

В.Ф. МИШУКОВ, Г.И. МИШУКОВА, Р.Б. ШАКИРОВ

Сравнительный анализ процессов обмена метана на границе раздела вода–атмосфера на акватории окраинных морей

Приведены результаты изучения процессов тепло-, массообмена на границе раздела вода–атмосфера для окраинных морей. Были обработаны экспериментальные данные и проанализированы динамические процессы газообмена на акватории Охотского, Японского и Южно-Китайского морей. Выявлены характерные особенности пространственного распределения потоков метана и пересыщения метаном пелагических вод морей для осеннего сезона. Парные коэффициенты корреляции показывают, что в открытом море преобладают процессы массообмена, обусловленные не молекулярной диффузией, а процессами перемешивания, определяющие влияние на которые оказывает скорость ветра. На профилях через глубоководные акватории Курильской котловины Охотского моря, Центральной котловины Японского моря при повышенных скоростях ветра в осенний период на величину потоков метана (средние значения 8 ± 4 и 5 ± 3 моль/(км² · сут) соответственно) оказывают влияние обрушение волн и схлопывание газовых пузырьков. На маршруте по центральному профилю в Южно-Китайском море среднее значение потока составило 3 ± 1 моль/(км² · сут) и было в два раза ниже, чем в Охотском и Японском морях.

Ключевые слова: скорость газообмена, потоки метана на границе раздела вода–атмосфера, концентрации метана, Курильская котловина, Центральная котловина, Охотское море, Японское море, Южно-Китайское море.

Comparative analysis of gas exchange processes for methane on the water–atmosphere interface at the water area of marginal seas. V.F. MISHUKOV, G.I. MISHUKOVA, R.B. SHAKIROV (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

The article presents the results of the research of heat-mass exchange processes on the water–atmosphere interface of the marginal seas. The experimental data were processed and the analysis of the dynamic processes of gas exchange in the waters of the Seas of Okhotsk, Japan and South China Sea was carried out. The analysis revealed the unique features of the spatial distribution of methane fluxes and methane supersaturation in the pelagic waters for the autumn season. Paired correlation coefficients revealed the predominance of mass transfer processes in the open sea; these processes are not caused by molecular diffusion, they result from mixing processes, influenced by wind speeds. At the profiles through the deep-water areas of the Kuril Basin of the Sea of Okhotsk and the Central Basin of the Sea of Japan, the methane flux with an average value of 8 ± 4 mol/(km² · day) and 5 ± 3 mol/(km² · day) was influenced by wave and bubble collapse during increased wind speeds in the autumn. Along the central profile of the South China Sea, the average flux value was 3 ± 1 mol/(km² · day) which was two times lower than for the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan.

Key words: gas exchange rate, methane fluxes on the water–atmosphere interface, methane concentrations, Kuril Basin, Central Basin, Sea of Okhotsk, Sea of Japan, South China Sea.

*МИШУКОВ Василий Федорович – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, МИШУКОВА Галина Ивановна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, ШАКИРОВ Ренат Белалович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, заместитель директора (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: vmishukov@poi.dvo.ru

Исследования выполнены в рамках государственных тем ТОИ ДВО РАН: 0211-2021-0014, регистрационный номер 12121500052-9; 0211-2021-0006, регистрационный номер 121021500055-0.

Введение

Океаны являются источником значительного поступления метана в атмосферу. Оценки этой эмиссии крайне немногочисленны и весьма неопределенны (млн т/год): 11–18 [13], 5–25 [20], 6–12 [24]. Ввиду сильной площадной и временной изменчивости оценка масштабов эмиссии метана в атмосферу окраинными морями остается невыясненной. Для сравнительного анализа потока метана на границе вода–атмосфера нами использовано 10 градаций (моль/(км² · сут)): сильный сток от –6 до –1, слабый сток от –1 до –0,01, равновесие от –0,01 до 0,01, эмиссия слабой интенсивности от 0,01 до 1, эмиссия умеренной интенсивности от 1 до 4, эмиссия средней интенсивности от 4 до 10, эмиссия высокой интенсивности от 10 до 20, эмиссия очень высокой интенсивности от 20 до 30, эмиссия аномальной интенсивности от 50 до 150, ураганные значения эмиссии от 150 до 500 [3]. Расчет потоков метана на границе вода–атмосфера для каждой точки отбора проб морской воды и изучение их распределения на акваториях Охотского, Японского и Южно-Китайского морей показали, что величина потоков с морской поверхности изменяется в широких пределах как по акватории моря, так и во времени от сильного стока – 6 моль/(км² · сут) до ураганных значений эмиссии 500 моль/(км² · сут). При этом локальные области с повышенным потоком метана с поверхности моря существуют как в шельфовой, так и в глубоководной зоне [4, 6–8, 10, 21]. Экспериментально установлено, что эмиссия метана с акватории Охотского и Японского морей определяется пространственным распределением и активностью подводных источников метана, а также связана с сезонными изменениями гидрологических и гидрохимических параметров морской воды и структурой течений [11, 19]. Осенью в результате сезонной конвекции вод и больших средних скоростей ветров метан, накопленный в промежуточных водах, выносится в атмосферу [4, 5, 9].

Цель работы – провести сравнительный анализ распределения потоков метана на границе раздела вода–атмосфера, рассчитанных для каждой точки отбора проб воды на основе экспериментальных данных, проанализировать динамические процессы переноса метана на акваториях окраинных морей – Охотского, Японского, Южно-Китайского, определить факторы, контролирующие изменчивость потоков метана в осенний сезон.

Объекты и методы исследования

Изучение распределения потоков метана проводилось на акваториях Охотского, Японского и Южно-Китайского морей по экспериментальным данным о концентрациях растворенного метана, температуре, солености в поверхностном слое морской воды, содержании метана в придном слое атмосферы, реальных скоростях ветра, полученным лабораторией газогеохимии ТОИ ДВО РАН в научно-исследовательских морских экспедициях НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в сентябре–октябре 2010 г. (LV52) и октябрь–ноябре 2019 г. (LV88). В статье рассмотрены два профиля (LV52) через Курильскую котловину Охотского моря, один профиль (LV52) через Центральную котловину Японского моря, один профиль (LV88) через глубоководную акваторию Южно-Китайского моря. По всем профилям из обработки были исключены данные со станций, глубина которых была меньше 500 м.

Отбор проб, их подготовка и аналитические исследования соответствовали сертифицированной методике, принятой в лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН (Свидетельство Росстандарта № 41 к Паспорту лаборатории ПС 1.047–18). Метеорологические измерения проводили на портативной метеостанции Davis Vantage Pro2 (USA), гидрологические измерения температуры и солености поверхностного 4-метрового слоя воды – с помощью термосолинографа SBE45 (USA).

Потоки метана F на границе раздела вода–атмосфера определяли для каждой точки отбора проб воды согласно методологии, описанной в работах [4, 18, 23]:

$$F = \Delta C \cdot K, \quad (1)$$

где $\Delta C = C - C^*$ – разность между измеренной и равновесной концентрациями метана, K – коэффициент газообмена на границе вода–воздух.

Степень пересыщения N (%) вычисляли для каждой пробы по формуле:

$$N = (\Delta C/C^*) \cdot 100. \quad (2)$$

В качестве основы для расчета течений использовали трехмерную нестационарную, нелинейную численную базовую модель POM (Princeton Oceanic Model A three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model) [17]. Она учитывает плотностные $u_{den}(x,y,t)$ и ветровые $u_w(x,y,t)$ течения. Кроме этого, принимаются во внимание приливо-отливные $u_{tide}(x,y,t)$ и турбулентные $u_d(x,y,t)$ течения. Общая формула расчета горизонтальных составляющих течений выглядит так:

$$u_{total} = \{u_{den}(x,y,t) + u_w(x,y,t) + u_{tide}(x,y,t) + u_d(x,y,t)\}. \quad (3)$$

Поля течений для северо-западной части Тихого океана, включая Японское и Охотское моря, определяли на сетке 15×20 км. Шаг по времени составлял 10 мин.

Каждые 6 ч в расчет вводили новые экспериментальные значения метеопараметров на прибрежных метеостанциях с учетом измерений в ходе рейса (скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, давление), которые для Японского и Охотского морей интерполировались в узлы расчетной сетки. Начальные значения распределения температуры и солёности были взяты из электронных атласов [12, 15, 16].

Представленная модель решается численно. Результаты расчета полей течений в узлах сетки осредняются за 6 ч и заносятся в массив поля течений, который затем используется для расчета распространения маркеров на акватории.

Для Южно-Китайского моря схема течений была взята из работы [2].

Схемы районов работ и результаты расчетов приведены на рисунке и в табл 1.

Таблица 1

Осредненные характеристики потоков метана на границе вода–атмосфера и сопутствующих гидрологических параметров по профилям в Охотском, Японском, Южно-Китайском морях

Акватория	Значение	F	C	t	S	C*	ΔC	N	U	CH ₄ air
Охотское море, LV52	Среднее	8 ± 4	$6,2 \pm 0,8$	14 ± 2	32 ± 0	$2,6 \pm 0,1$	$3,6 \pm 0,8$	137 ± 34	6 ± 3	$1,9 \pm 0,0$
	Макс.	14	9,9	18	33	3,1	7,2	268	8	1,9
	Мин.	2	4,3	7	32	2,4	1,4	49	2	1,9
Японское море, LV52	Среднее	5 ± 3	$5,5 \pm 0,9$	16 ± 2	33 ± 0	$2,4 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,9$	131 ± 40	4 ± 2	1,8
	Макс.	12	8,0	18	34	2,6	5,5	223	7	1,8
	Мин.	1	3,4	12	32	2,3	1,0	42	2	1,8
Южно-Китайское море, LV88	Среднее	3 ± 1	$4,9 \pm 0,8$	29 ± 1	33 ± 0	$1,9 \pm 0,0$	$3,1 \pm 1,0$	164 ± 42	2 ± 1	$1,8 \pm 0,0$
	Макс.	7	8,2	30	34	2,0	6,3	336	7	1,9
	Мин.	1	3,7	28	33	1,8	1,9	100	0	1,7

Примечание. Здесь и в табл. 2: F, моль/(км² · сут) – величина потока метана; C, нмоль/л – измеренная концентрация метана в 4-метровом поверхностном слое воды; t, °C – температура в 4-метровом поверхностном слое воды; S, ‰ – солёность в 4-метровом поверхностном слое воды; C*, нмоль/л – равновесная концентрация метана; $\Delta C = C - C^*$, нмоль/л; N, % – показатель пересыщения вод метаном; U, м/с – скорость ветра; CH₄air, ppm – концентрации метана в приводном слое атмосферы.

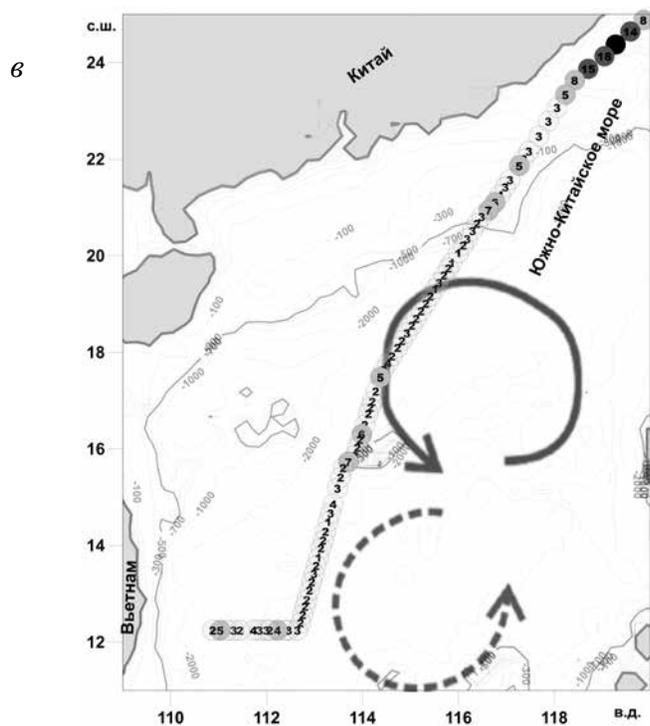
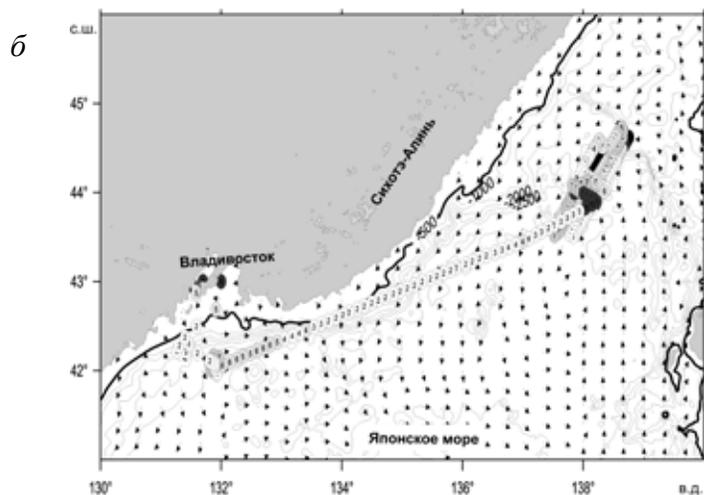
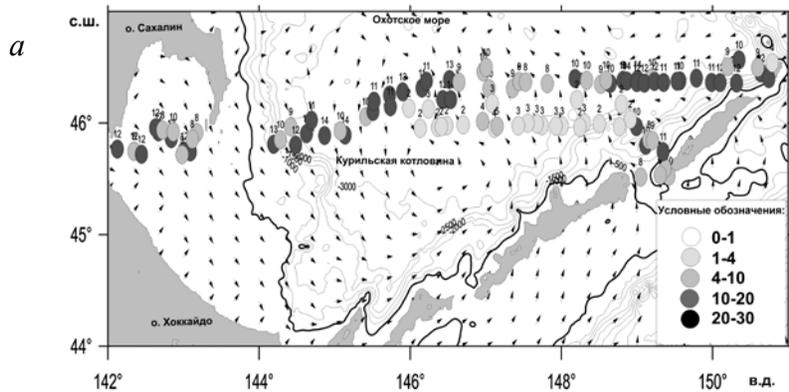


Схема станций отбора проб воды и распределение потоков метана на границе раздела вода-атмосфера: *а* – Охотское море, *б* – Японское море, *в* – Южно-Китайское море. Стрелками на *а*, *б* показана схема поверхностных течений. Стрелки на *в* – направление циркулирующих течений по [2]. На врезке (*а*) приведены величины потоков метана, моль/(км² · сут)

Результаты и обсуждение

На рисунке приведен расчет поверхностных течений на акваториях Японского и Охотского морей. Для этих морей маршрут рейсов проходил по периферии вихрей, в которых водные массы движутся по спирали с внешней стороны вихря в центр. Таким образом, приповерхностные воды задерживаются в данном районе на некоторое время до момента погружения, причем за счет испарения увеличивается соленность морской воды с образованием ядра более соленых вод [1] и дегазацией приповерхностных вод при уменьшении концентрации метана в морской воде и его потока в атмосферу. Подобная картина наблюдается и в Южно-Китайском море при циркуляции поверхностных вод по данным [2]. Таким образом, образование вихревых структур в поле течений на рассматриваемых акваториях определяет время контакта поверхностных вод с атмосферой для данных районов и интенсивное перемешивание, а следовательно, способствует воздействию процессов тепло-, влаго- и газообмена на соленность воды и концентрацию метана в морских приповерхностных водах.

В табл. 1 приведены результаты расчета потоков метана с поверхности моря на изучаемых акваториях, полученные в рейсах НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV52 и LV88).

Сравнительный анализ пространственного распределения потоков метана на границе раздела вода–атмосфера для Охотского, Японского и Южно-Китайского морей показал значительную изменчивость от равновесия (0 моль/(км² · сут)) до эмиссии высокой интенсивности (14 моль/(км² · сут)). На всех профилях, выполненных в пелагических водах, существуют локальные области с повышенным потоком метана с поверхности моря. Среднее значение потоков метана на профиле на центральной акватории в Южно-Китайском море было почти в 2,5 раза ниже, чем на охотоморских профилях, и в 1,5 ниже, чем на япономорском, и составило 3 ± 1 моль/(км² · сут). По предложенной нами градации [3] (см. Введение) такая эмиссия является умеренно интенсивной, как и эмиссия пелагических районов северо-восточной части Тихого океана, а также его северо-восточной тропической части (соответственно 2,9 и 0,9–3,5 моль/(км² · сут)) [14, 22]. Кроме того, в пелагических водах Охотского и Японского морей на изучаемых профилях есть участки с эмиссией средней и даже высокой – 12 и 14 моль/(км² · сут) – интенсивности. Концентрации метана в поверхностном слое на всех профилях превышали равновесные с атмосферой значения, самые низкие зафиксированы в Южно-Китайском море. Средняя степень пересыщения в Южно-Китайском море была выше (см. табл. 1), чем в Охотском и Японском. Среднее, а также максимальное и минимальное значения температуры поверхностного слоя воды в Южно-Китайском море были выше, чем в Японском и Охотском. Этот фактор, на фоне сопоставимых уровней соленности и измеренных концентраций метана в приводном слое атмосферы во всех изучаемых морях, обусловил в Южно-Китайском море пониженные равновесные концентрации метана и более высокие значения показателей пересыщения. Средние значения скорости ветра были самыми высокими в Охотском море, а самыми низкими в Южно-Китайском.

В табл. 2 приведены парные коэффициенты корреляции (Q) изучаемых величин для Охотского, Японского и Южно-Китайского морей.

Из табл. 2 следует, что основное влияние на величину потока метана на акватории Курильской котловины Охотского моря, Центральной котловины Японского моря и центральной части Южно-Китайского моря оказывает скорость ветра (Q = 0,9, 0,8, 0,8 соответственно).

Отрицательная корреляция между потоком и равновесными концентрациями метана, потоком и соленностью, по-видимому, обусловлена уменьшением растворимости метана с увеличением температуры, соленности и увеличением концентраций метана в приводном слое атмосферы.

На акватории Курильской котловины Охотского моря наблюдается отрицательная корреляция между потоками метана F и равновесными концентрациями метана C* (Q = -0,5),

Коэффициенты корреляции между величинами потоков метана на границе вода–атмосфера и сопутствующими гидрологическими параметрами на акваториях Охотского, Японского и Южно-Китайского морей

Курильская котловина Охотского моря, LV52

	F	C	t	S	C*	ΔC	N	U
F	1,0							
C	0,2	1,0						
t	0,5	0,0	1,0					
S	-0,2	0,2	-0,3	1,0				
C*	-0,5	0,0	-1,0	0,3	1,0			
ΔC	0,3	1,0	0,2	0,2	-0,2	1,0		
N	0,4	0,9	0,4	0,1	-0,4	1,0	1,0	
U	0,9	-0,1	0,4	-0,4	-0,4	-0,1	0,0	1,0

Центральная котловина Японского моря, LV52

	F	C	t	S	C*	ΔC	N	U
F	1,0							
C	0,6	1,0						
t	0,2	-0,1	1,0					
S	0,2	0,0	0,7	1,0				
C*	-0,2	0,1	-1,0	-0,7	1,0			
ΔC	0,7	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0		
N	0,7	1,0	0,2	0,1	-0,2	1,0	1,0	
U	0,8	0,1	0,2	0,3	-0,2	0,1	0,2	1,0

Южно-Китайское море, LV88

	F	C	t	S	C*	ΔC	N	U	CH ₄ air
F	1,0								
C	0,3	1,0							
t	0,0	0,0	1,0						
S	0,0	-0,1	-0,8	1,0					
C*	0,0	0,2	0,1	0,2	1,0				
ΔC	0,3	1,0	0,0	-0,1	0,2	1,0			
N	0,3	1,0	0,0	-0,1	0,1	1,0	1,0		
U	0,8	-0,3	0,0	0,1	0,0	-0,3	-0,3	1,0	
CH ₄ air	0,1	0,2	0,4	-0,1	0,9	0,2	0,1	0,0	1,0

которая согласно формуле (1) вызвана уменьшением значения ΔC. C* при практически постоянном значении концентрации метана в воздухе CH₄air увеличивается при уменьшении температуры (Q = -1) за счет большей растворимости метана в холодной воде. Значимый коэффициент корреляции отмечается между потоками метана и температурой (Q = 0,5), что обусловлено увеличением коэффициента молекулярной диффузии [4] и газообмена в формуле (1).

Значимые значения Q между потоком метана и измеренными концентрациями метана, процентом пересыщения, разностью между измеренной и равновесной концентрациями метана обнаруживаются на глубоководной акватории Японского моря (Q = 0,6, 0,7, 0,7 соответственно) и согласуются с зависимостью из формул (1) и (2).

Значительные скорости ветров на акватории Курильской котловины Охотского моря и Центральной котловины Японского моря (средние значения 6 ± 3 и 4 ± 2 м/с) вызвали интенсивное выделение метана в атмосферу из морской воды, и этот процесс привел к быстрому уменьшению концентраций в поверхностном водном слое и придном слое атмосферы, что нашло отражение в отрицательной корреляции между потоком и равновесными концентрациями метана.

Для Южно-Китайского моря измерения были выполнены в основном при слабых ветрах (2 ± 1 м/с) и небольших колебаниях CH_4 , air, t, S и C^* (табл. 1), что при высоком пересыщении (N) обусловило сильную зависимость F от скорости порывов ветра U ($Q = 0,8$) и слабую – от C, ΔC и N.

Парные коэффициенты корреляции указанных параметров для всех профилей показывают, что значительное влияние на величину потока метана оказывают скорости ветра, измеренные концентрации метана в поверхностном водном слое, равновесные концентрации метана, процент пересыщения, разность между измеренной и равновесной концентрациями метана, температура.

Выводы

Образование вихревых структур в поле течений на рассматриваемых акваториях определяет время контакта поверхностных вод с атмосферой и вызывает их интенсивное перемешивание, а следовательно, способствует воздействию процессов тепло-, влаго- и газообмена на соленость морских приповерхностных вод и концентрацию в них метана.

На профилях, выполненных в Охотском, Японском и Южно-Китайском морях, выявлена значительная изменчивость пространственного распределения потоков метана на границе раздела вода–атмосфера от равновесия (0 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$)) до эмиссии высокой интенсивности (14 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$)).

Парные коэффициенты корреляции показывают, что в открытом океане преобладают процессы массообмена, обусловленные не молекулярной диффузией, а процессами перемешивания вод под влиянием скорости ветра.

В процессе изучения установлены характерные особенности пересыщения поверхностных вод метаном относительно его равновесных содержаний в атмосфере. Для открытых вод Охотского и Японского морей средние значения концентраций метана в поверхностном слое воды превышали равновесные с атмосферой значения более чем в 2 раза, а для профиля в Южно-Китайском море – менее чем в 2 раза. Степени пересыщения в Южно-Китайском море (164 ± 42 %) были выше, чем в Охотском и Японском морях (137 ± 34 и 131 ± 40 % соответственно).

Авторы выражают признательность коллегам из лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН Н.Л. Соколовой, А.А. Легкодимову, Д.А. Швалову, Д.С. Максееву, А.К. Окулову, Е.В. Лифанскому за проведение экспериментальных работ и любезное предоставление экспериментальных данных для проведения расчетов и статистической обработки результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валитов М.Г., Ли Н.С., Сергеев А.Ф., Сагалаев С.Г., Легкодимов А.А., Захарков С.П., Пермяков П.А., Рязанов С.Д., Лобанов В.Б., Шакиров Р.Б., Салюк П.А., Колпашикова Т.Н. Экспедиционные исследования в Японском и Охотском морях в 55-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Опарин» // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 1. С. 165–168. DOI: 10.31857/S0030157420010244.
2. Власова Г.А., Мау Ле Динь, Зунг Нгуен Тхи Тхай. Гидрометеорологические характеристики // *Российско-вьетнамские океанологические исследования в Южно-Китайском море* / гл. ред. В.Б. Лобанов. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2020. С. 53–70. ISBN 978-5-6044821-3-1.
3. Легкодимов А.А., Мишукова О.В., Швалов Д.А., Максеев Д.С., Шакирова М.В., Бакунина М.С., Еськова Е.И. К дискуссии об эмиссии метана с акватории Татарского пролива, Японское море (по результатам 55-го рейса НИС «Академик Опарин») // *Вестн. ДВО РАН*. 2019. № 2. С. 81–86. DOI:10.25808/08697698.2019.204.2.009.
4. 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.
5. Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И., Пестрикова Н.Л., Верещагина О.Ф. Особенности распределения концентрации метана и его потоков на границе раздела вода–атмосфера на акватории Татарского пролива Японского моря // *Метеорол. и гидрология*. 2015. № 6. С. 89–96.

6. Мишукова Г.И., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Потоки метана на границе вода–атмосфера в Охотском море // ДАН. 2017. Т. 475, № 6. С. 697–701. DOI: 10.7868/S0869565217240203.
7. Мишукова Г.И., Шакиров Р.Б. Пространственная изменчивость распределения метана в морской среде и его потоков на границе вода–атмосфера в западной части Охотского моря // Вод. ресурсы. 2017. Т. 44, № 4. С. 493–503. DOI: 10.7868/S0321059617040137.
8. Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Окулов А.К. Распределение метана и его потоков на границе вода–атмосфера на акватории залива Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 6. С. 120–127.
9. Обжиров А.И., Мишукова Г.И., Шакиров Р.Б., Мишуков В.Ф., Мальцева Е.В., Соколова Н.Л., Окулов А.К., Яцук А.В., Лифанский Е.В. Межсезонная изменчивость концентраций и потоков метана на границе вода–атмосфера в западной части Охотского моря // Океанология. 2019. Т. 59, № 6. С. 944–951. DOI: 10.31857/S0030-1574596944-951.
10. Шакиров Р.Б., Валитов М.Г., Сырбу Н.С., Яцук А.В., Обжиров А.И., Мишуков В.Ф., Лифанский Е.В., Мишукова О.В., Саломатин А.С. Потоки метана на границе вода–атмосфера в южной части Татарского пролива Японского моря: особенности распределения и изменчивости // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 9. С. 1215–1230. DOI: 10.15372/GiG2019184.
11. Шакиров Р.Б., Мишукова О.В. Пространственное распределение потоков метана на границе вода–атмосфера в Охотском море // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3, № 1. С. 107–123. DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.
12. Antonov J.I., Seidov D., Boyer T.P., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Johnson D.R. World Ocean Atlas 2009. Vol. 2. Salinity / ed. S. Levitus. Wash., D.C.: U.S. Gov. Print. Off., 2010. 184 p. (NOAA Atlas NESDIS, N 69).
13. Bange H.W., Bartell U.H., Rapsomanikis S., Andreae M.O. Methane in the Baltic and the North Seas and a reassessment of the marine emissions of methane // Global Biogeochem. Cycles. 1994. Vol. 8, iss. 4. P. 465–480. <https://doi.org/10.1029/94gb02181> (дата обращения: 21.07.2021).
14. Lamontagne R.A., Swinnerton J.W., Linnenbom V.J., Smith W.D. Methane concentrations in various marine environments // J. Geophys. Res. 1973. Vol. 78. P. 5317–5324. <https://doi.org/10.1029/jc078i024p05317> (дата обращения: 21.07.2021).
15. Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Johnson D.R. World Ocean Atlas 2009. Vol. 1. Temperature / ed. S. Levitus. Wash., D.C.: U.S. Gov. Print. Off., 2010. 184 p. (NOAA Atlas NESDIS, N 68). https://www.researchgate.net/publication/216028010_World_Ocean_Atlas_2009_Vol_1_Temperature (дата обращения: 21.07.2021).
16. Luchin V., Kruts A., Sokolov O., Rostov V., Rudykh N., Perunova T., Zolotukhin E., Pischalnik V., Romeiko L., Hramushin V., Shustin V., Udens Y., Baranova O., Smolyar I., Yarosh E. Climatic Atlas of the North Pacific Seas 2009: Bering Sea, Sea of Okhotsk, and Sea of Japan / eds V. Akulichev, Yu. Volkov, V. Sapozhnikov, S. Levitus. Wash., D.C.: U.S. Gov. Print. Off., 2009. 380 p. DVD. (NOAA Atlas NESDIS, N 67).
17. Mellor G.L. Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model / Program in Atmospheric and Oceanic Sciences Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710. June 2004. 56 p. – http://jes.apl.washington.edu/modsims_two/usersguide0604.pdf (дата обращения: 21.07.2021).
18. Michoukov V., Mishukova G. White caps and bubble mechanisms of gas exchange between ocean and atmosphere // Proc. 2nd Intern. Symp. “CO₂ in the Oceans” / ed. Y. Nojiri. Environ. Agency of Japan, 1999. P. 517–520.
19. Mishukova O., Shukirov R., Yatsuk A. Methane fluxes on the water–atmosphere interface in the north-west of the Sea of Japan during spring – summer – autumn (2010–2018) // Marine Science and Technology for Sustainable Development: Abstr. 26th Intern. Conf. Pacific Congr. on Marine Science and Technology (PACON-2019). July 16–19, 2019. Vladivostok: POI FEB RAS, 2019. P. 78. ISBN 978-5-6043211-0-2.
20. Saunio M., Bousquet Ph., Poulter B. et al. The global methane budget 2000–2012 // Earth Syst. Sci. 2016. Vol. 8. P. 697–751. DOI: 10.5194/essd-8-697-2016.
21. Shukirov R.B., Valitov M.G., Obzhairov A.I., Mishukov V.F., Yatsuk A.V., Syrbu N.S., Mishukova O.V. Methane anomalies, its flux on the sea–atmosphere interface and their relations to the geological structure of the South-Tatar sedimentary basin (Tatar Strait, the Sea of Japan) // Marine Geophys. Res. 2019. Vol. 40. P. 581–600. <https://doi.org/10.1007/s11001-019-09389-3>.
22. Tilbrook B.D., Karl D.M. Methane sources, distributions and sinks from California coastal waters to the oligotrophic North Pacific gyre // Marine Chemistry. 1995. Vol. 49. P. 51–64.
23. Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I. Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2013. Vol. 86–87. P. 25–33.
24. Weber Th., Wiseman N.A., Kock A. Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters // Nature Commun. 2019. Vol. 10. 4584. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12541-7> (дата обращения: 21.07.2021).