

© Автор 2024 г. Открытый доступ.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2024. Open access.  
Content is available under Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.465

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.1.005-012>  
<http://journal.imgg.ru/web/full/f2024-1-1.pdf>

## Потоки метана на границе вода–атмосфера на акватории российского сектора Восточной Арктики

Г. И. Мишукова

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

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

**Резюме.** Средние значения потоков метана с морской поверхности в Чукотском море ( $4\pm 4$  моль/(км<sup>2</sup>·сут)) и показателей пересыщения поверхностного водного слоя метаном ( $78\pm 39$  %) были ниже, чем в Восточно-Сибирском море ( $32\pm 24$  моль/(км<sup>2</sup>·сут) и  $346\pm 247$  % соответственно). В 50 % случаев концентрации растворенного метана в поверхностном слое морских вод в 2 раза превышали равновесные с атмосферой значения. Неоднородное распределение метана в морской воде вызывает изменения направления и величины потоков метана на границе вода–атмосфера при данных экспериментальных гидро- и метеоусловиях. Анализ данных показал, что поток определялся главным образом скоростью ветра (коэффициент корреляции  $Q = 0,8$ ), концентрацией растворенного метана ( $Q = 0,6$ ), показателем пересыщения вод метаном ( $Q = 0,6$ ), температурой в поверхностном водном слое ( $Q = -0,6$ ). Отрицательный коэффициент корреляции с температурой указывает на то, что при снижении температуры увеличивается растворимость метана в воде, уменьшается разность концентраций с атмосферой, и интенсивность потока метана снижается.

**Ключевые слова:** потоки метана, Восточно-Сибирское море, Чукотское море, Арктика

## Methane fluxes at the water–atmosphere boundary in the waters of the Russian sector of the Eastern Arctic

Galina I. Mishukova

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

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

**Abstract.** The average value of methane fluxes from the sea surface in the Chukchi Sea ( $4\pm 4$  mol/(km<sup>2</sup>·day)) and parameters of methane supersaturation of the surface water layer ( $78\pm 39$  %) were lower than in the East Siberian Sea ( $32\pm 24$  mol/(km<sup>2</sup>·day) and  $346\pm 247$  %, respectively). In 50 % of cases, the concentrations of dissolved methane in the surface layer of sea waters were two times higher than the equilibrium values with the atmosphere. The heterogeneous distribution of methane in seawater causes a change in the direction and magnitude of methane fluxes at the water–atmosphere boundary under given experimental hydrometeorological conditions. Data analysis showed that the flux was predominantly determined by wind speed (correlation coefficient  $Q = 0.8$ ), concentration of dissolved methane ( $Q = 0.6$ ), parameter of methane supersaturation of waters ( $Q = 0.6$ ), and temperature of the surface water layer ( $Q = -0.6$ ). A negative correlation coefficient with temperature indicates that as the temperature decreases, the solubility of methane in water increases, the difference in concentrations with the atmosphere decreases, and the intensity of methane flux decreases.

**Keywords:** methane fluxes, East Siberian Sea, Chukchi Sea, Arctic

**Для цитирования:** Мишукова Г.И. Потоки метана на границе вода–атмосфера на акватории российского сектора Восточной Арктики [Электронный ресурс]. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 1. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.1.005-012>; <http://journal.imgg.ru/web/full/f2024-1-1.pdf>;

**For citation:** Mishukova G.I. Methane fluxes at the water–atmosphere boundary in the waters of the Russian sector of the Eastern Arctic. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 1, pp. 5–12. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.1.005-012>; EDN: <https://www.elibrary.ru/wgecap>

Перевод данной статьи на английский язык напечатан в журнале «Геосистемы переходных зон», 2024, т. 8, № 1, с. 5–12. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.1.005-012>; <https://www.elibrary.ru/dxcfhz>

Full text of this article in English published in the “Geosystems of Transition Zones” journal, 2024, vol. 8, no. 1, pp. 5–12. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.1.005-012>; <https://www.elibrary.ru/dxcfhz>

## Финансирование

Работы выполнялись в рамках государственной программы фундаментальных научных исследований РАН № 75 «Мировой океан – физические, химические и биологические процессы, геология, геодинамика и минеральные ресурсы океанской литосферы и континентальных окраин; роль океана в формировании климата Земли, современные климатические и антропогенные изменения океанских природных систем» (FWMM-2024-0029, проект № 0211-2021-0006; рег. номер 124022100076-3).

## Введение

Метан, несмотря на незначительное содержание в атмосфере, играет важную роль в формировании климатических условий планеты Земля. В настоящее время средняя концентрация метана в атмосфере Северного полушария Земли составляет 1.8 ppm с тенденцией постоянного увеличения. Кроме того, метан является индикатором залежей углеводородов и газонасыщенности недр. Тектонические разломы земной коры на акватории восточной Арктики формируют проницаемые зоны для миграции глубинных газов, таких как метан, водород, гелий и другие. Согласно литературным данным, Арктический регион разделяется на два макрорегиона – западный и восточный. В западном секторе, включая Баренцево и Карское моря и большую часть моря Лаптевых, содержание метана в атмосфере в период 2010–2022 гг. было увеличено по отношению к восточному сектору, включая Восточно-Сибирское и Чукотское моря. Это обусловлено природными факторами, прежде всего геологическим строением региона [1].

Источники метана в Арктике общеизвестны: залежи нефти и газа, угленосные толщи, газогидраты, антропогенный метан в районах добычи нефти и газа, метан, транспортируемый реками и продуцируемый микробными сообществами.

По прогнозам, в морях Арктики заключены огромные, все еще объективно не оцененные ресурсы углеводородов. Значительная мощность осадочного чехла и высокие перспективы прогноза генерации катагенетических газов (в том числе гомологов метана) в недрах предполагают значительный вклад латерального и адвективного поступления метана из литосферы в гидросферу и атмосферу.

Перспективные для промышленного использования ресурсы метана Восточной Ар-

ктики и востока России составляют 4.4 трлн м<sup>3</sup> [2]. Площади прогнозируемых газонефтяных, нефтегазовых и нефтяных залежей шельфа Восточно-Сибирского моря характеризуются максимальной мощностью (более 3 км) осадочного чехла в пределах Северо-Чукотского (более 10 км), Южно-Чукотского, Айонского бассейнов [3]. Содержание метана в угольных бассейнах на востоке России достигает 11 трлн т [4]. В Чаунской впадине Айонского бассейна установлено более 15 пластов лигнитов и бурого угля мощностью до 7–10 м и метаноносностью до 2 м<sup>3</sup>/т на глубинах 200–250 м [2]. В Восточно-Сибирском море была зафиксирована крупная область выхода газа в виде факелов, обнаруживаемых акустическими методами [5]. Газонасыщенные осадочные отложения простираются к северу от о. Врангеля [6]. На профиле газогеохимического опробования длиной 560 км от мыса Биллингса к хр. Менделеева, выполненном в 2008 г., для всех 56 станций в кернах донных осадков наблюдалось высокое содержание метана. Фоновые концентрации метана в донных осадках составили 13 ppm – в 4 раза выше, чем в Охотском море. В центральной части профиля выделяется участок газонасыщенных осадочных отложений с ураганным содержанием метана до 24 000 ppm (2.4 об.%) [7]. На границе Восточно-Сибирского и Чукотского морей были обнаружены газогидраты [8]. Потенциальное количество газа, находящегося в недрах Чукотского моря в форме гидратов, оценено в пределах  $7 \cdot 10^{11} - 11.8 \cdot 10^{13} \text{ м}^3$  [9].

При исследовании климатических изменений особую актуальность имеет расчет потоков метана на границе вода–атмосфера. Хотя исследования концентраций метана и его эмиссии в атмосферу в Арктике стали одним из основных направлений, остается значительная неопределенность масштабов эмиссии,

обусловленная пространственной неоднородностью потоков, использованием данных с разными методологиями.

По данным исследований 2011 г., средняя концентрация растворенного метана в поверхностном водном слое в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море была  $17.6 \pm 0.18$  нмоль/л; в Чукотском море и Беринговом –  $8.05 \pm 0.05$  нмоль/л [10]. В Чукотском море, по данным 2004 г., концентрации метана в поверхностных водах изменялись от 3 до 18 нмоль/л, диапазон потоков метана составлял 5–57 мкмоль/(м<sup>2</sup>·сут) [11]. Потоки метана с акватории шельфа Аляски и Центрального трога Чукотского моря составляли 10.8 мкмоль/(м<sup>2</sup>·сут) [12]. Самые низкие потоки  $1.9 \pm 1.4$  мкмоль/(м<sup>2</sup>·сут) для лета и осени 2015 г. отмечены на акватории Берингова пролива, шельфа Аляски Чукотского моря [13]. Согласно одной из последних оценок, потоки с поверхности моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей составляли 4.58; 1.74 и 0.14 мг/(м<sup>2</sup>·день), что соответствует годовым потокам 0.83; 0.62 и 0.03 Тг в год соответственно [14].

Годовые оценки предполагают экстраполяцию потоков на всю площадь шельфа и глубоководных районов, хотя данных зачастую недостаточно или они вовсе отсутствуют, особенно для акваторий, покрытых льдом, областей просачиваний газа. Для изучения закономерностей и особенностей вклада региональных потоков пока не хватает экспериментальных данных по акватории внутреннего шельфа Чукотского моря и восточной части Восточно-Сибирского моря.

Целью данной работы является расчет потоков метана на границе вода–атмосфера по экспериментальным данным, полученным в летний сезон 2013 г., и исследование пространственного распределения скорости обмена метаном для акватории внутреннего шельфа восточного сектора российской Арктики.

## Материалы и методы

Для расчета потоков метана в каждой точке отбора проб поверхностного водного слоя использованы экспериментальные данные по

концентрациям растворенного метана, температуре, солености в поверхностном слое морской воды, содержаниям метана в приводном слое атмосферы и реальным скоростям ветра на момент отбора проб, полученные на акватории внутреннего шельфа восточного сектора российской Арктики в ходе исследований научно-образовательной экспедиции учебно-производственного судна (УПС) «Профессор Хлюстин» (июль–сентябрь 2013 г.).

При обсуждении результатов использованы данные, полученные на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV 45, 2008 г.).

Отбор проб воды, осадка, воздуха и аналитические исследования проводились согласно сертифицированной методике, принятой в Лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН (Свидетельство Росстандарта № 41 к Паспорту лаборатории ПС 1.047–18). В восточной Арктике пробы поверхностного слоя воды отобраны на ходу движения судна с помощью заборного устройства на глубине 5 м от поверхности моря. На четырех гидрологических станциях пробы воды отбирались с помощью батометров Нискина с поверхностного, придонного и промежуточных горизонтов. Для опробования донных осадков использовался гидростатический пробоотборник длиной 350 см. Отбор осадка проводился шприцами, шаг отбора 10 см.

Концентрации газов в воде и в осадках определялись методом равновесных концентраций.

Хроматографический анализ газового состава выполняли на хроматографе «Кристалл-Люкс 4000М» (ООО «НПФ «Мета-хром», г. Йошкар-Ола), снабженном пламенно-ионизационным детектором и двумя детекторами по теплопроводности, газ носитель – гелий.

Расчет концентраций метана, растворенного в морской воде, проводили с использованием расчетных констант растворимости метана [15] в модификации [16].

*Методика расчета потоков метана на границе раздела вода–атмосфера.* Потоки метана на границе вода–атмосфера на акватории Восточно-Сибирского и Чукотского морей были рассчитаны с учетом влияния на механизм газообмена свойств поверхностного ми-

кросля по методологии, описанной в работах [17–19]:

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

где  $F$  – интенсивность потока метана,  $\Delta C$  – разность между концентрацией растворенного метана и концентрацией метана, равновесной с атмосферой,  $K$  – коэффициент газообмена на границе вода–воздух.

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

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

где  $C^*$  – равновесная концентрация метана.

Ввиду сильной изменчивости потоков метана на границе вода–атмосфера предлагается использовать 10 градаций значений потоков [20], моль/(км<sup>2</sup>·сут): сильный сток метана из атмосферы (–6... –1), слабый сток (–1... –0.01), равновесие (–0.01... 0.01), эмиссия низкой интенсивности (0.01–1), умеренной (1–4), средней (4–10), высокой (10–20), очень высокой (20–50), аномальной интенсивности (50–150), ураганные значения эмиссии (150–500) [20].

## Результаты и обсуждение

Распределение потоков метана с морской поверхности внутреннего шельфа по маршруту следования судна в летний сезон 2013 г. было неравномерным (рис. 1, табл. 1).

Исследованная акватория является источником поступления метана в атмосферу. В рамках предложенной градации эмиссия метана изменялась от равновесных значений до значений аномальной интенсивности.

На станциях, расположенных на акватории Чаунской губы Восточно-Сибирского моря, фиксировались потоки очень высокой и аномальной интенсивности 39 и 62 моль/(км<sup>2</sup>·сут), процент пересыщения составлял 258 и 316 %. Вблизи прол. Лонга поток высокой интенсивности – 20 моль/(км<sup>2</sup>·сут), процент пересыщения – 694 %. Проявляется совпадение локальных зон повышенных потоков метана с акватории с высокими концентрациями растворенного метана в поверхностном водном слое. Концентрации растворенного метана в поверхностном водном слое в районе исследу-

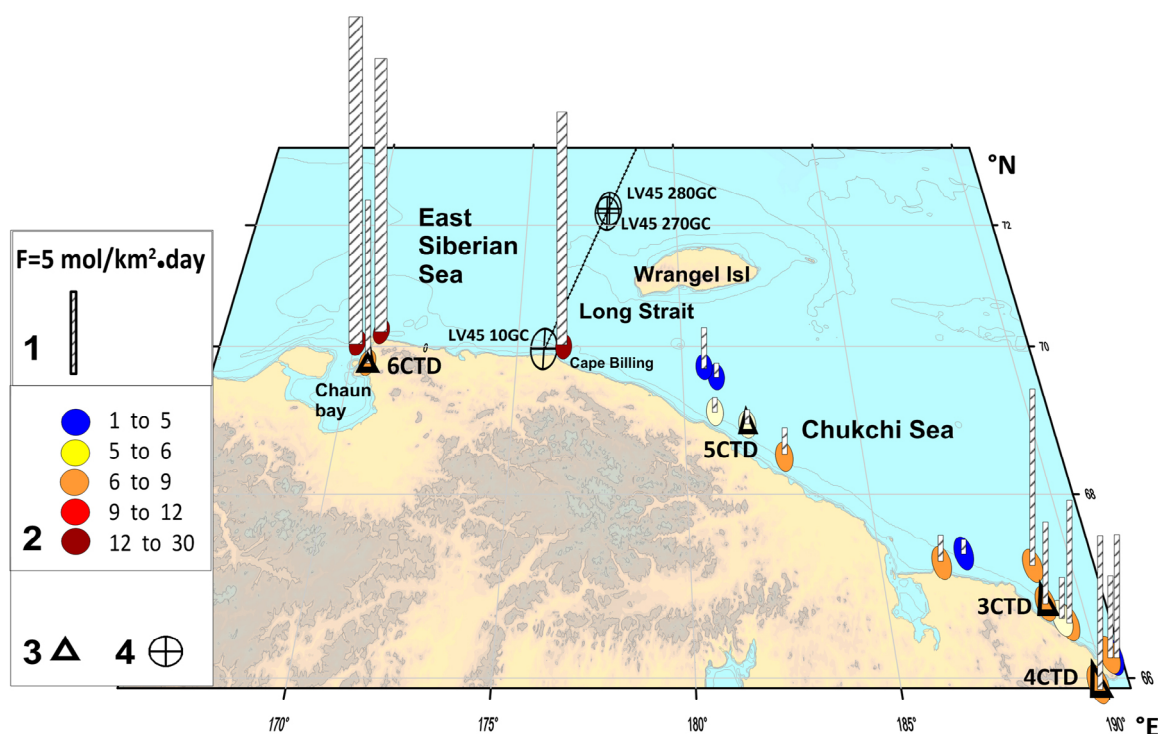


Рис. 1. Распределение концентраций растворенного метана и его потоков на границе вода–атмосфера в районе исследований. 1 – потоки метана на границе вода–атмосфера,  $F$ , моль/(км<sup>2</sup>·сут); 2 – концентрации растворенного метана (нмоль/л); 3 – местоположение CTD-станций; 4 – местоположение станций отбора проб осадков.



дований изменялись от 4.1 до 27.1 нмоль/л. Разность между концентрацией растворенного метана и равновесной концентрацией метана была положительная – от 1 до 24 нмоль/л. Процент пересыщения поверхностных вод растворенным метаном относительно атмосферы составлял от 33 до 694 %.

В табл. 2 представлены средние значения и диапазон изменчивости интенсивности потоков метана на границе вода–атмосфера, концентраций растворенного метана в поверхностном слое воды, показателей пересыщения

вод метаном, скорости ветра для Восточно-Сибирского и Чукотского морей.

Среднее значение и диапазон изменения потоков метана на границе вода–атмосфера в Восточно-Сибирском море были выше, чем в Чукотском. Диапазон потоков метана с акватории Чукотского моря был меньше указанного в работе [11] для 2004 г. Поток метана с морской поверхности внутреннего шельфа в летний сезон 2013 г. Чукотского моря был в 2 раза ниже, а Восточно-Сибирского моря – в 3 раза ниже приведенного в работе [14] для 2014 г.

**Таблица 1.** Характеристики потоков метана и сопутствующих параметров для изучаемой акватории

Акватория	<i>F</i>	<i>C</i>	<i>t</i> , C°	<i>S</i>	<i>C*</i>	$\Delta C$	<i>N</i>	<i>U</i>	№ станции
Берингов пролив	10.3	6.1	5.7	30.0	3.3	2.8	85	9	CTD 4
	7.1	4.1	7.1	31.4	3.0	1.1	36	13	
	5.1	6.1	6.0	31.7	3.1	3.0	97	5	
	7.2	8.1	4.3	31.9	3.4	4.7	137	5	
Чукотское море	6.3	7.0	4.9	31.3	3.2	3.9	121	5	CTD 3
	1.1	5.2	2.5	29.0	3.5	1.7	48	2	CTD 5
	3.2	5.1	5.2	31.7	3.2	1.9	60	5	
	12.1	8.1	3.9	32.4	3.3	4.8	148	7	
	0.6	4.1	6.1	30.6	3.1	1.0	33	1	
	1.9	6.2	6.3	29.1	3.1	3.0	97	1	
	2.3	6.2	1.3	25.4	3.7	2.5	68	3	
	0.6	4.1	6.5	30.4	2.9	1.2	42	0	
	1.1	5.2	4.8	27.6	3.3	1.9	58	1	
2.8	4.1	6.5	30.5	2.9	1.2	42	6		
Восточно-Сибирское море	7.7	6.3	8.8	21.8	2.9	3.4	116	6	CTD 6
	19.7	27.1	0.7	30.5	3.4	23.7	694	2	
	38.9	12.1	0.8	31.8	3.4	8.7	258	10	
	61.6	14.1	0.7	31.8	3.4	10.7	316	12	

*Примечание.* Здесь и в табл. 2 и 3: *F* – интенсивность потоков метана на границе вода–атмосфера, моль/(км<sup>2</sup>·сут); *C* – концентрация растворенного метана в поверхностном слое воды, нмоль/л; *t* – температура, C°; *S* – соленость в поверхностном слое воды, psu; *C\** – равновесная концентрация метана, нмоль/л;  $\Delta C$  – разность между концентрацией растворенного метана и равновесной его концентрацией, нмоль/л; *N* – показатель пересыщения водного слоя метаном, %; *U* – скорость ветра, м/с.

**Таблица 2.** Средние значения характеристик потоков метана (2013 г.)

Акватория	Значение среднее (диапазон значений)			
	<i>F</i> , моль/(км <sup>2</sup> ·сут)	<i>C</i> , нмоль/л	<i>N</i> , %	<i>U</i> , м/с
Восточно-Сибирское море	32±24 (62–8)	15±9 (27–6)	346±247 (694–116)	8±4 (12–2)
Чукотское море	4±4 (12–1)	6±1 (8–4)	78±39 (148–33)	4±3 (9–0)

В табл. 3 приведены парные коэффициенты корреляции ( $Q$ ) изучаемых величин.

Анализ данных показал, что поток определялся преимущественно скоростью ветра  $U$  (коэффициент корреляции  $Q = 0.8$ ); статистически значимы также коэффициенты корреляции потока с концентрацией растворенного метана  $C$  ( $Q = 0.6$ ), показателем пересыщения вод метаном  $N$  ( $Q = 0.6$ ) и с температурой  $t$  в поверхностном водном слое ( $Q = -0.6$ ). То есть с увеличением скорости ветра, концентрации растворенного метана, показателя пересыщения вод интенсивность потока увеличивается. С температурой коэффициент корреляции связи имеет обратную зависимость, указывающую на то, что при снижении температуры увеличивается растворимость метана в воде, уменьшается разность концентраций с атмосферой, и интенсивность потока метана снижается.

На рис. 2 приведено вертикальное распределение концентраций растворенного метана на станциях STD6 в Восточно-Сибирском, STD5 и STD3 Чукотском морях и STD4 в Беринговом проливе.

На вертикальных профилях наблюдалась неоднородность в распределении концентраций растворенного метана. На всех станциях, кроме станции STD3 в Чукотском море, фиксировались повышенные концентрации в придонном слое. Максимальная концентрация растворенного метана на горизонте 6 м на мелководной станции STD6 в прибрежной зоне Восточно-Сибирского моря составила 32 нмоль/л. На станции STD5 в центральной части шельфа Чукотского моря в пробах, отобранных на разных горизонтах, аномальные

концентрации метана около 20 нмоль/л наблюдались на горизонтах 25 и 40 м. При сопоставлении максимумов содержания хлорофилла- $a$  и окрашенного растворенного органического вещества, приведенных в работе [21], с максимумами содержания метана значимых совпадений выявлено не было. Совпадение для всех трех параметров наблюдается в придонном слое на станции STD4 и на горизонте 25 м под слоем изменения термохалинных параметров на станции STD5; концентрации растворенного метана и окрашенного растворенного органического вещества совпадают в поверхностном слое на STD3, а на станции STD6 они совпадают над слоем изменения термохалинных параметров на горизонте 6 м, концентрации же растворенного метана и хлорофилла- $a$  совпадают в придонном слое. Явной закономерности, подтверждающей образование метана в процессе жизнедеятельности и деструкции гидробионтов, вероятно, из-за небольшого количества данных не обнаружено.

Так как на период работ воды на станциях в российском секторе восточной Арктики характеризовались двухслойной структурой (со слоем воды пониженной солености в поверхностном слое, см. рис. 2), переход растворенного метана из воды в поверхностный водный слой и далее в атмосферу был ограничен [21]. На профиле вдоль внутреннего шельфа концентрации растворенного метана в поверхностном слое превышали равновесные с атмосферой значения в 2 раза как для 4 гидрологических станций, так и для большинства станций шельфа. Исключение составили 3 станции в Восточно-Сибирском море, на

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между величинами потоков метана и сопутствующими параметрами

	$F$	$C$	$t$	$S$	$C^*$	$\Delta C$	$N$	$U$
$F$	1.0							
$C$	0.6	1.0						
$t$	-0.6	-0.6	1.0					
$S$	0.3	0.2	-0.3	1.0				
$C^*$	0.3	0.4	-0.8	0.1	1.0			
$\Delta C$	0.6	1.0	-0.6	0.2	0.3	1.0		
$N$	0.6	1.0	-0.6	0.2	0.3	1.0	1.0	
$U$	0.8	0.2	-0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	1.0

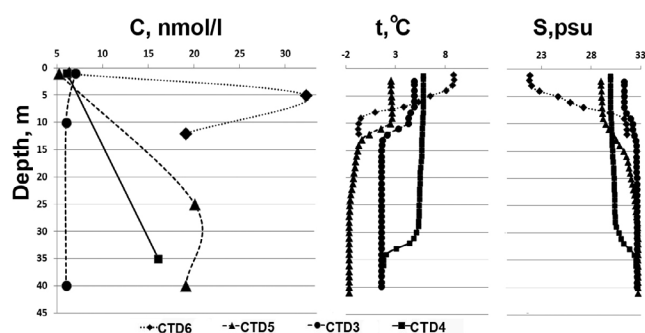


Рис. 2. Вертикальное распределение концентраций растворенного метана ( $C$ , нмоль/л), температуры ( $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ); солености ( $S$ , psu) в Восточно-Сибирском (станция STD6), Чукотском море (STD3, STD5) и Беринговом проливе (STD4).

которых концентрации растворенного метана превышала равновесные с атмосферой значения в 9 и 4 раза (см. табл. 1).

Максимальная концентрация растворенного метана в поверхностном водном слое – 27.1 нмоль/л и максимальный процент пересыщения вод метаном 694 % отмечены на станции около мыса Биллингса (см. табл. 1). Рядом с ней расположена станция опробования донных осадков LV45-10, являющаяся началом профиля, выполненного в 2008 г. На рис. 3 показано вертикальное распределение метана в кернах донных осадков для станции LV45-10 и двух станций центральной части профиля с аномально высоким содержанием метана – LV45-270, LV45-280.

Высокий региональный углеводородный фон и ураганные значения содержания метана в кернах донных осадков в результате длительного просачивания природного газа могли обусловить концентрации растворенного метана, превышающие равновесные с атмосферой значения.

Таким образом, наблюдаемые повышенные концентрации растворенного метана в придонном и поверхностном водных слоях, аномально высокие значения содержания метана в кернах донных осадков, вероятно, указывают на наличие геологических источников, из которых метан мигрирует в верхний слой морских осадков и поступает далее в водную толщу и атмосферу.

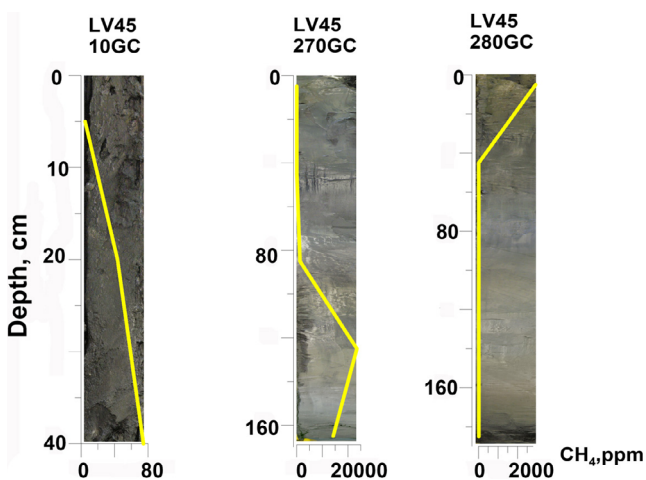


Рис. 3. Распределение концентраций метана в кернах осадков на станциях LV45-10, LV45-270, LV45-280, рейс 45 НИС «Академик М.А. Лаврентьев».

Данный вывод согласуется с результатами газогеохимических исследований донных осадков и геоструктур Восточно-Сибирского моря. В работах [22, 23] показано, что углеводородные газы юго-восточной части Восточно-Сибирского моря представлены биогенными газами современных осадков и торфяников; метаморфогенными газами угленосных формаций, газовых залежей, твердых битумов, предполагаемых газогидратных, конденсатно-газовых, газоконденсатных, нефтегазовых, газонефтяных и нефтяных залежей; а также газами магматических образований.

### Заключение

В результате исследований скоростей метанообмена на границе вода–атмосфера выявлено, что акватория внутреннего шельфа российского сектора восточной Арктики в летний период 2013 г. была источником поступления метана в атмосферу. Поток с морской поверхности изменялся от равновесия 0.6 моль/(км<sup>2</sup>·сут) в Чукотском море до эмиссии аномальной интенсивности 61.6 моль/(км<sup>2</sup>·сут) в Восточно-Сибирском море.

Корреляционный анализ данных показал, что основное влияние на поток оказывают скорости ветра; концентрации растворенного метана; пересыщение поверхностных вод метаном; температура (коэффициенты корреляции Q = 0.8; Q = 0.6; Q = 0.6; Q = -0.6 соответственно). Неоднородное распределение метана в поверхностной морской воде и сильная зависимость коэффициента газопереноса от скорости ветра обуславливают изменение величины потоков метана на границе вода–атмосфера.

Вертикальное распределение метана в морской воде неоднородно: в нижних горизонтах водной толщи могут наблюдаться аномальные концентрации метана, вероятно поступающего в водную толщу из морских осадков, в том числе и из геологических подводных источников.

Концентрации растворенного метана в поверхностном слое морских вод в 50 % случаев в 2 раза превышали равновесные с атмосферой значения. Концентрации растворенного ме-

тана в поверхностном слое в Чукотском море были ниже, чем в Восточно-Сибирском. Среднее значение показателей пересыщения вод метаном и диапазоны их изменения в Чукотском море ( $78 \pm 39$  %) были также ниже, чем в Восточно-Сибирском ( $346 \pm 247$  %).

Среднее значение потоков метана в атмосферу с морской поверхности в Восточно-Сибирском море, при более высоких концентрациях метана и больших скоростях ветра, было выше, чем в Чукотском ( $32 \pm 24$  и  $4 \pm 4$  моль/(км<sup>2</sup>·сут) соответственно).

### Список литературы

- Шакиров Р.Б., Хазанова Е.С., Стёпочкин И.Е. **2023**. Новые данные о закономерностях распределения метана над арктическим шельфом Евразии. *Доклады РАН. Науки о Земле*, 511(1): 130–134. DOI:10.31857/S2686739722603003
- Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В., Мазуров А.К., Рубан А.С. **2017**. Газоносность донных осадков и геохимические признаки нефтегазоносности шельфа Восточно-Сибирского моря. *Тихоокеанская геология*, 36(4): 78–84.
- Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В. **2014**. Геоструктурные закономерности распределения мерзлоты в углегазоносных бассейнах северо-востока России. *Криосфера Земли*, 18(1): 3–11. EDN: RXDUBF
- Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В., Шакиров Р.Б. **2015**. Геотектонические аспекты формирования углегазоносных бассейнов северо-востока России. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 3(27): 58–70. EDN: URQKDX
- Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Gustafsson Ö. **2013**. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*, 7: 64–70. DOI:10.1038/ngeo2007
- Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. **2013**. Геохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(21): 98–110. EDN: RCCSOL
- Шакиров Р.Б., Мальцева Е.В., Веникова А.Л., Соколова Н.Л., Гресов А.И. **2023**. Комплексные геолого-геофизические исследования по обоснованию внешней границы континентального шельфа России в Охотском и Восточно-Сибирском морях (2006–2009 гг.): обзор. *Геосистемы переходных зон*, 7(3): 264–275. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.3.264-275>
- ARA07C Cruise Report: 2016 Korea-Russia-Germany East-Siberian Sea Research Program. **2017**. Korea Polar Research Inst., 108. URL: <http://repository.kopri.re.kr/handle/201206/4995> (accessed 22.11.2023).
- Матвеева Т.В., Семенова А.А., Щур Н.А., Логвина Е.А., Назарова О.В. **2017**. Перспективы газогазодратоносности Чукотского моря. *Записки Горного института*, 226: 387–396. <https://doi.org/10.25515/рmi.2017.4.387>
- Космач Д.А., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Куриленко А.В., Густафссон О., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. **2015**. Метан в поверхностных водах окраинных морей Северной Евразии. *Доклады Академии наук*, 465(4): 441–445. DOI:10.7868/S0869565215340149
- Savvichev A.S., Rusanov I.I., Pimenov N.V., Zakharova E.E., Veslopolova E.F., Lein A.Y., Crane K., Ivanov M.V. **2007**. Microbial processes of the carbon and sulfur cycles in the Chukchi Sea. *Microbiology*, 76: 603–613. <https://doi.org/10.1134/S0026261707050141>
- Li Y., Zhan L., Zhang J., Chen L., Chen J., Zhuang Y. **2017**. A significant methane source over the Chukchi Sea shelf and its sources. *Continental Shelf Research*, 148: 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.08.019>
- Fenwick L., Capelle D., Damm E., Zimmermann S., Williams W.J., Vagle S., Tortell P.D. **2017**. Methane and nitrous oxide distributions across the North American Arctic Ocean during summer, 2015. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 122(1): 390–412. <https://doi.org/10.1002/2016JC012493>
- Thornton B.F., Prytherch J., Andersson K., Brooks I.M., Salisbury D., Tjernström M., Crill P.M. **2020**. Shipborne eddy covariance observations of methane fluxes constrain Arctic Sea emissions. *Science Advances*, 6(5). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay7934>
- Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. **1976**. Solubility of methane in distilled water and seawater. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 21(1): 78–80. <https://doi.org/10.1021/jc60068a029>
- Wiessenburg D.A., Guinasso N.L. **1979**. Equilibrium solubility of methane, carbon dioxide, and hydrogen in water and sea water. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 24(4): 356–360. <https://doi.org/10.1021/jc60083a006>
- Michoukov V., Mishukova G. **1999**. White caps and bubble mechanisms of gas exchange between ocean and atmosphere. In: Nojiri Y. (Ed.) *Proceedings of the 2nd International Symp. "CO<sub>2</sub> in the Oceans"*. Environ. Agency of Japan, p. 517–520.
- Мишукова Г.И., Обжиров А.И., Мишуков В.Ф. **2007**. Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода–атмосфера в Дальневосточном регионе. Владивосток: Дальнаука, 159 с.
- Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I. **2013**. Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan. *Deep Sea Research*.



- Part II: Topical Studies in Oceanography*, 86–87: 25–33. DOI:10.1016/j.dsr2.2012.08.017
20. Легкодимов А.А., Мишукова О.В., Швалов Д.А., Максеев Д.С., Шакирова М.В., Бакунина М.С., Еськова А.И. **2019**. К дискуссии об эмиссии метана с акватории Татарского пролива, Японское море (по результатам 55-го рейса НИС Академик Опарин). *Вестник ДВО РАН*, 2: 81–87. DOI:10.25808/08697698.2019.204.2.009
  21. Соколова Е.Б., Мишукова Г.И., Салюк П.А., Шакиров Р.Б. **2021**. Совместный анализ вертикальных профилей гидрооптических параметров и концентрации растворенного метана в воде в Беринговом море и в восточном секторе Арктики. *Подводные исследования и робототехника*, 1(35): 60–69. DOI:10.37102/1992-4429\_2021\_35\_01\_06; EDN: EKVXXJ
  22. Гресов А.И., Яцук А.В. **2021**. Геологические условия формирования газонасыщенности донных отложений осадочных бассейнов юго-восточного сектора Восточно-Сибирского моря. *Геология и геофизика*, 62(2): 197–215. DOI:10.15372/GiG2020104
  23. Гресов А.И., Яцук А.В. **2020**. Геохимия и генезис углеводородных газов Чаунской впадины и Айонского осадочного бассейна Восточно-Сибирского моря. *Тихоокеанская геология*, 39(1): 92–101. DOI:10.30911/0207-4028-2020-39-1-92-101

### Об авторе

**Мишукова Галина Ивановна** (<https://orcid.org/0000-0003-1820-6069>), кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН (ТОИ ДВО РАН), Владивосток, gmishukova@poi.dvo.ru

Поступила 13.11.2023

Принята к публикации 12.01.2024