

УДК 551.465

МЕТАН В ВОДЕ И ДОННЫХ ОСАДКАХ НА ТРЕХ РАЗРЕЗАХ В КАРСКОМ И ЛАПТЕВЫХ МОРЯХ

© 2018 г. А. А. Ветров, Н. В. Лобус, А. Н. Дроздова, Н. А. Беляев, Е. А. Романкевич

*Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва, Россия**e-mail: vetrov@ocean.ru*

Поступила в редакцию 05.04.2016 г., после доработки 08.02.2017 г.

Измерено содержание метана в воде и донных осадках на вертикальных разрезах дельта Лены – континентальный склон (море Лаптевых), полуостров Таймыр – желоб Воронина и на разрезе вдоль архипелага Новая Земля. Содержание метана в водной толще варьировало от 2.5 до 70 нмоль/л, а также от 590 до 2600 нмоль/дм³ в осадках. В большинстве поверхностных проб воды наблюдалось перенасыщение метаном (до 19 раз, среднее 4 раза), определившее направление потоков метана из воды в атмосферу, которые составляли от 1 до 400 моль/км² · сут при средней величине 52 моль/км² сут).

DOI: 10.7868/S0030157418020053

Оценки климатических изменений и экологических рисков, обусловленных увеличением содержания в атмосфере парниковых газов, связаны с оценками разложения современного и ранее накопленного древнего органического вещества (ОВ) с образованием минеральных соединений биогенных элементов, а также CO₂ и CH₄, их потоками в атмосферу. К биогенному диагенетическому потоку этих газов добавляются антропогенные потоки CH₄ и CO₂ и потоки термокаталитического метана, которые могут распространяться вертикально и квазилатерально по разломам и тектонически ослабленным зонам. Моря Восточной Арктики с их мощными осадочными бассейнами привлекают в этом отношении особое внимание из-за биогенного и термогенного метана и его летучих гомологов, высвобождающихся в результате изменения климата, эвстатических колебаний уровня моря, таяния многолетнемерзлых толщ и бактериального разложения крупных масс накопленного ОВ. На шельфе морей Восточной Арктики в последние годы обнаружены места массивного выброса метана из подводных многолетнемерзлых пород [7, 8, 21–23]. Проблема изучения органического вещества и потенциальной метаногенерации теснейшим образом связана с освоением Арктического шельфа и экологическими проблемами прибрежных полярных акваторий. В настоящей работе проведены количественные оценки содержания и потоков метана на границе “вода–атмосфера”, учет которых необходим для решения проблемы глобальных климатических изменений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы воды и донных осадков для анализа на содержание метана были собраны в 63-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” (26 августа 2015 г.– 10 октября 2015 г.) на трех разрезах: I–дельта Лены – континентальный склон, II–полуостров Таймыр – желоб Воронина и III– вдоль архипелага Новая Земля (рис. 1). Каждая из 90 проб воды и 10 проб донных осадков была собрана с повтором.

Для извлечения метана из проб воды и донных отложений использовали способ фазово-равновесной дегазации проб, известной как headspace analysis [2]. Метод основан на измерении содержания метана в воздухе, содержащемся в герметично закрытой склянке, не полностью заполненной пробой воды, с дополнением его рассчитанной долей метана, оставшегося в воде после установления равновесия. Связь между концентрацией метана в водной и газовой фазах определяется законом Генри $C_{ig} = k_i C_{iw}$, где k_i – константа Генри, C_{iw} и C_{ig} – концентрация газа в водной и газовой фазах соответственно. Отбор проб проводили сразу после подъема батометров на борт судна. Воду из батометров сливали в склянки объемом 22.9–25.1 мл через силиконовую трубку, не создавая турбулентности, добавляли сухой КОН для подавления микробных процессов, донатором из оргстекла вытесняли 4.7 мл воды, закрывали склянки пробкой из бутиловой резины и завальцовывали алюминиевыми колпачками. Пробы осадков (интервал 0–2 см), представленные в основном алеврито-пеллитовыми илами,

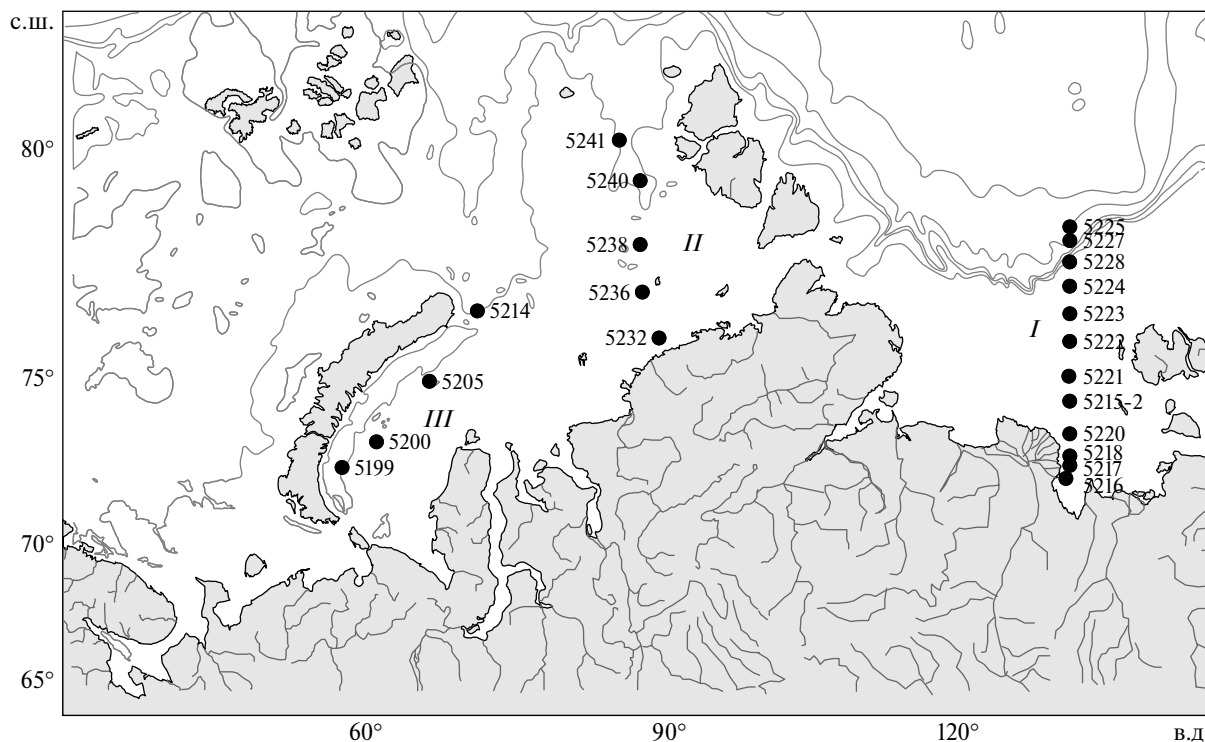


Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб воды и осадков. I, II, III – номера разрезов.

отбирали 2 мл шприцем с обрезанным краем сразу после подъема трубки Ниемисте на борт судна. Затем осадок помещали в склянку с дистиллированной водой, добавляли КОН и, выдавив стандартный объем, закрывали пробкой. Пробы хранили в холодильнике до возвращения из рейса. Анализ проводился в первые 10 дней после возвращения.

Определение концентраций метана в газовой фазе проводили на хроматографе GC-2014 (Shimadzu) с капиллярной колонкой Supel Q Plot длиной 30 м и внутренним диаметром 0.32 мм и пламенно-ионизационным детектором, газ-носитель – гелий, скорость через колонку 3 мл/мин, температура детектора – 260 °С, инжектора – 35 °С. Общее время анализа составляло 5 минут. Газовую фазу отбирали 1 мл шприцем, при этом для компенсации разряжения в склянку самотеком вводилось эквивалентное количество насыщенного солевого раствора. Ввод проб в инжектор хроматографа осуществляли шприцем через петлю объемом 100 мкл. Анализ каждой пробы проводили дважды. Время выхода метана составляло 1.5 мин. В качестве градуировочного образца использовалась стандартная смесь газов с концентрацией метана 15.2 ppm (Supelco 22566).

Концентрация метана в образце определялась по формуле:

$$C_{\text{образца}} = K \cdot C_{\text{газа}} + (C_{\text{газа}} - C_{\text{атм}}) \cdot V_{\text{газа}} / V_{\text{воды}},$$

где $C_{\text{атм}}$ – концентрация метана в воздухе, внесенном в склянку во время отбора пробы, а K – безразмерная константа Генри для метана в морской воде [26]:

$$K = \exp\{-68.8862 + 101.4956(100/T) + 28.7314 \ln(T/100) + S[-0.076146 + 0.043970(T/100) - 0.0068672(T/100)^2]\},$$

где T – температура (°K), а S – соленость (psu). Измеренная концентрация метана в пробах воздуха, отобранных в те же склянки, что и воду, с выдерживанием их 20–30 мин на палубе открытыми, составила 1.9 ppm и была в полном согласии с ее непрерывными измерениями на борту судна анализатором газов G2132-I Picarro Inc. (США). Погрешность определения метана для концентраций <10 нмоль/л составила в среднем 25%, а для более высоких – 7%.

Поток метана через границу вода-атмосфера (F) описывается двумя механизмами [11, 25]. Первый обусловлен термической неустойчивостью поверхностного микрослоя воды (ПМС). Вода в этом слое, охлаждаясь за счет испарения, опускается вниз, замещаясь новыми порциями, обогащенными метаном [11]. Второй механизм обмена возникает при ветре, приводящем к образованию волн

с барашками. За счет гидродинамической неустойчивости ПМС, вызванной обрушением волн с образованием пены, брызг и пузырьков, которые насыщаются растворенным метаном, а при схлопывании выносят его в приводный слой атмосферы. При скоростях ветра ~5 м/с вклад второго потока начинает преобладать [25].

Расчет потока метана F_t за счет термической неустойчивости ПМС производился по формуле [11]:

$$F_t = 2(D/\pi t^*)^{1/2} \cdot \Delta C,$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии метана в воде ($\text{м}^2/\text{с}$), t^* – характерное время существования ПМС до обновления подстилающим слоем воды, ΔC – разница концентраций метана в воде и его равновесной концентрацией. Для t^* верно соотношение

$$t^* = 10.2 ((\mu_w \rho_w C_p)/(g \alpha_w q))^{1/2},$$

где μ_w – кинематическая вязкость ($\text{м}^2/\text{с}$), ρ_w – плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$), C_p – удельная теплоемкость ($\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$), α_w – коэффициент объемного расширения воды (К^{-1}) [14], g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$) и q – плотность теплового потока через границу раздела. Для расчета использовались табличные значения μ_w , ρ_w , C_p и α_w [14]. Среднее значение q было принято равным $11 \text{ Вт}/\text{м}^2$, как характерное для открытой воды арктических морей в летнее время [1, 18] и на порядок меньшее, чем в средних широтах. Учет зависимости q от скорости ветра (U , м/с) и разности температур воды (T_w) и воздуха (T_a) для станций производился по уравнению $q = k \cdot U \cdot (T_w - T_a)$ [4], где $k = 0.82$ – коэффициент теплопереноса, который был определен по наилучшему согласованию среднего по станциям значения q с принятой величиной $11 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Оцененное время существования ПМС составило 2–13 мин. (среднее 7 мин.). Коэффициент диффузии метана рассчитывался по уравнению [15]:

$$D_{\text{CH}_4} = D_{\text{CH}_4}^{20} \cdot [1 + 0.2 \cdot \mu_{20}^{1/2} \cdot \rho_w^{-1/3} \cdot (t - 20)],$$

где $D_{\text{CH}_4}^{20} = 2.06 \cdot 10^{-5}$ – коэффициент диффузии метана в воде ($\text{см}^2/\text{с}$) при 20°C , μ_{20} – динамическая вязкость воды при 20°C ($1.008 \text{ мПа} \cdot \text{с}$), ρ_w – плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$), t – $^\circ\text{C}$.

Расчет потоков метана F_h через границу вода-атмосфера по модели гидродинамической неустойчивости ПМС производился по формулам [25]:

$$F_h = 0.31 U^2 (Sc/678)^{-1/2} \cdot \Delta C,$$

где U , (м/с) – скорость ветра, $\Delta C = (C - KC_{\text{атм}})$ – разность между измеренной концентрацией метана в воде (C) и его равновесной концентрацией ($KC_{\text{атм}}$), соответствующей содержанию метана в воздухе ($C_{\text{атм}} = 1.9 \text{ ppm}$). Число Шмидта

$Sc = \mu/D$ – отношение кинематической вязкости воды к коэффициенту диффузии метана в воде, для пресной воды аппроксимируется выражением:

$$Sc = 1897.8 - 114.28 t + 3.2902 t^2 - 0.0390617 t^3 \quad (t \text{ в } ^\circ\text{C}),$$

а в случае морской воды (35 psu) – выражением:

$$Sc = 2039.2 - 120.31 t + 3.4209 t^2 - 0.040437 t^3 \quad [25]$$

В расчетах Sc учитывалась температура и интерполирование по солености. Для метана в морской воде при 20°C и 35 psu – значение $Sc = 678$ (использовано для нормирования Sc). Оцененный вклад потока метана за счет термической неустойчивости ПМС составил 3–70%, в среднем 14% от обусловленного гидродинамической неустойчивостью.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что содержание метана в воде на разрезе I (море Лаптевых) варьировало от 4 до 71 нмоль/л. Наибольшие значения наблюдались в маргинальной части разреза (рис. 2). В верхней части губы Буор-Хая, характеризующейся высоким содержанием органического углерода как в воде, так и в донных осадках [20], содержание метана варьировало в воде от 20 до 70 нмоль/л, (среднее 49 нмоль/л). Максимальные значения были зафиксированы напротив Быковской протоки. В мористой части разреза устойчиво высокие концентрации метана (20–40 нмоль/л) наблюдались в придонных водах по сравнению с поверхностными (6–11 нмоль/л).

Для сравнения, результаты измерений на аналогичном разрезе в августе–сентябре 2003–2008 гг. [22] выявили изменения концентрации метана от 2 до ~200 нмоль/л в придонных водах и от 2 до ~70 нмоль/л в поверхностных водах. Средняя концентрация метана в водах моря была оценена в 12 нмоль/л [17, 24], а в верхней части губы Буор-Хая – в 26–33 нмоль/л [19]. Измерения содержания метана в воде по трассе Северного Морского пути через каждые 5 минут выявили самое высокое его содержание в верхней части губы Буор-Хая, достигающее 154 нмоль/л, а средняя величина по трассе в море Лаптевых составила $17.6 + 0.18$ нмоль/л [5].

В Карском море на разрезе II (от полуострова Таймыр до желоба Воронина, рис. 2) концентрация метана была меньше, чем в мористой части разреза I, варьировала от 2.7 до 39 нмоль/л при средней величине 11 нмоль/л. Для сравнения в открытой части моря в 1993 г. содержание метана в водной толще составляло 2.7–19 (среднее 7.5)

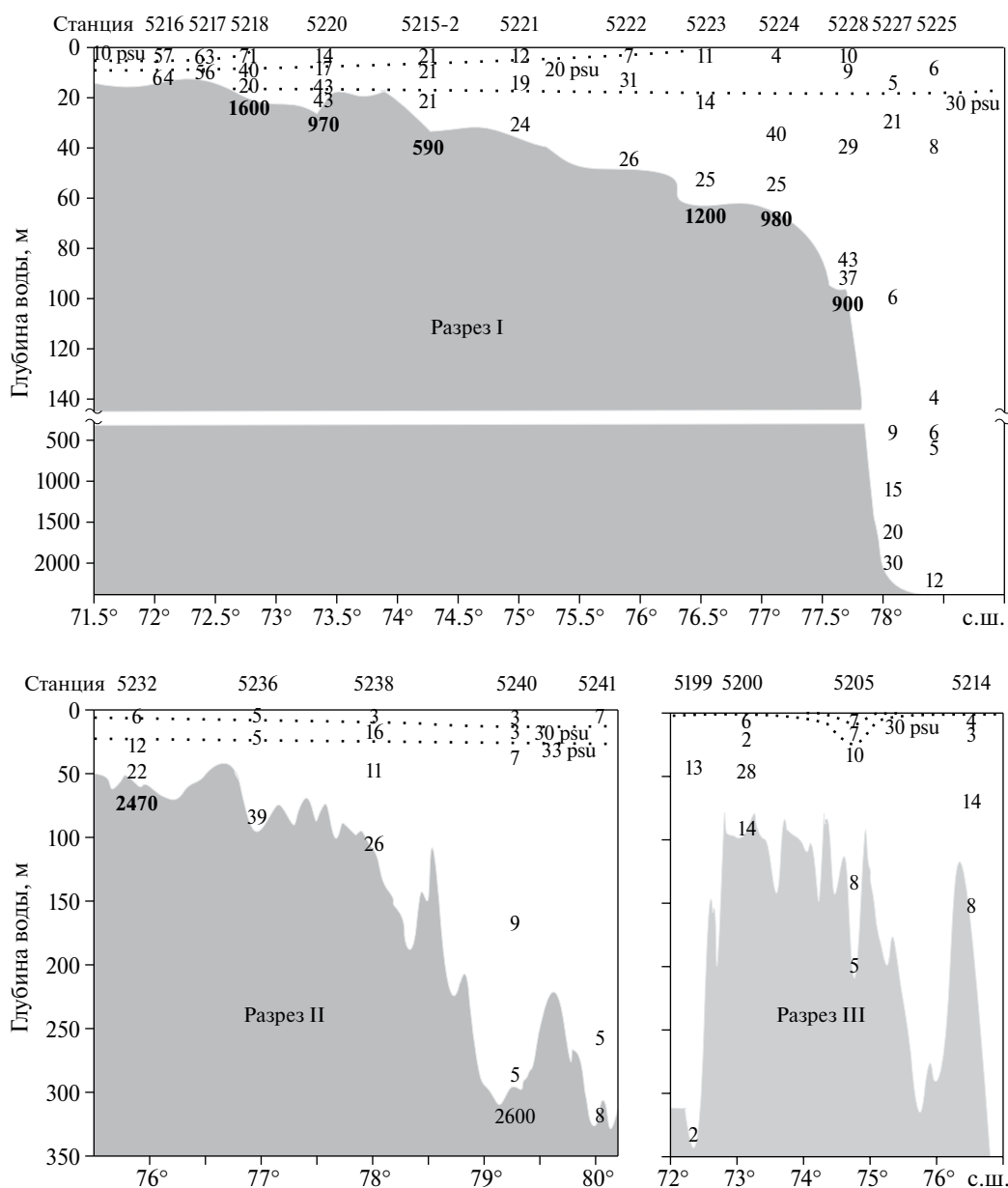


Рис. 2. Распределение метана на разрезах в воде (нмоль/л) и донных осадках (нмоль/дм³; выделены жирным шрифтом). Точечная линия – соленость (psu). Профиль дна по IBCAO_ver2_23_GEO_ARC_2min.

нмоль/л, а в эстуарии р.Енисей 210–640 нмоль/л [13]; по трассе Северного Морского пути в месте начала разреза II содержание метана составляло 10.5 нмоль/л, в то время как в эстуарии р.Обь – 90 нмоль/л [5]. Еще ниже концентрация метана была на разрезе III (1,7–29, среднее 9 нмоль/л). В водах северной части Карского моря содержание метана оказалось низким – 3.1–4.3 при средней величине 3.6 нмоль/л [3].

В целом картина распределения метана в водной массе довольно пестрая с тенденцией уменьшения его содержания, с удалением от берега. На разрезе I повышенные концентрации метана в воде наблюдались в придонных горизонтах (20–43 нмоль/л),

что свидетельствует о его поставке из донных осадков. Другим источником метана, вероятно, является опускающаяся на дно взвесь и пеллеты. Наблюдаемые на разрезах повышенные концентрации метана в водной массе относительно его содержания в придонных водах, по-видимому, являются результатом соотношения активности метанпродуцирующих и метанооксиляющих микроорганизмов, переноса его течениями [6]. В поверхностных водах концентрация метана в открытых частях моря варьирует от 3 до 12 нмоль/л, средняя величина составляет 7 нмоль/л. В районах смешения речных и морских вод она может повышаться на один–два порядка [5, 22]. В верхней части губы Буор-Хая

Распределение потока метана (F , моль/км² · сутки) в поверхностных водах на разрезах, F_t и F_h – его составляющие за счет термической и гидродинамической неустойчивости ПМС, C – концентрация метана (нмоль/л), C_p – соответствующая равновесная концентрация метана в воде, C/C_p – ее превышение, S – соленость, T – температура, U – скорость ветра

№ ст.	Глубина моря, м	S , psu	T , °C воды	T , °C возд.	C	C_p	C/C_p	U , м · с ⁻¹	F_t	F_h	F_t+F_h
Разрез I											
5216	11	2.7	3.6	9.3	57	4.30	13.3	8.7	9.5	199	208
5217	10	7.5	7.1	6.7	63	3.79	16.7	8.0	9.2	208	217
5218	17	4.8	8.3	4.8	71	3.73	19.0	10	9.8	398	408
5220	24	17.8	5.1	5.1	14	3.72	3.8	4.0	2.0	8.0	10
5215-2	25	21.9	3.4	2.7	21	3.78	5.5	7.4	2.5	45	48
5221	35	16.0	4.4	2.2	12	3.84	3.0	8.5	1.3	28	30
5222	47	15.9	3.7	1.7	7	3.91	1.9	8.9	0.5	14	14
5223	56	20.6	3.7	0.9	11	3.79	3.0	3.1	1.5	3.5	5.0
5224	57	21.6	3.6	3.0	3.7	3.77	1.0	7.3	-0.01	-0.1	-0.1
5228	88	27.0	3.0	1.5	10	3.69	2.8	13	1.5	52	53
5227	1980	29.3	2.4	1.0	5.0	3.69	1.4	13	0.3	9.9	10
5225	2390	30.1	2.0	2.6	6.4	3.71	1.7	12	0.5	17	17
Разрез II											
5232	50	31.1	2.2	0.5	5.6	3.66	1.5	2.2	0.3	0.4	0.7
5236	85	24.3	2.7	-1.3	5.3	3.79	1.4	16	0.5	19	19
5238	104	26.3	2.7	-0.9	3.1±0.77	3.74	0.8	3.3	-0.1	-0.3	-0.4
5240	287	27.2	1.4	-0.2	2.7±0.67	3.85	0.7	5.4	-0.2	-1.5	-1.8
5241	322	29.1	0.3	-0.2	6.7	3.92	1.7	4.6	0.3	2.6	2.9
Разрез III											
5200	92	31.9	7.1	6.1	6.1	3.20	1.9	5.9	0.6	5.4	6.0
5205	200	17.3	7.1	7.0	6.8	3.54	2.0	4.6	0.5	4.1	4.6
5214	152	29.6	5.0	4.7	4.4	3.44	1.3	12	0.2	6.2	6.3

в поверхностных водах (соленость < 10 psu, температура 3–8 °C) концентрация метана составляла 63–67 нмоль/л, благодаря выносу взвеси и растворенного метана речными водами, а также увеличенной гибели планктона в несвойственных для него условиях существования. На следующих в разрезе станциях 5220, 5215–2, 5221, где поверхностная морская вода еще сильно разбавлена (16–22 psu), концентрация метана была относительно высокой (10–20 нмоль/л). В то же время в линзе распресненной воды на разрезе III (ст. 5205, 17.3 psu), где процессы характерные для маргинальных фильтров закончились, концентрация метана не выделялась среди мористых станций.

В донных осадках, которые являются основными поставщиками метана в воду, его концентрация варьировала от 590 до 1200 нмоль/дм³ в мористой части разреза I при средней величине 930 нмоль/дм³. Высокое содержание метана зафиксировано в губе Буор-Хая (1600 нмоль/дм³) и наиболее высокое на

разрезе II, где оно на краях разреза, в прибрежной части (38 км от берега) и в желобе Воронина, составило 2470 и 2600 нмоль/дм³. Для сравнения, в Чукотском море содержание метана в первых сантиметрах осадков составляло ~700 нмоль/дм³, увеличиваясь в глубь осадка до 15000 нмоль/дм³ [16]. В работе [3] представлены распределения метана в осадках на трех разрезах Карского моря. Для большинства станций в верхних слоях осадка содержание метана не превышало 44 нмоль/дм³. Лишь на станциях Енисейского разреза содержание метана в верхней части осадков часто попадало в интервал 44–440 нмоль/дм³, однако с глубиной осадка концентрация метана возрастала до 1 800 000 нмоль/дм³ (1.8 мМ/дм³).

На всех разрезах в большинстве проб наблюдалось превышение метаном его равновесной концентрации в воде по отношению к содержанию метана в атмосфере (до 19 раз, среднее в 4.5 раза), из 87 проб только в семи наблюдалось

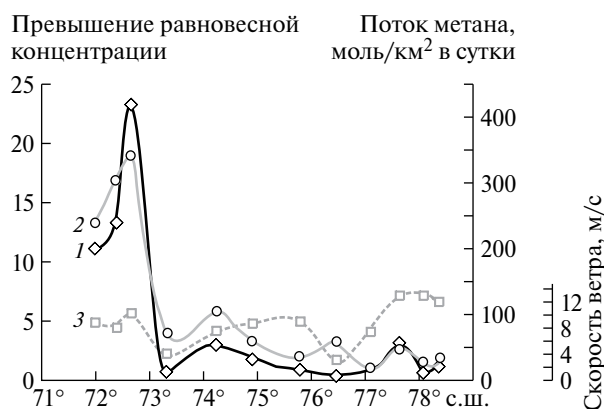


Рис. 3. Поток метана (1), превышение равновесной концентрации метана в воде (2) и скорость ветра во время отбора проб (3) на разрезе I.

недонасыщение. Поверхностные пробы воды, за исключением двух, были перенасыщены метаном в среднем в 4 раза (таблица), что определяло направление его потока из воды в атмосферу. В случае двух недонасыщенных проб на разрезе II ошибка определения малых концентраций метана (25%) не позволяет уверенно судить о направлении его потока. Наибольших величин превышение равновесных концентраций (в 13–19 раз) достигало в верхней части губы Буор-Хая, что в сочетании с высокими скоростями ветра (8–10 м/с) определило большие потоки метана через границу вода–воздух $200\text{--}410$ моль/км² · сут). (рис. 3). Высокие потоки, измеренные в верхней части губы Буор-Хая согласуются с ранее измеренными в этом районе $0.52\text{--}1.56$ мг С/м² · сут ($44\text{--}130$ моль/км² · сут) при ветре 2–4 м/с [19]. На станциях 5220, 5215–2, 5221 следующих за станциями в Буор-Хая превышение метаном равновесных концентраций также было достаточно высоким (3–5.5 раз). В вынесенной далеко от устья линзе распресненной воды (разрез III, ст. 5205) оно было уже не таким высоким (двукратное), что, по-видимому, связано с завершением процессов, сопутствующих смешиванию морских и речных вод. Следует заметить, что поток метана зависит не только от скорости ветра, но и от длительности его воздействия [9]. При сильном ветре концентрация метана в воде быстро падает до равновесных значений, его поток уменьшается.

В целом потоки метана на разрезах были невысокими (52 моль/км² · сут или 1.2 м³/км² · сут) в среднем по трем разрезам), максимальный поток в верхней части бухты Буор-Хая не превышал 9 м³/км² · сут. Оценка потока метана на весь арктический шельф по среднему значению его диффузионного потока не превышает 0.3% от глобального потока метана 556 Тг СН₄ в год (IPCC, 2013). По порядку величин оцененные потоки согласуются с потоками в Охотском море $0.8\text{--}126$ моль/км² · сут

[9–12], измеренными при скоростях ветра от 2 до 12 м/с, а также со средним потоком 18 моль/км² · сут в Лаптевых и Восточно-Сибирском морях [17], но значительно ниже среднего диффузионного потока 3.67 мг/м² · сут (230 моль/км² · сут), оцененного на большой площади в 2003–2008 годах в тех же морях [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концентрация метана в водах моря Лаптевых, как правило, выше, чем в Карском море, что неоднократно было зафиксировано ранее. Картина распределения метана в воде довольно пестрая, что объясняется соотношением поступления метана в нее из донных осадков, метаноокислением и метаногенерацией микроорганизмами в водной толще. В большинстве станций наблюдается превышение метаном равновесных концентраций от 1.5 до 19 раз (Буор-Хая). Оно определяет направление потоков метана из морей в атмосферу, что ведет к увеличению его концентрации в воздухе и усилению парникового эффекта, учитывая, что парниковый потенциал метана в 20–25 раз выше, чем у двуокси углерода (IPCC, 2013). Оцененные в 2015 году потоки показывают, что вклад метана в парниковый эффект за счет диффузионных потоков незначительный.

Финансовое сопровождение экспедиционных работ, сбор фактического материала и пробоподготовку осуществляли за счет проектов РФФИ № 14-05-05003 и РНФ № 14-50-00095, химико-аналитическую обработку проб – в рамках Государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0005), комплексный анализ данных за счет проекта РФФИ № 16-05-00032.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакин А.А., Алексеев Г.В., Богородский П.В. и др. Вертикальные потоки тепла в верхнем 400-метровом слое Арктического бассейна по данным наблюдений на дрейфующей станции “Северный полюс-38” // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014 (100). № 2. С. 41–56.
2. Большаков А.М., Егоров А.В. Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газометрических исследованиях // Океанология. 1987. Т. 27. № 5. С. 861–862.
3. Большаков А.М., Егоров А.В. Результаты газометрических исследований в Карском море // Океанология. 1995. Т. 35. № 3. С. 399–404.
4. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Лабораторное исследование охлаждения воды с поверхности в зависимости от условий теплообмена между водой и воздухом // Мезомасштабная изменчивость

- поля температуры в океане. М.: ИО РАН, 1977. С. 126–139.
5. *Космач Д.А., Сергиенко В.И., Дударев О.В. и др.* Метан в поверхностных водах окраинных морей северной Евразии // Докл. РАН. 2015. Т. 465. № 4. С. 441–445.
 6. *Леш А.Ю., Иванов М.В.* Биогеохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
 7. *Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Дмитриевский Н.Н. и др.* О процессах газовой выделении и деградации подводных многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 312–320.
 8. *Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Шахова Н.Е. и др.* О механизмах деградации подводных многолетнемерзлых пород на восточном арктическом шельфе России // Докл. РАН. 2013. Т. 449. № 2. С. 185–188.
 9. *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.
 10. *Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И.* Распределение метана и его потоков на границе вода–атмосфера в некоторых районах Охотского моря // Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 36–43.
 11. *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.
 12. *Мишукова Г.И., Пестрикова Н.Л., Верещагина О.Ф. и др.* Пространственная и временная изменчивость распределения метана и его потоков на границе вода–атмосфера на прикурильских акваториях в районе Охотского моря и Тихого океана // Вестник ДВО РАН. 2013. № 1. С. 52–61.
 13. *Намсараев Б.Б., Русанов И.И., Мицкевич И.Н. и др.* Бактериальное окисление метана в эстуарии реки Енисей в Карском море // Океанология. 1995. Т. 35. № 1. С. 88–93.
 14. *Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М.* Морская вода. М.: Наука, 1979. 327 с.
 15. *Рамм В.М.* Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 656 с.
 16. *Саввичев А.С., Русанов И.И., Пименов Н.В. и др.* Микробные процессы циклов углерода и серы в Чукотском море // Микробиология. 2007. Т. 76. № 5. С. 682–693.
 17. *Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Бельчева Н.И.* Растворенный метан в шельфовых водах Арктических морей // Докл. РАН. 2005. Т. 402. № 4. С. 529–533.
 18. *Alekseev G.V., Bulatov L.V., Zakharov V.F.* Freshwater freezing/melting cycle in the Arctic Ocean // The Freshwater Budget of the Arctic Ocean / Eds. Lewis E.L. et al. Kluwer Acad. Publ., 2000. P. 589–608.
 19. *Bussmann I.* Distribution of methane in the Lena Delta and Buor-Khaya Bay, Russia // Biogeosciences. 2013. V. 10. P. 4641–4652.
 20. *Karlsson E.S., Charkin A., Dudarev O. et al.* Carbon isotopes and lipid biomarker investigation of sources, transport and degradation of terrestrial organic matter in the Buor-Khaya Bay, SE Laptev Sea // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 1865–1879.
 21. *Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al.* Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // Nature Geoscience. 2014. V. 7. P. 64–70.
 22. *Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al.* Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian arctic shelf // Science. 2010. V. 327. P. 1246–1250.
 23. *Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al.* The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // Phil. Trans. R. Soc. A. 2015. V. 373. № 2052. P. 1–13.
 24. *Shakhova N., Semiletov L., Panteleev G.* The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. At. L09601.
 25. *Wanninkhof R.* Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 7373–7382.
 26. *Wiessenburg D.A., Guinasso N.L.* Equilibrium Solubility of Methane, Carbon Dioxide, and Hydrogen in Water and Sea Water // J. Chem. Eng. Data. 1979. V. 24. № 4. P. 356–360.

Methane in Water and Bottom Sediments at Three Sections in Kara and Laptev Seas

A. A. Vetrov, N. V. Lobus, A. N. Drozdova, N. A. Belyaev, E. A. Romankevich

Methane content is measured in water and sediments at the vertical sections from the Lena's delta to continental slope (the Laptev Sea), Taimyr Peninsula – Voronin Trough, and along the Novaya Zemlya archipelago. Methane content varied in the range of 2.5–70 nmol/L in the seawater and 590–2600 nmol/dm³ in the bottom sediments. In most cases methane concentration exceeds equilibrium one in water up to 19 times, an average as many as 4, to determine the methane flux from water to the atmosphere, which ranged from 1 to 400 mol/km²/day with an average value of 52 mol/km²/day.