

УДК 550.4.02:550:424

**Р. Б. ШАКИРОВ\***, **А. И. ОБЖИРОВ\***, **Н. С. СЫРБУ\***, **НГУЕН НУ ЧУНГ\*\***, **ЗЫОНГ КУОК ХЫН\*\***,  
**Е. В. МАЛЬЦЕВА\***, **А. В. СОРОЧИНСКАЯ\***, **И. Г. ЮГАЙ\***, **ЛЕ ДЫК АНЬ\*\***, **ФУНГ ВАН ФАТЬ\*\***,  
**Н. С. ПОЛОНИК\***, **БУИ ВАН НАМ\*\***, **НГУЕН ВАН ДИЕП\*\***

\*Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

\*\*Институт морской геологии и геофизики Вьетнамской академии наук и технологий,  
 г. Ханой, Вьетнам

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ И ВОДЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТОНКИНСКОГО ЗАЛИВА (ЮЖНО-КИТАЙСКОЕ МОРЕ, ВЬЕТНАМ)

*В результате исследования донных осадков, придонной и поверхностной воды в Тонкинском заливе (Бакбо) в 2013 г. впервые были изучены основные особенности распределения газогеохимических полей и обнаружены аномалии углеводородных газов и водорода. Газогеохимические данные вынесены на временные разрезы сейсмического профилирования, что дало возможность выявить приуроченность аномалий метана и водорода к тектоническим разломам. Судя по низким отношениям метана к углеводородным газам ряда  $C_2-C_5$ , наличию аномалий водорода и построенной карте разломов, сделан вывод о преимущественно миграционном происхождении газовых аномалий. Наличие миграционных газов, био-маркеров пристана и фитана в совокупности с геологическими данными определяет нефтегазоносный потенциал осадочного бассейна Бейбу, контролируемого с запада рифтом Красной реки, где выявлены ураганные концентрации метана ( $13 \text{ мл/дм}^3$ ) в пресноводных источниках.*

Ключевые слова: газогеохимия, метан, углеводородные газы, водород, гелий.

*We investigated the bottom sediments, near bottom and surface water in the Gulf of Tonkin (Bac Bo Gulf) in 2013, which provided the first-ever opportunity to study the main distribution patterns of gas geochemical fields and detect anomalies of hydrocarbon gases and hydrogen. Gas geochemical data were plotted on time sections of seismic profiling to reveal the occurrence of methane and hydrogen anomalies on tectonic faults. Judging from the low ratios of methane to hydrocarbon gases of the  $C_2-C_5$  series, the presence of hydrogen anomalies and the map of faults which we constructed, it is concluded that the gas anomalies have largely a migration origin. The presence of migrating gases and pristine and phytane biomarkers, coupled with geological data, determines the oil-and-gas bearing potential of the Beibu sedimentary basin governed on the west by the Red River Rift where hurricane concentrations of methane ( $13 \text{ mL/dm}^3$ ) were discovered in freshwater sources.*

Keywords: gas geochemistry, methane, hydrocarbon gases, hydrogen, helium.

### ВВЕДЕНИЕ

Районы поиска и добычи углеводородов на морских акваториях в настоящее время расширяются и соответственно увеличиваются объемы научно-исследовательских работ, направленных на изучение распределения и источников природных газов в районах, считавшихся ранее неперспективными. В этой связи большой интерес представляет газогеохимическая съемка, привлекательность которой обусловлена мобильностью и эффективностью решения фундаментальных и поисковых задач в целях исследования закономерностей рассеивания природных газов и выявления углеводородных скоплений. Основные объекты при использовании газогеохимического метода на акваториях — поверхностные осадки, придонная и поверхностная вода.

В результате газогеохимических исследований, проводившихся в Южно-Китайском море Тихоокеанским океанологическим институтом ДВО РАН в 1981, 1983, 1989 и 1990 гг. совместно с вьетнамскими специалистами [1], в западной (привьетнамской) части акватории обнаружена резкая изменчивость концентраций метана и углеводородных газов в придонной воде. Минимальные концентрации метана

© 2015 Шакиров Р. Б. (ren@poi.dvo.ru), Обжиров А. И. (obzhirov@poi.dvo.ru), Сырбу Н. С. (syrbu@poi.dvo.ru), Нгуен Ну Чунг (nntrung@imgg.vast.vn), Зыонг Куок Хын (quochunghdh@yahoo.com), Мальцева Е. В. (ekor@poi.dvo.ru), Сорочинская А. В. (sorochin2001@mail.ru), Югай И. Г. (yugai.iosif@mail.ru), Ле Дык Ань (leducanh01282@gmail.com), Фунг Ван Фать (nntrung@imgg.vast.vn), Полоник Н. С. (nikpol@poi.dvo.ru), Буи Ван Нам (buiannam.88@gmail.com), Нгуен Ван Диеп (nvdiiep@imgg.vast.vn)

(10–20 нл/дм<sup>3</sup>) установлены в глубоководной (500–3800 м) части моря. На шельфе (глубина 30–200 м) и склоне (глубина 200–500 м) его содержание увеличивалось до 30–40 нл/дм<sup>3</sup>. Аномальные поля концентраций метана, достигающие 250 нл/дм<sup>3</sup> и свидетельствующие о наличии нефтегазовых залежей, обнаружены в северной и южной частях привьетнамского шельфа. Газогеохимические исследования на шельфе южного Вьетнама, выполняемые сотрудниками ВНИИОкеангеология [2], показали, что аномалии углеводородных газов (УВГ) на участке Коншонской площади имеют эпигенетическое происхождение при основном термогенном источнике газогенерации. Установлен процесс миграции УВГ через осадки в водную толщу. В этом же районе геофизическими методами закартированы геологические тела ультраосновного состава [1], которые в окраинных морях востока Азии сопровождают наиболее крупные месторождения нефти и газа.

В настоящее время большой интерес для фундаментальных и прикладных исследований представляют районы в морях западной части Тихого океана, считавшиеся неперспективными в отношении углеводородного потенциала. При этом особое внимание вызывают неизученные структуры, которые могут быть очагами генерации глубинных флюидов, и глубинные разломы как каналы транзита газов из недр к поверхности.

Цель данной работы — проведение газогеохимических исследований на северо-западной акватории Южно-Китайского моря. В качестве начального полигона выбран Тонкинский залив как один из наименее изученных и сопряженных с крупнейшей рифтовой системой Красной реки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Краткая характеристика района исследований.** В Южно-Китайском море в нефтегазоносном отношении наиболее перспективен южный шельф Вьетнама [3]. На склоновых глубинах основными миграционными каналами для газово-жидких флюидов считаются сбросы, сконцентрированные ниже бровки шельфа [4]. Также Южно-Китайское море является перспективным бассейном в отношении залежей гидратов метана [5]. В его северной части, на участке с координатами 19,9° с. ш., 115,2° в. д., китайскими исследователями обнаружены газовые гидраты в интервале осадочной толщи 153–225 м ниже поверхности дна [6]. Здесь были установлены не менее восьми палеовыбросов метана из донных отложений, связанных с понижением уровня моря, диссоциацией газовых гидратов, изменением гидрологических параметров и источником углеводородного (метанового) флюида [7]. В настоящее время этот участок соответствует глубинам 473–785 м, а масштабное окисление метана способствовало интенсивному накоплению карбонатных пород с преобладанием арагонита [7].

Однако наиболее доступный мелководный, до 50 м глубиной, северный шельф до сих пор не изучен в газогеохимическом отношении. Район работ расположен в осадочном бассейне Бейбуван, занимающем мелководье с глубинами от 20 до 70 м (рис. 1). Бассейн образовался в результате полициклических рифтогенных процессов в мезозое и кайнозое и разбит разломами северо-восточного направления. Под действием тектонических подвижек основание бассейна было осложнено депрессиями, опусканиями и поднятиями, которые отображаются на картах спутниковых гравитационных аномалий. В Тонкинском заливе развиты тектонические депрессии северо-восточного и западно-восточного простирания, причем последние из них более глубокие. В северо-восточной и юго-западной частях бассейна распространены поднятия северо-восточного простирания. Бассейн пересечен разломами северо-восточного, субширотного и субмеридионального простирания, при этом разломы северо-восточного–юго-западного направления преобладают и являются более глубокими. Разломы субмеридионального простирания более мелкие, но встречаются чаще.

**Характеристика донных отложений.** Гранулометрический состав осадков оценивался при первичном описании образцов и при характеристике микроскопических препаратов. Основной тип осадка — песчано-алевритовый, преимущественно серого цвета. В районе работ осадки не имеют запаха, представлены илом с примесью песка, во внешней стороне залива на дне обнажаются твердые карбонатные породы (известняк). На профилях I и II, ближайших к берегу (глубина от 7 до 32 м), присутствуют пелиты и алевриты пелитовые. При удалении от берега и увеличении глубины до 53 м размер частиц укрупняется (псаммит алевритовый, реже пелит алевритовый). Это нетипичная ситуация: как правило, по удалении от берега размер частиц уменьшается. Для уточнения этого наблюдения необходимы дополнительные данные. Очевидно, большая примесь грубозернистой составляющей образуется за счет сноса обломочного материала с суши, в том числе с многочисленных островов, и контролируется гидродинамическим

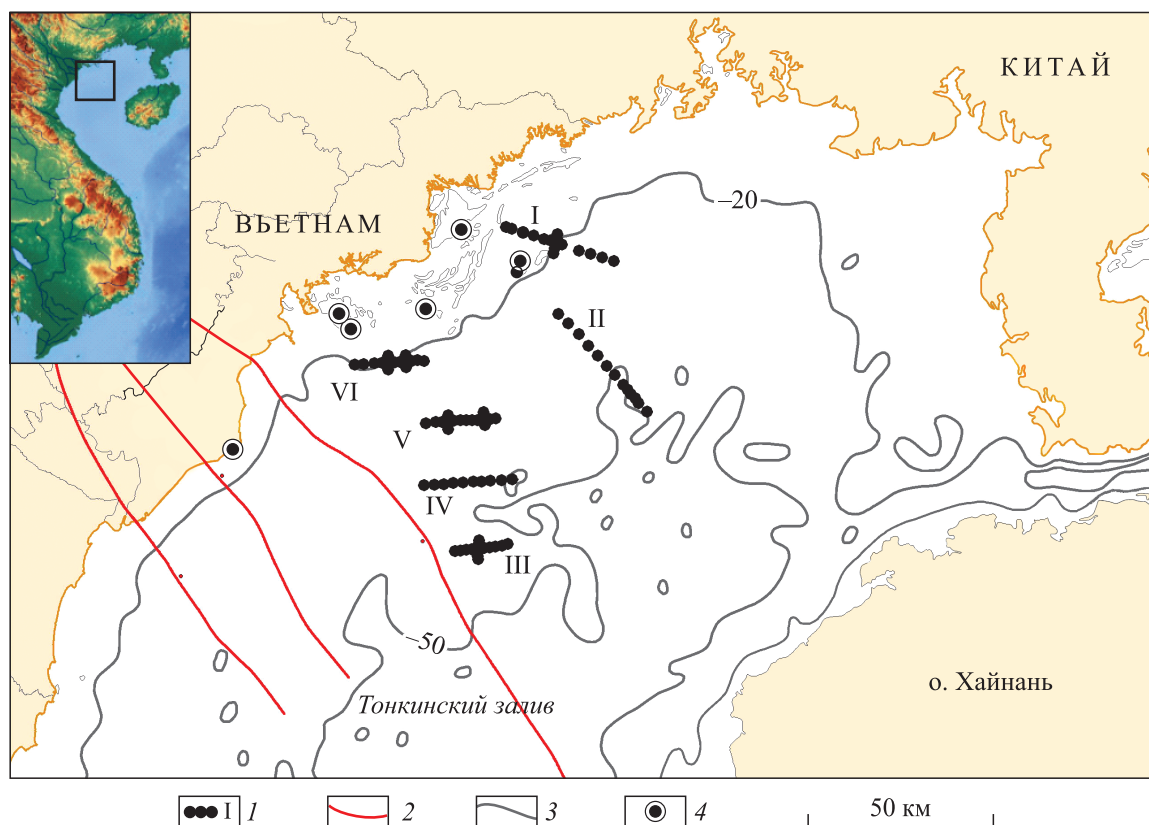


Рис. 1. Карта района комплексных геолого-геофизических исследований в Тонкинском заливе, 2013 г.

1 — профиль и его номер; 2 — разломы рифта Красной реки; 3 — изобаты; 4 — станции отбора проб воды на суше. На врезке квадратом показано положение района работ на карте Вьетнама.

режимом. Компонентный состав проб устанавливался при изучении микроскопических препаратов с полуколичественным определением основных осадкообразующих компонентов (обломочный, глинистый, биогенные карбонатный и кремнистый, аутигенный).

По результатам первичного описания осадков и изучения микроскопических препаратов все пробы можно отнести к терригенным с примесью биогенного материала. Главные обломочные минералы (в порядке убывания): полевые шпаты с преобладанием плагиоклазов, кварц, карбонатные обломки, амфиболы, биотит, циркон. В восточной части залива отмечается пиритизация фораминифер и образование фрамбоидального аутигенного пирита (1–2 %). Среди биогенных компонентов наиболее распространены карбонатсодержащие организмы: фораминиферы и обломки раковин (10–50 %). Кремнийсодержащие организмы представлены диатомеями и спикулами губок (от 5 до 20 %). Концентрация  $C_{орг}$  в осадках изменяется в широких пределах (от 0,25 до 1,23 %) и коррелирует с пелитовой составляющей. Содержание неорганического углерода также меняется в широком диапазоне (от 0 до 1,69 %). При движении от берега (с севера на юг) отмечается уменьшение содержания органического углерода в осадках и увеличение — неорганического.

**Обработка материалов.** Экспедиционные работы проводились на 97 станциях на шести профилях. Первичная обработка проб (дегазация, фиксация и подготовка к транспортировке) выполнена в Совместной вьетнамо-российской лаборатории в Институте морской геологии и геофизики ВАНТ (г. Ханой). Исследовано 210 проб придонной и поверхностной воды, 80 проб осадочных отложений для анализа на содержание природных газов и 40 образцов осадков на геохимический и хромато-масс-спектрометрический анализы. Осадок отбирался при помощи стальной трубки (длина 130 см, вес 50 кг) — длина кернов в среднем составляла 65 см. Из них с интервалом 10–15 см брали образцы при помощи 10 мл шприцев. Для взятия проб воды использовали батометры NISKIN. Пробы отбирались на двух уровнях: у дна и у поверхности (средняя глубина района работ 20 м). Также взяты образцы воды из сква-

жин и подземных источников на островах Катба (8 проб), Кото (2) и Нгоквын (2) и в устье Красной реки за пределами района работ (1). Они помещались в стеклянные бутылочки объемом 65 мл, фиксировались реагентом, герметично упаковывались для дальнейшего анализа в лаборатории Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН. Сейсмическое профилирование и картирование разломов осуществлялись с применением оборудования «Спаркер Геонт». Обработка сейсмограмм выполнялась в программе REFLEXW ver. 6.0 и включала анализ сейсмограмм, вычленение амплитуд, фильтрацию частот, коррекцию, наложение и интерпретацию в сопоставлении с данными магнитометрических измерений и картой гравитационного поля.

Анализ углеводородных газов, азота, кислорода и углекислого газа был выполнен на двухканальном газовом хроматографе КристалЛюкс 4000М с датчиками потока ионизации и теплопроводности, чувствительностью  $10^{-5}$  %. Для анализа гелия и водорода применялся газовый хроматограф «Хроматэк-Газохром 2000» (ОАО «Хроматэк», 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. Извлечение гелия и водорода из донных осадков проводилось методом Head Space. Образец из осадочных кернов (12 мл) отбирался в склянки, заполненные солевым раствором, 20 мл шприцем с обрезанным носиком. Интервал опробования составлял 10 см. Затем склянка доверху заполнялась солевым раствором, закрывалась резиновой пробкой с использованием иголки, чтобы удалить оставшийся воздух. Пробы фиксировались и хранились при температуре 4 °С в темном месте для их последующей дегазации в Институте морской геологии и геофизики ВАНТ и анализа в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН. Хромато-масс-спектрометрический анализ проводился на приборе Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra (Shimadzu, Япония). В качестве устройства для ввода пробы в инжектор использовался многофункциональный пиролизёр Multi-Shot Pyrolyser EGA/PY-3030 (Frontier Lab., Япония), укомплектованный дополнительными блоками Carrier Gas Selector CGS-1050Ex и Selective sampler SS-1010E (Frontier Lab., Япония). При определении фоновых концентраций метана в донных отложениях применялись методы, регламентированные действующими нормативными указаниями установления фоновых концентраций веществ (газов) и имеющимися методическими вероятностно-статистическими опубликованными источниками [8–10]. Лаборатория газогеохимии Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН имеет Свидетельство Росстандарта № 49 к паспорту лаборатории ПС 1.021–12.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Распределение природных газов в Тонкинском заливе.** Район исследований можно разделить на шесть участков согласно профилям, которые были выбраны по предварительным геофизическим исследованиям Института морской геологии и геофизики ВАНТ (рис. 2). Основным критерием для выбора станций отбора проб были геофизические признаки, указывающие на наличие каналов миграции газов.

Метан обнаружен во всех пробах осадка, этан — в 95 % проб. При этом концентрации этана были в 10 раз ниже, чем метана, но иногда достигали и таких же значений (например, 1050 нл/дм<sup>3</sup> на станции 73). В 80 % проб обнаружены пропан и бутан. Содержание метана варьирует от 1010 до 8000 нл/дм<sup>3</sup>. Такие концентрации метана в поверхностных осадках, по аналогии с известными нефтегазовыми залежами в Охотском море, обычно говорят о существовании литологической покрывки, которая задерживает миграцию углеводородных газов при условии наличия их источника в осадочной толще или фундаменте. Фоновые концентрации метана в донных осадках Тонкинском залива — 3490 нл/дм<sup>3</sup>. Это достаточно высокий фон, который может указывать на диффузионное просачивание природного газа через слабо проницаемые толщи.

Характер нахождения газов в донных отложениях, придонной и поверхностной морской воде в целом свидетельствует об относительно равномерном распределении метана и его высших гомологов, количество которых в сумме часто сравнимо с содержанием метана (табл. 1 и 2). Концентрации метана в морской воде редко превышают 150 нл/дм<sup>3</sup> и в большинстве случаев находятся в пределах 50–70 нл/дм<sup>3</sup>, что совпадает с диапазоном архивных данных, приведенных выше. С одной стороны, это указывает на хорошую воспроизводимость результатов газогеохимической съемки, а с другой — подтверждает отсутствие интенсивных газовых потоков в условиях низкой сейсмичности западной части Южно-Китайского моря. Следует отметить, что концентрации метана в морской воде Тонкинском залива за период исследований были не менее 50 нл/дм<sup>3</sup>, что в целом превышает в три раза концентрации метана в глубоководных районах Южно-Китайского моря.

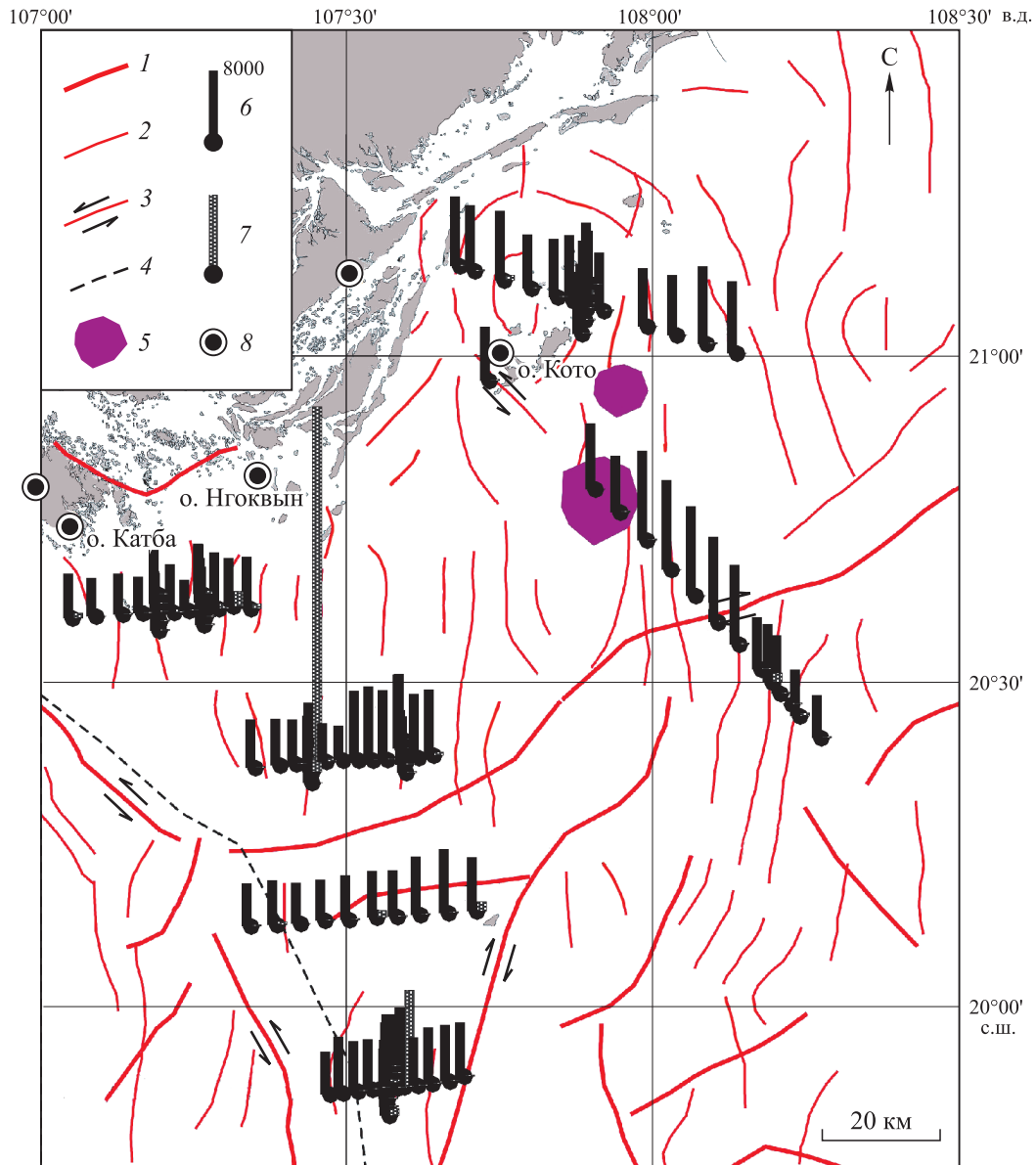


Рис. 2. Распределение метана в придонном слое вод Тонкинского залива на карте поверхностных разломов, выделенных по комплексированию геофизических методов, 2013–2014 гг.

Тектонические нарушения: 1 — главные разломы, 2 — второстепенные, 3 — сдвиги, 4 — граница провинции; 5 — магматические комплексы; 6 — диаграммы концентраций метана (макс. 8000 нл/дм<sup>3</sup>); 7 — аномалии водорода в придонном слое толщи вод; 8 — места отбора проб воды на суше.

Распределение гелия относительно однородно и не имеет заметных всплесков концентраций. В распределении водорода обнаруживается ряд аномалий (см. табл. 2), когда газ поступает в поверхностные осадки и водную толщу через сеть разломов. Фоновые содержания гелия в осадках составляют 10,4 ppm (10<sup>-4</sup> % об.), водорода — 6,4 ppm. В морской воде фоновые содержания гелия 8,55 ppm, водорода — 4,5 ppm. В целом в районе работ содержание гелия не имеет заметных колебаний, оставаясь на уровне фоновых значений с небольшими отклонениями. Учитывая близость глубинной рифтовой зоны Красной реки, нельзя исключать появления аномалий гелия при последующих исследованиях, поскольку его фон относительно повышен.

Источником водорода теоретически могут быть угленосные толщи с углем крайней стадии метаморфизма — антрацитом, месторождения которого разрабатываются открытым способом на побережье

Таблица 1

Среднее содержание углеводородных газов в донных осадках (10<sup>-4</sup>% об.), ppm

| Номер профиля | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | <i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | neo-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | <i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | He                      | H <sub>2</sub>          |
|---------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| I             | 4,1             | 0,5                           | 0,1                           | 0,2                           | 0,1                           | 2,8                                      | 0,5                            | Следы                              | 1,1                                      | <u>0,5–13,3</u><br>11,0 | <u>0,9–15,7</u><br>4,0  |
| II            | 5,1             | 0,5                           | 0,1                           | 0,1                           | 0,1                           | 2,8                                      | 0,4                            | Следы                              | Следы                                    | <u>7,6–12,0</u><br>10,0 | <u>1,1–20,1</u><br>6,0  |
| III           | 2,2             | 4,0                           | 0,4                           | 0,1                           | 0,1                           | Следы                                    | Следы                          | 0,3                                | Следы                                    | <u>8,8–13,1</u><br>11,0 | <u>1,9–16,8</u><br>6,0  |
| IV            | –               | –                             | –                             | –                             | –                             | –  | –                              | –                                  | –  | –                       | –                       |
| V             | 3,8             | 0,3                           | 0,2                           | 0,1                           | 0,1                           | 6,7                                      | 0,3                            | 3,8                                | Следы                                    | <u>8,7–12,3</u><br>11,0 | <u>1,3–20,5</u><br>6,0  |
| VI            | 4,7             | 0,32                          | 0,1                           | 0,1                           | 0,1                           | Следы                                    | 0,3                            | 4,7                                | Следы                                    | <u>4,0–13,7</u><br>10,0 | <u>0,3–101,6</u><br>6,0 |

Примечание. Здесь и в табл. 2 для He и H<sub>2</sub> в числителе приведен разброс значений (min–max), в знаменателе — среднее. Прочерк — не определено.

Таблица 2

## Среднее содержание газов, растворенных в воде Тонкинского залива

| Номер профиля | CO <sub>2</sub>    | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>    | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | <i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | He                      | H <sub>2</sub>          |
|---------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
|               | мл/дм <sup>3</sup> |                |                | нл/дм <sup>3</sup> |                               |                               |                               |                               |                               |                                |  | Ppm                     |                         |
| I             | 0,21               | 4,8            | 10,64          | 122,0              | 17,8                          | 0,2                           | 1,9                           | 0,1                           | 0,09                          | 28,4                           | Следы                                    | <u>4,2–10,8</u><br>7,5  | <u>0,5–11,2</u><br>3,8  |
| II            | 0,2                | 4,2            | 10,0           | 98,8               | 8,7                           | 0,9                           | 1,1                           | 0,5                           | Следы                         | 22,4                           | 17,1                                     | <u>3,2–11,9</u><br>7,7  | <u>1,0–20,0</u><br>4,7  |
| III           | 0,2                | 4,9            | 10,8           | 85,7               | 11,6                          | 0,6                           | 0,9                           | 0,2                           | 4,4                           | 12,8                           | 11,9                                     | <u>7,5–10,5</u><br>9,3  | <u>1,0–191,2</u><br>3,7 |
| IV            | 0,13               | 4,69           | 10,21          | 81,03              | 14,63                         | 0,44                          | Следы                         | 0,21                          | Следы                         | 5,32                           | Следы                                    | <u>6,5–13,8</u><br>9,4  | <u>6,5–13,8</u><br>9,4  |
| V             | 0,1                | 4,7            | 10,3           | 92,3               | 12,0                          | 0,8                           | Следы                         | Следы                         | Следы                         | 3,1                            | Следы                                    | <u>4,4–14,1</u><br>10,0 | <u>1,5–716,5</u><br>4,3 |
| VI            | 0,1                | 4,6            | 9,8            | 81,8               | 11,1                          | 0,4                           | Следы                         | Следы                         | Следы                         | 3,0                            | Следы                                    | <u>1,5–11,4</u><br>7,9  | <u>1,5–31,2</u><br>6,5  |

Тонкинского залива. Однако при исследовании в 2014 г. антрацитового карьера заметных концентраций водорода в гидрологических скважинах и источниках на прилегающей суше, включая острова, нами не выявлено. Вероятно, определенный вклад в создание аномалий водорода в Тонкинском заливе вносит другой источник, который сопряжен с очагом генерации углеводородных газов. Для интерпретации этого источника требуются дополнительные исследования. Примечательно, что в 2013 г. в районе работ были зарегистрированы землетрясения [11], которые довольно редки для данной территории. Высокая коровая сейсмическая активность соседней суши является дополнительным фактором поступления углеводородных газов и водорода на поверхность дна и в водную толщу. Ниже приведены графики содержания водорода и гелия по профилю VI и их сопоставление с интерпретированным разрезом непрерывного сейсмического профилирования (рис. 3). Отчетливо выражены пики содержаний водорода и гелия над разломами, при этом максимум зафиксирован над разломами, секущими морское дно, а второй всплеск — над «слепыми» разломами, не выходящими на поверхность дна. Незначительный пик в правой части профиля (см. рис. 3, а) нуждается в дополнительных исследованиях и более детальной интерпретации материалов непрерывного сейсмического профилирования (НСП). В левой части профиля НСП

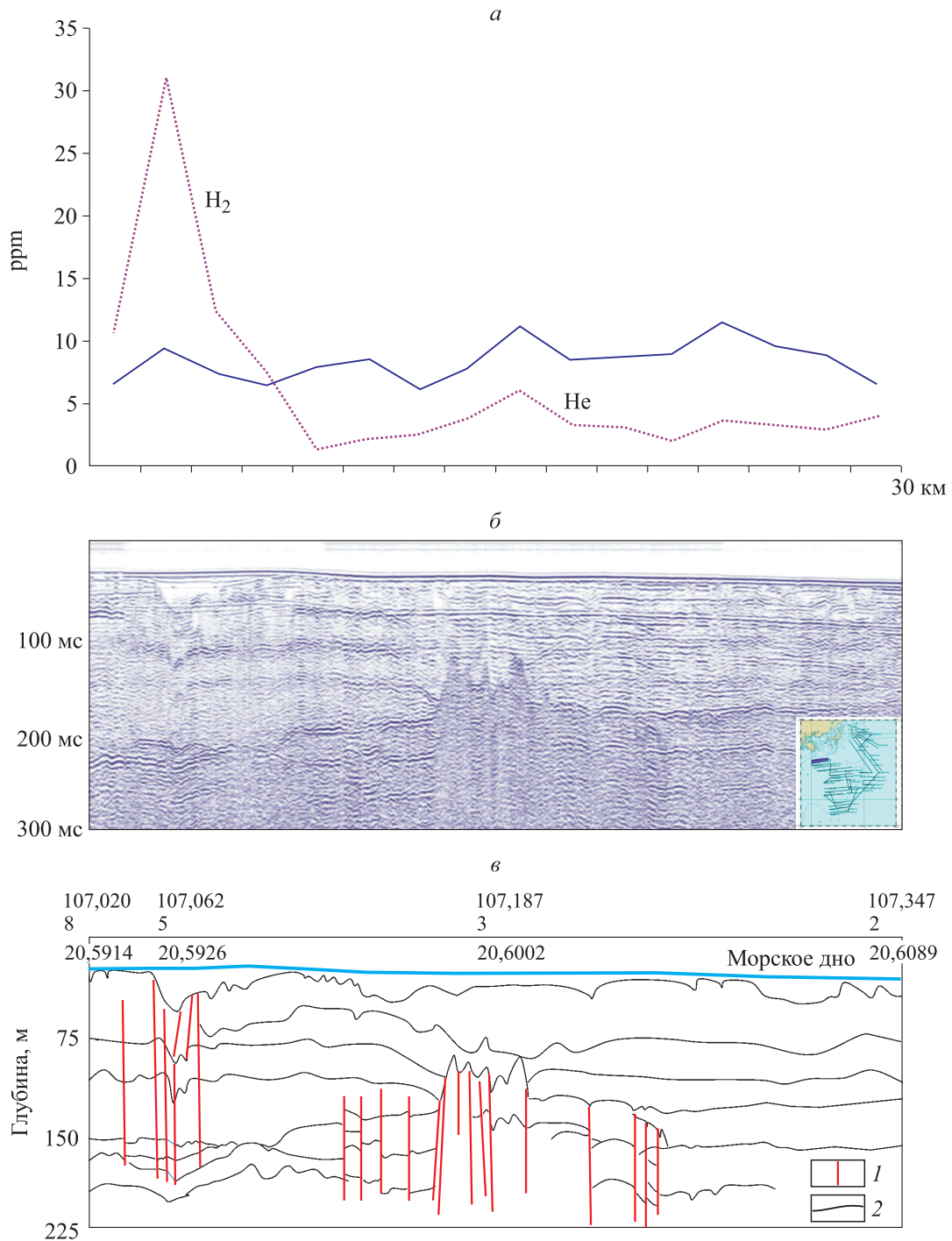


Рис. 3. Распределение гелия и водорода в осадках вдоль профиля VI (а); временной разрез непрерывного сейсмического профилирования (б) и его интерпретация (в).

1 — разломы; 2 — сейсмические границы осадочных слоев.

в верхней толще, вероятно, отображена зона расширения, а в центральной (второй пик водорода и гелия) в нижней толще — зона сжатия (см. рис. 3, б). На этом же профиле в осадке содержание метана достигало максимальных для района работ значений: от 1490 до 8170 нл/дм<sup>3</sup>, что, скорее всего, связано с близостью к системе разломов рифта Красной реки. Содержание гелия на профиле в осадке менялось от 3,7 до 13,7 ppm (в среднем 9,4), в придонной воде — от 1,5 до 11,4 ppm (в среднем 7,9). Содержание водорода

варьировало от 1,5 до 12,3 ppm, а метана — от 700 до 1300 нл/дм<sup>3</sup> (бутан — от 0,5 до 11,4 нл/дм<sup>3</sup>). В поверхностной воде концентрация гелия также не превышала 13 ppm, водорода — не более 8,5 ppm, а метана — от 900 до 1200 нл/дм<sup>3</sup> (бутан — до 12,9 нл/дм<sup>3</sup>).

Особенно важно, что на профилях V и VI были обнаружены биомаркеры углеводородных скоплений — изопреноиды пристан и фитан. Для образцов осадка по этим профилям характерно умеренное содержание органического углерода (0,31–0,74 %). В составе органического вещества преобладали линейные алканы с числом углеродных атомов от C<sub>10</sub> до C<sub>24</sub>. Концентрационный максимум на кривой распределения *n*-алканов находится в области C<sub>14</sub>–C<sub>17</sub>. Соотношение пристан/фитан (Pr/Ph) для всех образцов колеблется от 0,8 до 1,1 и указывает на то, что процесс накопления органического вещества происходил в восстановительных условиях, без доступа кислорода. Низкое значение Pr/Ph (~1) позволяет сделать вывод о морском источнике органического вещества. Для всех изученных образцов характерно присутствие на хроматограммах пиков таких полярных органических соединений, как фурфураль, фенол, бензальдегид, 3-фуранкарбоксальдегид. Производные фурана образовались, скорее всего, из пентоз — сахаров, входящих в состав клеточных стенок растений, а также различных биополимеров (ДНК, полисахариды). Эти профили приближены к дельте Красной реки, и на них зафиксированы аномалии водорода, гелия и углеводородов. Перечисленные особенности распределения газов и появление характерных биомаркеров, вероятно, обусловлены выносом газов и углеводородных флюидов по системе разломов рифта Красной реки.

Медианные содержания углеводородных газов в донных отложениях для каждого профиля (участка) приведены в табл. 1. Их распределение со значительной долей предельных гомологов метана при аномалиях водорода указывает на наличие миграционных компонентов: этана, пропана, бутана и пентана (см. табл. 1 и 2) при фоновых значениях метана, равных 4 ppm. Содержание бутана достаточно постоянное на всех профилях, за исключением профиля V, где оно увеличивается до 6,7 ppm (см. табл. 1). Наличие в осадках углеводородных газов C<sub>2</sub>–C<sub>5</sub> в близких с метаном концентрациях указывает на их эпигенетический термогенный генезис. Концентрации растворенных газов относительно стабильны, но углеводородные газы на некоторых участках достигают очень высоких для морских вод значений, например бутан (есть на всех станциях) и пентан (найден на профилях II и III) (см. табл. 2).

Повышенные содержания водорода (до 100 ppm) обнаружены на профиле V. Также выявлены значительные аномалии водорода (до 700 ppm), превышающие фон в 100 раз, в придонном слое морской воды — станция 72, профиль IV. В поверхностном слое воды тоже зафиксированы водородные аномалии (до 300 ppm) на станциях 9 (профиль I), 34 (профиль III) и 73 (профиль V). Эти аномалии обусловлены миграцией газов по тектоническим разломам из глубоких горизонтов (см. рис. 3; рис. 4) и являются газогеохимическим признаком восходящего флюида. Как известно, водород в большинстве случаев присутствует в газах, поступающих по сейсмоактивным разломам, и служит их индикатором.

Измеренные методом газовой хроматографии концентрации растворенного углекислого газа в морской воде Тонкинского залива в целом равномерно варьировали в пределах 0,1–0,2 мл/дм<sup>3</sup>, азота — 9–10, кислорода — 4,6–5 мл/дм<sup>3</sup>. Концентрации углекислого газа в осадке показали несколько повышенные по сравнению с морской водой значения (0,2–0,3 мл/дм<sup>3</sup>), однако также обнаружены редкие превышения (до 1 мл/дм<sup>3</sup>). Кислород (4–5 мл/дм<sup>3</sup>) и азот (9–10 мл/дм<sup>3</sup>) распределены равномерно, в целом соответствуя распространению азота и кислорода атмосферного происхождения.

**Распределение углеводородных газов, гелия и водорода на островах Тонкинского залива.** Несколько неожиданными оказались измерения содержания метана в устье Красной реки, в скважинах и источниках на островах Катба, Кото и Нгоквын. Скважины глубиной 50–60 м используются путем прокачки насосом для снабжения местных жителей питьевой водой. В нескольких скважинах были обнаружены ураганные содержания метана (табл. 3).

Такие концентрации сопоставимы с аномалиями метана в осадках над углеводородными залежами на шельфе о. Сахалин или в гранитоидах Южного Приморья. Скважины находятся в пределах развития сложнодислоцированных структур, сложенных разновозрастными древними породами. Предварительно можно утверждать, что концентрации метана, растворенного в пресных водах охваченного опробованием сухопутного обрамления, уменьшались с запада на восток, от дельты Красной реки. Меньшие значения обнаружены в колодцах и других источниках пресной воды на о. Катба, еще меньшие — на островах Кото и Нгоквын. Это можно объяснить уменьшением интенсивности газово-флюидных потоков при удалении от системы разломов рифта Красной реки. Обращает на себя внимание разница между очень высокими концентрациями метана в скважинах и источниках островов и невысокими — в осадках и



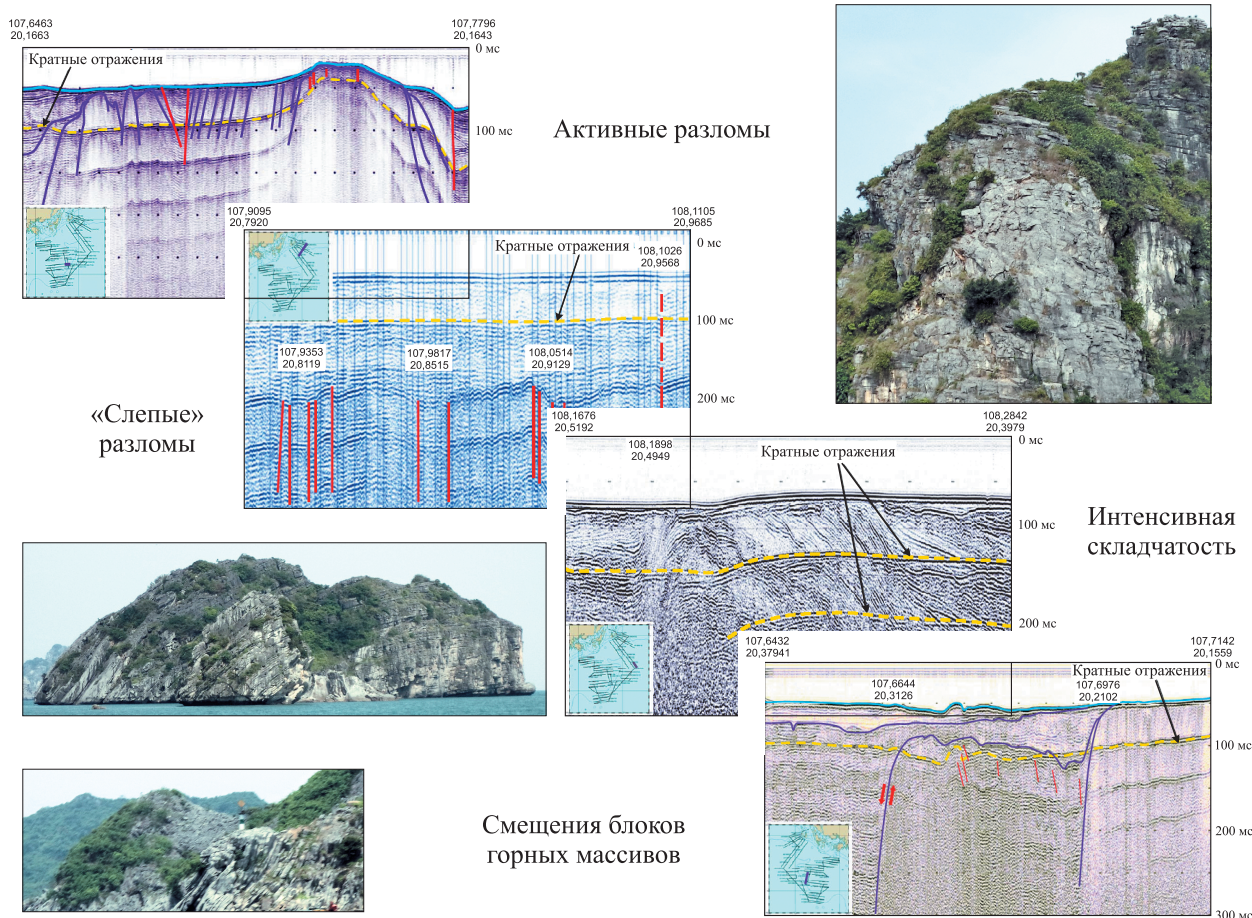


Рис. 4. Основные геологические факторы, влияющие на формирование вертикального потока природных газов на морском дне и суше в районе исследований.

морской воде. Вероятно, причиной этого являются интенсивные процессы окисления метана и переработки органического вещества в Тонкинском заливе в морских осадках и морской воде, о чем свидетельствуют низкое содержание органического углерода и другие признаки. Окисление метана также выражается в накоплении карбонатов, как это происходило в геологическом прошлом [12]. Кроме того, плотные карбонатные породы, которые были встречены на большинстве станций при отборе гравитационной трубкой, служат хорошей крышкой и сдерживают поступление флюидов на морское дно. Фоновые концентрации гелия в водных источниках островов составили 14,5 ppm, а водорода — 2–3 ppm. Высокие содержания гелия с превышением фона на 10 ppm обнаружены на о. Кото. Любопытно, что в пробах пресной воды, отобранных методом равновесных концентраций с островов и побережья в 2013 г., не обнаружено высоких концентраций водорода, которые можно было бы ожидать в сравнении с аномалиями, найденными в осадках и морской воде. С этой целью в апреле 2014 г. проведено повторное опробование скважин и дополнительных объектов. Был использован метод вакуумной дегазации пресной воды, который применялся для дегазации проб морской воды в 2013 г. Результаты показали, что в воде о. Катба содержание водорода достигает 25 ppm, а на побережье — 18 ppm, что сопоставимо со средним содержанием водорода в морской воде в 2013 г. Особенно важно, что в пресной воде источников и скважин на о. Катба были обнаружены очень высокие концентрации углекислого газа (18–28 мл/дм<sup>3</sup>), что может быть связано с выщелачиванием карбонатных пород, а также с наличием интрузивных тел, внедренных в карбонатные толщи. Местные жители используют эту воду в качестве питьевой, но по содержанию углекислоты она приближается к минеральной воде. На следующем этапе планируется изучить изотопный состав углерода карбонатов и углекислого газа для уточнения происхождения углекислого газа.

Таблица 3

## Содержание углеводородных газов, гелия и водорода в гидрологических горизонтах сухопутного обрамления и некоторых островов Тонкинского залива

| Место, объект                          | Номер пробы | CH <sub>4</sub> , 10 <sup>-4</sup> % | CH <sub>4</sub> , нл/дм <sup>3</sup> | CO <sub>2</sub> , % | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , % | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , % | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> , % | He, 10 <sup>-4</sup> % | H <sub>2</sub> |
|--|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------|----------------|
| Побережье бухты Халонг, грунтовая вода | Viet2013–2  | 2,5                                  | 202                                  | 0,124               | –                                 | –                                 | –                                  | 20,1                   | 1,4            |
| о. Катба, ручей                        | Viet2013–3  | <b>804,2</b>                         | <b>178 574</b>                       | 0,835               | –                                 | Следы                             | –                                  | 14,2                   | 1,4            |
| о. Катба, источник                     | Viet2013–4  | 2,2                                  | 135                                  | 0,323               | –                                 | –                                 | –                                  | 14,3                   | 0,9            |
| Гидрологическая скважина глубиной 60 м | Viet2013–5  | <b>577,0</b>                         | <b>128 024</b>                       | 4,887               | –                                 | 0,00001                           | –                                  | 16,0                   | 1,70           |
| скв. о. Катба                          | Viet2013–6  | 25,4                                 | 5297                                 | 3,803               | –                                 | Следы                             | –                                  | 15,0                   | 1,50           |
| скв. о. Катба                          | Viet2013–7  | 12,3                                 | 2382                                 | 5,426               | –                                 | –                                 | –                                  | 11,1                   | 0,6            |
| скв. о. Катба                          | Viet2013–8  | 3,7                                  | 469                                  | 3,815               | –                                 | –                                 | –                                  | 16,2                   | 0,9            |
| скв. о. Катба                          | Viet2013–9  | <b>61,9</b>                          | <b>13 418</b>                        | 2,950               | –                                 | Следы                             | –                                  | 12,1                   | 0,9            |
| скв. о. Катба                          | Viet2013–10 | <b>929,1</b>                         | <b>206 364</b>                       | 3,679               | –                                 | Следы                             | –                                  | 11,9                   | 0,3            |
| о. Кото                                | 1           | 12,8                                 | 2648                                 | 1,804               | –                                 | Следы                             | –                                  | 16,2                   | 1,7            |
| о. Кото                                | 2           | <b>448,5</b>                         | <b>105 058</b>                       | 1,973               | –                                 | 0,00003                           | 0,00003                            | 24,5                   | 0,6            |
| о. Нгоквын                             | 3           | 2,5                                  | 227                                  | 1,393               | –                                 | Следы                             | 0,00014                            | 13,3                   | 1,4            |
| о. Нгоквын                             | 4           | 5,6                                  | 956                                  | 2,418               | –                                 | Следы                             | 0,00005                            | 12,7                   | 2,3            |
| Колодец в дельте Красной реки          | 5           | <b>1 488 618</b>                     | <b>11 684 604</b>                    | 1,90                | 0,00009                           | 0,00003                           | –                                  | 17,4                   | 0,8            |

Примечание. Прочерк — не определено. Жирным шрифтом выделены anomalно высокие значения концентраций метана.

Анализ геологического строения показывает, что основными факторами, определяющими вертикальную или субвертикальную миграцию газовых компонентов (метан, углеводородные газы, гелий, водород, углекислый газ) в районе исследований, являются: диффузионное просачивание и тектонический режим территории, выражающийся в структурах выдавливания антиклинальных складок, которые сопровождаются формированием миграционных каналов в виде разломов, а также блоковые смещения геологических структур (см. рис. 4). Повышенный региональный фон гелия и водорода, возможно, связан с указанными геологическими особенностями. Основными разломами, формирующими каналы газовой проницаемости древних (палеозойских) пород на о. Катба и прилегающей территории, вероятнее всего, являются сдвиговые дислокации, определенные тектоническим режимом регионального сжатия [13].

Следует отметить, что особенности распределения природных газов, низкая сейсмическая активность шельфа, распространение термальных источников и угленосных площадей на прилегающей суше, линейный характер протяженных глубинных зон проницаемости и другие признаки позволяют провести параллель между системой рифта Красной реки и мезозойско-кайнозойской грабен-рифтовой системой Чукотского моря [14], а также линеаменами Хоккайдо-Сахалинской складчатой системы.

## ВЫВОДЫ

Впервые получены данные о распределении углеводородных газов, гелия, водорода, азота и углекислого газа в морских осадках и воде Тонкинского залива (северо-запад Южно-Китайского моря), что позволило выделить участки миграционных газов и проследить связь с геологическим строением района. Метан обнаружен во всех пробах осадка (до 9000 нл/дм<sup>3</sup>), этан — в 95 % проб. Концентрации этана в пробах были в 10 раз ниже, чем концентрации метана, но иногда достигали равных значений. В 75–80 % проб обнаружены пропан и бутан. В скважинах на островах Катба, Кото, Нгоквын и других в пределах Тонкинского залива, а также в колодцах и источниках зафиксированы ураганные концентрации метана — до 11 мл/дм<sup>3</sup> (при фоне 0,3 мл/дм<sup>3</sup>).

Выявлено, что распределение углеводородных газов носит необычный по сравнению с Охотским и Японским морями характер: в донных осадках и морской воде Тонкинского залива (Бакбо) обнаружены высокие концентрации углеводородных газов (до пентана) при сравнительно небольших концентрациях метана. Установлено высокое содержание водорода (максимум 700 ppm) в осадках и воде в районе эпи-

центра землетрясений, произошедших в 2013 г. перед началом работ. Всплески концентраций водорода свидетельствуют о сейсмотектонической активности района исследований. Обнаружено 20 аномалий водорода среди 96 станций исследования. Всплески концентраций водорода одновременно в составе аномальных газогеохимических полей говорят о поставке глубинного флюида. Концентрации метана в осадке достигали 8200 нл/дм<sup>3</sup>, высокое содержание углеводородных газов (этан, пропан и особенно бутан) указывают, вероятнее всего, на газоконденсатный источник.

Невысокие концентрации метана в донных отложениях могут быть обусловлены интенсивными процессами его окисления. Это также подтверждается данными хромато-масс-спектрометрических исследований и литературными сведениями [7]. Однако более важным фактором выступает наличие карбонатного и сланцевого флюидоупоров в районе исследований.

Полученные данные (высокие концентрации углеводородных газов, водорода и гелия, наличие биомаркеров) свидетельствуют о газоносном, возможно газоконденсатном, потенциале осадочного бассейна Бейбуван, при этом вклад глубинного газового углеводородно-водородного флюида может быть значителен. Невысокие концентрации метана в донных отложениях компенсируются ураганными его концентрациями на островах бассейна, где выносу метана с подземными водами не препятствуют региональный флюидоупор и «микробиальный» фильтр донных отложений и морской воды.

Исследование будет продолжено с расширением методической и аналитической базы, особенно в части отношений стабильных изотопов углерода метана, углекислого газа и карбонатов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (13–05–93000, 14–05–00294) и программы «Дальний Восток» ДВО РАН (12–III–А–07–139, 14–III–Д–07–039).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Обжиров А. И.** Газогеохимические поля и прогноз нефтегазоносности морских акваторий: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. — М., 1996. — 38 с.
2. **Илатовская П. В., Семёнов П. Б., Рыськова Е. О., Портнов А. Д., Серов П. И.** Распределение газообразных углеводородов в донных отложениях и придонно-пограничном слое водной толщи континентального шельфа Южного Вьетнама // Нефтегазоносная геология. Теория и практика. — 2012. — Т. 7, № 4. — С. 1–13.
3. **Аршев Е. Г.** Нефтегазоносность окраинных морей Дальнего Востока и Юго-Восточной Азии. — М.: Аванти, 2003. — 288 с.
4. **Liu C. S., Huang I. L., Teng L. S.** Structural features off southwestern Taiwan // Marine Geology. — 1997. — 137. — P. 305–319.
5. **Trung N. N.** The gas hydrate potential in the South China Sea // Journ. Petroleum Sci. Eng. — 2012. — Vol. 88–89. — P. 41–47.
6. **Zhang H., Yang S., Wu N., Su X., Holland M., Schultheiss P., Rose K., Butler H., Humphrey G.** Successful and surprising results for China's first gas hydrate drilling expedition // Fire in the ice: methane hydrate newsletter, Fall issue. — 2007. — P. 6–9.
7. **Han X. Q., Suess E., Huang Y. Y., Wu N. Y., Bohrrmann G., Su X., Eisenhauer A., Rehder G., Fang Y. X.** Jiulong methane reef: microbial mediation of seep carbonates in the South China Sea // Marine Geology. — 2008. — Vol. 249 (3–4). — P. 243–256.
8. **Нормативно-методическое** обеспечение охраны атмосферного воздуха. — Пермь: ИНТЕРЭКО, 1995. — Т. 2. — 249 с.
9. **Поротов Г. С.** Математические методы при поисках и разведке полезных ископаемых. Учеб. пособие. — Л.: Изд-во Ленингр. горн. ин-та, 1977. — 106 с.
10. **Смирнов Б. В.** Вероятностные методы прогнозирования в инженерной геологии. — М.: Недра, 1983. — 134 с.
11. **Trung N. N.** Basement structure of the Bac Bo Basin based on the 3D interpretation of satellite gravity and magnetic data // Proceedings of the 11<sup>th</sup> SEGJ Intern. Symposium. — Yokohama, 2013. — P. 1–3.
12. **Han X., Suess E., Liebetrau V., Eisenhauer A., Huang Y.** Past methane release events and environmental conditions at the upper continental slope of the South China Sea: constraints by seep carbonates // Intern. Journ. Earth Sci. (Geol. Rundsch). — 2014. — Vol. 103. — P. 1873–1887.
13. **Касаткин С. А., Голозубов В. В., Фунг Ван Фать, Ле Дык Ань.** Проявление кайнозойских сдвиговых дислокаций системы разломов Красной реки в палеозойских карбонатных толщах острова Катба (Северный Вьетнам) // Тихоокеан. геология. — 2014. — Т. 33, № 3. — С. 14–28.
14. **Шипилов Э. В., Сенин Б. В., Юнов А. Ю.** Осадочный чехол и фундамент Чукотского моря по сейсмическим данным // Геотектоника. — 1989. — № 5. — С. 99–109.

*Поступила в редакцию 30 октября 2014 г.*