

Пространственное распределение потоков метана на границе вода–атмосфера в Охотском море

© 2019 Р. Б. Шакиров, О. В. Мишукова*

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

**E-mail: omishukova@poi.dvo.ru*

Изучено пространственное распределение потоков метана на границе вода–атмосфера на акватории Охотского моря – района наиболее активной углеводородной дегазации в Азиатско-Тихоокеанской зоне перехода. Анализ потоков метана, рассчитанных по данным экспедиционных исследований 1991–2016 гг., позволил выявить причины их изменчивости, которая согласуется с особенностями строения газогеохимических провинций в Охотском море. Особенности распределения потоков метана на поверхности акватории, пересыщения поверхностных вод метаном относительно его равновесных содержаний в атмосфере, распределение содержаний метана в водной толще и в приповерхностном слое морской воды, состав и содержание углеводородных газов в донных отложениях определяются количеством и составом газов, мигрирующих из литосферных источников (нефтегазовые залежи, газогидраты, газонасыщенные осадки). Высокая изменчивость потоков метана в западной части Охотского моря (западно-охотоморская газогеохимическая провинция) – от поглощения до максимальных значений эмиссии более чем 300 моль/(км²·сут) – как по площади моря, так и во времени носит пульсационный сейсмозависимый характер. В исследуемом районе на большой площади и во времени установлено повышенное выделение метана в атмосферу, при этом потоки метана увеличиваются под влиянием больших скоростей ветра и более высокой температуры воды. Тектонические разломы и распределение нефтегазоносных структур – основные факторы, обуславливающие формирование потоков углеводородных газов в районе исследований.

Ключевые слова: распределение потоков метана, концентрации метана, Охотское море, газогеохимическая провинция.

The spatial distribution of the methane fluxes on the water-atmosphere boundary in the Sea of Okhotsk

*Renat B. Shakirov, Olga V. Mishukova**

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

**E-mail: omishukova@poi.dvo.ru*

The spatial distribution of the methane fluxes on the water-atmosphere interface in the Sea of Okhotsk, which is the region of the most active hydrocarbon degasation in Asia Pacific transitional zone, was studied. Analysis of CH₄ fluxes, which were calculated according to the experimental data of expeditional researches in 1991–2016, revealed the reasons of their variability which accords with the features of the structures of gasgeochemical provinces in the Sea of Okhotsk. The characteristics of distribution of methane fluxes on the surface of the sea area, supersaturation of surface water with methane relative to its equilibrium atmospheric contents, the distributions of methane in the water column and in the upper sea water layer, composition and the content of hydrocarbon gases in the bottom sediments are controlled by of the gases which migrate from the lithospheric sources (oil and gas deposits, gas hydrates, gas-saturated sediments). The high changeability of methane fluxes on the water-atmosphere border which increased from the absorption to the emission (more than 300 mole/(km²·day)) had the pulsating nature triggered by seismic events both on the area of sea and in the time in the western part of Sea of Okhotsk (West-Okhotsk Sea gasgeochemical province). The increased methane emission into the atmosphere was observed in the region being investigated on the big sea area, whereas methane fluxes have been increased by the effect of high wind speeds and higher temperature of water. Tectonic faults and the distribution of oil and gas-bearing structures are the basic factors, which cause the formation of the flows of hydrocarbon gases in the region of studies.

Key words: methane flux, methane distribution, the Sea of Okhotsk, gasgeochemical provinces.

Введение

В связи с проблемой глобального потепления климата одним из самых важных вопросов является оценка эмиссии парниковых газов, в том числе метана [Climate Change... , 1996]. Актуальность исследования концентраций метана обусловлена также его влиянием на содержание озона в атмосфере и образованием «озоновых дыр», поскольку метан активно участвует в фотохимических реакциях в стратосфере и способствует разрушению озонового слоя [Мишукова и др., 2007]. Интерес к данной проблеме обусловлен и решением энергетических проблем [Обжиров, 1993].

В работе [Climate Change... , 1996] отмечено, что общее содержание метана в атмосфере Земли – около 5000 Тг, а рост содержания метана в атмосфере с 1931 г. по настоящее время составляет 0.9 % в год и связан в основном с усилением хозяйственной деятельности человека. На рост содержания метана в атмосфере для Дальневосточного региона кроме антропогенных источников оказывают влияние тундровые районы Восточной Сибири [Climate Change... , 1996; Lammers et al., 1995; Matsueda et al., 1996].

Исходя из глобального роста концентрации метана в атмосфере (средняя скорость 1 % в год), авторы работы [Cicerone, Oremland, 1988] рассчитали, что глобальная эмиссия метана в атмосферу составляет 540 млн т/год, из них около 98 % вносят наземные источники. Потенциальная оценка вклада океанов в увеличение содержания метана в атмосфере остается неопределенной.

Известно, что поверхностные океанические воды слегка пересыщены метаном относительно его концентраций в атмосфере. Пересыщение морской воды относительно воздуха, по оценкам [Cicerone, Oremland, 1988; Ehhalt, 1974], примерно 30 %. Авторы работы [Conrad, Seiler, 1988] полагают, что на долю океана приходится от 0.005 до 3 % глобальной продукции метана.

Переоценка показала, что глобальная морская эмиссия метана лежит в диапазоне от 11 до 18 млн т/год, причем 75 % этого потока приходится на шельфовые районы [Bange et al., 1994]. В этой связи реальный

вклад окраинных морей Тихого океана в глобальный цикл метана в атмосфере еще слабо изучен. Это справедливо и для Охотского моря, которое является важнейшим звеном зоны перехода вода–атмосфера, содержит многочисленные и многообразные скопления природного газа, а также целые участки дна с активной метановой дегазацией.

Анализ литературных данных для изучаемого района показал, что приведенные результаты носят фрагментарный характер, а расчеты потоков метана в системе океан–атмосфера основаны на недостаточном фактическом материале и ряде допущений. Необъяснимая изменчивость концентраций метана в атмосфере, наличие естественных и антропогенных источников метана обуславливают необходимость получения информации о районах и масштабах поступления метана в воздух в Охотоморском регионе на основе прямых методов измерения содержаний метана в ходе комплексных океанологических экспедиций.

Цель работы – изучение пространственного распределения потоков метана на границе океан–атмосфера по данным рейсов 1991–2016 гг. для оценки факторов, влияющих на содержание метана в воде и его поток с акватории.

Материалы и методы

Для расчетов распределения потоков и концентраций метана и сравнительного анализа в данной работе использованы данные отбора проб воды в марте 1991 и 1999 гг. и летом 1992 г., а также в экспедиционных исследованиях рейсов НИС «Академик Несмеянов», лето 1992 и лето 1993; НИС «Профессор Гагаринский» № 25 (рейс G 25), октябрь 1998; № 28 (рейс G 28), июнь 2000; № 53 (рейс G 53), август–сентябрь 2011; НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 37 (рейс LV 37), август–сентябрь 2005; № 44 (рейс LV 44), июнь–июль 2008; № 45 (рейс LV 45), июль–август 2008; № 47 (рейс LV 47), июль–август 2009; № 52 (рейс LV 52), сентябрь–октябрь 2010; № 54 (рейс LV 54), май–июнь 2011 г.

Расчет потока метана в атмосферу с акватории Охотского моря впервые приведен в работе [Lammers et al., 1995].

Поток метана рассчитывался авторами [Lammers et al., 1995] по формуле:

$$F = 0.31U^2 \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-1/2} \Delta C$$

при $Sc = 2039.2 - 120.31t + 3.4209t^2 - 0.040437t^3$, где U – скорость ветра, Sc – число Шмидта, t – температура воды, ΔC – разность между измеренной и равновесной с атмосферой концентрацией метана.

Расчет выполнен ими по данным двух экспедиций. В марте 1991 г. в образцах воды, отобранной подо льдом на глубине 5 м в шести точках на полигоне с координатами $53^\circ 14' - 53^\circ 18' N$, $143^\circ 24' - 143^\circ 34' E$ (месторождение нефти Одопту), содержание метана варьировало от 95 до 385 нмоль/л, при среднем значении 274 нмоль/л (6138 нл/л). В июле на полигоне из 12 станций с координатами $52^\circ 40' - 53^\circ 03' N$, $143^\circ 20' - 144^\circ 25' E$ (рейс «Академик Несмеянов», июль 1992 г., месторождение нефти Пильтун-Астохское) содержание метана изменялось от 6 до 76 нмоль/л, средняя концентрация составила 58 нмоль/л (1299 нл/л).

Расчет был сделан для средних значений концентрации метана по каждой экспедиции при следующих допущениях:

а) для зимы – температура воды $0^\circ C$, соленость 34 ‰, скорость ветра 7 м/с, концентрация метана в атмосфере 2 ppmv, соответствующая равновесной концентрации метана в воде 4 нмоль/л. Расчет выполнялся для воды при отсутствии льда (полагается, что лед уже растаял в апреле). Поток метана из морской воды в атмосферу в апреле составил $8.9 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, или $560 \text{ моль}/(\text{км}^2 \cdot \text{сут})$;

б) для лета – температура воды $10^\circ C$, соленость 34 ‰, скорость ветра 7 м/с, концентрация метана в атмосфере 2 ppmv, соответствующая равновесной концентрации метана в воде 3 нмоль/л. Поток метана в июле равен $2.4 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, или $150 \text{ моль}/(\text{км}^2 \cdot \text{сут})$.

По предположению [Lammers et al., 1995], скорость падения потока метана с апреля по июль изменяется по экспоненциальному закону. В этом случае среднегодовой поток метана с акватории этих двух полигонов (март 1991 г. и июль 1992 г.) составляет $7.3 \cdot 10^5 \text{ г}/\text{км}^2 \cdot \text{год}$, или $125 \text{ моль}/(\text{км}^2 \cdot \text{сут})$,

причем 74 % метана поступает в атмосферу в период между апрелем и июлем, а минимальный поток будет наблюдаться с октября по март [Lammers et al., 1995].

Полученная величина среднегодового потока метана в 43 раза выше соответствующего значения для открытых районов северо-западной части Тихого океана – $1.7 \cdot 10^4 \text{ г}/\text{км}^2$ в год, или $2.9 \text{ моль}/(\text{км}^2 \cdot \text{сут})$ [Lamontagne et al., 1973].

Принимая, что величины пересыщения метаном поверхностных вод относительно его равновесных концентраций с атмосферой распространяются на 15 % площади Охотского моря, авторы [Lammers et al., 1995] получили, что соответствующий поток метана с акватории к востоку от о. Сахалин равен $6.1 \cdot 10^5 \text{ г}/\text{км}^2$ за год, причем $5.7 \cdot 10^5 \text{ г}/\text{км}^2$ выделяется с апреля по июль [Lammers et al., 1995].

По сравнению с наземными бореальными и арктическими экосистемами интенсивность эмиссии метана с поверхности Охотского моря в целом либо совпадает с данными для сухой тундры ($11.5 \pm 3.5 \text{ мг}/\text{м}^2$ в день), либо меньше на 1–2 порядка по сравнению с влажной тундрой и болотами [Kvenvolden et al., 1993].

Для оценки влияния эндогенных источников на поток CH_4 из Охотского моря в атмосферу В.В. Аникиевым и А.И. Обжировым [Аникиев, Обжиров, 1993] был проведен расчет величины потоков CH_4 в придонную воду Охотского моря из низкотемпературных источников на основе следующих исходных предположений:

1. CH_4 поступает в виде газовых струй с интенсивностью $0.02 \text{ л}/\text{см}^2$, что является нижним пределом зарегистрированных потоков метана на дне Черного моря при проведении прямых акустических наблюдений [Аникиев, Обжиров, 1993].

2. Общая площадь полей с холодными сипами составляет около 10 км^2 или 100 случаев с площадями по 0.1 км^2 (как это было в Черном море).

Из первого предположения получили, что скорость выделения CH_4 для Охотского моря в этом случае равна $5.0 \cdot 10^{11} \text{ г}$ на 1 км^2 холодных сипов в год. Если эту величину умножить на площадь полей с холодными сипами (10 км^2), что следует из предположения 2, то поток метана из холодных сипов в воду значительно увеличивается.

Общий поток CH_4 в атмосферу с акватории Охотского моря площадью $1.6 \cdot 10^6 \text{ км}^2$, с использованием среднегодовой скорости выделения метана с 1 км^2 поверхности моря $6.1 \cdot 10^5 \text{ г/км}^2$ в год, оказался равным $9.6 \cdot 10^{11} \text{ г}$ в год [Аникиев, Обжиров, 1993]. Это значение в 5–10 раз выше [Аникиев, Обжиров, 1993], чем для моря Бофорта [Kvenvolden et al., 1993], а по сравнению с пелагическими водами субтропических районов Тихого океана интенсивность выноса CH_4 с поверхности Охотского моря больше в 10–15 раз.

Последующие исследования выявили для этой же акватории, включающей месторождения нефти Одопту, Пильтун-Астохское и Чайво, сильную изменчивость концентраций метана в поверхностном слое морской воды. В «ледовой экспедиции» в конце марта 1999 г. на 4 станциях на северо-западном шельфе и склоне о. Сахалин в образцах воды, отобранных из-под

льда, содержание метана варьировало от 4 до 20 нмоль/л (82–444 нл/л). Самая высокая концентрация 20 нмоль/л наблюдалась на станции 3 на том же полигоне, что и для экспедиции в марте 1991 г., но была в 13 раз меньше среднего значения 274 нмоль/л, которое приводят авторы [Lammers et al., 1995].

Как видим в табл. 1, поток метана, рассчитанный нами при таких же условиях на полигоне из четырех станций в конце марта 1999 г., варьировал от 0.3 до 39.0 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$).

Анализ экспедиционного материала за 1998–2000 гг. показал, что содержание метана в морской воде в акваториях к востоку от о. Сахалин, в том числе и в районах открытых месторождений нефти и газа, колеблется очень сильно [Мониторинг метана... , 2002].

Таким образом, предварительная оценка потока метана, выполненная по средним значениям для северо-восточного шельфа о. Сахалин, требовала дальнейших исследований и обобщения более широкого материала.

Результаты и обсуждения

Исследования потоков метана на границе вода–атмосфера на акватории восточного шельфа и склона о. Сахалин

В работе [Мишукова и др., 2007] приведены результаты расчета потоков метана с поверхности моря для восточного шельфа и склона о. Сахалин, которые включали шельфовые районы с глубинами до 200 м, склон шельфа и глубоководные районы с глубинами до 1200 м при различных метеоусловиях. Особый интерес к данному району обусловлен высокой потенциальной нефтегазоносностью всего шельфа о. Сахалин, а также наличием разведанных морских нефтегазовых месторождений, таких как Одопту, Пильтун-Астохское, Аркутун-Даги, Лунское и др. Схема работ на акватории западной части Охотского моря показана на рис. 1.

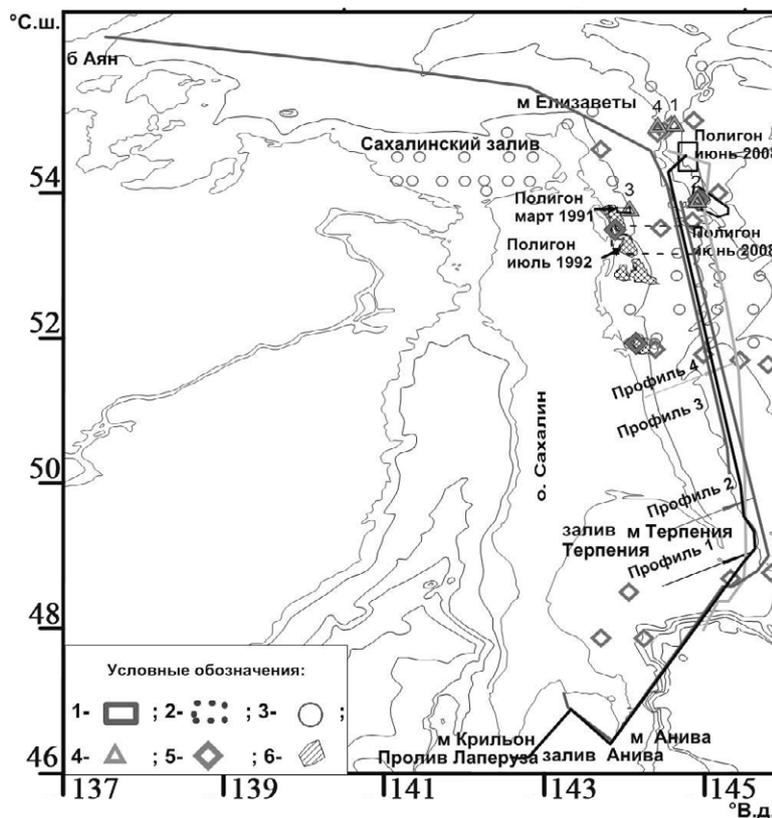


Рис. 1. Схема работ на акватории западной части Охотского моря. 1 – полигон отбора проб воды из-под льда, март 1991 г.; 2 – полигон отбора проб воды, лето 1992; 3 – станции отбора проб воды, НИС «Академик Несмеянов», лето 1993; 4 – полигон отбора проб воды из-под льда, март 1999; 5 – станции отбора проб воды, рейс G 28, июнь 2000; 6 – разведанные месторождения нефти и газа. Профили 1 и 2 – рейс LV 44, июнь–июль 2008; профиль 3 – рейс LV 45, июль–август 2008; профиль 4 – рейс LV 47, июль–август 2009 г.

Таблица 1. Распределение потоков метана на границе вода–атмосфера на акватории Охотского моря в ледовой экспедиции 1999 г.

Номер станции	Координаты		Глубина отбора проб, м	Концентрация, нл/л	Поток метана, моль/(м ² ·сут)
	широта	долгота			
Ice-99/1	54°26.636′	144°07.546′	5	98	0.3
Ice-99/2	53°22.296′	144°23.647′	5	132	4.1
Ice-99/3	53°15.866′	143°33.717′	5	447	39.0
Ice-99/4	54°24.633′	143°54.621	5	82	1.5

Потоки метана с акватории Охотского моря были рассчитаны для каждой станции отбора проб воды на основе полученных в рейсе 28 НИС «Профессор Гагаринский» (6–13 июня 2000 г.) экспериментальных данных о концентрации метана в поверхностных водах. Скорость ветра определяли расчетным способом по метеосценариям, концентрацию метана и соленость получали из экспериментальных данных. Ветровые условия дифференцировали для лета и осени [Мишукова и др., 2007]. Среднемесячная температура воды для расчетного периода была выбрана на основании литературных данных [Climatic Atlas... , 2009].

По результатам расчета, представленным в работе [Мишукова и др., 2007], в исследуемом районе наблюдается выделение

метана в атмосферу, причем в осенний сезон (сентябрь, октябрь) потоки метана (от 14 до 174 моль/(м²·сут)) выше, чем его потоки (от 7 до 90 моль/(км²·сут)) в летний период (июнь–август). Поскольку динамика коэффициента газообмена нелинейным образом зависит от скорости ветра и скорость ветра оказывает на коэффициент газообмена определяющее влияние [Мишукова и др., 2007, Vereshchagina et al., 2013], то увеличение потоков метана на границе вода–воздух в осенний сезон обусловлено влиянием, в основном, больших скоростей ветра и, в среднем, более высокой температуры воды.

Распределение потоков метана по акватории Охотского моря, прилегающей к восточному побережью о. Сахалин, показано в табл. 2.

Таблица 2. Распределение потоков метана на границе вода–атмосфера в летний и осенний периоды 2000 г. [Мишукова и др., 2007]

Номер станции	Координаты		Поток метана, моль/(км ² ·сут)		Концентрация, нл/л	Температура, °С	Соленость, ‰	Глубина отбора, м
	широта	долгота	лето	осень				
G00-1	47°22.125′	143°12.390′	12.34	23.70	218	2.589	30.624	1.2
G00-2	53°00.152′	143°22.405′	44.21	85.67	606	1.831	32.152	2.9
G00-3	53°01.166′	143°56.950′	40.67	78.78	563	3.389	31.72	3
G00-4	53°06.973′	144°20.726′	6.02	11.41	140	1.651	32.545	3
G00-5	53°23.048′	144°24.742′	0.19	0.08	69	1.996	32.355	2
G00-6	53°30.357′	144°39.988′	0.84	1.35	77	2.546	32.21	2.5
G00-7	54°30.204′	144°21.613′	0.85	1.37	77	3.789	32.542	2.3
G00-8	54°26.370′	144°04.783′	1.34	2.32	83	1.344	32.386	2.6
G00-9	54°21.714′	143°59.553′	1.17	2.00	81	1.64	32.425	2.2
G00-10	54°19.803′	143°54.634′	14.06	27.04	238	1.49	32.625	2.4
G00-11	54°06.255′	143°12.045′	21.47	41.46	329	2.984	31.473	1.9
G00-12	51°26.804′	143°38.162′	90.02	174.72	1165	3.278	31.346	3
G00-13	51°21.060′	143°52.960′	38.88	75.29	541	3.488	31.943	2.6
G00-14	51°16.650′	144°28.883′	27.33	52.85	400	1.209	32.337	2.9
G00-15	51°12.164′	144°56.213′	14.53	27.97	244	1.394	32.169	3.3
G00-16	51°08.419′	145°17.221′	9.12	17.44	178	2.129	32.086	2.5
G00-17	48°18.072′	145°40.297′	1.83	3.27	89	2.756	32.285	3
G00-18	48°16.056′	145°19.819′	3.96	7.41	115	1.842	32.255	3.2
G00-19	48°11.404′	144°49.394′	28.98	56.06	420	1.942	32.645	3
G00-20	48°00.144′	143°33.238′	7.34	13.99	157	5.617	30.714	3.4
G00-21	47°22.125′	143°12.390′	0.17	0.05	69	5.437	31.88	10.6

Наибольшие потоки метана наблюдались в шельфовых районах о. Сахалин, в них получены максимальные концентрации метана в поверхностном слое морской воды: 1) на мелководной части шельфа на северо-востоке о. Сахалин (станции GOO-11, GOO-2, GOO-3); 2) на шельфе в центральной части (ст. GOO-12, GOO-13); 3) на кромке шельфа на юге (ст. GOO-19, GOO-18).

Потоки метана были рассчитаны также для каждой станции отбора проб морской воды для реальных метеоусловий в летний и осенний сезоны по данным комплексных экспедиций 1998 и 2000 гг.: рейсы G 28, июнь 2000, и G 25, октябрь 1998 (рис. 2). Для данных рейсов измерения скорости ветра не проводились. Были взяты средние для

октября 1998 и июня 2000 г., зарегистрированные на метеостанциях о. Сахалин.

Как можно видеть по представленным данным, потоки отличаются от модельных, но положения максимумов остаются. Для октября 1998 г. реальные скорости ветра на момент отбора проб воды были гораздо ниже скоростей ветра для июня 2000 г. и ниже среднестатистических. Соответственно, потоки метана при реальных скоростях ветра в июне 2000 г. оказались выше, а в октябре 1998 г. – ниже. Средний по акватории поток для лета составил 43.6 моль/(км²·сут) (июнь 2000 г.) и для осени 14.3 моль/(км²·сут) (октябрь 1998 г.); в то время как для среднестатистических скоростей ветра поток для лета был 17.4 моль/(км²·сут), а для осени 33.0 моль/(км²·сут).

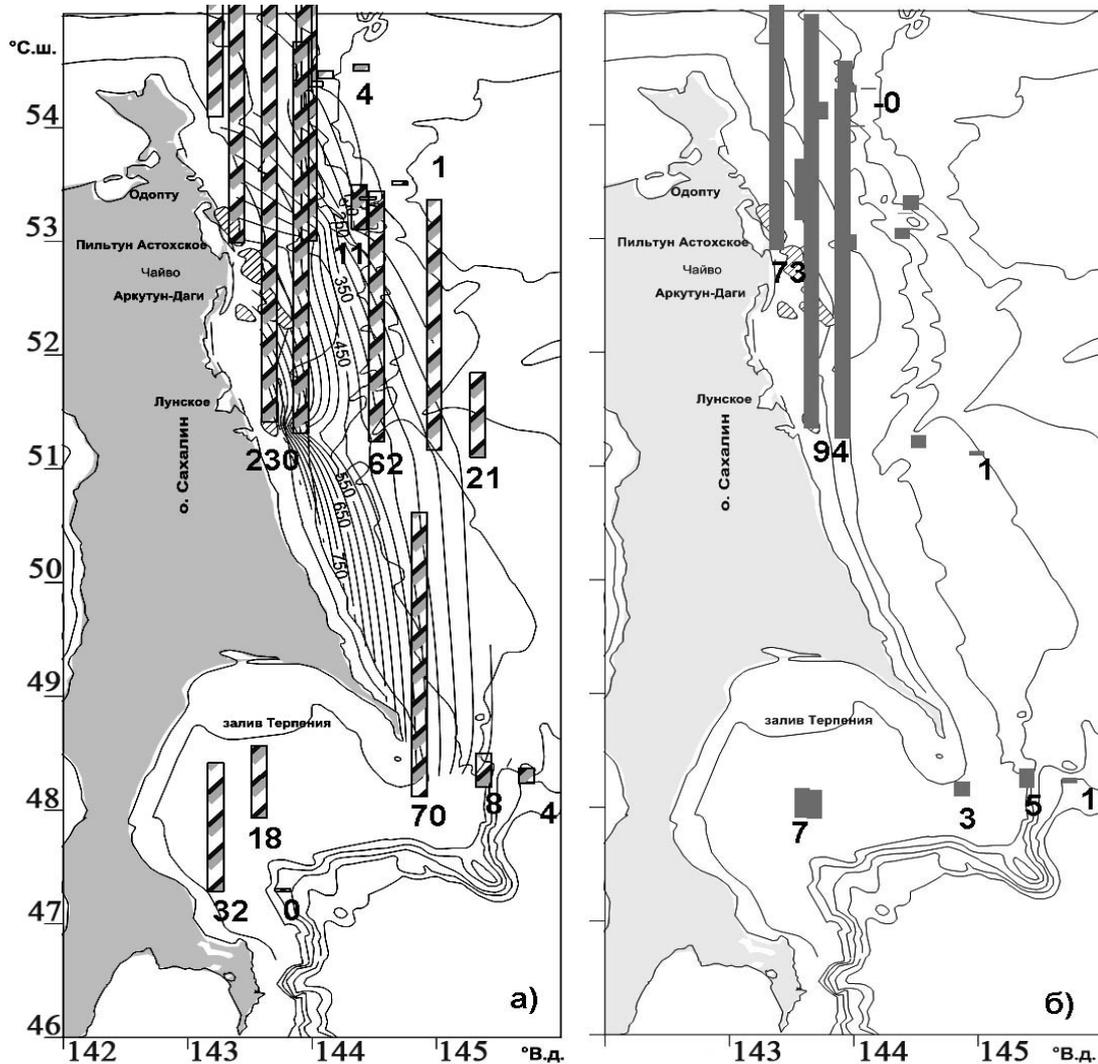


Рис. 2. Распределение потоков метана на акватории восточного шельфа и континентального склона о. Сахалин: (а) для лета, июнь 2000 г. (рейс G 28); (б) для осени, октябрь 1998 г. (рейс G 25). Вертикальные столбики на станциях отбора проб воды по профилям – потоки метана в атмосферу, цифры – значения потоков метана, моль/(км²·сут). Изолиниями показаны концентрации метана (нл/л).

Исследования потоков метана на границе вода–атмосфера на всей акватории Охотского моря

Распределение потоков метана на границе вода–атмосфера на всей акватории Охотского моря и прилегающей части Тихого океана представлено в работе [Мишукова и др., 2010]. Полигоны изучения потоков метана к западу и востоку от о. Сахалин включали шельфовые районы с глубинами до 200 м, склон и глубоководные районы с глубинами до 1200 м, а также западный шельф п-ова Камчатка и районы Курильских островов. Потоки метана рассчитывались для каждой станции отбора проб морской воды по данным рейса НИС «Академик Несмеянов» (июль–август 1993 г.). Измерения скорости ветра для этого рейса не проводились. Были взяты средние июля–августа 1993 г., зарегистрированные на метеостанциях о. Парамушир, о. Симушир и с. Джаоре о. Сахалин.

На рис. 3 изображены потоки метана, а также горизонтальное распределение концентраций метана в поверхностном слое морской воды.

По представленным данным рейса НИС «Академик Несмеянов» (лето 1993 г.), структура потоков метана с акватории Охотского моря неоднородна – от поглощения -1.2 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) до эмиссии 175.4 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$).

Изменчивость потока с поверхности моря и содержания метана в поверхностном слое воды связана с неоднородным пространственным распределением источников метана.

В горизонтальном распределении метана в поверхностном слое морской воды на акватории Охотского моря летом 1993 г. заметно значительное увеличение концентрации метана в шельфовых районах о. Сахалин.

Изолиния 70 нл/л метана приблизительно соответствует равновесной с атмосферой концентрации метана в морской воде при солености и температуре измерений и разделяет акваторию на районы с выделением метана (>70 нл/л) и поглощением.

Максимальные потоки метана летом 1993 г. наблюдались на восточном шельфе о. Сахалин между 51° и 52° с.ш. и в восточной части Сахалинского залива при слабом выделении метана на западном шельфе п-ова Камчатка и в районах Курильских островов севернее прол. Буссоль, а также в районе о. Кунашир со стороны Тихого океана.

В Сахалинском заливе в зоне смешения вод потоки метана крайне неоднородны (от -0.3 до 88.3 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$)), как и горизонтальное распределение концентраций метана (от 67 до

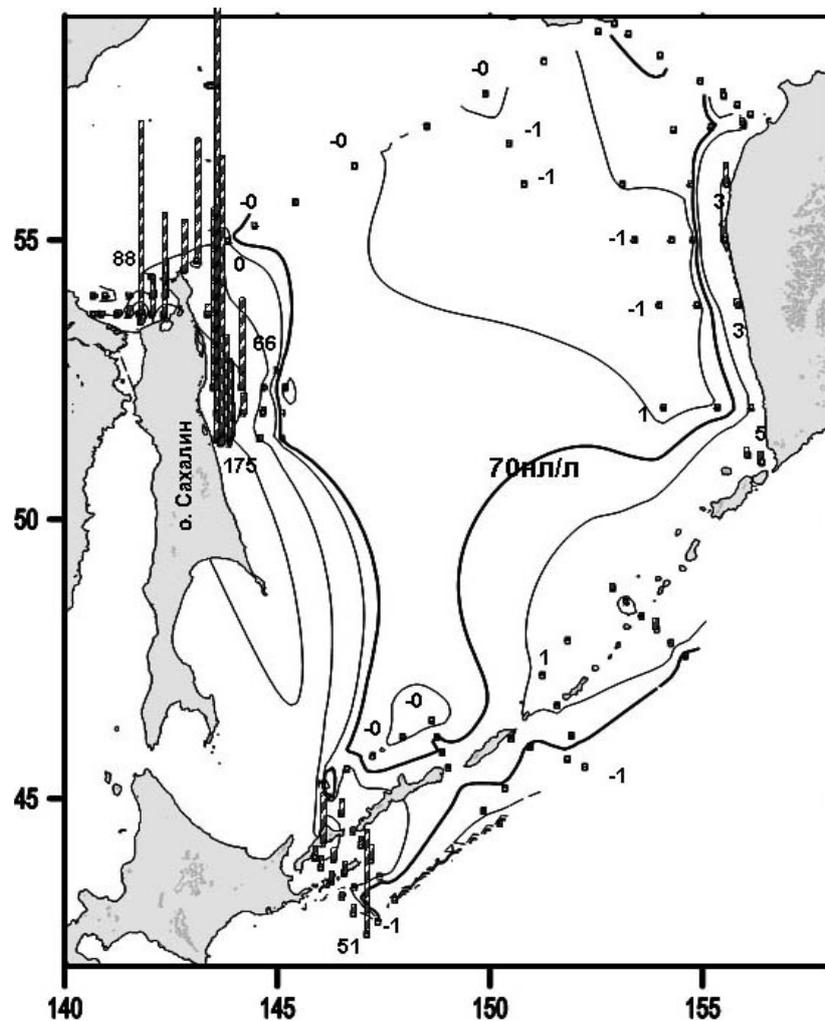


Рис. 3. Распределение потоков метана летом 1993 г. Столбики и цифры при них – потоки метана, моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$). Изолиния 70 нл/л метана разделяет акваторию на районы с выделением метана (>70 нл/л) и его поглощением.

1590 нл/л). Максимальная эмиссия метана наблюдалась в восточной части Сахалинского залива, севернее и восточнее банки Зотова. Максимальные концентрации метана в воде как на поверхности, так и в придонном слое отмечались также не на всей площади и не в устье р. Амур, а на участке, перспективном для разработки нефти и газа в рамках проекта «Сахалин-4» [Нефть и газ... , 1998]. На некоторых станциях, расположенных в заливе, можно видеть и поглощение. Для мелководных станций залива характерно уменьшение концентрации метана от придонных горизонтов к поверхностным водам, что свидетельствует о поступлении метана со дна, а также о том, что процесс микробиального продуцирования метана из органического вещества восстановленных донных осадков в зоне континентального шельфа не является преобладающим на данной акватории, в отличие, например, от устья р. Янцзы (Восточно-Китайское море) [Tsurushima, 1996].

На северо-восточных станциях наблюдается максимальное поглощение метана из атмосферы -1.2 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$).

Для акватории со стороны Тихого океана значения потока меняются от -1.2 до 51.4 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$), а средний поток равен 4.5 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$). Среднее значение потоков на прикурильской акватории Тихого океана сопоставимо с таковым в прилегающих районах Тихого океана: восточное побережье о. Хонсю – 2.9 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) [Rehder, Suess, 2001], северо-западная часть Тихого океана – 2.5 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) [Watanabe et al., 1995].

Как можно видеть из представленных данных, изменение потоков метана с поверхности моря весьма значительное. Явно выделяется район шельфа и склона о. Сахалин на широтах между 51° – 54° N. Повышенные значения потоков на этой части акватории в 1993 г. согласуются с результатами расчета потоков как для июня 2000 г. (рейс G 28), так и для октября 1998 г. (рейс G 25), а также со средним значением потока 150 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) на полигоне летом 1992 г., хотя профили станций, выполненные летом 1993 г., не совпадают с полигоном, для которого проводили расчет потока авторы работы [Lammers et al., 1995].

Выделяются также районы с повышенными потоками метана, прилегающие к о. Кунашир как со стороны Охотского моря, так и со стороны Тихого океана.

Изучение пространственной изменчивости потоков метана на границе вода–атмосфера в западной части Охотского моря по данным 2008–2009 гг.

Во всех приведенных выше работах расчет потоков метана с акватории Охотского моря проводился в каждой точке отбора проб воды на станциях, находящихся на значительном расстоянии друг от друга. Для изучения пространственного распределения потоков метана на границе вода–атмосфера необходимы непрерывные измерения концентрации метана в морской воде на больших акваториях за непродолжительный промежуток времени. Первые такие работы были осуществлены в экспедициях НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в июне–июле 2008 г. (рейс LV 44), в июле–августе 2008 г. (рейс LV 45) и в июле–августе 2009 г. (рейс LV 47).

Распределение потоков метана на границе вода–атмосфера и горизонтальное распределение содержаний метана в поверхностном слое морской воды изучались на акваториях от мыса Крильон до мыса Анива в зал. Анива, на акватории восточного склона о. Сахалин от мыса Терпения вдоль изобаты 200 м до мыса Елизаветы и далее на запад к бухте Аян, а также на полигонах и станциях на акваториях впадины Дерюгина, северо-восточного шельфа и склона о. Сахалин [Мишукова, Верещагина, 2011; Mishukova et al., 2017; Mishukova, Shakirov, 2017] (см. рис. 1).

Распределение потоков метана приведено на рис. 4. В июне–июле 2008 г. было выполнено 2 полигона и проложено два профиля: с юга на север (профиль 1, рис. 4а) и с севера на юг (профиль 2, рис. 4б), в августе 2008 г. – профиль 3 (рис. 4в), в июле 2009 – профиль 4 (рис. 4г).

На западной акватории Охотского моря величины потоков варьировали от поглощения до 324 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$). Содержания метана при этом изменялись от 58 до 2014 нл/л. Равновесная с атмосферой концентрация

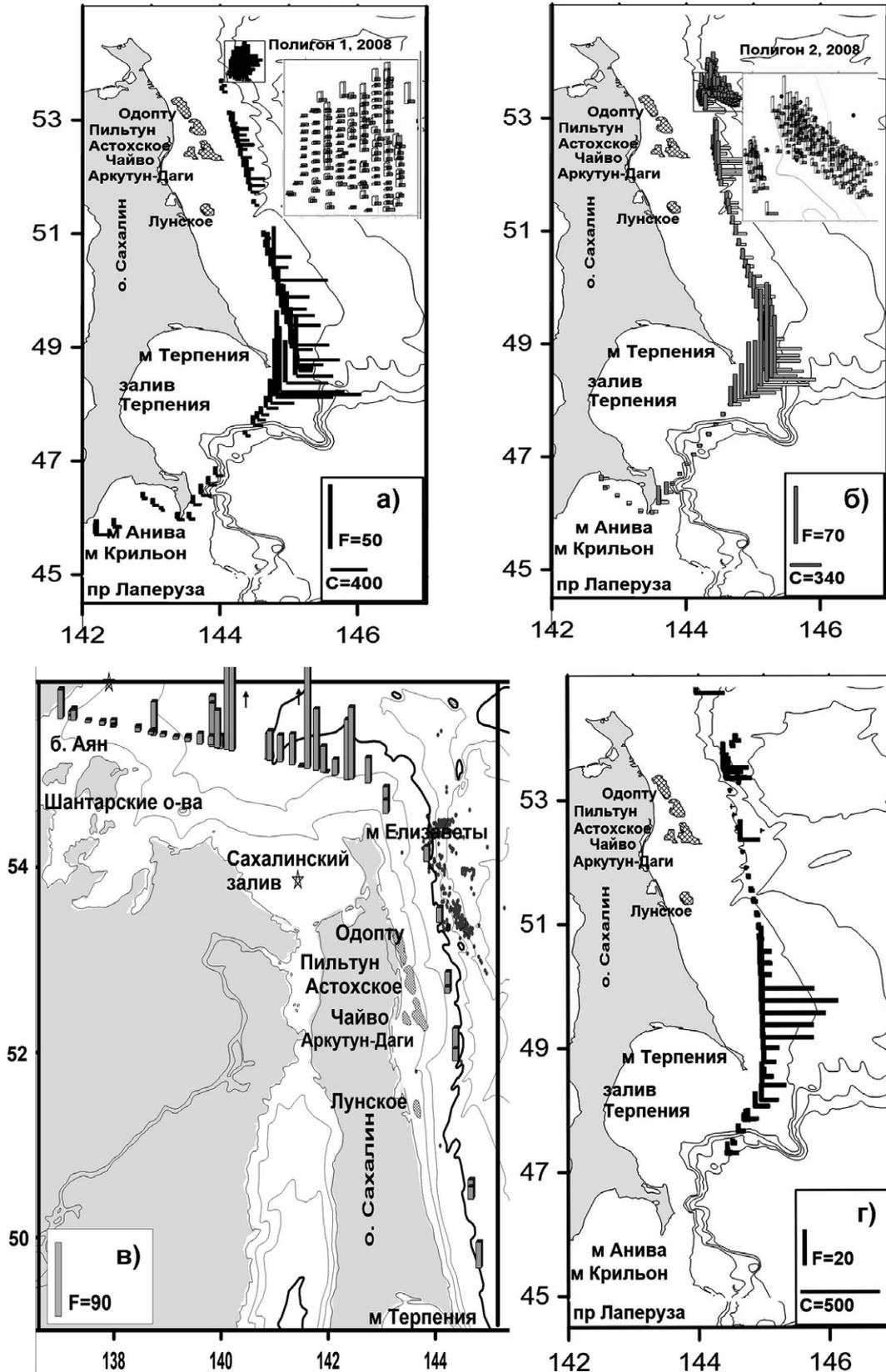


Рис. 4. Распределение потоков метана на границе вода–атмосфера (F – величина потока метана, моль/(км² сут), вертикальные столбики) и концентраций метана в поверхностных водах (C – концентрация метана, нл/л, горизонтальные столбики) в Охотском море. а, б – профили 1 и 2 (июнь–июль 2008 г.), на врезках – распределение концентраций и потоков метана на акватории впадины Дерюгина (полигоны 1 и 2); в – профиль 3 (июль 2008 г.); г – профиль 4 (июль 2009 г.). Заштрихованные области – разведанные месторождения нефти и газа; точки – «газовые факелы».

метана при измеренных солености и температуре воды составляла от 46 до 75 нл/л. Почти для всей изучаемой акватории поверхностный слой воды пересыщен метаном относительно его содержания в атмосфере, и только на одной станции летом 2009 г. (рейс LV 47) наблюдалось недосыщение. Показатель насыщения составил от 95 до 3786 %. Максимальный поток метана наблюдался на северо-запад от о. Сахалин летом 2008 г. (рейс LV 45, профиль 3, рис. 4в).

На рис. 4 видно, что для совпадающих частей четырех профилей между 49° и 54° с.ш. на акватории вдоль восточного склона о. Сахалин потоки метана по рейсам различаются.

Изменение направления и интенсивности потоков метана на акватории Охотского моря связано с неоднородным пространственным распределением метана в поверхностном слое воды.

В июне 2008 г. (рейс LV 44) (рис. 4а) при движении из порта Корсаков в юго-восточном направлении до мыса Анива поток метана изменялся в диапазоне от 2 до 18, среднее значение составляло 7 моль/(км²·сут), концентрации метана в поверхностных водах при этом в зал. Анива варьировали от 85 до 314 нл/л при среднем значении 159 нл/л. В зал. Терпения максимальный поток (101 моль/(км²·сут)) зафиксирован в области с наибольшими концентрациями метана в приповерхностном слое. На маршруте мыс Анива – мыс Терпения концентрация метана сначала постепенно снижается с 141 до 108 нл/л в глубоководных центральных районах зал. Терпения, а затем около мыса Терпения интенсивно возрастает до 812 нл/л. Следует отметить, что в этом районе повышенное содержание метана было зафиксировано при движении судна как на север (профиль 1, рис. 4а), так и на обратном маршруте в июле 2008 г. (профиль 2, рис. 4б).

Вдоль склона о. Сахалин в целом для обоих профилей 1, 2 значения потоков метана меняются от 2 до 126 при среднем значении 14 моль/(км²·сут). На этом участке маршрута с юга на север вдоль склона шельфа (профиль 1, рис. 4а) первоначальное снижение концентрации метана в приповерхностных водах сменяется ее ростом. Поток метана увеличился до 126 моль/(км²·сут) на обрат-

ном маршруте (профиль 2, рис. 4б) при максимальном значении концентрации метана 990 нл/л, скорости ветра 8 м/с и температуре 6–8 °С в наиболее холодном поверхностном слое морской воды.

Во впадине Дерюгина (полигоны 1 и 2 на врезках рис. 4а и 4б) среднее значение потока составило 8.6 моль/(км²·сут), максимальное – 34 моль/км²·сут. Максимальный поток фиксируется в районе, где в течение ряда лет наблюдается прямой выход газа. Особенно активно метан выделяется в шельфовой и склоновой зонах о. Сахалин. Количество регистрируемых акустическими методами газовых «факелов» на акватории северо-восточного склона и шельфа о. Сахалин превышает 500 [Salomatin, Yusupov, 2011]. Метан – основной компонент восходящего газового потока, он активно мигрирует по разрывным нарушениям из зоны газонасыщения под осадками. Наиболее многочисленные выходы метана обнаружены в Дерюгинской котловине вблизи пересечений взбросов С-С3 или С-3 простирания и предполагаемых сдвигов С-СВ простирания, закартированных [Baranov et al., 1999] между Западно- и Восточно-Дерюгинской разломными зонами.

На маршруте от мыса Терпения до бухты Аян в июле–августе 2008 г. (рейс LV 45) (рис. 4в) значения потоков метана зафиксированы в диапазоне от 1.4 до 324 моль/(км²·сут) при среднем значении 40 моль/(км²·сут), концентрация метана изменялась от 69 до 2014 нл/л. В июле–августе 2009 г. (рейс LV 47) (рис. 4г) на маршруте мыс Анива – мыс Терпения потоки метана были низкими – от 2 до 6 моль/(км²·сут), концентрации метана – от 85 до 180 нл/л.

Вдоль восточного склона о. Сахалин на совпадающих частях профилей 1–4 в июне–начале июля 2008 г. (рис. 4 а, б) поток на границе вода–атмосфера составил от 1 до 126 моль/(км²·сут); средний процент насыщения 490 %. В конце июля 2008 г. (рис. 4в) потоки метана на части профиля вдоль восточного склона о. Сахалин изменялись от 12 до 62 моль/(км²·сут). Концентрации метана в конце июля 2008 г. (рис. 4в) от мыса Терпения варьировали от 206 до 887 нл/л,

максимальное значение содержания метана достигло 887 нл/л на широте около 50° с.ш. с последующим снижением, средний процент насыщения 1348 %. В июле–августе 2009 г. (профиль 4, рис. 4г) потоки метана были заметно слабее: максимальный 25 при среднем 4 моль/(км²·сут), при этом на одной станции во впадине Дерюгина наблюдалось поглощение метана из атмосферы. Средний процент насыщения был 138 %.

Диапазон потоков метана 6–61 моль/(км²·сут) для 2000 (G 28, рис. 2а) и 1993 гг. (НИС «Академик Несмеянов», рис. 3) на совпадающих частях акватории восточного шельфа о. Сахалин вдоль изобаты 200 м близок к потокам метана для 2008 и 2009 гг. (LV 44, 45, 47).

На северо-западе от о. Сахалин от мыса Елизаветы в сторону бухты Аян в 2008 г. наблюдалось крайне неоднородное распределение потоков метана (см. профиль 3, рис. 4в). Следует отметить, что западная часть профиля 3 в 2008 г. проходила севернее полигона в Сахалинском заливе, выполненного в 1993 г. Максимальное значение на акватории профиля 3 было 324 моль/(км²·сут), в то время как в Сахалинском заливе в 1993 г. оно составляло до 88 моль/(км²·сут). В работе [Mishukova, Shakirov, 2017] показано, что потоки метана на границе вода–атмосфера пространственно совпадают (проецируются) с наибольшими концентрациями метана в донных отложениях. Область высоких содержаний метана распространяется на всю Шмидтовскую складчато-сдвиговую зону и часть Дерюгинского прогиба. Волнообразная форма их распределения отражает особенности тектонического строения этих структур. Повышенные значения потоков метана в атмосферу обусловлены дегазацией структур по зонам тектонических разломов, усиливающейся при сейсмической активности. Максимальный поток, зафиксированный на западной части профиля 3 (рис. 4в), можно объяснить тем, что под влиянием землетрясений происходит активизация вертикальной миграции метана из донных отложений в толщу воды: накануне отбора проб 18 и 27 июня 2008 г. было зарегистрировано 2 землетрясения с эпицентра-

ми на выходе из Сахалинского залива и западнее п-ова Шмидта.

При изучении распределения потоков метана было выявлено, что на их величину оказывала влияние температура воды поверхностного слоя.

Для профилей 1, 2, 3 (рис. 4 а, б, в) концентрации метана в июне и июле 2008 г. почти одинаковы, однако средний поток и показатели насыщения вод метаном различаются. Содержание метана в июне – начале июля 2008 г. (рейс LV 44, часть профилей 1, 2) на данной акватории изменялось в таких же пределах, что и в конце июля 2008 г. (рейс LV 45, часть профиля 3), но равновесная с атмосферой концентрация метана была выше вследствие более низкой температуры морской воды. Средним температурам воды в июне 8° и 10°, а в июле 18° С соответствовали равновесные с атмосферой концентрации метана 64, 62 и 46 нл/л. Поэтому в июле средний процент насыщения и поток метана в целом были выше.

Из рис. 4 а, б видно, что поток метана на профиле 1 меньше, чем на профиле 2, так как на участке 51–53° с.ш. при движении судна на север средняя скорость ветра была 2 м/с (скорость ветра приводится на момент отбора проб воды, пробы отбирались с интервалом 30 мин), а при движении в обратном направлении ветер усилился до 5 м/с. Во время рейса 44 в июне–июле 2008 г. на профилях с юга на север (профиль 1) и в обратном направлении (профиль 2) 144 пробы из 362 были отобраны при скорости ветра 7–8 м/с, которая считается средней для Мирового океана.

Поскольку при больших скоростях ветра (8 м/с и более) сохраняется превышение концентраций метана в поверхностном слое воды над равновесными, то должно присутствовать постоянное влияние источника метана.

Повышенные значения потока метана на границе вода–атмосфера и аномально высокие концентрации метана в поверхностных водах на акватории центрального и северо-восточного шельфа и склона о. Сахалин объясняются миграцией этого газа в виде пузырьков из донных отложений. Процесс хорошо согласуется с распространением

сквозных устойчивых аномальных полей метана [Shakirov et al., 2005]. Поступление метана со дна северо-восточного и восточного шельфа о. Сахалин обусловлено наличием нефтегазовых залежей, неотектоническими зонами проницаемости и многочисленными активными разломами в сочетании с высокой сейсмической активностью этого района. В донных отложениях Дерюгинского прогиба (или Дерюгинской депрессии) обнаружены максимальные содержания метана до 5 об. % (свободная фаза, метод headspace). Убедительным доказательством того, что тектонические структуры контролируют расположение долгоживущих выходов природного газа, является локализация над ними сквозных аномальных полей метана с максимальными значениями до 450–1340 нмоль/л в придонных водных горизонтах. Ураганные концентрации метана в донных отложениях тоже маркируют наличие локальных зон свободного выхода природного газа (сипов). Многочисленные выходы метана в течение ряда лет наблюдались в Дерюгинской депрессии вблизи пересечений взбросов С-СЗ или С-З простирания и сдвигов С-СВ простирания, закартированных между Западно- и Восточно-Дерюгинской разломными зонами в пределах газогидратоносного района [Шакиров, 2016].

Таким образом, можно отметить большую изменчивость потоков метана для изучаемых акваторий. В немалой степени это связано с пространственным расположением подводных источников и проявлений свободного выхода метана («факелов»). Неоднородное распределение метана в морской воде вызывает изменение направления и величины потоков метана на границе море–атмосфера. На величине потока сказывается и изменение температуры поверхностного слоя воды и скорости ветра.

Пространственное распределение потоков метана на границе вода–атмосфера на акваториях южной части Охотского моря по данным 2005–2011 гг.

Для анализа пространственно-временной изменчивости распределения потоков метана

на границе вода–атмосфера в южной части Охотского моря были использованы экспериментальные измерения концентраций метана, полученные в экспедициях 2005–2011 гг. Потоки метана с поверхности моря были рассчитаны для каждой точки отбора проб воды по данным концентраций метана, полученным экспериментально для рейсов: НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 37 (LV 37, август–сентябрь 2005 г.), № 52 (LV 52, сентябрь–октябрь 2010); № 54 (LV 54, май–июнь 2011) и НИС «Профессор Гагаринский» № 53 (G 53, август–сентябрь 2011 г.).

Результаты изучения распределений потоков метана на границе вода–атмосфера представлены в работах [Мишукова и др., 2013; Obzhirov et al., 2016].

Акваторию проведения экспериментальных работ условно можно разделить на несколько районов: а) от мыса Крильон до мыса Анива; б) Курильская котловина Охотского моря; г) полигон 3 около островов Малой Курильской гряды.

Анализ пространственного распределения потоков метана для этих акваторий выявил сильную изменчивость, как и для акваторий, описанных ранее. Неоднородный характер распределения потоков метана на границе вода–атмосфера связан с неоднородным пространственным распределением метана в поверхностном слое морской воды. В процессе исследований установлены участки с аномально высокими и близкими к равновесным концентрациями метана. Но на всей акватории измеренные концентрации метана в поверхностном четырехметровом слое морской воды были выше равновесных. Большинство значений превышали равновесные в 1.5–3 раза.

На маршруте движения прол. Лаперуза – Прикурильский район концентрации метана в поверхностном 4-метровом слое морской воды в различных рейсах сильно разнятся: 54–116 нл/л в августе–сентябре 2005 г., 96–146 в сентябре–октябре 2010 г., 195–513 нл/л в мае 2011 г. Потоки метана на этой акватории тоже различны. На рис. 5 представлены результаты расчета потоков метана на границе вода–атмосфера и концентрации метана в 4-метровом

поверхностном слое в южной части Охотского моря на маршрутах: склон зал. Анива – прол. Елизаветы, через Курильскую котловину, центр Курильской котловины – склон зал. Терпения – зал. Анива.

От мыса Крильон до склона зал. Анива в мае–июне 2011 г. поток метана составил 15 моль/(км²·сут) при аномально высоких значениях концентрации 513 нл/л (рис. 5а). Далее вдоль южного склона Курильской котловины поток и концентрации немного снизились – в среднем до 10 моль/(км²·сут) и 269 нл/л соответственно, но около о. Итуруп поток увеличился до 15 моль/(км²·сут) при концентрации 336 нл/л (рис. 5а). Максимальный поток метана 25 моль/(км²·сут) наблюдался в центре Курильской котловины на обратном маршруте, при движении от о. Уруп на север, в июне, при значениях концентрации 336 нл/л и скорости ветра 6 м/с. От мыса Терпения до мыса Анива на склоне зал. Терпения диапазон изменений потока метана 8–12 моль/(км²·сут) при среднем 10 моль/(км²·сут). В зал. Анива (мыс Анива – мыс Крильон) поток увеличился до 23 моль/(км²·сут) при концентрации 335 нл/л (рис. 5а).

В центральных районах Курильской котловины в сентябре–октябре 2010 г. поток изменялся от 7 до 15 моль/(км²·сут), хотя большинство значений концентраций метана были близки к равновесным (рис. 5б). Сравнение данных на рис. 5б показало, что поток метана в сентябре больше, чем на обратном пути в октябре, так как при отборе большинства проб скорость ветра составляла 7–8 м/с, а температура воды 7–18° С. В октябре температура воды была немного ниже – от 8 до 15° С, а скорость ветра сначала 8 м/с, а затем ветер стал заметно слабее – до 2 м/с, и потоки при этом резко снизились с 12 до 2 моль/(км²·сут) (рис. 5б).

В августе 2011 г. при движении судна (рейс G53) на маршруте от склона зал. Анива до прол. Елизаветы поток метана в атмосферу составлял 0–5 моль/(км²·сут) при скорости ветра от 2 до 5 м/с, кроме двух точек на южном склоне Курильской котловины, где потоки и концентрации метана заметно возрастали – до 16 моль/(км²·сут) и 269 нл/л (рис. 5в).

На акватории Курильской котловины в августе 2005 г. (рейс LV 37) (рис. 5г) и в августе 2011 г. (рис. 5в) концентрации метана и потоки

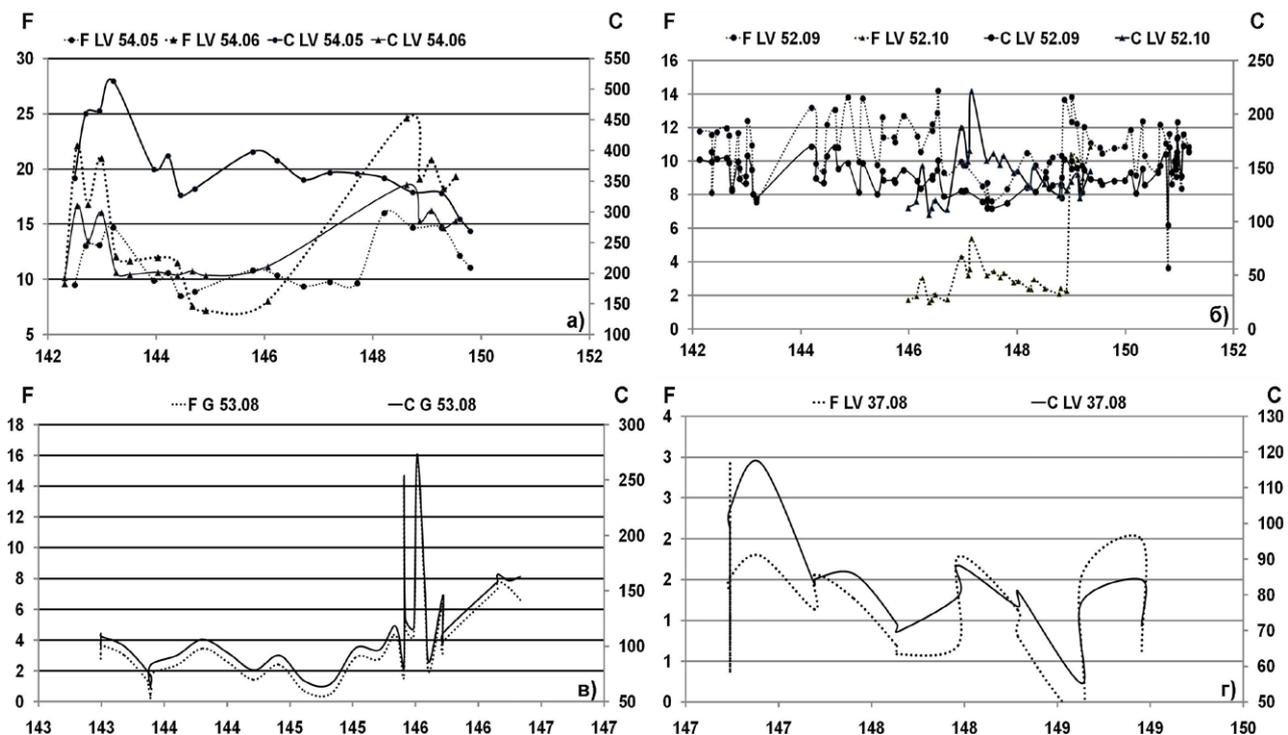


Рис. 5. Потоки метана на границе вода–атмосфера, моль/(км²·сут), и концентрации метана, нл/л, в 4-метровом поверхностном слое в южной части Охотского моря. В условных обозначениях к кривым: F – величина потока метана, рейс, месяц; C – концентрация метана, рейс, месяц.

изменялись в одинаковых пределах, хотя акватории исследования немного различаются. Маршрут рейса LV 37 проходил через глубоководную часть котловины, а рейса G 53 – ближе к южному склону Курильской котловины аналогично маршруту LV 54 в мае 2011 г.

Максимальные потоки метана зафиксированы в мае–июне 2011 г., когда отчетливо выделялись несколько областей повышенных значений как по глубоководной акватории, так и в прибрежной полосе.

Зависимость потоков метана на границе вода–атмосфера от концентраций, температуры воды и скорости ветра

Для изучения влияния скоростей ветра и разности между измеренными и равновесными с атмосферой концентрациями метана в морской воде на величину потоков метана с поверхности моря [Obzhirov et al., 2016] были обработаны 780 значений потоков по данным рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 52 по маршруту Владивосток – Японское море – Курильская котловина (Охотское море) – хр. Витязя (Тихий океан) и обратно.

На рис. 6 приведен результат расчета максимальных скоростей выделения метана из морской воды в зависимости от скорости ветра и разности между измеренными и равновесными концентрациями метана ΔC .

Максимальное значение потока метана

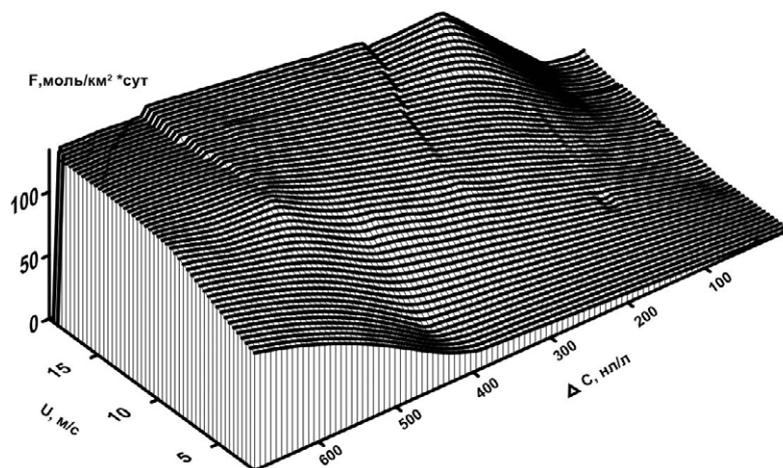


Рис. 6. Изменение максимального потока метана на границе вода–атмосфера (F , моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$)) в зависимости от скорости ветра (U , м/с) и разности концентрации метана в морской воде и его равновесного с атмосферой значения (ΔC).

102 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) наблюдалось при разности концентраций 220 нл/л и скорости ветра 16 м/с. При уменьшении разности концентраций положение максимума скорости выделения метана смещается в сторону больших скоростей ветра. Последующие значения имеют меньшую величину и сопровождаются возрастанием разности концентраций при уменьшении скорости ветра. Причем значение потока составляло 80 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) уже при скорости ветра 5 м/с и разности концентрации 110 нл/л.

При малых скоростях ветра и небольших потоках метана в атмосферу концентрация метана в приповерхностных водах повышается за счет его переноса из глубинных источников. При повышении скорости ветра и увеличении потока метана концентрация газа в морской воде быстро падает до равновесных значений, если нет быстрого подвода метана из нижележащих слоев, и, соответственно, поток метана уменьшается до минимальных значений. Выделение метана в атмосферу происходит пульсациями, что сопровождается изменением концентрации метана в морской воде как в пространстве, так и во времени, в зависимости от гидрометеорологического режима акватории.

Газогеохимическое районирование Охотского моря

Газовые выходы, пространственная изменчивость распределения метана в морской среде и переход метана в атмосферу изучены недостаточно, как и их связь с геологическими структурами. С 1988 г. к настоящему времени в западной части Охотского моря обнаружено более 700 участков струйного выделения метана, наиболее активно проявляющегося при землетрясениях, при этом 17 участков с факелами содержат газогидратоносные осадки [Salomatin, Yusupov, 2011; Akulich et al., 2014].

Исследования источников метана и распределения аномальных газогеохимических полей

в донных отложениях позволили выделить в Охотском море 5 газогеохимических провинций (ГПП) [Шакиров, 2016] (рис. 7). На этой основе изучено распределение потоков метана на поверхности акватории. Благодаря данным, полученным в 1991–2016 гг., выявлена [Mishukova et al., 2017] высокая изменчивость потоков метана на границе вода–атмосфера от поглощения до эмиссии более чем 300 моль/(км²·сут) как по площади всего моря, так и во времени. Участки с максимальными потоками метана довольно точно проецируются на тектонические разломы и газовые факелы [Shakirov et al., 2016].

Отчетливо выделяются максимальные значения потоков метана до 324 моль/(км²·сут) в Западно-Охотоморской ГПП, а также в глубоководных районах Центрально-Охотоморской ГПП до 110 моль/(км²·сут), несмотря на преобладание там фонового поля метана. Повышенные значения потоков метана проявлены локально также в Южно-Охотоморской ГПП – до 222 моль/(км²·сут).

Таким образом, особенности геологического строения территории исследований – определяющие факторы, контролирующие формирование зон аномальных концентраций углеводородных газов в донных отложениях, которые проецируются на поверхность моря в виде зон эмиссии метана в атмосферу. Западно-Охотоморская газогеохимическая провинция характеризуется наиболее интенсивными восходящими потоками природных газов в системе литосфера–гидросфера–атмосфера [Mishukova, Shakirov, 2017]. Сейсмическая активность обуславливает повышенную газовую эмиссию, проявляющуюся в формировании сквозных аномальных полей метана в толще вод западной части Охотского моря, и по-

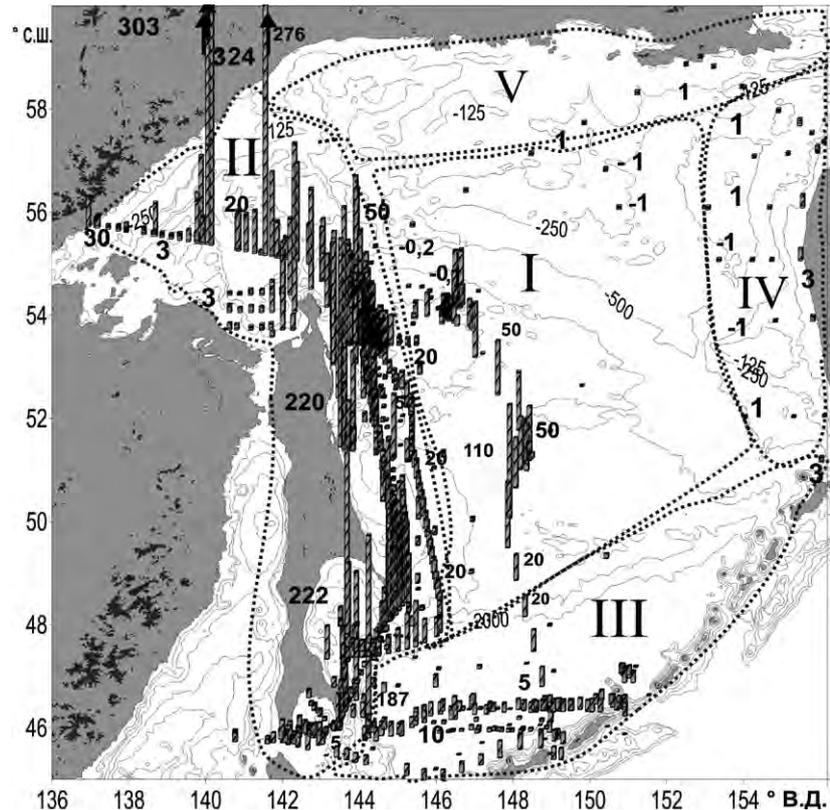


Рис. 7. Потоки метана, моль/(км²·сут) (столбики и цифры при них) на границе вода–атмосфера на акватории Охотского моря. Газогеохимические провинции: I – Центрально-Охотоморская; II – Западно-Охотоморская; III – Южно-Охотоморская; IV – Восточно-Охотоморская; V – Северо-Охотоморская.

вышенные потоки метана с акватории моря. И хотя этот вопрос требует дальнейшего изучения, не вызывает сомнения, что исследование распределения природных газов в атмосфере, гидросфере и литосфере, вопросы формирования зон проницаемости земной коры и потоков природного газа по разломам следует рассматривать во взаимосвязи с тектоническим строением района.

Выводы

За период 1990–2016 гг. установлена высокая пространственная изменчивость потоков метана на границе вода–атмосфера – от поглощения до эмиссии более чем 300 (моль/км²·сут). Установлено, что межгодовая эмиссия метана в атмосферу в западной части Охотского моря носит пульсационный сейсмозависимый характер. Повышенная эмиссия метана с поверхности моря связана с зонами распространения сквозных и комбинированных аномальных газогеохимических полей в морской воде,

которые формируются источниками газов в морских осадках. Тектонические разломы и расположение нефтегазоносных структур в Охотском море – основные факторы, обуславливающие распределение потоков природных газов в районе исследований, и в конечном итоге они маркируют участки эмиссии метана из воды в атмосферу. Потоки метана на границе вода–атмосфера с максимальными значениями зафиксированы в районах, в которых обнаружены повышенные концентрации метана в поверхностном слое морских вод и в донных отложениях. В исследуемом районе наблюдается преимущественно выделение метана в атмосферу, при этом потоки метана увеличиваются под влиянием больших скоростей ветра и повышения температуры воды. Особенности пересыщения поверхностных вод метаном относительно его равновесных содержаний в атмосфере, возникающие аномалии метана в приповерхностном слое морской воды, распределение метана в водной толще, состав и содержание углеводородных газов в донных отложениях определяются количеством и составом газов, мигрирующих из литосферных источников.

Список литературы

1. Аникиев В.В., Обжиров А.И. Влияние низкотемпературных гидротерм на газовый состав придонной воды в Охотском море // *Океанология*. 1993. Т. 33, № 3. С. 360–366.
2. Мишукова Г.И., Верещагина О.Ф. Распределение метана и его потоков на границе вода–атмосфера на акваториях шельфа, склона острова Сахалин и впадины Дерюгина (Охотское море) // *Вестник ДВО РАН*. 2011. № 6. С. 64–71.
3. Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И. Распределение метана и его потоки на границе вода–атмосфера в некоторых районах Охотского моря // *Вестник ДВО РАН*. 2010. № 6. С. 36–43.
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., 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 Тихо-

го океана // *Подводные исследования и робототехника*. 2013. № 1(15). С. 52–61.

6. *Мониторинг метана в Охотском море* / отв. ред. А.И. Обжиров, А.Н. Салюк, О.Ф. Верещагина. Владивосток: Дальнаука, 2002. 250 с.

7. *Нефть и газ Сахалина: обзор: спец. приложение к журналу «Нефтегазовая вертикаль»*, 1998.

8. Обжиров А.И. *Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов*. М.: Наука, 1993. 139 с.

9. Шакиров Р.Б. *Газогеохимические поля окраинных морей Дальневосточного региона: распределение, генезис, связь с геологическими структурами, газогидратами и сейсмотектоникой: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук*. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2016. 49 с.

10. Akulich V.A., Obzhirov A.I., Shakirov R.B., Maltseva E.V., Gresov A.I., Telegin Yu.A. Conditions of gas hydrate formation in the Sea of Okhotsk // *Doklady Earth Sciences*. 2014. Vol. 454(1). P. 94–96. doi:10.7868/S0869565214030165

11. Bange H.W., Bartell U.H., Rapsomanikis S., Andrae M.O. Methane in the Baltic and the North Seas and reassessment of marine emissions of methane // *Global Biogeochem. Cycles*. 1994. Vol. 8(4). P. 465–480. https://doi.org/10.1029/94gb02181

12. Baranov B.V., Karp B.Ya., Wong H.K. Areas of gas seepage // *KOMEX Cruise Report I RV Professor Gagarinsky, Cruise 22. GEOMAR Report 82 INESSA*. Kiel, 1999. P. 45–52.

13. Cicerone R.J., Oremland R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane // *Global Biogeochem. Cycles*. 1988. Vol. 2. P. 299–327. https://doi.org/10.1029/gb002i004p00299

14. *Climate Change 1994* / Ed. by J.T. Houghton et al.; Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, 1996. 86 p.

15. *Climatic Atlas of the North Pacific Seas 2009: Bering Sea, Sea of Okhotsk, and Sea of Japan* / V. Luchin, A. Kruts, O. Sokolov, V. Rostov, N. Rudykh, T. Perunova, E. Zolotukhin, V. Pischalnik, L. Romeiko, V. Hramushin, V. Shustin, Y. Udens, O. Baranova, I. Smolyar, E. Yarosh. NOAA Atlas NESDIS 67, U.S. Gov. Printing Office, Wash., D.C., 2009. 380 p. CD Disc.

16. Conrad R., Seiler W. Methane and hydrogen in seawater (Atlantic Ocean) // *Deep-Sea Research. Pt A*. 1988. Vol. 35. P. 1903–1917. https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90116-1

17. Ehhalt D.H. The atmospheric cycle of methane // *Tellus*. 1974. Vol. 26(1–2). P. 58–70. https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1974.tb01952.x

18. Kvenvolden K.A., Lilley M.D., Lorenson P.W. et al. The Beaufort Sea continental shelf as a seasonal source of atmospheric methane // *Geophys. Res. Lett.* 1993. Vol. 20. P. 2459–2462. https://doi.org/10.1029/93gl02727

19. Lammers S., Suess E., Mansurov M.N., Anikiev V.V. Variations of atmospheric methane supply from the Sea of Okhotsk induced by the seasonal ice cover // *Global Biogeochem. Cycles*. 1995. Vol. 9(3). P. 351–358. <https://doi.org/10.1029/95gb01144>
20. Lamontagne R.A., Swinnerton J.W., Linnenbom V.J., Smith W.D. Methane concentration in various marine environment // *J. Geophys. Res.* 1973. Vol. 78. P. 5317–5324. <https://doi.org/10.1029/jc078i024p05317>
21. Matsueda H., Inoue H.Y., Ishii M., Nogi Y. Atmospheric methane over the North Pacific from 1987 to 1993 // *Geochemical J.* 1996. Vol. 30. P. 1–15. <https://doi.org/10.2343/geochemj.30.1>
22. Mishukova G.I., Shakirov R.B. Spatial variations of methane distribution in marine environment and its fluxes at the water–atmosphere interface in the Western Sea of Okhotsk // *Water Resources*. 2017. Vol. 44, N 4. P. 662–672. doi:10.1134/S0097807817040133
23. Mishukova G.I., Shakirov R.B., Obzhirov A.I. Methane fluxes on the water–atmosphere boundary in the Sea of Okhotsk // *Doklady Earth Sciences*. 2017. Vol. 475, N 2. P. 963–967. doi:10.1134/S1028334X17080256
24. Obzhirov A.I., Pestrikova N.L., Mishukova G.I., Mishukov V.F., Okulov A.K. Distribution of methane content and methane fluxes in the Sea of Japan, Sea of Okhotsk, and near-Kuril Pacific // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. Vol. 41(3). P. 205–212. doi:10.3103/S1068373916030067
25. Rehder G., Suess E. Methane and pCO₂ in the Kuroshio and the South China Sea during maximum surface temperature // *Marine Chemistry*. 2001. Vol. 75. P. 89–108. [https://doi.org/10.1016/s0304-4203\(01\)00026-3](https://doi.org/10.1016/s0304-4203(01)00026-3)
26. Salomatin A.S., Yusupov V.I. Acoustic Investigations of gas «Flares» in the Sea of Okhotsk // *Oceanology*. 2011. Vol. 51(5). P. 857–865. doi:10.1134/S0001437011050134
27. Shakirov R.B., Obzhirov A.I., Biebow N., Salyuk A.N., Tsunogai U., Terekhova V.E., Shoji H. Classification of anomalous methane fields in the Okhotsk Sea // *J. of Polar Meteorology and Glaciology*. Tokyo, Nat. Inst. of Polar Res. 2005. Vol. 19. P. 50–66.
28. Shakirov R.B., Syrbu N.S., Obzhirov A.I. Distribution of helium and hydrogen in sediments and water on the Sakhalin slope // *Lithology and Mineral Resources*. 2016. Vol. 51(1). P. 61–73. <https://doi.org/10.1134/s0024490216010065>
29. Tsurushima N., Watanabe S., Tsunogai S. Methane in the East China Sea water // *J. of Oceanography*. 1996. Vol. 52(2). P. 221–233. <https://doi.org/10.1007/bf02235671>
30. 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.
31. Watanabe S., Higashitani N., Tsurushima N., Tsunogai S. Methane in the Western North Pacific // *J. of Oceanography (Japan)*. 1995. Vol. 51(1). P. 39–60. <https://doi.org/10.1007/bf02235935>

Сведения об авторах

ШАКИРОВ Ренат Белалович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, заместитель директора, МИШУКОВА Ольга Васильевна, инженер – лаборатория газогеохимии, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток.