тектонических, литологических и др. ловушках. Поступающие из глубин водород и гелий экранируются в ловушках низкопроницаемыми покровными. Они отличаются большей глубиной залегания по сравнению с покровными, улавливающими углеводороды. Проницаемость таких покровов определяется диффундирующими способностями водорода и гелия (Кудрин и др., 2006).

Поскольку происхождение большей части водорода и гелия в недрах Земли однозначно эндогенное и не связано с биогенезом, перспективные на водород и гелиеносные структуры пространственно локализируются в более узких, по сравнению с углеводородами, зонами – вдоль глубинных разломов, являющихся каналами миграции водорода из мантии.

Заключение

Впервые за последние 30 лет ТОИ ДВО РАН и ИМГТ ВАНТ проведены масштабные комплексные геолого-геофизические, геохимические и океанографические исследования на привьетнамской акватории Южно-Китайского

моря, в результате которых получены уникальные данные о распределении гелия и водорода, метана, углеводородных газов в районе континентального шельфа и склона Вьетнама. Рассмотрены особенности дегазации литосферы во взаимосвязи с тектоническими разломами, выходами водорода и его контроля как одного из показателей газогеохимического режима.

В результате исследований изучено пространственное распределение гелия и водорода в осадке в трёх осадочных бассейнах: Красной реки, Фу Хань и Нам Кон Сон.

Выявлены закономерности распределения газогеохимических полей гелия и водорода на привьетнамской части Южно-Китайского моря, уточнен газогеохимический фон, установлен возможный генезис потока газа.

Основываясь на результатах газогеохимических и изотопных исследований можно сделать вывод, что в пределах глубинной разломной зоны Красной реки (северный полигон) аномалии гелия и водорода имеют локальный характер и проявляются на отрезках с максимальным тепловым потоком, то есть ближе к зоне глубинного разлома, что подтверждается результатами нефтегазописковых работ.

При активизации сейсмостектонической активности происходит смещение вдоль основных разломных зон, что способствует увеличению проницаемости и продвижению термогенных газов к поверхности дна и в водную толщу.

Проявления вулканоматических процессов в пределах архипелага Катба, по всей видимости, являются причиной образования метана и углекислого газа с «тяжелым» изотопным составом углерода в водных источниках островов залива Тонкин.

Высокие концентрации водорода и гелия, углеводородных газов, метана в заливе Тонкин и его островах имеют тенденцию к снижению по мере перехода от зоны рифта Красной Реки к осадочному бассейну Шонг Хонг, где своих максимальных концентраций достигает диоксид углерода.

Обнаруженные особенности распределения газогеохимических полей необходимо исследовать и детализировать в последующих экспедициях.

Благодарности/Финансирование

Коллектив авторов выражает признательность коллегам из Института морской геологии и геофизики ВАНТ Ле Дык Ань (Le Duc Anh) и Нгуен Ну Чунг (Dr. Nguyen Nhu Trung) за помощь в получении данных и литературных материалов, а также д.г.-м.н. Шакирову Р.Б., зам. директора ТОИ ДВО РАН, заведующему лабораторией газогеохимии за помощь в организации экспедиций и проведении исследований.

Исследования выполнены в рамках гостемы АААА-А19-119122090009-2 «Исследование состояния и изменений природной среды на основе комплексного анализа и моделирования гидрометеорологических, биогеохимических, геологических процессов и ресурсов Дальнего Востока», а также при поддержке программы «Дальний Восток» № 21-ВАНТ-014 и 21-ВАНТ-017, в рамках совместных проектов с Вьетнамской академией наук и технологий (VAST QTRU 02.02/20-21, QTRU02.01/21-22), а также при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-35-70014, проект «Исследование взаимосвязи газогео-

охимических полей, тектоники, геодинамической обстановки и нефтегазоносности, определяющих характер геологического развития и углеводородного потенциала региона Северного Вьетнама».

Работы проведены в рамках совместной Российско-Вьетнамской лаборатории по морским геонаукам (ТОИ ДВО РАН – ИМГТ ВАНТ) в соответствии с Дорожной картой морских исследований ДВО РАН – ВАНТ (2018–2025 гг.). Информационная поддержка обеспечена ТОИ ДВО РАН и Приморским отделением Российского географического общества (ОИАК РГО). Исследование отвечает положениям Протокола 2-го заседания Комиссии по научно-техническому сотрудничеству (Минобрнауки РФ – МНТ СРВ, 2019 г.).

Статья посвящается десятилетию совместной Российско-Вьетнамской лаборатории по морским геонаукам, учредителями которой являются ТОИ ДВО РАН и Институт морской геологии и геофизики Вьетнамской Академии наук и технологий (ИМГТ ВАНТ).

Литература

- Акуличев В.А., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И., Фунг Ван Фать, Нгуен Ну Чунг, Зыонг Куок Хын, Мальцева Е.В., Полоник Н.С., Ле Дык Ань. (2015). Аномалии природных газов в заливе Тонкин (Южно-Китайское море). *ДАН*, 461(1), с. 53–57. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15030010>
- Арешев Е.Г., Гаврилов В.П., Донг Ч.Л., Зао Н., Попов О.К., Поспелов В.В., Шан Н.Т., Шнип О.А. (1997). Геология и нефтегазоносность фундамента Зондского шельфа. М., 285 с.
- Войтов Г.И., Добровольский И.П. (1994). Химические и изотопно-углеродные нестабильности потоков природных газов в сейсмически активных регионах. *Физика Земли*, 3, с. 20–31.
- Долгинов Е.А., Башкин Ю.В., Белоусов Т.П., Као Д.Т., Ле В.З. (2010). Рифтовые и эпирифтовые структуры северо-западного Вьетнама и их вероятные аналоги. *Известия вузов. Геология и разведка*, 5, с. 3–8.
- Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Мельников О.А., Копанина А.В. (2010). Вариации параметров грязевулканической деятельности и их связь с сейсмичностью юга острова Сахалин. *Региональная геология и металлогения*, 42, с. 49–57.
- Еськова А.И., Пономарева А.Л., Легкодимов А.А., Калгин В.Ю., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. (2020). Особенности распределения индикаторных групп микроорганизмов в донных отложениях Южно-Китайского моря. *Известия Иркутского Государственного Университета. Серия: Науки о земле*, 33, с. 33–43. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.33>
- Кулинич Р.Г., Обжиров А.И. (1985). О структуре и современной активности зоны сочленения шельфа Сунда и котловины Южно-Китайского моря. *Тихоокеанская геология*, № 3, с. 102–106.
- Кравцов А.И., Войтов Г.И., Фридман А.И. и др. (1967). О содержании водорода в свободных струях в Хибинах. *ДАН СССР*, 5, с. 1190–1192.
- Нормативно-методическое обеспечение охраны атмосферного воздуха. (1995). Пермь: ИНТЕРЭКО, 249 с.
- Обжиров А.И. (1993). Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 139 с.
- Кудрин И.В., Орлянкин В.Н., Кудрин К.И. (2006). Способ поисков в недрах земли скоплений газообразных водорода и гелия. Патент РФ RU2316028.
- Перевозчиков Г.В. (2012). Поле водорода на месторождении Газли по данным геохимических исследований в нефтегазоносном регионе Средней Азии. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 7(1), с. 1–13.
- Поротов Г.С. (1977). Математические методы при поисках и разведке полезных ископаемых. Л.: Изд-во Ленинград. горного института, 106 с.
- Смирнов Б.В. (1983). Вероятностные методы прогнозирования в инженерной геологии. М.: Недра, 134 с.
- Шакиров Р.Б. (2016). Газогеохимические поля окраинных морей Дальневосточного региона: распределение, генезис, связь с геологическими структурами, газогидратами и сейсмоструктурной. *Автореф. дисс. д. геол.-мин. наук*. Владивосток: ТОИ им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 49 с.
- Шакиров Р.Б., Обжиров А.И., Сырбу Н.С., Нгуен Ну Чунг, Зыонг Куок Хын, Мальцева Е.В., Сорочинская А.В., Югай И.Г., Ле Дык Ань, Фунг Ван Фать, Полоник Н.С., Буи Ван Нам, Нгуен Ван Диеп. (2015). Особенности распределения природных газов в донных осадках и воде северо-западной части Тонкинского залива (Южно-Китайское море, Вьетнам). *География и природные ресурсы*, 4, с. 178–188.
- Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И. (2016). Распределение гелия и водорода в отложениях и воде на склоне о. Сахалин. *Литология и полез. ископаемые*, 1, с. 68–81. <https://doi.org/10.1134/S0024490216010065>
- Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Сырбу Н.С., Нгуен Ну Чунг, Фунг Ван Фать, Ле Дык Ань, Чон Тхань Фи. (2017). Газогеохимические особенности осадков залива Тонкин (Южно-Китайское море). *Вестник ДВО РАН*, 4, с. 33–42.
- Шакиров Р.Б. (2018). Газогеохимические поля морей Восточной Азии. М.: ГЕОС, 341 с.
- Шакиров Р.Б., Ли Н.С., Обжиров А.И., Валитов М.Г., Съедин В.Т., Телегин Ю.А., Прошкина З.Н., Окулов А.К., Стороженко А.В., Иванов М.В., Швалов Д.А., Легкодимов А.А., Еськова А.И., Липинская Н.А., Бовсун М.А., Максеев Д.С., Калгин В.Ю., Якимов Т.С., Нгуен Чун Тхань, Ле Дык Ань. (2020). Первая комплексная российско-вьетнамская геолого-геофизическая и океанографическая экспедиция в Южно-Китайском море, НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (рейс 88, 2019 г.). *Вестник ДВО РАН*, 3, с. 138–152.
- Шнип О.А. Состав и нефтегазоносность фундамента шельфа северного и центрального Вьетнама (2012). Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 31, с. 53–55.
- Duong Quoc Hung, Renat Shakirov, Iosif Iugai, Nguyen Van Diep, Le Duc Anh, Mai Duc Dong, Bui Van Nam, Yury Telegin (2019). A study on the relationship between gas-geochemical field and tectonic fault activities in the rivermouth of Gulf of Tonkin. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 19(2), pp. 191–198. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/19/2/14036>
- Geological map of Vietnam. (1986). Scale 1: 1 500 000. General Dpt. of Geology, Hanoi.
- Le Duc Anh, Nguyen Hoang, Phung Van Phach, Malinovskii A. I., Kasatkin S. A., Golozubov V. V. (2018). Geochemistry and petrogenesis of volcanic rocks and their mantle source in the East Vietnam Sea and adjacent regions in the Cenozoic. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 17(4), pp. 406–428. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/17/4/9258>
- Nguyen Nhu Trung. (2013). Basement structure of the Bac Bo Basin based on the 3D interpretation of satellite gravity and magnetic data. *Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium*. <https://doi.org/10.1190/segj112013-034>
- Pollak H.N., Hurter S.J., Johnson J.R. (1991). New global heat flow compilation. University of Michigan, USA.
- Shakirov R.B., Hung D.Q., Anh L.D., Syrbu N.S., Obzhirv A.I., Borzova O.V., Okulov A.K., Nam B.V., Diep N.V., Dong M.D., Legkodimov A.A., Shakirova M.V., Ponomareva A.L., Bakunina M.S. (2019). Features of the gasgeochemical abnormal fields distribution in the Red River rift (Tonkin gulf, South-China sea). *Doklady Earth Sciences*, 484, Part 2, pp. 181–184. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19020065>
- Syrbu N.S., Shakirov R.B., Le Duc Anh, Kholmogorov A.O., Iakimov T.S., Kalgin V.Yu. (2020). Formation of abnormal gasgeochemical fields of methane, helium and hydrogen in Northern Vietnam, its coastal and adjacent water areas. *Lithology and Mineral Resources*, 55(6), pp. 512–527. <https://doi.org/10.1134/S0024490220060097>
- Tsunogai U., Kosaka A., Nakayama N., Komatsu D., Konno U., Kameyama S., Nakagawa F., Sumino H., Nagao K., Fujikura K., Machiyama H. (2010). Origin and fate of deep sea seeping methane bubbles at Kuroshima Knoll, Ryukyu forearc region, Japan. *Geochemical Journal*, 44, pp. 461–476. <https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0096>
- Tuyen N.H., Phach Ph.V., Shakirov R.B., Trong C.D., Hung Ph.N., Anh L.D. (2018). Geoblocks Recognition and Delineation of the Earthquake Prone Areas in the Tuan Giao Area (Northwest Vietnam). *Geotectonics*, 52(3), pp. 359–381. <https://doi.org/10.1134/S001685211803007X>

Сведения об авторах

Надежда Сергеевна Сырбу – канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией комплексных исследований окружающей среды и минеральных ресурсов, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43 e-mail: syrbu@poi.dvo.ru

До Хуи Кыонг – директор, Институт морской геологии и геофизики Вьетнамской академии наук и технологий Вьетнам, Ханой, Хоанг Куок Вьет, 18

Тимур Сергеевич Якимов – аспирант, старший инженер
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.
Ильичева ДВО РАН

Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

Андрей Олегович Холмогоров – аспирант, старший инженер

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.
Ильичева ДВО РАН

Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

Юрий Александрович Телегин – канд. геол.-мин. наук,
младший научный сотрудник лаборатории комплексных
исследований окружающей среды и минеральных ресур-
сов, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.
Ильичева ДВО РАН

Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

Уруму Тсуногай – профессор, Высшая школа экологи-
ческих исследований, Университет Нагоя
Япония, Нагоя 464-8601, Чикуса-ку, Фуру-чо

Статья поступила в редакцию 20.07.2020;

Принята к публикации 19.02.2021; Опубликована 30.09.2021

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Geological features for the formation of gas-geochemical fields, including helium and hydrogen, in the water and sediments at the Vietnamese part of the South-China Sea

N.S. Syrbu^{1*}, D.H. Cuong², T.S. Iakimov¹, A.O. Kholmogorov¹, Yu.A. Telegin¹, U. Tsunogai³

¹Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

²Institute of Marine Geology and Geophysics, Vietnam Academy of Sciences and Technology, Hanoi, Vietnam

³Nagoya University, Nagoya, Japan

*Corresponding author: Nadezhda S. Syrbu, e-mail: syrbu@poi.dvo.ru

Abstract. The paper presents the results of a complex joint Russian-Vietnamese geological, geophysical and oceanographic expedition in the South-China Sea (R/V “Akademik M.A. Lavrentyev”, cruise 88, 2019), as well as related joint Russian-Vietnamese marine and land researches in the area of north and south Vietnam under a series of local FEB RAS – VAST grants. The organizers of the marine expedition are the V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (POI FEB RAS) and the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Vietnam Academy of Science and Technology (IMGG VAST). In comparison with the Sea of Japan and the Sea of Okhotsk, it can be noted that the active bottom degassing on the on the Vietnamese shelf and slope have is a local, although the intensity of gas-geochemical anomalies is comparable to similar zones in the Far Eastern Seas. For the first time, anomalous methane fields (up to 5000 nl/l) were found in the water column of the South-China Sea, which are comparable to anomalies on the oil and gas shelf and the gas-hydrate-bearing slope of Sakhalin Island.

Metamorphosed sedimentary and volcanic rocks were discovered for the first time in the southern part of Catba Island (Gulf of Tonkin), which indicates the introduction of an endogenous body into the sedimentary strata and its further transformation. In connection with the discovery in 2020 of the large Ken Bau gas field at the southern end of the sedimentary basin of the Red River, the forecast of POI scientists about the presence of significant hydrocarbon reserves in this area was confirmed.

The work was carried out within the framework of the joint Vietnam-Russia Laboratory for Marine Sciences and Technology (V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and the Institute of Marine Geology and Geophysics Vietnam Academy of Science and Technology). The expedition of the R/V “Akademik M.A. Lavrentyev” (cruise 88) is part of a series of expeditions in accordance with the UN Decade dedicated to the Ocean Science for Sustainable Development.

Keywords: helium, hydrogen, hydrocarbon potential, Nam Con Son basin, Phu Khan basin, Red River basin, South-China Sea

Recommended citation: Syrbu N.S., Cuong D.H., Iakimov T.S., Kholmogorov A.O., Telegin Yu.A., Tsunogai U. (2021). Geological features for the formation of gas-geochemical fields, including helium

and hydrogen, in the water and sediments at the Vietnamese part of the South-China Sea. *Georesursy = Georesources*, 23(1), pp. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.16>

Acknowledgements

The authors are grateful to their colleagues from the Institute of Marine Geology and Geophysics, VAST Dr. Nguen Nhu Trung and Le Duc Anh, for their help in obtaining data and literary materials, as well as Dr. Shakirov R.B., deputy director of the POI FEB RAS, the head of the laboratory of gas geochemistry for organizing expeditions and researches.

The research was carried out as part as State Program for basic scientific research AAAA-A19-119122090009-2 “Study of the state and changes of the environment based on a complex analysis and modeling of hydrometeorological, biogeochemical, geological processes and resources of the Far East”, as well as with the support of the Far East programs 21-BAHT-014 u 21-BAHT-017 (VAST QTRU 02.02/20-21 and QTRU02.01/21-22), and also with the financial support of the RFBR grant 20-35-70014, the project “Interrelation of gasgeochemical fields, tectonics, geodynamic situation and oil and gas bearing potential, which determine geologic and hydrocarbon potential of the North Vietnam”.

The work was carried out within the framework of the joint Vietnam-Russia Laboratory for Marine Sciences and Technology (POI FEB RAS – IMGG VAST) in accordance with the Roadmap for Marine Research of the FEB RAS – VAST (2018–2025). Information support was provided by the POI FEB RAS and the Primorsky Branch of the Russian Geographical Society. The study complies with the provisions of the Protocol of the 2nd meeting of the Commission for Scientific and Technical Cooperation (Ministry of Education and Science of the Russian Federation-MNT SRV, 2019).

The paper is dedicated to the tenth anniversary of the joint Vietnam-Russia Laboratory for Marine Sciences and Technology.

References

- Akulichev V.A., Obzhairov A.I., Shakirov R.B., Mal'tseva E.V., Syrbu N.S., Polonik N.S., Van Phach P., Trung N.N., Hung D.Q., Anh L.D. (2015). Anomalies of natural gases in the Gulf of Tonkin (South China Sea). *Doklady Earth Sciences*, 461(1), pp. 203–207. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15030010>

- Areshv E.G., Gavrilov V.P., Dong Ch.L., Zao N., Popov O.K., Pospelov V.V., Shan N.T., Shnip O.A. (1997). Geology and oil and gas content of the Sunda shelf basement. Moscow, 285 p. (In Russ.)
- Dolginov E.A., Bashkin Yu.V., Belousov T.P., Kao D.T., Le V.Z. (2010). Rift and epirift structures of northwestern Vietnam and their probable analogues. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka = Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 5, pp. 3–8. (In Russ.)
- Duong Quoc Hung, Renat Shakirov, Iosif Iugai, Nguyen Van Diep, Le Duc Anh, Mai Duc Dong, Bui Van Nam, Yury Telegin (2019). A study on the relationship between gas-geochemical field and tectonic fault activities in the rivermouth of Gulf of Tonkin. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 19(2), pp. 191–198. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/19/2/14036>
- Ershov V.V., Shakirov R.B., Mel'nikov O.A., Kopanina A.V. (2010). Variations in the parameters of mud volcanic activity and their relationship with the seismicity of the south of Sakhalin Island. *Regional'naya geologiya i metallogeniya = Regional Geology and Metallogeny*, 42, pp. 49–57. (In Russ.)
- Es'kova A.I., Ponomareva A.L., Legkodimov A.A., Kalgin V.Yu., Shakirov R.B., Obzhirov A.I. (2020). The Characteristics and Distribution of Indicator Microorganisms in the Marine Sediments from the South-China Sea. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Nauki o zemle = The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 33, pp. 33–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.33>
- Geological map of Vietnam. (1986). Scale 1: 1 500 000. General Dpt. of Geology, Hanoi.
- Kravtsov A.I., Voitov G.I., Fridman A.I. et al. (1967). Hydrogen content in free jets in the Khibiny. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 5, pp. 1190–1192. (In Russ.)
- Kudrin I.V., Orlyankin V.N., Kudrin K.I. (2006). Method of searching of gaseous hydrogen and helium clusters in earth interior. Patent RF RU2316028. (In Russ.)
- Kulinich R.G., Obzhirov A.I. (1985). On the structure and current activity of the junction zone of the Sunda shelf and the South China Sea basin. *Tikhookeanskaya geologiya = Russian Journal of Pacific Geology*, 3, pp. 102–106. (In Russ.)
- Le Duc Anh, Nguyen Hoang, Phung Van Phach, Malinovskii A. I., Kasatkin S. A., Golozubov V. V. (2018). Geochemistry and petrogenesis of volcanic rocks and their mantle source in the East Vietnam Sea and adjacent regions in the Cenozoic. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 17(4), pp. 406–428. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/17/4/9258>
- Nguyen Nhu Trung. (2013). Basement structure of the Bac Bo Basin based on the 3D interpretation of satellite gravity and magnetic data. *Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium*. <https://doi.org/10.1190/segj112013-034>
- Regulatory and methodological support for the protection of atmospheric air (1995). Perm: Intereko, 249 p. (In Russ.)
- Obzhirov A.I. (1993). Gas-geochemical fields of the bottom layer of seas and oceans. Moscow: Nauka, 139 p. (In Russ.)
- Perevozchikov G.V. (2012). PHydrogen field at the Gazli field according to geochemical studies in the oil and gas region of Central Asia. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Oil and gas geology. Theory and practice*, 7(1), pp. 1–13. (In Russ.)
- Pollak H.N., Hurter S.J., Johnson J.R. (1991). New global heat flow compilation. University of Michigan, USA.
- Porotov G.S. (1977). Mathematical methods in searching and prospecting for minerals. Leningrad: Leningrad Mining Institute, 106 p. (In Russ.)
- Shakirov R.B. (2016). Gas-geochemical fields of the marginal seas of the Far Eastern region: distribution, genesis, connection with geological structures, gas hydrates and seismotectonics. Abstract Sci. Diss. Vladivostok: Il'ichev POI FES RAS, 49 p. (In Russ.)
- Shakirov R.B. (2018). Gas-geochemical fields of the seas of East Asia. Moscow: GEOS, 341 p. (In Russ.)
- Shakirov R.B., Hung D.Q., Anh L.D., Syrbu N.S., Obzhirov A.I., Borzova O.V., Okulov A.K., Nam B.V., Diep N.V., Dong M.D., Legkodimov A.A., Shakirova M.V., Ponomareva A.L., Bakunina M.S. (2019). Features of the gasgeochemical abnormal fields distribution in the Red River rift (Tonkin gulf, South-China sea). *Doklady Earth Sciences*, 484, Part 2, pp. 181–184. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19020065>
- Shakirov R.B., Li N.S., Obzhirov A.I., Valitov M.G., S'edin V.T., Telegin Yu.A., Proshkina Z.N., Okulov A.K., Storozhenko A.V., Ivanov M.V., Shvalov D.A., Legkodimov A.A., Es'kova A.I., Lipinskaya N.A., Boysun M.A., Makseev D.S., Kalgin V.Yu., Yakimov T.S., Nguen Chun T Khan', Le Dyk An'. (2020). Integrated Russian-Vietnamese geological-geophysical and oceanographic expedition in the South China Sea (R/V "Akademik M.A. Lavrentyev", cruise 88, 2019). *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*, 3, pp. 138–152. (In Russ.)
- Shakirov R.B., Obzhirov A.I., Syrbu N.S., Nguen Nu Chung, Zyong Kuok Khyn, Mal'tseva E.V., Sorochinskaya A.V., Yugai I.G., Le Duc Anh, Fug Van Fat, Polonik N.S., Bui Van Nam, Nguen Van Diep. (2015). Features of the distribution of natural gases in bottom sediments and water in the northwestern part of the Gulf of Tonkin (South China Sea, Vietnam). *Geografiya i prirodnye resursy*, 4, pp. 178–188. (In Russ.)
- Shakirov R.B., Sorochinskaya A.V., Syrbu N.S., Nguen Nu Chung, Fung Van Fat, Le Duc Anh, Chon T Khan' Fi. (2017). Gas-geochemical features of sediments in the Tonkin Gulf (South China Sea). *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*, 4, pp. 33–42. (In Russ.)
- Shakirov R.B., Syrbu N.S., Obzhirov A.I. (2016). Distribution of helium and hydrogen in sediments and water on the Sakhalin slope. *Lithology and Mineral Resources*, 51(1), pp. 61–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0024490216010065>
- Shnip O.A. (2012). Composition and oil and gas content of the basement of the shelf of Northern and Central Vietnam. *Trudy RGU Nefti i gaza imeni I.M. Gubkina*, 31, pp. 53–55. (In Russ.)
- Smirnov B.V. (1983). Probabilistic forecasting methods in engineering geology. Moscow: Nedra, 134 p. (In Russ.)
- Syrbu N.S., Shakirov R.B., Le Duc Anh, Kholmogorov A.O., Iakimov T.S., Kalgin V.Yu. (2020). Formation of abnormal gasgeochemical fields of methane, helium and hydrogen in Northern Vietnam, its coastal and adjacent water areas. *Lithology and Mineral Resources*, 55(6), pp. 512–527. <https://doi.org/10.1134/S0024490220060097>
- Tsunogai U., Kosaka A., Nakayama N., Komatsu D., Konno U., Kameyama S., Nakagawa F., Sumino H., Nagao K., Fujikura K., Machiyama H. (2010). Origin and fate of deep sea seeping methane bubbles at Kuroshima Knoll, Ryukyu forearc region, Japan. *Geochemical Journal*, 44, pp. 461–476. <https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0096>
- Tuyen N.H., Phach Ph.V., Shakirov R.B., Trong C.D., Hung Ph.N., Anh L.D. (2018). Geoblocks Recognition and Delineation of the Earthquake Prone Areas in the Tuan Giao Area (Northwest Vietnam). *Geotectonics*, 52(3), pp. 359–381. <https://doi.org/10.1134/S001685211803007X>
- Voitov G.I., Dobrovol'skii I.P. (1994). Chemical and isotopic carbon instabilities of natural gas flows in seismically active regions. *Fizika Zemli = Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 3, pp. 20–31. (In Russ.)

About the Authors

Nadezhda S. Syrbu – PhD (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory for Integrated Research of Environment and Mineral Resources, Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation
e-mail: syrbu@poi.dvo.ru

Do Huy Kyong – Director, Institute of Marine Geology and Geophysics, Vietnam Academy of Sciences and Technology
18, Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

Timur S. Yakimov – Postgraduate Student, Senior Engineer, Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation

Andrey O. Kholmogorov – Postgraduate Student, Senior Engineer, Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation

Yury A. Telegin – PhD (Geology and Mineralogy) Junior Researcher, Laboratory for Integrated Research of Environment and Mineral Resources, Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation

Urumu Tsunogai – Professor, Graduate School of Environmental Research, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Manuscript received 20 July 2020;

Accepted 19 February 2021; Published 30 September 2021