

УДК 551.465

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАНА И ЕГО ПОТОКОВ НА ГРАНИЦЕ ВОДА–АТМОСФЕРА НА ПРИКУРИЛЬСКИХ АКВАТОРИЯХ В РАЙОНЕ ОХОТСКОГО МОРЯ И ТИХОГО ОКЕАНА

**Г. И. Мишукова,
Н. Л. Пестрикова,
О. Ф. Верещагина,
А. К. Окулов,
В. Ф. Мишуков**

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт
им. В. И. Ильичева
Дальневосточного отделения РАН¹

В процессе исследований за 2005, 2010 и 2011 гг. изучено пространственное распределение содержания метана и его потоков на Прикурильских акваториях со стороны Охотского моря и Тихого океана. Установлены участки с аномально высокими концентрациями метана и близкими к равновесным и указаны причины их возникновения.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение пространственного распределения метана в водной среде является важным для определения источников и механизмов, влияющих на его содержание. Часто метан, растворенный в воде, используется в качестве индикатора для обнаружения углеводородов (нефтяных, угольных, газовых месторождений и залежей газогидратов) [1]. В местах диффузного высачивания метана протекают интенсивные процессы, приводящие к образованию биохимических матов, развитию бентосного и планктонного сообществ, в состав которых входят симбиотрофные и гетеротрофные животные [2]. Особую актуальность имеет

расчет потоков метана на границе вода–атмосфера, так как, несмотря на незначительное содержание в атмосфере, метан играет исключительно важную роль в формировании климата на планете. Он активно участвует в фотохимических реакциях в стратосфере и способствует разрушению озонового слоя, кроме этого является одним из парниковых газов [3].

Для изучаемых акваторий предыдущими исследованиями установлено, что распределение метана в морской воде и его потоков на границе вода–атмосфера носит явно неоднородный характер. Отчасти это связано

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43; e-mail: natap81@mail.ru, gmishukova@poi.dvo.ru

с пространственным расположением подводных источников метана. Неоднородное распределение метана в морской воде вызывает изменение направления и величины потоков метана на границе море-атмосфера, что позволило разделить акваторию на районы с выделением и поглощением метана [4, 5]. Представленные в этих работах данные получены на основе измерений, которые проводились в летний сезон на значительно удаленных друг от друга станциях. Цель настоящей работы – исследования пространственного распределения метана в поверхностном слое морской воды и его потоков на границе вода-атмосфера при непрерывном определении концентрации метана в морской воде на больших акваториях за небольшой промежуток времени.

■ Объекты и методы исследования

Отбор проб морской воды осуществлялся с помощью заборного устройства на ходу движения судна, на глубине 4 м от поверхности моря. Пробы поступали в термосолинограф SBE 21SEACAT (USA, Washington) для непрерывного определения температуры и солености при параллельном отборе воды в емкости для проведения газохимического анализа.

На станциях воду отбирали с различных горизонтов батометрами Нискина системы Rozett. Система комбинирована с многопараметрическим CTD-зондом. Зондирующий комплекс был оснащен кассетой батометров NISKIN (12 батометров). Для мелководных станций отбор проб осуществлялся на двух горизонтах: в поверхностном слое на расстоянии 3–5 м от поверхности, в придонном на расстоянии 3–5 м от дна.

Концентрация метана в воде определялась методом дегазации или равновесного парафазного анализа. Проба воды отбиралась в медицинскую склянку «под горлышко с двойным переливом» объемом соответственно 500 или 275 мл. Склянка закрывалась резиновой пробкой. Для парафазного анализа пробку прокалывали двумя иглами от шприцев для удаления воздуха и избытка воды. Одна игла затем либо подсоединялась к газовому мешку Tedlar Bag Dual Valves (СПА), наполненному гелием при атмосферном давлении, либо ее отверстие оставалось открытым для атмосферного воздуха. С помощью пустого шприца, подсоединенного ко второй игле, отбирали 12 мл морской воды, на место которой поступал газ из мешка или атмосферы. Иглы удалялись, а склянки в течение 4 часов термостатировались при комнатной температуре (20–23°C) и периодически встряхивались с помощью перемешивающего устройства LS-110, в результате чего в емкости устанавливалось равновесие между жидкой и газовой фазами. По истечении указанного времени шприцем отбиралась аликвота газовой фазы для последующего анализа.

Газохроматографическое определение состава газовой фазы производилось на борту судна. Ввод пробы осуществлялся краном-дозатором.

Определение газовых компонентов в пробе осуществляется на хроматографе SRI-8610 (СПА) или на хроматографе «Кристалл-Люкс-4000 м» (произведено в России, г. Йошкар-Ола). Пламенно-ионизационный детектор (ДИП) служит для качественного и количественного измерения концентрации метана и других органических компонентов с точностью 10⁻⁵ %.

Хроматографические условия анализа: газ-носитель – гелий, расход – 20 мл/мин; две металлические колонки (NaX, внутренний диаметр – 3 мм, длина – 1,5 м и HayeSep D, внутренний диаметр – 3 мм, длина – 2 м); программирование температуры – от 50° со скоростью 10°/мин.

Для калибровки прибора применяются сертифицированные проверочные газовые смеси производства Германии с концентрациями метана 10, 100, 1000 ppm (ppm – part per million = 1·10⁻⁴ %) и 1 %. Погрешность измерений составляет 5 %.

Для расчета растворенного в морской воде метана использовалось уравнение, приведенное в работе [6].

Расчет потоков метана проводился по методологии, описанной в работах [3, 7].

$$F = K^{\text{общ}} \Delta C, \quad (1)$$

где $K^{\text{общ}}$ – суммарный коэффициент газообмена на границе вода-воздух при коэффициенте молекулярной диффузии метана в морской воде (D_w , см² с⁻¹), температуре воды, солености и скорости ветра (U , мс⁻¹) в момент измерения равен:

$$K^{\text{общ}} = K_t + K_o + K_p, \quad (2)$$

где $K_t = 2\{D_w / \pi t^*\}^{1/2}$ – термический коэффициент газообмена; $K_o = \{D_w S\}^{1/2}$ – коэффициент газообмена для обрушений волн; $S = 4,5 \cdot 10^{-6} U^{3,31}$ (с⁻¹); $K_p = 2\{D_w M\}^{1/2}$ – коэффициент газообмена для схлопывания пузырьков; $M = 2,76 \cdot 10^{-5} U^{3,74}$ (с⁻¹).

Термическая неустойчивость поверхностного микрослоя воды объясняется отводом тепла за счет испарения и эффективного инфракрасного излучения, которые вызывают погружение охлажденной поверхностной жидкости и последующее поступление новой пор-

ции подповерхностной воды на границу раздела вода–воздух.

Интенсивность обрушений гребней волн, при которой происходит образование барашков, определяется притоком энергии от ветра к волнам, приводящим к росту гребней и потере их устойчивости. В результате обрушения энергия волн передается дрейфовым течениям и турбулентным процессам в поверхностном слое океана.

При обрушении волны в подповерхностных водах образуется облако диспергированных пузырьков газа, которые затем всплывают к поверхности, выходят на границу раздела вода–атмосфера и схлопываются. Чем выше скорость ветра, тем больше длина волн и площадь барашков и тем интенсивнее образование пузырьков, которые проникают на все большую глубину. При усилении ветра число обрушений волн увеличивается, отдельные пузырьковые облака сливаются и формируется насыщенный пузырьками приповерхностный слой воды.

За счет энергии волн и последующего всплывания пузырьков происходит интенсивное перемешивание морской воды, которое обеспечивает относительно однородное распределение гидрохимических характеристик в приповерхностном слое воды.

Разность концентраций метана в морской воде (ΔC) рассчитывается как разность между измеренной концентрацией метана и равновесной концентрацией, которую имел бы атмосферный метан в морской воде при данных температуре, солености и атмосферном давлении. Рассчитывается по формуле (2) [6]:

$$\ln C_{eq} = \ln f_G + A_1 + A_2 \left(\frac{100}{T} \right) + A_3 \ln \left(\frac{T}{100} \right) + A_4 \left(\frac{T}{100} \right) + S \left[B_1 + B_2 \left(\frac{T}{100} \right) + B_3 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где C_{eq} – равновесная концентрация ($\text{нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$), f_G – мольная доля метана в атмосфере, T – температура воды ($^{\circ}\text{K}$), S – соленость (‰); $A_1 = -415,2807$, $A_2 = 596,8104$, $A_3 = 379,2599$, $A_4 = -62,0757$, $B_1 = -0,05916$, $B_2 = 0,032174$, $B_3 = -0,0048198$.

Для учета влияния сейсмической ситуации района в момент проведения экспериментальных исследований на сайте U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center [8] взяты данные о положении эпицентров времени и магнитудах землетрясений за 2010–2011 гг.

Для анализа пространственно-временной изменчивости распределения метана используются экспериментальные измерения в 789 точках, в том числе: 128 для рейса НИС «Академик Лаврентьев» № 37 (Lv 37; 18.08–16.09.2005), 429 для рейса НИС «Академик Лаврентьев» № 52 (Lv 52; 17.09–9.10.2010); 34 для рейса НИС «Академик Лаврентьев» № 54 (Lv 54; 22.05–18.06.2011) и 98 для рейса НИС «Профессор Гагаринский» № 55 (Ga 53; 20.08–8.09.2011).

■ Результаты и обсуждение

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

Акваторию проведения экспериментальных работ условно можно разделить на несколько районов:

- а) залив Анива от м. Крыльон до м. Анива;
- б) склон залива Терпения – центральная часть, северный и южный склон Курильской котловины;
- в) полигоны 1, 2 в Тихом океане в северной и централь-

ной частях Курило-Камчатской островодужной системы;

г) полигоны 3 и 4 акватории около островов Малой Курильской гряды (Шикотан, Полонского, Зеленый, Юрий, Танфильева, Анучина, Демина, осколки ряда более мелких островов и скал).

В рельефе дна изучаемого участка Тихого океана отчетливо выделяется такая структура, как хребет Витязя. Согласно работе [9], он сложен кайнозойскими туфогенно-осадочными породами, из-под которых в ряде мест обнажаются вулканогенно-осадочные отложения предположительно позднемиоценового возраста и доверхнемеловые образования. Южный отрезок хребта на возвышенности Диана представлен базальтами, андезитами и андезидацитами среднемиоценового и плиоцен-плейстоценового вулканических комплексов [10]. Поперечные линейные структуры (преимущественно северо-западного простирания) пересекают генеральный план островодужной системы на ряд блоков. Геологическое основание пролива Буссоль представляет собой тектонический грабен. Природа остальных поперечных структур также связывается с разломной тектоникой. Современные разломные нарушения наблюдаются в пределах западного склона и на вершинной поверхности северной и южной частей хребта Витязя, в верхней части приостровного борта Курило-Камчатского жолоба. Результаты сейсмических работ, отраженные в публикации [9], показывают, что исследуемый район был подвержен активным тектоническим дизъюнктивным и пликративным деформациям, степень которых увеличивается с северо-востока на юго-запад. Кроме того, в южной части хребта Витязь, на возвышенности Диана и хребте Буссоль зафиксировано образование

железо-марганцевых корок на подводных вулканах [11], что говорит, возможно, о присутствии газофлюидного потока в этом районе.

Динамика коэффициента газообмена в зависимости от скорости ветра и сравнение вклада коэффициентов газообмена метана на границе вода–атмосфера по экспериментальным данным для 320 гидрометеорологических условий на полигоне 2 показаны на рис. 1.

Обнаружено, что в океанических условиях при скоростях ветра до 3 м/с общий коэффициент газообмена в основном обусловлен термической конвекцией. Начиная с 4 м/с определяющую роль в газообмене на границе вода–воздух играет механизм схлопывания пузырьков, а рост коэффициента газообмена пропорционален скорости ветра в степени 1,87. Для скоростей ветра более 5 м/с определяющую роль имеет K_p .

На рис. 2 приведен результат расчета максимальных скоростей выделения метана из морской воды в зависимости от скорости ветра и разности концентраций. Максимальное значение потока метана 102 моль/км² в сутки наблюдалось при скорости ветра 19 м/с и разности концентраций 8 нмоль·л⁻¹ в южной части полигона 2.

Последующие значения имеют меньшую величину и сопровождаются уменьшением скорости ветра при возрастании разности концентраций, причем значение потока составляло 80 моль/км² в сутки уже только при скорости ветра 5 м/с и разности концентрации 46 нмоль·л⁻¹.

При уменьшении разности концентраций положение максимума скорости выделения метана смещается в сторону больших скоростей ветра.

Таким образом, при малых скоростях ветра и небольших потоках метана в атмосферу

происходит повышение концентрации метана в приповерхностных водах 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. Данный эффект назван «метановым дыханием» моря, когда 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.

Пространственное распределение метана и его потоков

Средние значения концентраций растворенного в поверхностном слое воды метана (нмоль·л⁻¹), а также процента насыщения метана (%), скоростей ветра (U, м·с⁻¹), потоков метана (моль/км² в сутки) представлены в таблице.

Осредненные характеристики концентраций метана (нмоль·л⁻¹) измеренных (C), равновесных (C*), разностей между измеренными и равновесными (ΔC), показателей насыщения вод метаном (%), его потоков на границе вода–атмосфера (моль/км² в сутки) и скорости ветра (U, м·с⁻¹) для изучаемых акваторий

Район исследования	Дата (год, месяц)	Средние значения					
		концентраций метана			% насыщения	U	потоков метана
		C	C*	ΔC			
Анива	2010.10	7	2	4	169	7	10
	2011.05	15	3	11	348	4	14
	2011.08	5	3	2	72	5	3
Курильская котловина	2005.08	4	3	1	45	3	1
	2010.10	6	3	4	137	6	9
	2011.05	14	3	11	321	4	13
Полигон 1	2011.08	5	3	3	95	5	4
	2005.09	5	3	2	67	4	2
	2010.10	7	3	4	137	7	11
Полигон 2	2011.05	12	3	9	258	4	11
	2011.08	6	2	4	151	6	8
Полигон 4	2011.09	9	3	7	274	5	10

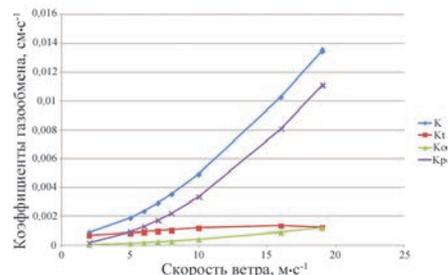


Рис. 1. Изменение коэффициентов газообмена на границе вода–атмосфера в зависимости от скорости ветра

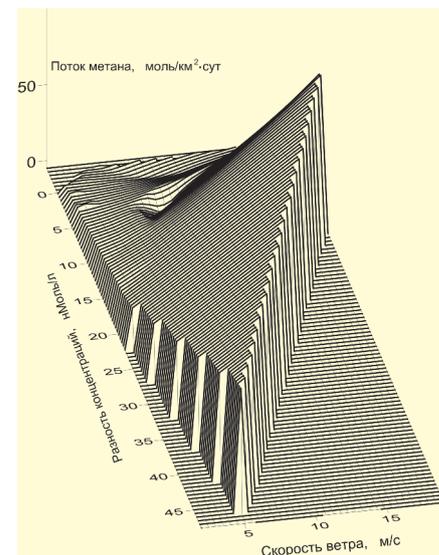


Рис. 2. Изменение максимального потока метана на границе вода–атмосфера (моль/км² в сутки) в зависимости от скорости ветра и разности концентрации метана в морской воде и его равновесно с атмосферой значения

На рис. 3 изображено распределение концентраций метана ($\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$) и потоков метана на границе вода–атмосфера ($\text{моль}/\text{км}^2$ в сутки) для всех экспедиций (врезка для полигонов 3 и 4).

Можно отметить большую изменчивость концентраций метана и его потоков на исследованной акватории.

На рис. 4 изображены схема района работ, распределение концентрации метана в поверхностных водах ($\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$) для экспедиций НИС «Акаде-

мик Лаврентьев», рейсы № 37, № 52, № 54; НИС «Профессор Гагаринский», рейс № 53; положение эпицентров землетрясений за 2005 и 2010–2011 гг.

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

Концентрации метана и результаты расчета потоков метана на границе вода–атмосфера по экспериментальным данным представлены на рис. 5.

Для рейса № 54 в мае–июне 2011 г. (рис. 5, а, б) в районе залива Анива концентрация метана аномально высока и достигает $23 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$. Для этой акватории летом 1999 г. (станция Ge 99-3) вблизи разрывных нарушений было обнаружено сквозное аномальное поле метана с концентрациями на поверхности $9 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$, в придонном слое – $30 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$ [12]. Согласно данным [13], во внутренних частях и на склоне Анивского прогиба в осадочных комплексах на глубинах от 300 м встречаются прослойки и линзы углей – дополнительные источники метана, а также надвиги и сбросы – дополнительные каналы для эмиссии метана [14].

Температура поверхностного слоя морской воды для мая–июня составляла $2\text{--}5^\circ\text{C}$. При маршруте движения от м. Крильон до склона зал. Анива поток метана при аномально высоких значениях концентрации составил $15 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки из-за низкой скорости ветра ($2 \text{ м}/\text{с}$). Далее вдоль южного склона Курильской котловины концентрации и поток немного снизились и составили в среднем $12 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$ и $10 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки соответственно, но около о-ва Итуруп поток увеличился до $15 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки (рис. 5, а).

При движении от о-ва Уруп на север максимальный поток метана – $25 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки – наблюдался в июне в центре Курильской котловины (рис. 5, б) при значениях концентрации $15 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$ и скорости ветра $6 \text{ м}/\text{с}$. На маршруте м. Терпения – м. Анива на склоне залива Терпения поток метана изменялся в диапазоне от 8 до $12 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки (средний – $10 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки). В заливе Анива поток увеличился до $23 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки. Основным источником метана в прогибе залива Терпения являются

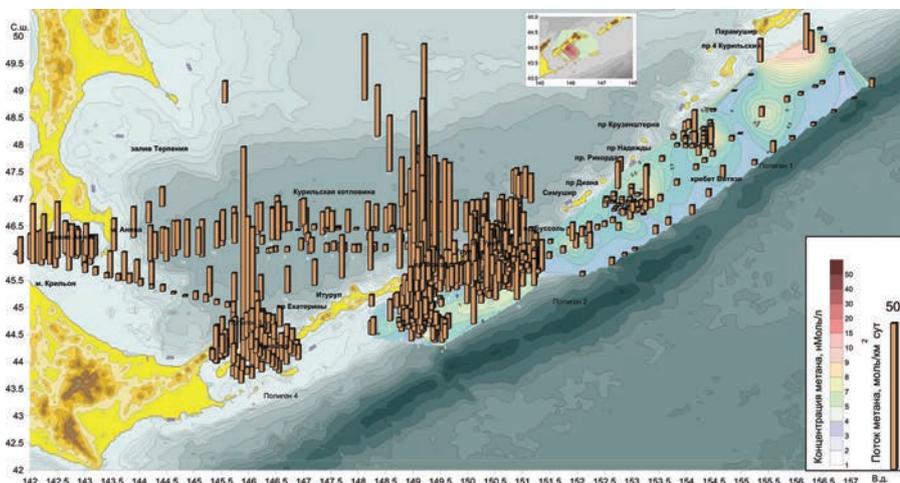


Рис. 3. Распределение концентраций метана ($\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$) в поверхностном (4 м) слое морской воды и потоков метана на границе вода–атмосфера ($\text{моль}/\text{км}^2$ в сутки) для экспедиций НИС «Академик Лаврентьев» и НИС «Профессор Гагаринский» (на врезке полигоны 3 и 4)

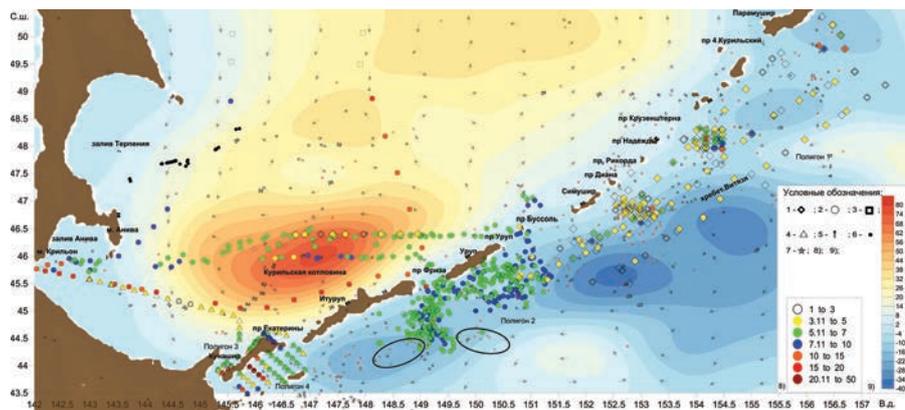


Рис. 4. Распределение концентраций метана ($\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$) в поверхностном (4 м) слое морской воды. Условные обозначения: 1 – концентрации метана ($\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$), рейс Lv 37, 08–09.2005 г.; 2 – концентрации метана ($\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$), рейс Lv 52, 09–10.2010 г.; 3 – концентрации метана ($\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$), рейс Lv 54, 05–06.2011 г.; 4 – концентрации метана ($\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$), рейс Ga 53, 08–09.2011 г.; 5 – направление течений; 6 – газовые факелы [1]; 7 – эпицентры землетрясений 2005 г. (черные), 2010 г. (коричневые), 2011 г. (красные); 8 – шкала распределений концентраций метана ($\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$) для всех рейсов; 9 – шкала распределений полных функций тока

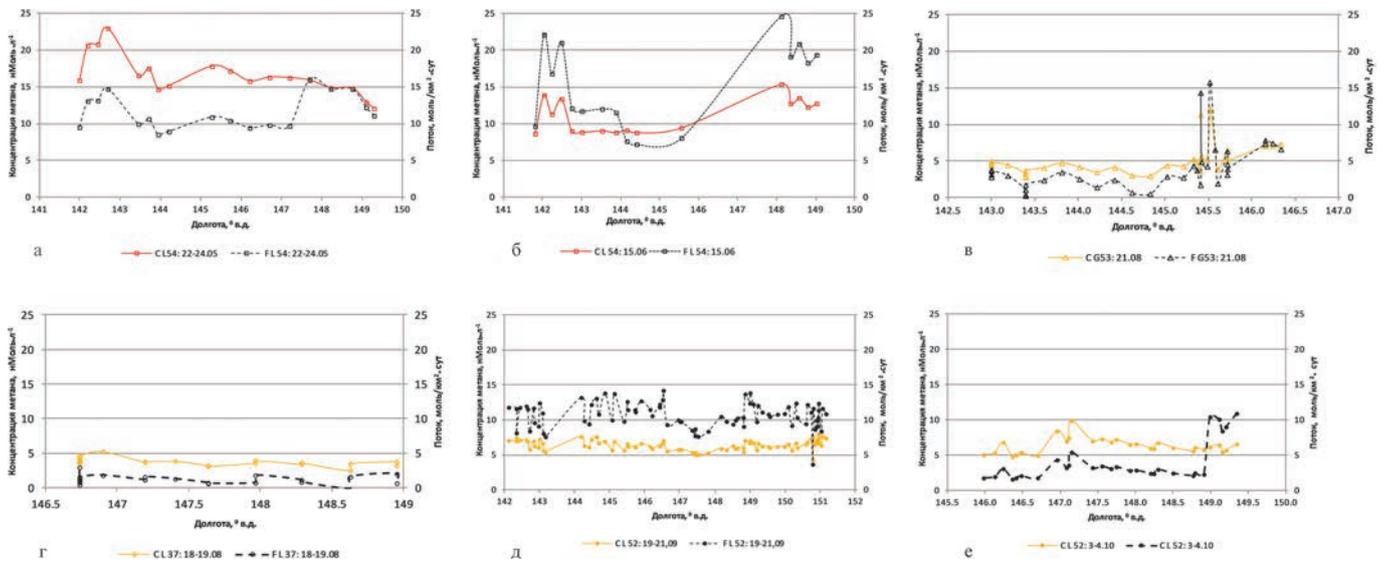


Рис. 5. Распределение концентраций метана ($\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$) в поверхностном слое морской воды и его потоков на границе вода–атмосфера ($\text{моль}/\text{км}^2$ в сутки) по профилям от пролива Лаперуза в Прикурильский район Охотского моря: а – 22–23.05.2011 г., рейс Lv 54; б – 15.06.2011, Lv 54; в – 19.08.2011, Lv 54; г – 18–19.08.2005, Lv 37; д – 19–21.09.2011, Lv 52; е – 3–4.10.2011, Lv 52

нефтегазоносные структуры. В открытой части залива закартированы локальные структуры, контуры которых расположены среди надвигов, взбросов и сбросов [13]. Водные образцы вдоль склона залива Терпения были отобраны в рейсе Lv № 54 в мае 2011 г. на акваториях, где ранее по данным зондирования регистрировались придонные акустические аномалии, вызванные рассеянием звука от пузырьков газа и имеющие вид струи или облака газовых пузырьков [1]. Тогда в глубинных пробах морской воды регистрировались повышенные значения метана (до $50 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$, на поверхности – до $25 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$, Ut май 1999 г.). Повышенное содержание метана объясняется его миграцией по зонам разломов из нефтегазоносных пород в морскую воду.

Профиль Ga53 (рис. 5, в) в августе 2011 г. при движении судна на маршруте склон зал. Анива – пролив Елизаветы («Профессор Гагаринский», рейс № 53) проходил через южный склон Курильской котлови-

ны аналогично маршруту Lv 54. Но тогда температура воды увеличилась до $14\text{--}16^\circ\text{C}$, концентрации метана в морской воде уменьшились до $3\text{--}5 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$, а поток метана в атмосферу составил $0\text{--}5 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки при скорости ветра от 2 до 5 м/с (рис. 5, в). Только в 2 точках на южном склоне Курильской котловины концентрации метана и его потоков заметно возрастали – до $12 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$ и $16 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки (рис. 5, в).

Через глубоководную часть в центральных районах Курильской котловины проходили маршруты рейсов Lv 37 (август 2005 г.) и Lv 52 (сентябрь–октябрь 2010 г.), что отражено на рис. 5, г; 5, д и 5, е соответственно. В августе 2005 г. температура воды держалась в диапазоне $14\text{--}16^\circ\text{C}$, скорость ветра составляла 2–5 м/с, значения концентрации метана варьировались от 3 до $5 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$, а поток изменялся от 0 до $5 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки. В октябре температура воды изменялась от 8 до 15°C , скорость ветра – от 2 до 8 м/с. Сравнение данных на рисунках 5, е и 5, д

показало, что на рис. 5, д при увеличении скорости ветра до 8 м/с поток метана больше, чем на рис. 5, е, где сила ветра опустилась с 8 до 2 м/с. Большинство значений концентраций метана на рис. 5, е были близки к равновесным и изменялись от 2,5 до $5 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$, и поток в $12 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки при скорости ветра 8 м/с резко снизился на станциях до $2 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки при скорости ветра 2 м/с.

В сентябре и октябре 2010 г. температура воды изменялась с 7 до 18°C , значения концентрации метана составили около $5 \text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$ (рис. 5, д), скорость ветра – до 7–8 м/с, поток изменялся от 7 до $15 \text{ моль}/\text{км}^2$ в сутки. Большинство проб были отобраны при скорости ветра 7–8 м/с, которая считается средней для Мирового океана.

Как было показано в работе [3], для сезонного изменения распределения метана в морской воде Охотского моря можно принять следующую картину процесса:

– в весенние месяцы после таяния льда и вскрытия рек наблюдается вынос пресных вод

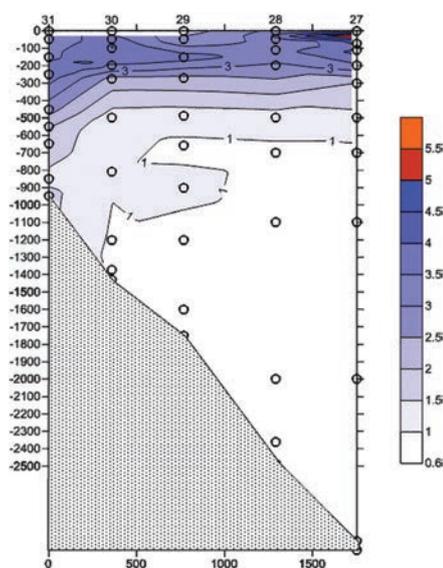


Рис. 6. Вертикальное распределение концентраций метана в морской воде, $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$

и начинается формирование поверхностного слоя, который препятствует выносу метана на поверхность. Вследствие этого под ним происходит увеличение концентрации метана в морской воде, причем под влиянием гидрологического режима возможно образование локальных максимумов метана на поверхности;

– в летне-осенний период происходит прогрев поверхностных вод с усилением стратификации и замедлением обмена метаном, который накапливается в подповерхностных водах в виде горизонтально ориентированных слоев на разных глубинах, связанных с расположением подводных источников метана;

– поздней осенью вследствие осенней конвекции вод происходит разрушение прежней стратификации вод, причем перемешивание обуславливает более однородное распределение метана с глубиной.

Судя по распределениям температур и метана для сентября–октября, конвекция еще не прошла, хотя средняя скорость ветра и увеличилась.

Полигоны 1, 2 в Тихом океане в пределах Курило-Камчатской островодужной системы переходной зоны от континента к океану

Анализ полученных результатов на полигоне 1 показывает неоднородность распределения метана на поверхности и в толще воды. В поверхностном слое отмечены концентрации метана от 2 до 13 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$ со средним значением 5 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$. На значительной части акватории наблюдаются значения, близкие к равновесным, но в отдельных районах повышенные значения по метану фиксируются в трех частях полигона: а) северная и центральная часть хребта Витязь; б) район пролива Диана; в) акватория между островами Уруп и Симушир.

На рассматриваемой акватории формируется холодный подповерхностный слой морской воды на глубине 50–100 м, в котором отчетливо выделяется максимум метана. Наибольшая вертикальная изменчивость концентраций метана наблюдается в слое 0–500 м. При дальнейшем увеличении глубины количество метана уменьшается, а минимальные концентрации – менее 0,8 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$ – располагаются на придонных горизонтах станций с глубиной 3000 м и более.

Для примера на рис. 6 приведено вертикальное распределение метана в морской воде на траверсе пролива Дианы в рейсе Lv 37. Подповерхностный максимум метана по профилю из пролива Дианы в открытую часть Тихого океана находился на глубине 50–300 м в холодном слое воды с температурой 1,48°C.

В пределах Тихоокеанского полигона 2 отмечены концентрации метана от 3 до 13 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$ со средним значе-

нием 7 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$. На неоднородном пространственном распределении концентраций метана можно выделить области с повышенным содержанием метана: район пролива Фриза между островами Уруп и Итуруп, южная и центральная части полигона со стороны Тихого океана (рис. 3).

Полигоны 3 и 4 акватории около островов Малой Курильской гряды

На полигоне 3, выполненном на акватории Охотского моря к западу от о-ва Кунашир, в северо-восточном и восточном районах измеренные концентрации метана в морской воде близки к равновесным значениям с атмосферой (рис. 3). В районе м. Ивановский, м. Круглый, м. Красный высокие – 10–15 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$ – значения метана связаны, по-видимому, с гидротермальной деятельностью. Кроме того, поднятые дночерпателем пробы грунта имели сильный запах сероводорода и присутствовал органический материал в донных осадках. Около м. Алехина наблюдается уменьшение концентраций от 5 до 10 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$. Около северной части о-ва Кунашир также наблюдаются высокие концентрации метана. Минимальные значения зафиксированы в центре полигона 3 и на северо-западной части площади.

В центральной части полигона 4 до о-ва Полонского в поверхностном слое морской воды были зафиксированы максимальные значения содержания метана – до 50 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$, при равновесном значении 2,5 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$, процент насыщения составил около 2000 % (см. таблицу). В месте аномалии на сравнительно небольшом участке рельеф дна сильно расчленен. Возможно,

что на данном участке находится зона разуплотнения пород, по которой происходит миграция газа. Концентрации уменьшались в северо-восточном направлении. Для рейса Ga 53 можно выделить район мелководных станций, где отмечен рост концентраций метана от придонных слоев до поверхности моря.

Влияние сейсмотектонических процессов

Возможно, изменение содержания метана связано с активизацией сейсмотектонических процессов, сопровождающихся увеличением доли этого газа в воде и атмосфере [15]. Как показано в работе [16], координаты района эпицентра землетрясения можно рассматривать как координаты района подводных источников, выделяющих метан в морскую среду. В изучаемом регионе на момент проведения исследований отмечается высокая сейсмическая активность, проявившаяся серией землетрясений. Особенно многочисленны землетрясения регистрируются со стороны Тихого океана.

Накануне выполнения работ на полигоне 2 в рейсе № 52 с 4 по 20 сентября зафиксировано 10 случаев коровых землетрясений магнитудой 4–5 баллов по шкале Рихтера на глубинах 10–28 км (эпицентры землетрясений помечены контурными эллипсами на рис. 4). Нарушение структуры земной коры, вероятно, способствовало выходу метана из подземных источников и проявилось в увеличении концентраций метана на поверхности в южной части полигона. Для полигона 2 наблюдается область повышенных значений метана в юго-

восточной части полигона от двух источников.

Для полигонов 3 и 4 накануне отбора проб зафиксировано 1 землетрясение в центре о-ва Кунашир и 10 за островами Малой Курильской гряды.

В заливе Анива в Курильской котловине и на склоне залива Терпения на момент отбора проб в мае 2011 г. произошло 3 землетрясения, несколько эпицентров отмечалось на склоне Курильской котловины. Вероятно, это является одной из причин аномально высоких концентраций метана.

Влияние гидрологического режима вод на распределение метана

Ранее нами для залива Петра Великого Японского моря [3] была разработана модель расчета полей течений и распространения примеси в морской среде и было показано, что адвективный перенос вод обуславливает формирование полей метана в поверхностных морских водах. С использованием указанной модели для условий Охотского моря был проведен расчет квазистационарной структуры течений для августа при воздействии летнего муссона, включая скорости ветра юго-восточного направления в диапазоне 6–10 м/с. Расчетная структура поверхностных течений (рис. 4) согласуется с результатами работ [17, 18] для летнего сезона. Результаты расчета показали, что в районе исследований наблюдается сложная структура течений с формированием многочисленных циклонических и антициклонических вихрей. В южной части Курильской котловины формируется круговорот вод с движением водных масс против часовой стрелки, который севернее о-ва Уруп переходит

в течение северного направления. Благодаря круговороту в южных проливах от Елизаветы до Буссоль происходит вынос охотоморских вод в Тихий океан, а от северной части пролива Буссоль до Четвертого Курильского пролива – поступление тихоокеанских вод в Охотское море.

В центре циклонического вихря в Курильской впадине в зоне конвергенции морских вод наблюдаются повышенные концентрации метана в диапазоне 7–10 нмоль·л⁻¹, а по периферии круговорота – от 3 до 7 нмоль·л⁻¹. Это широко известное в океанологии явление, когда в зоне конвергенции концентрируются различные загрязняющие соединения, такие как нефтяные углеводороды и плавающий пластиковый мусор.

С тихоокеанской стороны Курильских островов формируется цепочка антициклонических вихрей, в центральной зоне которых происходит подъем глубинных морских вод с последующей их дивергенцией вблизи морской поверхности. На рис. 6 показано вертикальное распределение метана в морской воде восточнее прол. Дианы на полигоне 1. Подъем обедненных метаном глубинных вод вызывает снижение содержания метана в центральной области вихря и, таким образом, происходит блокировка выноса метана в открытый океан при концентрировании метана в прибрежных областях на полигонах 1, 2 и 4. Кроме того, можно ожидать, что основные подводные источники метана находятся также в зонах шельфа и склона Курильских островов, как это наблюдалось на северо-восточном побережье о-ва Сахалин [3], что вызывает повышенное содержание метана именно в прибрежных морских водах.

На рис. 4 показано, что распределение метана в поверхностном слое хорошо согласуется со схемой направления течений. Для мелководных источников метана на глубинах до 200 м для полигонов 1 и 2 повышенные концентрации метана расположены над эпицентрами землетрясений, а метан под влиянием течений переносится в район около пролива Крузенштерна. Для более глубоководных станций в северной части полигона 1 метан из открытой части переносится к берегу о-ва Парамушир и далее, вероятно, в Охотское море через Четвертый Курильский пролив.

Из нескольких источников напротив проливов Надежды и Рикорда метан выносится на поверхность и относится в сторону Тихого океана. В свою очередь, из источников напротив пролива Дианы метан относится в сторону пролива Рикорда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным 2005, 2010 и 2011 гг. изучено пространственное распределение содержания метана и его потоков на прикурильских акваториях со стороны Охотского моря и открытой части Тихого океана.

В целом исследуемая область характеризуется неравномерным распределением метана в поверхностном слое воды. Это связано с рядом особенностей района – гидрологических, геологических и сейсмотектонических.

В результате исследований установлены участки с аномально высокими и близкими к равновесным концентрациями метана. Для большинства акваторий поверхностный слой воды был пересыщен. Диапазон изменения насыщения концентраций метана в поверхностных водах относительно равновесных с атмосферой составил для всех экспедиций от -16 до 2000 %.

Предлагаемый механизм газообмена на границе океан–атмосфера позволил произвести расчет скорости газообмена с учетом влияния обрушения волн и газовых пузырьков. В океанических условиях при скоростях ветра до 5 м/с основное влияние на скорость газообмена оказывает термическая неустойчивость поверхностного микрослоя, а обрушение волн и схлопывание газовых пузырьков определяют главный механизм переноса газов на границе вода–воздух при более высоких скоростях ветра за счет снижения сопротивления газообмену в поверхностном микрослое морской воды и активизации транспорта газов внутри водной массы. Подтвержден эффект пульсационного выделения метана. При малых скоростях ветра и малых потоках метана происходит повышение концентрации метана в приповерхностных водах за счет его переноса из нижележащих глубинных вод, которая при повышении скорости ветра (и увеличении

потока метана) быстро падает до равновесных значений с уменьшением потока метана до минимальных значений.

Проведенный анализ изменения сейсмической обстановки на изучаемой акватории в годы проведения экспериментальных работ дал возможность заключить, что землетрясения вызывают сильные гидравлические удары и приводят к периодической прочистке каналов, перекрывающихся газогидратами и минеральным веществом, обуславливая повышенные содержания метана в морской воде.

Применение модели расчета полей течений и переноса примесей для исследованной акватории позволило объяснить формирование повышенных концентраций метана в центре циклонического круговорота в зоне конвергенции морских вод, а по периферии круговорота концентрации падают на акватории Охотского моря. Со стороны Тихого океана цепочка антициклональных вихрей вызывает подъем обедненных метаном глубинных вод к поверхности, что приводит к снижению содержания метана в центральной области вихря, и происходит блокировка выноса метана в открытый океан из шельфовых районов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-05-31179 по проекту «Исследование газовых гидратов и выходов природного газа в Охотском море».



ЛИТЕРАТУРА

1. Обжиров А. И. и др. Мониторинг метана в Охотском море / под ред. А. И. Обжирова, А. Н. Салюк, О. Ф. Верещагиной. Владивосток: Дальнаука, 2002. 250 с.
2. Леин А. Ю., Иванов А. М. Биогеохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
3. 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. 112 с.
4. Мишукова Г. И., Верещагина О. Ф. Распределение метана и его потоков на границе вода–атмосфера на акваториях впадины Дерюгина, шельфа и склона о-ва Сахалин Охотского моря // Вестник ДВО РАН. 2011. № 6. С. 64–71.
5. 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. № 10. С. 36–43.
6. Wiessenburg D. A., Guinasso N. L. Equilibrium solubility of methane, carbon dioxide, and hydrogen in water and sea water // Journal of Chemical Engineering Data. 1979. Vol. 24, No. 4. P. 356–360.
7. Michoukov V., Mishukova G. White caps and bubble mechanisms of gas exchange between ocean and atmosphere // Proc. of the 2nd Intern. Sym «CO₂ in the Oceans». Environ, Japan, 1999. P. 517–520.
8. U. S. Geological Survey, National Earthquake Information Center. World Data Center for Seismology. URL: <http://neic.usgs.gov/neic>
9. Кулинич Р. Г., Карп Б. Я., Баранов Б. В. и др. О структурно-геологической характеристике «сейсмической брешы» в центральной части Курильской островной дуги // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 26, № 1. С. 5–19.
10. Леликов Е. П., Емельянова Т. А., Баранов Б. В. Магматизм подводного хребта Витязя (Тихоокеанский склон Курильской островной дуги) // Океанология. 2008. Т. 47, № 2. С. 294–303.
11. Астахова Н. В., Леликов Е. П. Особенности железо-марганцевого рудообразования на подводном хребте Витязя // Матер. Всерос. конф. с междунар. участ. «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит». Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 326–327.
12. Шакиров Р. Б., Обжиров А. И. Морфотектонический контроль потоков метана в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 1(7). С. 31–39.
13. Снеговской С. С. Особенности осадконакопления и формирования шельфа юго-восточного Сахалина // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. 4. Южно-Сахалинск, 1997. С. 79–89.
14. Куделькин В. В., Савицкий В. О., Карпей Т. И., Болдырева В. П. Структура и эволюция осадочного чехла присахалинского обрамления Южно-Охотской котловины // Тихоокеанская геология. 1986. № 4. С. 3–13.
15. Мишукова Г. И., Мишуков В. Ф., Обжиров А. И. Особенности проявления метана в придонных водах на территории Приморского края России // Вестник ДВО РАН. 2009. № 6. С. 50–54.
16. Мишукова Г. И., Пестрикова Н. Л., Мишуков В. Ф., Яновская О. С. Распределение метана и расчет его потоков на границе вода–атмосфера на акватории северо-западной части Японского моря в теплый сезон // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 1(11). С. 68–74.
17. Власова Г. А. Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря. М.: Наука, 2008. 358 с.
18. Мороз В. В. Особенности термохалинной структуры вод и динамики температурных аномалий в зоне Курильской гряды и прилегающих акваторий // Вестник ДВО РАН. 2011. № 3. С. 96–103.

