

Научная статья

УДК 550.46

DOI: 10.31857/S0869769825030032

EDN: PLSSRC

## Потоки метана на границе раздела вода–атмосфера на акватории Южно-Китайского моря по результатам экспедиционных исследований

А.А. Легкодимов, Г.И. Мишукова, Ле Дык Ань, М.А. Бовсун, П.Д. Жердев✉

*Алексей Александрович Легкодимов*

младший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,

Владивосток, Россия

legkodimov.aa@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1768-8222>

*Галина Ивановна Мишукова*

кандидат географических наук, старший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,

Владивосток, Россия

gmishukova@poi.dvo.ru

<http://orcid.org/0000-0002-2806-3834>

*Ле Дык Ань*

кандидат компьютерных наук

Институт морской геологии и геофизики Вьетнамской академии наук и технологий,

Ханой, Вьетнам

leducanh010282@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-2995-9752>

*Мария Александровна Бовсун*

младший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,

Владивосток, Россия

bovsun.ma@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1916-3566>

*Павел Дмитриевич Жердев*

старший инженер

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,

Владивосток, Россия

zherdev.pd@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0009-0008-5739-7543>

<http://orcid.org/0000-0001-9828-5929>

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследований пространственно-временного распределения рассчитанных потоков метана на границе раздела вода–атмосфера на акватории Привьетнамского континентального шельфа, склона и открытой части моря по данным рейса № 88 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV88) в период с 1 по 29 ноября 2019 г. В результате исследований установлена высокая изменчивость от равновесия и слабой эмиссии 0–1 моль/(км<sup>2</sup>×сут) до потока очень высокой интенсивности 29 моль/(км<sup>2</sup>×сут). Активность газообмена на границе дно–вода–атмосфера обусловлена активным выходом CH<sub>4</sub> из донных отложений и контролируется комплексом геологических и гидрологических факторов.

**Ключевые слова:** метан, источник, концентрация, морская вода, атмосфера

**Для цитирования:** Легкодимов А.А., Мишукова Г.И., Ле Дык Ань, Бовсун М.А., Жердев П.Д. Потоки метана на границе раздела вода–атмосфера на акватории Южно-Китайского моря по результатам экспедиционных исследований // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 29–42.  
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030032>

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-47-04001, <https://rscf.ru/project/24-47-04001/>.

Original article

## Methane flows at the water–atmosphere interface in the South China Sea according to the results of expeditionary research

A.A. Legkodimov, G.I. Mishukova, Le Duc Anh, M.A. Bovsun, P.D. Zherdev

*Alexey A. Legkodimov*

Junior Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

[legkodimov.aa@poi.dvo.ru](mailto:legkodimov.aa@poi.dvo.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-1768-8222>

*Galina I. Mishukova*

Candidate of Sciences in Geography, Senior Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

[gmishukova@poi.dvo.ru](mailto:gmishukova@poi.dvo.ru)

<http://orcid.org/0000-0002-2806-3834>

*Le Duc Anh*

Candidate of Sciences in Computer

Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

[leducanh010282@gmail.com](mailto:leducanh010282@gmail.com)

<http://orcid.org/0000-0003-2995-9752>

*Maria A. Bovsun*

Junior Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

[bovsun.ma@poi.dvo.ru](mailto:bovsun.ma@poi.dvo.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-1916-3566>

*Pavel D. Zherdev*

Senior Engineer

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

[zherdev.pd@poi.dvo.ru](mailto:zherdev.pd@poi.dvo.ru)

<https://orcid.org/0009-0008-5739-7543>

**Abstract.** The article presents the results of studies of the spatiotemporal distribution of calculated methane flows at the water-atmosphere interface in the waters of the Vietnam continental shelf, slope and open part of the sea according to flight № 88 of the SRV Academician M.A. Lavrentiev (LV88) in the period from November 1 to November 29, 2019. As a result of the research, high variability was established from equilibrium and weak emission of 0–1 mole/(km<sup>2</sup>×day) to a very high intensity flux of 29 mole/(km<sup>2</sup>×day). The activity of gas exchange at the bottom–water–atmosphere boundary is due to the active release of CH<sub>4</sub> from bottom sediments and is controlled by a complex of geological and hydrological factors.

**Keywords:** methane, source, concentration, seawater, atmosphere

**For citation:** Legkodimov A.A., Mishukova G.I., Le Duc Anh, Bovsun M.A., Zherdev P.D. Methane flows at the water–atmosphere interface in the South China Sea according to the results of expeditionary research. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):29–42. (In Russ.).  
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030032>

**Funding.** The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-47-04001, <https://rscf.ru/project/24-47-04001/>.

## Введение

Различными исследованиями признается, что открытые океаны представляют собой источник поступления метана в атмосферу, хотя лежащий в их основе механизм производства метана остается неясным и является дискуссионным. По некоторым оценкам, глобальная морская эмиссия метана лежит в диапазоне от 11 до 18 млн т/год, причем 75% этого потока приходится на шельфовые районы [1]. Важный источник метана в атмосферу – эстуарии. При этом основным источником метана является метаногенная деградация обогащенных органическими веществами донных отложений [2]. В устье р. Жемчужная потоки метана на границе вода–атмосфера изменялись в широком диапазоне со средним значением 314,3±464,9 моль/(км<sup>2</sup>×сут) осенью и 184,2±187,5 моль/(км<sup>2</sup>×сут) летом [3]. В дельте р. Меконг потоки метана на границе вода–атмосфера составляли 118 моль/(км<sup>2</sup>×сут) [4]. Другие исследователи полагают, что континентальные шельфы являются более интенсивным источником. По данным разных исследователей, на континентальном склоне и шельфе среднее значение составляло 8,6±6,4 моль/(км<sup>2</sup>×сут) [5]; 15,6±8,0 моль/(км<sup>2</sup>×сут) [6]; 8,0±4,3 моль/(км<sup>2</sup>×сут) осенью; 4,1±5,2 моль/(км<sup>2</sup>×сут) летом; 1,1±0,8 моль/(км<sup>2</sup>×сут) зимой [3]; 8,3±4,1 моль/(км<sup>2</sup>×сут) [5]. В связи с тем, что метан – активный «парниковый» газ, концентрация которого в атмосфере возрастает, то исследование зон его эмиссии, особенно в нефтегазоносных районах, является одной из важных задач современной океанографии. В целом низкосейсмичное Южно-Китайское море в этом аспекте изучено недостаточно.

Цель статьи – на основе экспериментальных данных рассмотреть распределения потоков метана на границе раздела вода–атмосфера на континентальном Приветнамском шельфе, склоне и в открытой части Южно-Китайского моря.

## Материалы и методы

Непрерывный забор воды осуществлялся насосом из носового кингстона (уровень забора воды 4 м от поверхности моря) на ходу судна. Отбор проб воды производился с временной дискретностью 2–4 ч. При пробоотборе фиксировались время отбора и навигационная привязка к маршруту движения судна. Концентрация метана в пробах из проточной системы определялась методом “HeadSpace”, температура и соленость – с помощью термосалинографа SBE 45, метеорологические

наблюдения велись метеостанцией Davis Vantage Pro 2. В качестве газовой фазы применялся гелий, который напускался в склянки с помощью газового мешка “Tedlar Bag Dual Valve” (USA) с двумя клапанами. Через один клапан мешка, снабженный иглой, производился напуск гелия во время вытягивания 12 мл водного раствора шприцем через другой клапан. Пробы интенсивно встряхивались не менее 4 ч на перемешивающем устройстве LS 110 (Россия), затем газовая фаза извлекалась шприцем с соблюдением равновесных условий, и проба газа вводилась в хроматограф. Для хроматографического анализа газового состава использовался газовый хроматограф «КРИСТАЛЛЮКС-4000М», снабженный пламенно-ионизационным детектором, двумя детекторами по теплопроводности и двумя металлическими набивными колонками (сорбенты HayeSep D и NaX). Газ-носитель – гелий. Погрешность измерений составляет не более 5.

*Анализ газа.* Для анализа газового состава использовался газовый хроматограф «Кристаллюкс-4000М» (ЗАО «МЕТАХРОМ», г. Йошкар-Ола), оснащенный пламенно-ионизационным детектором и двумя детекторами по теплопроводности. Минимальный объем вводимой в прибор газовой фазы составлял 5 мл. Пламенно-ионизационный детектор (ПИД) использовался для качественного и количественного анализа метана и других углеводородов с точностью 10–6%. Неорганические газы (азот, кислород, углекислый газ), а также метан с концентрацией более 1% анализировались на детекторе по теплопроводности (ДТП), чувствительность которого составляет 0,01%.

*Условия газохроматографического анализа:*

ПИД: колонка металлическая, 2 м, заполненная HayeSep SD, 0,2–0,3 мм.

ДТП: колонка металлическая, 1 м, заполненная молекулярными ситами 5А, 0,2–0,3 мм, температура колонок в изотермическом режиме – 50°; с программированием температуры – 50–175°, 10 град./мин.; температура детекторов – 190°, газ-носитель – гелий. Для калибровки прибора применяются сертифицированные поверочные газовые смеси производства ООО «ПГС-Сервис». Расчет концентраций метана, растворенного в морской воде, производился по методике S. Yamamoto et al. [7] в модификации D. Wiesenburg and N. Guinasso [8] с использованием расчетных констант растворимости метана.

Дополнительно для анализа распределения климатически активных газов в приводной атмосфере Южно-Китайского моря авторы изучали данные, полученные с помощью лазерных анализаторов на борту НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2019 г. Основной задачей являлось исследование распределения и динамики парниковых газов в приземном слое атмосферы в рейсе LV88 на основе сбора и анализа данных по содержанию метана и углекислого газа на двух уровнях высот относительно водной поверхности согласно движению судна. Измерение эмиссии  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и паров воды производилось с помощью двух лазерных анализаторов потоковых концентраций газов Picarro G2311-f (Picarro, США). Данный газоанализатор предназначен для измерения эмиссии диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), метана ( $\text{CH}_4$ ) и паров воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ) при скорости передачи данных 10 Гц для каждого газа (общая скорость передачи 30 Гц), что позволяет делать до 2000 измерений в минуту, с точностью до  $1 \cdot 10^{-14}$  для  $\text{CH}_4$  и  $1 \cdot 10^{-12}$  для  $\text{CO}_2$ . Погрешность прибора составляет 200 ppb для  $\text{CO}_2$ , 3 ppb для  $\text{CH}_4$  и 6 ppb + 0,3% показаний для водяного пара при небольшой подвижности прибора.

Установка газоанализаторов производилась в лаборатории научно-исследовательского судна, находящейся в его носовой части. Поступление анализируемого воздуха к газоанализатору осуществлялось камерами забора воздуха, соединенными с газоанализатором при помощи воздухозаборных трубок. Камеры с воздухозаборными трубками из помещения лаборатории через иллюминатор были выведены на палубу и расположены на двух уровнях высот. Камера забора воздуха одного из газоанализаторов была установлена на высоте 7 м (G7) над уровнем моря, а камера

второго – на высоте 14 м (G14) над уровнем моря. Для поддержания оптимального давления внутри газоанализатора к каждому из них был подключен мембранный вакуумный насос MD 4 NT (Vacuubrand, Германия).

Потоки метана были рассчитаны для каждой точки отбора проб по экспериментальным данным концентраций растворенного метана в поверхностном слое морской воды, содержания метана в приводном слое атмосферы, температуры, солености и реальных скоростях ветра.

## Результаты и обсуждение

В процессе исследований установлено, что на всей изучаемой акватории происходит эмиссия метана в атмосферу, значения потоков метана отличаются неравномерным распределением: от равновесия и слабой эмиссии 0 моль/(км<sup>2</sup>×сут) до потоков очень высокой интенсивности 29 моль/(км<sup>2</sup>×сут) (рис. 1).

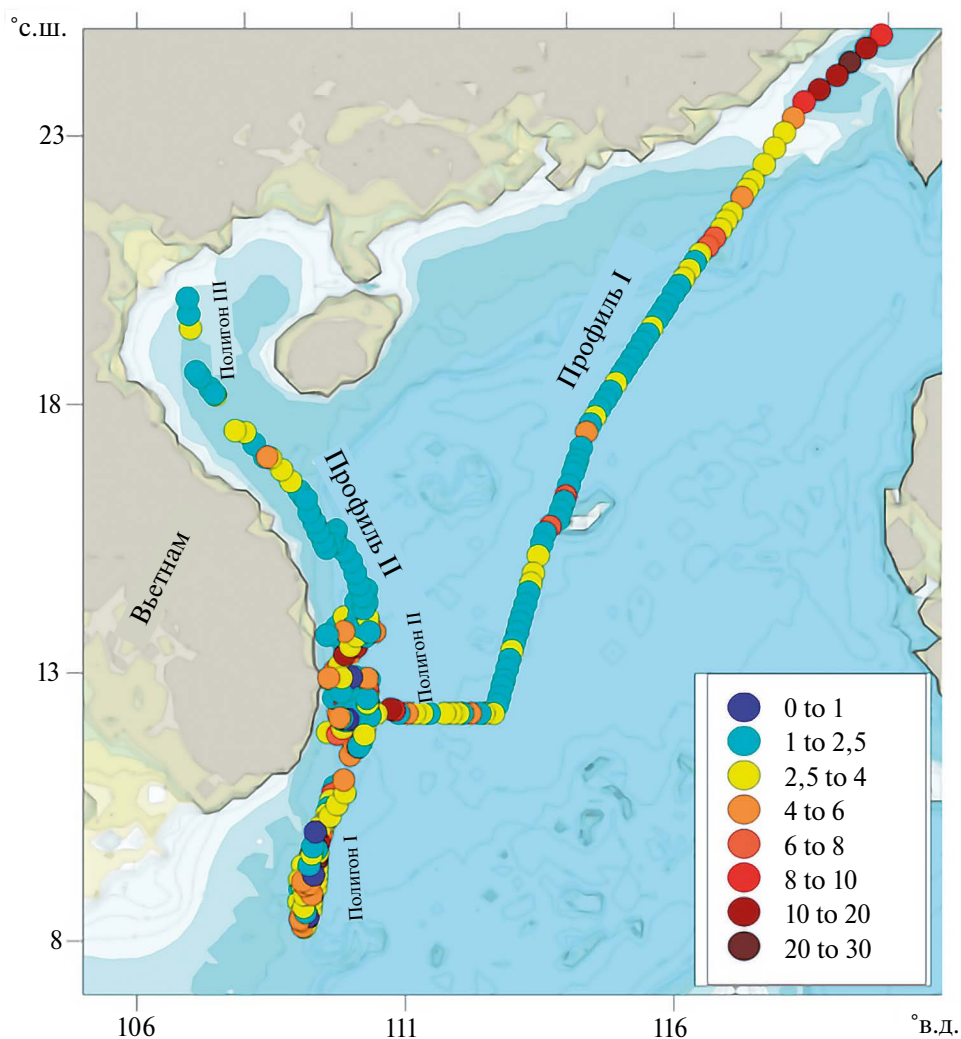


Рис. 1. Распределение потоков метана на границе раздела вода–атмосфера для рейса № 88 НИС «Академик М.А. Лаврентьев»

В предыдущий период исследований (2017 г.) в рамках комплексной экспедиции на НИС «Академик Борис Петров» (рейс № 42) авторами проанализировано распределение метана и его поток на региональном трансекте газогеохимических исследований (3180 км, 140 точек) в Южно-Китайском море в период 10–16 января 2017 г. [9]. Измерения концентрации метана (газовый хроматограф ЭХО-ЕW-ПИД), а также температуры и солёности (термосалинограф SBE 45) в 4-метровом поверхностном слое морской воды и метеорологические наблюдения (метеостанция Davis Vantage Pro 2) для расчета потока метана на границе вода–атмосфера проведены от Тайваньского пролива до шельфа Маллакского полуострова (рис. 2). Расчет газообмена выполнен по [8]. Получены знакопеременные значения с преобладанием эмиссии метана в атмосферу. Суммарное значение величин потока метана по профилю составило  $663 \text{ моль/км}^2 \times \text{сут}$  при интервале  $-1,45 \div 28,4 \text{ моль/км}^2 \times \text{сут}$  (медиана 3,65) и концентрациях метана  $0,6 \div 9 \text{ нмоль/л}$ . Содержание метана в приводном слое атмосферы составило  $1,43 \div 1,72 \text{ ppm}$  (30 измерений). Эти данные согласуются с результатами исследований в 2019 г.

Потоки метана на границе раздела вода–атмосфера на изучаемой акватории в 2019 г. по региональному газогеохимическому профилю I с средним значением  $3,8 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$  по предложенной нами градации относятся к эмиссии умеренной интенсивности от 1 до  $4 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$ . После прохождения Тайваньского пролива на профиле фиксируются единичные значения эмиссии средней интенсивности. К этому диапазону относится и значение медианы по совпадающей части профиля 2017 г., которое составляло  $3,7 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$  [10]. Немного выше, но к этому же диапазону относится и среднее значение  $4 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$  на профиле II, поток при этом изменялся от  $0 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$  до  $24 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$ .

Значения потоков метана на границе раздела вода–атмосфера зависят от концентраций метана в поверхностном водном слое, приводном слое атмосферы, температуры и солёности воды, скорости ветра. Анализ распределения потоков метана для данного рейса № 88 показал, что на поток метана определяющее влияние оказывают скорость ветра и процент пересыщения. Скорость ветра усиливает газообмен на границе вода–атмосфера.

Изучение распределений потоков метана, рассчитанных в каждой точке отбора проб воды на больших акваториях за непродолжительный промежуток времени, выявило ряд важных закономерностей. Как было показано ранее, выделение метана в атмосферу происходит пульсациями и сопровождается изменением концентрации метана в морской воде как в пространстве, так и во времени, в зависимости от гидрометеорологического режима акватории [11, 12]. Зависимость потоков метана на границе вода–атмосфера от концентраций, температуры воды и скорости ветра была получена при обработке 760 значений потоков по данным рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 52. На рис. 3 приведены результаты рассчитанных максимальных скоростей выделения метана на границе вода–атмосфера в зависимости от скорости ветра и разности между измеренными концентрациями метана в морской воде и его равновесными с атмосферой значениями.

При выбранном значении скорости ветра и перепаде концентраций наблюдается диапазон потоков метана от минимальных до максимальных значений. При повышении скорости ветра и увеличении потока метана концентрация газа в морской воде быстро падает до равновесных значений, и, соответственно, поток метана уменьшается до минимальных значений. При малых скоростях ветра и небольших потоках метана в атмосферу концентрация метана в приповерхностных водах повышается за счет его переноса из глубинных источников. На скорость газообмена при низких скоростях ветра  $1,5 \div 4 \text{ м/с}$  основное влияние оказывает термическая конвекция, имеющая зависимость от температуры и солёности воды. При более

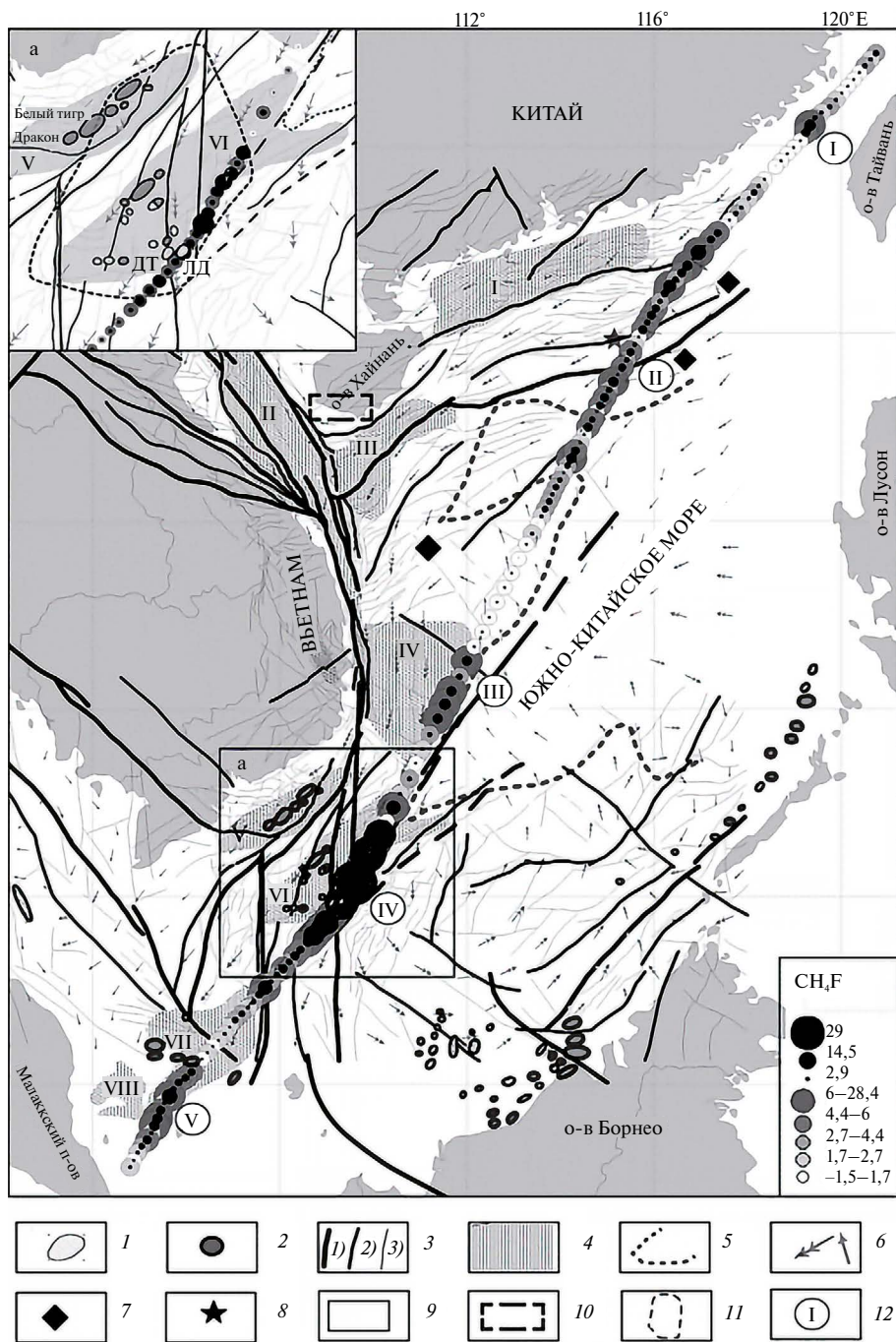


Рис. 2. Распределение потока метана в атмосферу по региональному газогеохимическому профилю на тектонической карте Южно-Китайского моря. Условные обозначения: 1 – газовые залежи, 2 – нефтяные залежи, 3 – разломы (1) первого порядка; 2) второго порядка; 3) третьего порядка), 4 – основные осадочные бассейны (палеоген, синрифтовые осадочные толщи с высоким содержанием углерода) (I – дельты р. Жемчужной, II – Шон Хон, III – Кионгдонган, IV – Фухань, V – Ку Лонг, VI – Нам Кон Шон, VII – Натунский, VIII – Малайский), 5 – схематичный контур границ блока океанической коры, 6 – направление поверхностных течений в зимний период, 7 – участки нефтегазопонского бурения КНР, 8 – газогидратоносный участок, 9 – врезка, 10 – район с активными выходами углеводородных газов на дне шельфа о-ва Хайнань [9], 11 – аномальное поле метана в придонном слое (100–250 нл/л), обнаруженное в 1983 г., 12 – обозначения и порядковый номер зон эмиссии метана в атмосферу. Месторождения газа: ДТ – Дан Тай, ЛД – Лан До.  $CH_4F$  – поток метана ( $mol/km^2 \times \text{сут}$ ). Проекция WGS 84

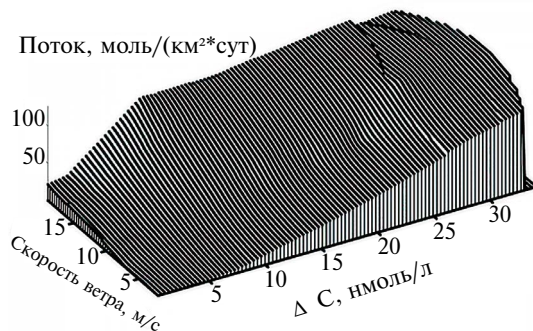


Рис. 3. Изменение максимального потока метана на границе раздела вода–атмосфера в зависимости от скорости ветра и разности концентрации метана в морской воде и его равновесного с атмосферой значения

высоких скоростях ветра определяющее влияние на величину потока метана оказывают обрушение волн и схлопывание газовых пузырьков.

В таблице приведены осредненные характеристики на трех полигонах: Намконсон-I, Фухань-II, Шонхон-III.

Потоки метана, показатель пересыщения вод метаном, измеренные концентрации метана были выше всего на южном полигоне I. На акватории шельфа и склона Вьетнама на момент измерений преобладали ветра 3 м/с и 2 м/с, хотя наблюдался и ветер 11–12 м/с. На северном полигоне III скорости ветра были до 7 м/с. Самые низкие потоки также были в северной части профиля II.

Средние и минимальные значения потоков на трех полигонах были близки, но выделяется центральный участок на полигоне I. Полигон расположен в зоне перехода

**Осредненные характеристики на полигонах потоков метана на границе вода–атмосфера (F, моль/км<sup>2</sup>×сут); измеренных концентраций метана (C, нмоль/л); равновесных концентраций метана (C\*, нмоль/л); температуры (t, °C); солености (S, ‰) в 4-метровом поверхностном слое воды; показателей пересыщения вод метаном (N, ‰); скорости ветра U, м/с**

LV88	F	C	C*	ΔC	N	C <sub>air</sub>	U	t	S
I – бассейн Намконсон									
Среднее	4	6	2,1	4	202	2,0	3	27,9	33,3
Максимум	24	41	2,5	39	1841	2,3	11	30,0	34,5
Минимум	1	3	1,8	1	37	1,7	1	27,1	22,4
II – бассейн Фухань									
Среднее	3	5	2,0	3	142	1,8	3	27,2	33,5
Максимум	16	9	2,0	7	358	1,9	12	28,8	33,9
Минимум	0	3	1,7	1	38	1,6	1	26,2	28,8
III – Шонхон									
Среднее	3	5	2,0	3	167	1,9	2	26,7	33,5
Максимум	5	9	2,1	7	314	2,0	7	27,6	33,8
Минимум	1	3	1,9	1	30	1,8	1	25,0	32,5



от континентального шельфа к глубоководному осадочному бассейну Намконсон. По нашим расчетам, на траверзе р. Меконг наблюдается эмиссия от слабой до очень высокой интенсивности (максимум 24 моль/(км<sup>2</sup>×сут). Отбор проб воды был выполнен на гидрологических станциях в шельфовой – st02 (156 м), st04 (262 м), st06 (249 м), st08 (196 м), st10 (156 м), st11 (267 м), st12 (267 м), st13 (264 м), st14 (256 м), st15 (242 м); склоновой st03 (430 м), st05 (707 м), st07 (866 м), st09 (682 м) – и глубоководных частях профиля – st11 (1004 м), st16 (1796 м). Концентрации метана для CTD станций в поверхностном водном слое составили от 2,9 до 6,5 нмоль/л, среднее 3,5 нмоль/л; процент пересыщения изменялся от 37 до 240%, среднее значение 71%. Высокие концентрации метана на промежуточных глубинах 120–170 м (18 нмоль/л – st07; 11 нмоль/л – st09), на 200–300 м (7–8 нмоль/л – st11; 6–12 нмоль/л – st15), на 50 м (5 нмоль/л – st16) и максимальные значения концентраций в придонном слое (185 нмоль/л, – st06 и 81 нмоль/л – st10), вероятно, обусловлены поступлением газов в водную толщу из донных отложений. Максимальные концентрации метана в донных осадках приходятся на разные горизонты керна, но наблюдается тенденция увеличения концентрации метана в верхней части до 100 см. Самые большие концентрации метана, отмеченные на полигоне I, наблюдаются для шельфовой станции LV88-03/GC, глубина моря 263 м.

Вероятно, метан из донных отложений поступает в воды придонного слоя и переносится за счет турбулентного перемешивания, выносится в вышележащие водные массы, что в некоторых случаях может приводить к образованию органических пленок на поверхности морской воды [10, 13].

На центральном полигоне (западная часть осадочного бассейна Фухань) эмиссия метана высокой интенсивности (максимум 16 моль/(км<sup>2</sup>×сут) при глубинах 200–600 м наблюдается как на континентальном склоне, так и в шельфовой области. Распределение концентраций метана в водной толще на акватории полигона II, включая шельф, континентальный склон и глубоководную котловину, было изучено на 14 гидрологических станциях: st17 (2314 м), st18 (2360 м), st19 (1905 м), st20 (685 м), st21 (1645 м), st22 (1416 м), st23 (700 м), st24 (235 м), st25 (825 м), st26 (660 м), st27 (123 м), st28 (2280 м), st29 (870 м), st30 (167 м). Несмотря на то что на втором полигоне большинство станций относятся к глубоководным, средние значения концентраций метана в поверхностном водном слое на CTD станциях были такими же, как на первом полигоне, и составили 3,5 нмоль/л, диапазон изменения от 2,7 до 5,3 нмоль/л; а средний процент пересыщения был выше, чем на первом полигоне и составил 83%, диапазон от 38 до 181%. На горизонте максимального зондирования около 600 м для глубоководных станций концентрации метана были 1–2 нмоль/л. Максимальные значения концентраций на шельфовых станциях около 5 нмоль/л, концентрации CH<sub>4</sub> на промежуточных глубинах 65–200 м составляли 3–7 нмоль/л. В центральной части на профиле II были отобраны керны донных отложений: LV88-16GC, LV88-17GC, LV88-18GC, LV88-20/1GC, LV88-21GC, LV88-22GC, LV88-23GC, LV88-25GC, LV88-27GC, LV88-28GC, LV88-29GC, LV88-30GC, LV88-31GC, LV88-32GC, LV88-33GC, LV88-34GC, LV88-35GC, LV88-36GC, LV88-37GC, LV88-38GC, LV88-40GC, LV88-41GC, LV88-42GC, LV88-43GC, LV88-46GC, LV88-47GC, LV88-48GC, LV88-49GC. Максимальные концентрации метана на полигоне II фиксируются в осадочном керне шельфовой станции LV88-42GC на горизонте 250 см, повышенные значения – на 70 см.

Распределение концентраций метана в северной части профиля II было исследовано для 5 гидрологических станций: st31 (118 м), st32 (110 м), st34 (90 м), st35 (72 м), st36 (62 м). В поверхностном водном слое на шельфовых станциях (глубина от 62 до 118 м) концентрации метана составили от 2,6 до 5,0 нмоль/л, среднее значение 3,7 нмоль/л, процент пересыщения от 30 до 156%, среднее значение 89%. Концен-

трация метана увеличивалась ко дну. Максимальные значения концентраций метана фиксировались в придонном слое от 4 до 32 нмоль/л. В северной части профиля П были отобраны керны донных отложений: LV88-50GC, LV88-51GC, LV88-55GC, LV88-56GC. Для этих станций общей тенденцией распределения концентрации метана является уменьшение к верхней части керна осадка от горизонта 100–150 см.

Таким образом, поскольку максимальные значения концентраций метана в придонном слое коррелируют с аномалиями метана в кернах донных отложений, существует вероятность того, что метан из донных осадков в шельфовой зоне привносится в вышележащие воды. Стратификация водной толщи и окисление метана в водной толще ограничивают количество метана, достигающего атмосферы.

Повышенные концентрации метана в поверхностном водном слое, на промежуточных глубинах, в придонном слое обусловлены поступлением газов в водную толщу из донных отложений и контролируются комплексом гидрологических и геологических факторов.

Полученные результаты хорошо согласуются с ранее проведенными авторами исследованиями. Было выявлено на примере трансекта через Южно-Китайское море (рейс № 42 НИС «Академик Борис Петров», 2017 г.), что не менее 2/3 (2000 км) длины газогеохимического профиля занимают зоны эмиссии метана в атмосферу, но с невысокими значениями потока. Сопоставление особенностей пространственного распределения этих зон и их характеристик с геологическими структурами, открытыми и прогнозируемыми источниками углеводородов подтверждают высокий углеводородный потенциал Южно-Китайского моря.

Дополнительно для анализа распределения климатически активных газов в приводной атмосфере Южно-Китайского моря авторы изучали данные, полученные с помощью лазерных анализаторов на борту НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2019 г. Основной задачей являлось исследование распределения и динамики парниковых газов в приводном слое атмосферы в рейсе LV88 на основе сбора и анализа данных по содержанию метана и углекислого газа на двух уровнях высот относительно водной поверхности согласно движению судна. Измерение эмиссии  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и паров воды производилось с помощью двух лазерных анализаторов потоковых концентраций газов Picarro G2311-f (Picarro, США). Данный газоанализатор предназначен для измерения эмиссии диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), метана ( $\text{CH}_4$ ) и паров воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ) при скорости передачи данных 10 Гц для каждого газа (общая скорость передачи 30 Гц), что позволяет делать до 2000 измерений в минуту, с точностью до  $1 \cdot 10^{-14}$  для  $\text{CH}_4$  и  $1 \cdot 10^{-12}$  для  $\text{CO}_2$ . Погрешность прибора составляет 200 ppb для  $\text{CO}_2$ , 3 pp для  $\text{CH}_4$  и 6 ppb + 0,3 % показаний для водяного пара при небольшой подвижности прибора.

Установка газоанализаторов производилась в лаборатории научно-исследовательского судна, находящейся в его носовой части. Поступление анализируемого воздуха к газоанализатору осуществлялось камерами забора воздуха, соединенными с газоанализатором с помощью воздухозаборных трубок. Камеры с воздухозаборными трубками из помещения лаборатории через иллюминатор были выведены на палубу и расположены на двух уровнях высот. Камера забора воздуха одного из газоанализаторов была установлена на высоте 7 м (G7) над уровнем моря, а камера второго – на высоте 14 м (G14) над уровнем моря. Для поддержания оптимального давления внутри газоанализатора к каждому из них был подключен мембранный вакуумный насос MD 4 NT (Vacuubrand, Германия).

Для контроля метеорологических условий, в которых проводилось измерение эмиссии газов, осуществлялось измерение температуры воздуха, давления воздуха, скорости и направления ветра, фотосинтетического активного излучения, радиации с помощью метеорологических датчиков. Метеорологические датчики были установлены на палубе в носовой части корабля рядом с камерой забора воздуха

газоанализатора G7. Определение температуры и давления воздуха, скорости и направления ветра велось портативным преобразователем метеоданных Vaisala Weather Transmitter WXT520 (Хельсинки, Финляндия). Фотосинтетическая радиация определялась с помощью датчика Li-190 (Li-Cor, США), а чистая радиация – радиометром Net Radiometer CNR4 (Kipp Zonen, Нидерланды). Сбор и вывод метеорологических данных со всех датчиков осуществлялись измерительным и контрольным модулем Data Logger CR 1000 (Campbell Scientific, США).

За время рейса исследовано более 6400 км маршрута, при этом с газоанализатора G14 было получено 5895 пятиминутных измерений по углекислому газу и 6183 пятиминутных значения по метану, с газоанализатора G7 – 2754 измерения по углекислому газу и 3042 измерения по метану. Обработка полученных данных проводилась в программах Microsoft Excel и Math Lab, а их визуализация – в геоинформационном приложении ArcGIS 10.4 (рис. 4).

Согласно полученным данным, концентрация углекислого газа за время экспедиции варьировала в пределах от 409 до 531 ppm на уровне G14 и от 368 до 519 ppm на уровне G7. Несмотря на высокие максимальные показатели, 76% от всех значений были ниже 420 ppm, что подтверждает рассчитанное среднее значение  $\text{CO}_2$  на обоих уровнях, которое составило 418,7 ppm. Полученные данные позволяют судить о нормальном уровне концентраций в акваториях трех представленных морей. Исключение составили участки в акватории Южно-Китайского моря, расположенные в его северо-восточной части и центральной части вблизи п-ова Индокитай, однако эти аномальные значения имели единичный характер.

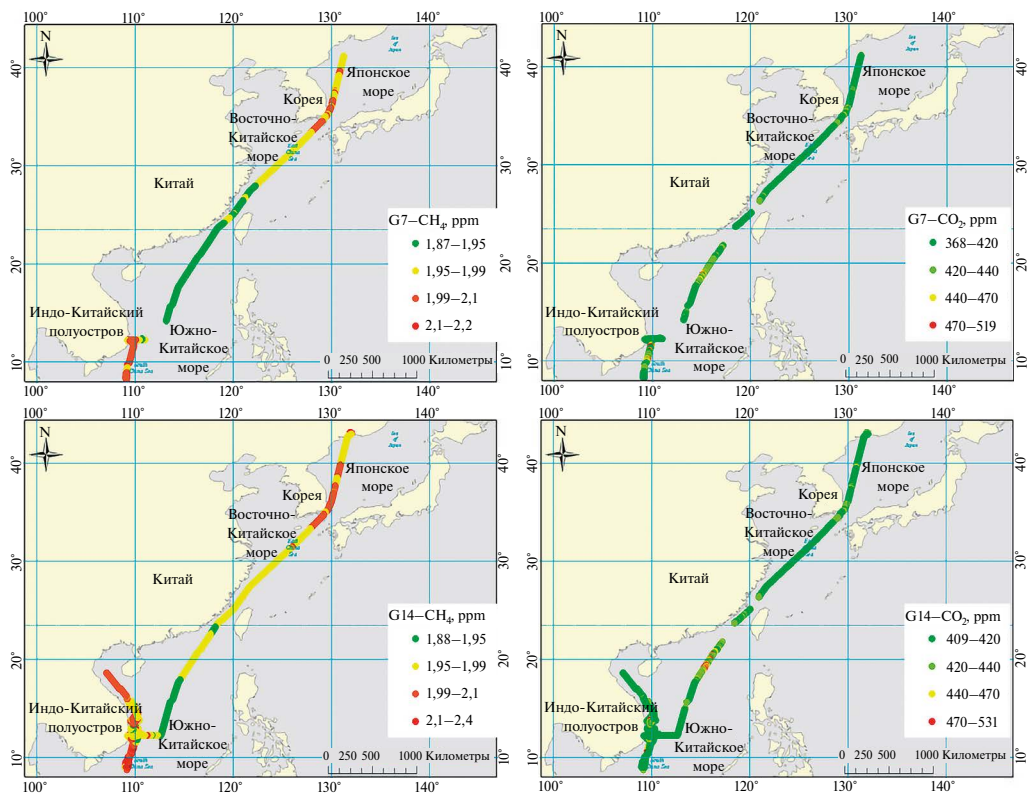


Рис. 4. Пространственная изменчивость концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в рейсе LV88 по курсу следования НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2019 г.

Пространственное распределение эмиссии метана имело более контрастный характер по сравнению с распределением углекислого газа и позволяет выявить различия между эмиссией газа в исследуемых морях. Наименьшее среднее значение концентраций  $\text{CH}_4$ , равное 1,97 ppm, получено в Восточно-Китайском море. В Японском и Южно-Китайском морях среднее значение  $\text{CH}_4$  составило 1,99 ppm, однако значения эмиссии в Японском море были наиболее стабильны и варьировали в пределах от 1,97 до 2,04 ppm, а значения эмиссии  $\text{CH}_4$  в Южно-Китайском море были наиболее ярко выражены. Вариационный диапазон для Южно-Китайского моря составил 1,89–2,4 ppm, наименьшие значения концентрации  $\text{CH}_4$  были зафиксированы на участке от его северо-восточной до центральной части, а повышенные аномальные значения – в прибрежной части п-ова Индокитай с максимумом, подобно единичным аномалиям  $\text{CO}_2$ , в центральной части акватории вблизи южной части п-ова Индокитай.

## Выводы

В результате исследований изучено пространственное распределение потоков метана на границе раздела вода–атмосфера. Предложенный в лаборатории ТОИ ДВО РАН метод расчета потоков метана для каждой точки отбора проб позволил выявить и объяснить зоны с повышенной эмиссией метана с акватории.

Установлена высокая изменчивость потока от равновесия и слабой эмиссии 0–1 моль/( $\text{км}^2 \times \text{сут}$ ) до потоков очень высокой интенсивности, зависящая от наличия источника и состояния поверхности моря.

Среднее значение потоков метана на границе раздела вода–атмосфера на континентальном шельфе, склоне по региональному газогеохимическому профилю II составило 4 моль/( $\text{км}^2 \times \text{сут}$ ). Это значение немного выше, чем среднее значение 3,8 моль/( $\text{км}^2 \times \text{сут}$ ) в открытой части моря на профиле I, на котором после прохождения Тайваньского пролива с максимальным потоком 29 моль/( $\text{км}^2 \times \text{сут}$ ) фиксируются единичные значения эмиссии средней интенсивности.

Средние и минимальные значения потоков на трех полигонах близки, но выделяется центральный участок на полигоне I, расположенный в зоне перехода от континентального шельфа к глубоководному осадочному бассейну Намконсон. На траверзе р. Меконг наблюдалась эмиссия от слабой до очень высокой интенсивности (максимум 24 моль/( $\text{км}^2 \times \text{сут}$ )).

На акватории Привьетнамского континентального шельфа и склона при глубинах моря 200–600 м существуют локальные области с высокой до 20 моль/( $\text{км}^2 \times \text{сут}$ ) и очень высокой интенсивностью до 24 моль/( $\text{км}^2 \times \text{сут}$ ).

Активность газообмена на границе дно–вода–атмосфера обусловлена выходом  $\text{CH}_4$  из донных отложений и контролируется комплексом геологических и гидрологических факторов.

В целом, невысокие значения потока метана в атмосферу в Южно-Китайском море по сравнению с Охотским и Японским морями, вероятно, обусловлены в первую очередь низкой сейсмической активностью этого уникального окраинного бассейна в настоящее время. Тем не менее в условиях сейсмической активизации многих районов северо-западной части Тихого океана не исключено, что эта ситуация изменится.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bange H.W., Bartell U.H., Rapsomanikis S., Andrae O. Methane in the Baltic and the North Seas and reassessment of marine emissions of methane // *Global Biogeochem. Cycles*. 1994. Vol. 8. P. 465–480.

2. Tsurushima N., Watanabe S., Tsunogai S. Methane in the East China sea water // *J. of Oceanography (Japan)*. 1996. Vol. 52, No. 2. P. 221–233.
3. Ye Wang-Wang, Zhang Guiling, Zheng Wenjing, Wu Ying. Methane distributions and sea-to-air fluxes in the Pearl River Estuary and the northern South China sea // *Deep-Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2019. Vol. 167. P. 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.06.016>.
4. Borges A.V., Abril G., Bouillon S. Carbon dynamics and CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> outgassing in the Mekong delta // *Biogeosciences*. 2018. No. 15. P. 1093–1114. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1093-2018>.
5. Tseng Hsiao-Chun, Chen Chen-Tung Arthur, Borges Alberto Vieira, Delvalls Angel, Chang Yu-Chang. Methane in the South China Sea and the Western Philippine Sea // *Continental Shelf Research*. 2017. Vol. 135. P. 23–34. DOI: 10.1016/j.csr.2017.01.005.
6. Zhou H., Yin X., Yang Q., Wang H., Wu Z., Bao S. Distribution, source and flux of methane in the western Pearl River Estuary and northern South China Sea // *Mar. Chem.* 2009. Vol. 117. P. 21–31.
7. Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and sea water // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1976. Vol. 21, No. 1. P. 78–80.
8. Wiesenburg D.A., Guinasso N.L. Equilibrium solubility of methane, carbon monooxide, and hydrogen in water and sea water // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1979. Vol. 24, No. 4. P. 356–360.
9. Шакиров Р.Б., Яцук А.В., Мишукова Г.И. и др. О потоке метана в атмосферу в Южно-Китайском море // *ДАН*. 2019. Т. 486. № 1. С. 103–107. DOI: 10.31857/S0869-56524861103-107.
10. Мишукова Г.И., Обжиров А.И., Мишуков В.Ф. Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода–атмосфера в Дальневосточном регионе. Владивосток: Дальнаука, 2007. 159 с.
11. Мишукова Г.И., Пестрикова Н.Л., Верещагина О.Ф., Окулов А.К., Мишуков В.Ф. Пространственная и временная изменчивость распределения метана и его потоков на границе вода–атмосфера на Прикурильских акваториях в районе Охотского моря и Тихого океана // *Подводные исследования и робототехника*. 2013. № 1 (15). С. 52–61.
12. Обжиров А.И., Пестрикова Н.Л., Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Окулов А.К. Распределение содержания и потоков метана на акваториях Японского, Охотского морей и Прикурильской части Тихого океана // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 3. С. 71–81.
13. Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И. Особенности проявления метана в природных водах на территории Приморского края России // *Вестн. ДВО РАН*. 2009. № 6. С. 43–49.

## REFERENCES

1. Bange H.W., Bartell U.H., Rapsomanikis S., Andrae O. Methane in the Baltic and the North Seas and reassessment of marine emissions of methane. *Global Biogeochem. Cycles*. 1994; 8:465–480.
2. Tsurushima N., Watanabe S., Tsunogai S. Methane in the East China sea water. *J. of Oceanography (Japan)*. 1996;52(2):221–233.
3. Ye Wang-Wang, Zhang Guiling, Zheng Wenjing, Wu Ying. Methane distributions and sea-to-air fluxes in the Pearl River Estuary and the northern South China sea. *Deep-Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2019; 167:34–45. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.06.016>.
4. Borges A.V., Abril G., Bouillon S. Carbon dynamics and CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> outgassing in the Mekong delta. *Biogeosciences*. 2018;(15):1093–1114. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1093-2018>.
5. Tseng Hsiao-Chun, Chen Chen-Tung Arthur, Borges Alberto Vieira, Delvalls Angel, Chang Yu-Chang. Methane in the South China Sea and the Western Philippine Sea. *Continental Shelf Research*. 2017;135:23–34. DOI: 10.1016/j.csr.2017.01.005.
6. Zhou H., Yin X., Yang Q., Wang H., Wu Z., Bao S. Distribution, source and flux of methane in the western Pearl River Estuary and northern South China Sea. *Mar. Chem.* 2009; 117:21–31.
7. Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and sea water. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1976; 21(1):78–80.
8. Wiesenburg D.A., Guinasso N.L. Equilibrium solubility of methane, carbon monooxide, and hydrogen in water and sea water. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1979;24(4):356–360.

9. Shakirov R.B., Yatsuk A.V., Mishukova G.I. et al. On the flow of methane into the atmosphere in the South China Sea. *DAN*. 2019;486(1):103–107. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869-56524861103-107.
10. Mishukova G.I., Obzhirov A.I., Mishukov V.F. Methane in fresh and marine waters and its flows at the water–atmosphere boundary in the Far Eastern region. Vladivostok: Dal'nauka; 2007. 159 p. (In Russ.).
11. Mishukova G.I., Pestrikova N.L., Vereshchagina O.F., Okulov A.K., Mishukov V.F. Spatial and temporal variability of the distribution of methane and its fluxes at the water–atmosphere boundary in the Prikurilsky water areas in the Okhotsk Sea and the Pacific Ocean. *Underwater Research and Robotics*. 2013;15(1):52–61. (In Russ.).
12. Obzirov A.I., Pestrikova N.L., Mishukova G.I., Mishukov V.F., Okulov A.K. Distribution of methane content and fluxes in the waters of the Seas of Japan, Okhotsk and the Kuril Pacific Ocean. *Meteorology and Hydrology*. 2016;(3):71–81. (In Russ.).
13. Mishukova G.I., Mishukov V.F., Obzhirov A.I. Features of methane manifestation in natural waters on the territory of the Primorsky Territory of Russia. *Vestnik of the FEB RAS*. 2009;(6):43–49. (In Russ.).