

ПОТОКИ МЕТАНА НА ГРАНИЦЕ ВОДА—АТМОСФЕРА И ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Г.И. Мишукова, А.В. Яцук, Р.Б. Шакиров, Н.С. Сырбу, М.Г. Валитов,
А.Л. Пономарева, О.В. Мишукова

*¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия*

Приведены результаты комплексных исследований пространственного распределения потоков метана в районе северного замыкания Центральной котловины Японского моря и в южной части Татарского трога. Установлено, что на изученной акватории происходит эмиссия метана, при этом значения потоков отличаются неравномерным распределением по площади от 1 до 23 моль/(км²·сут). Дискретные измерения с большой частотой и расчет потоков метана на границе вода—атмосфера в сочетании с изучением содержания природных газов и микробиологических показателей в кернах осадков позволяют объяснить формирование локальных зон эмиссии метана с акватории. Несмотря на достаточно большие глубины моря, в данном районе существуют источники и флюидопроводящие зоны, определяющие концентрации метана, превышающие равновесные с атмосферой и повышенную эмиссию метана с акватории. Полученные данные дают новую информацию и позволяют предположить наличие глубинных газоматеринских источников в изучаемом районе, которые обуславливают ареалы рассеивания газов в донных осадках, содержания метана в поверхностном слое воды и распределение потоков метана на границе вода—атмосфера. Исследование является частью комплексной программы геолого-геофизических экспедиционных исследований ТОИ ДВО РАН в северной части Японского моря.

Потоки метана на границе вода—атмосфера, углеводородные газы, микробиологические показатели, донные осадки, Японское море

METHANE FLUXES AT THE WATER–ATMOSPHERE INTERFACE AND GAS-GEOCHEMICAL ANOMALIES IN THE BOTTOM SEDIMENTS IN THE NORTHWESTERN PART OF THE SEA OF JAPAN

G.I. Mishukova, A.V. Yatsuk, R.B. Shakirov, N.S. Syrbu, M.G. Valitov, A.L. Ponomareva, O.V. Mishukova

We present results of an integrated research into the spatial distribution of methane in the area of the northern closure of the Central Basin of the Sea of Japan and in the southern part of the Tatar Trough. Methane emissions have been revealed in the study area. The methane fluxes are distributed unevenly within the area (1 to 23 mol/(km² · day)). The discrete high-frequency measurements and calculation of methane fluxes at the water–atmosphere interface, combined with the study of the content of natural gases and microbiologic parameters in sediment cores, allow us to explain the formation of local methane emission zones in the water area. Despite the great sea depths, there are sources and fluid-conducting zones that determine methane concentrations (exceeding the equilibrium ones) and high methane emissions from the water area. The data obtained provide new information and suggest the presence of deep gas sources, which determine gas dispersion in the bottom sediments, the methane content in the surface water layer, and the distribution of methane flows at the water–atmosphere interface in the study area. This study is part of the integrated program of geological and geophysical expeditionary research performed by V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute (Vladivostok) in the northern part of the Sea of Japan.

Methane fluxes at the water–atmosphere interface, hydrocarbon gases, microbiologic parameters, bottom sediments, Sea of Japan

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время дискуссия о роли метана как наиболее чувствительном индикаторе эволюционных процессов изменения климата остается одной из наиболее обсуждаемых тем в океанологических науках. Сведения о величине потока метана в атмосферу крайне противоречивы. Рассматриваются модели от незначительной эмиссии до взрывного выброса, влекущего глобальную катастрофу. Данные о динамике потока метана ограничены и мало что известно о факторах, его контролирующих [Шакиров

и др., 2020б]. Вклады океанов в глобальную эмиссию метана в атмосферу остаются весьма неопределенными. Различными исследованиями признается, что открытые океаны представляют собой источник метана в атмосферу от 0.005 до 3 % глобальной продукции метана [Conrad, Seiler, 1988], хотя лежащий в основе механизм производства метана остается неясным. По некоторым оценкам, поток метана с акватории Мирового океана в атмосферу составляет 6 млн т CH_4 в год на площади океана ($36 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$) при среднем потоке метана в атмосферу 2.5 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) [Watanabe et al., 1995].

По другим оценкам, глобальная морская эмиссия метана лежит в диапазоне от 11 до 18 млн т/год [Bange et al., 1994] или от 5 до 25 млн т/год [Saunio et al., 2016], или от 6 до 12 млн т/год [Weber et al., 2019]. Эстуарии и континентальные шельфы получают большое количество органического вещества и питательных веществ из рек, создавая условия, благоприятные для метаногенеза в донных отложениях и в водной толще [Tsurushima et al., 1996; Tseng et al., 2017] и являются более интенсивным источником метана в атмосферу по сравнению с открытым океаном. На шельфовые районы приходится около 75 % глобального морского потока [Bange et al., 1994]. На акваториях окраинных морей востока Азии и прилегающей северо-западной части Тихого океана потоки метана изменяются в широких пределах как по площади моря, так и во времени: от поглощения -6 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) до эмиссии 500 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) [Мишукова и др., 2007, 2011, 2017; Мишукова, Шакиров, 2017; Обжиров и др., 2016; Шакиров, Мишукова, 2019; Shakirov et al., 2019; Шакиров и др., 2020а]. На величину и направление потока метана на границе раздела вода—атмосфера влияют многие процессы: наличие и активность подводных источников метана, состояние поверхности моря, процессы вертикального и горизонтального перемешивания, сейсмическая активность района, загрязнение моря нефтепродуктами, дампинг грунтов. Однако какой из этих процессов является доминирующим выявить сложно, а порой и невозможно. Для исследования изменчивости и определения границ предлагается использовать 10 градаций значений потоков (моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$)): сильный сток от -6 до -1 ; слабый сток от -1 до -0.01 ; равновесие от -0.01 до 0.01 ; эмиссия слабой интенсивности 0.01 — 1.00 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$); эмиссия умеренной интенсивности 1 — 4 ; эмиссия средней интенсивности 4 — 10 ; эмиссия высокой интенсивности 10 — 20 ; эмиссия очень высокой интенсивности 20 — 30 ; эмиссия аномальной интенсивности 50 — 150 ; ураганные значения 150 — 500 [Легкодимов и др., 2019].

Эмиссия ураганных значений до 500 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) наблюдалась на газоносном юго-западном шельфе и газогидратоносном склоне о. Сахалин в северной части Японского моря [Shakirov et al., 2019; Шакиров и др., 2020а]. Районирование распределения потоков метана на поверхности акватории Охотского моря показало, что эмиссия до ураганных значений 220 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) наблюдается над нефтегазоносными структурами и подводными скоплениями гидратов метана на северо-восточном склоне о. Сахалин [Мишукова и др., 2017]. В западной части Курильской котловины в зоне ее сочленения с зал. Терпения (Охотское море) эмиссия метана в атмосферу достигает не меньших значений, чем на нефтегазоносном северо-восточном шельфе и склоне о. Сахалин (222 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$)). Локальные области эмиссии высокой и аномальной интенсивности проявлены в глубоководных районах центральной части Охотского моря (до 110 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$)) и на акватории Курильской котловины (до 10 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$)) [Мишукова и др., 2010, 2017; Мишукова, Шакиров, 2017]. При этом как в пелагических водах, так и в шельфовых районах Охотского и Японского морей может наблюдаться сильный и слабый сток от -6 до -1 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) [Мишукова и др., 2007, 2009, 2013; Легкодимов и др., 2019; Шакиров и др., 2020а]. Высокую временную изменчивость потоков метана с поверхности моря обуславливает сейсмическая активность. В работе [Мишукова и др., 2011] показано, что район эпицентра землетрясения может выступать в роли источника метана в морскую среду. В Охотском и Японском морях обнаружены участки струйного выделения метана [Саломатин, Юсупов, 2011]. На западном склоне Курильской котловины на НИС «Академик М.А. Лаврентьев», рейс 59, в точке с координатами $46^{\circ}02.0$ с.ш., $144^{\circ}15.2$ в.д. был обнаружен газовый факел высотой около 2000 м, источником которого предположительно является грязевой вулкан [Обжиров и др., 2018]. В январе 2011 г. в точке, где фиксировался факел, произошло землетрясение [U.S. Geological Survey..., 2011]. Ураганные значения потока метана (187 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$)) над этим участком сохранялись и в 2016 г., указывая на долгоживущий канал газовой эмиссии, формирующий комбинированное неустойчивое аномальное поле метана в водной толще [Мишукова, Шакиров, 2017]. На акватории Охотского моря локальные области с ураганными значениями потока метана отмечались на западном склоне и западнее п-ова Шмидта (200 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$)), севернее Сахалинского залива (более 300 моль/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$)) [Мишукова, Шакиров, 2017]. В этих же районах перед выполнением экспедиционных работ было зарегистрировано два землетрясения 18 июня и 27 июня 2008 г. [U.S. Geological Survey..., 2008].

Предыдущими исследованиями [Мишукова и др., 2011; Vereshchagina et al., 2013; Обжиров и др., 2016] установлено, что в разные годы и различные сезоны на акватории северо-западной части Японского моря от траверза о. Монерон до северного замыкания Центральной котловины существуют локальные области с повышенным потоком метана с поверхности моря (более, чем эмиссия умеренной

интенсивности) как в шельфовой, так и в глубоководной зоне. Газогеохимическая изученность комплексного распределения природных газов в донных осадках и водной толще в представленном районе акватории до 2018 г. была крайне низкая: семь станций рейса LV51 на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (август 2010 г.) и одна станция LV32 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (октябрь 2003 г.). Ввиду очень небольшого количества и несистематического отбора проб воды и донных осадков источники метана и механизмы переноса в водной толще и осадках для глубоководных акваторий на сегодняшний день остаются слабоизученными.

Цель работы — изучение пространственного распределения потоков метана на границе вода—атмосфера, рассчитанных на основе экспериментальных данных в весенний сезон.

Задача работы — выявленные зоны устойчивой эмиссии метана в атмосферу сопоставить с аномальными полями углеводородных газов в донных отложениях, выступающих потенциальными региональными источниками метана и влияющими на его поток с акватории.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение распределения потоков метана проводилось на акватории северо-западной части Японского моря по данным, полученным лабораторией газогеохимии ТОИ ДВО РАН в научно-исследовательских морских экспедициях НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV81), май 2018 г. и НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV85), май—июнь 2019 г. К обсуждению привлечены результаты рейсов НИС «Академик М.А. Лаврентьев», май—июнь 2011 г. (LV54); НИС «Академик М.А. Лаврентьев», август 2010 г. (LV51); НИС «Академик М.А. Лаврентьев», сентябрь—октябрь 2010 г. (LV52).

Отбор проб, их подготовка и аналитические исследования проводились согласно сертифицированной методике, принятой в лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН (Свидетельство Росстандарта № 41 к паспорту лаборатории ПС 1.047–18).

Карта фактического материала и схема расположения исследуемого района представлены на рис. 1.

Краткая характеристика района исследования

Исследуемый район расположен в северной части Японского моря, от траверза о. Монерон на севере до северного замыкания Центральной глубоководной котловины на юге [Берсенева и др., 1987; Безверхний и др., 1988]. Южная граница исследуемой акватории лежит в области распространения в Японском море земной коры океанического типа, в пределах которой процессы растяжения, обусловленные рифтогенезом, приобрели экстремальный характер и привели к разрыву ранее существовавшей здесь континентальной окраины. В результате чего на относительно небольшом расстоянии наблюдается переход от зрелого континента к молодой океанической коре с постепенным исчезновением или коренной переработкой сиалической оболочки [Кулинич, Валитов, 2011]. Откуда следует, что рассматриваемый район расположен в зоне высокой тектонической раздробленности, что позволяет предположить здесь активность тектонических процессов, сформировавших зоны флюидопроницаемости.

Южная часть района исследования (полигон 1) имеет сложное геоморфологическое строение. Она расположена в районе сочленения северного замыкания Центральной котловины Японского моря с южной оконечностью Татарского трога.

Границу северного замыкания Центральной котловины формируют три относительно крупные возвышенности с «субконтинентальным» типом земной коры — Витязя, Алпатова и Лаврентьева. Абиссальная равнина северного замыкания Центральной котловины осложнена четырьмя подводными горами вулканического происхождения, которым в рейсе LV81 дали название: Ольга, Владимир, Брат-1 и Брат-2 [Валитов и др., 2019].

На возвышенности Ольга на станции LV81-04GC (43° 48.872' с.ш., 137° 25.802' в.д.; глубина 3000—3200 м) были подняты при драгировании слаболитифицированные осадочные породы, характеризующиеся высокими содержаниями железа (6.3—9.3 %), марганца (0.43—3.46 %) и фосфора (0.15—1.42 %) [Валитов и др., 2019]. Для этой части акватории в осадочных ядрах регистрируются значительные количества железа (более 10 % обнаружено в ядре станции LV81-15GC). Максимальные концентрации марганца наблюдаются в нижних горизонтах осадочного ядра LV81-01GC [Валитов и др., 2019]. Кроме того, в этих районах выявлены высокие содержания серы в донных отложениях, которые могут быть индикаторами зон миграции углеводородов [Максеев и др., 2020]. В. М. Никифоров с соавторами [2013], изучив характеристику электромагнитных данных, предполагают, что в Японском море по каналам с низким сопротивлением проходят флюидо-газовые потоки, в том числе, возможно, метана из глубоких горизонтов пород.

Полигон 2 находится в южной части Татарского трога. Зона представляет собой район с интенсивной деструкцией коры, разбита на блоки и осложнена субвертикальными геологическими телами — индикаторами локальной флюидодинамической активности [Харахинов, 2010]. В районе исследований выявлены многочисленные зоны газонасыщенных осадков (chimney) [Operation Report..., 2013].

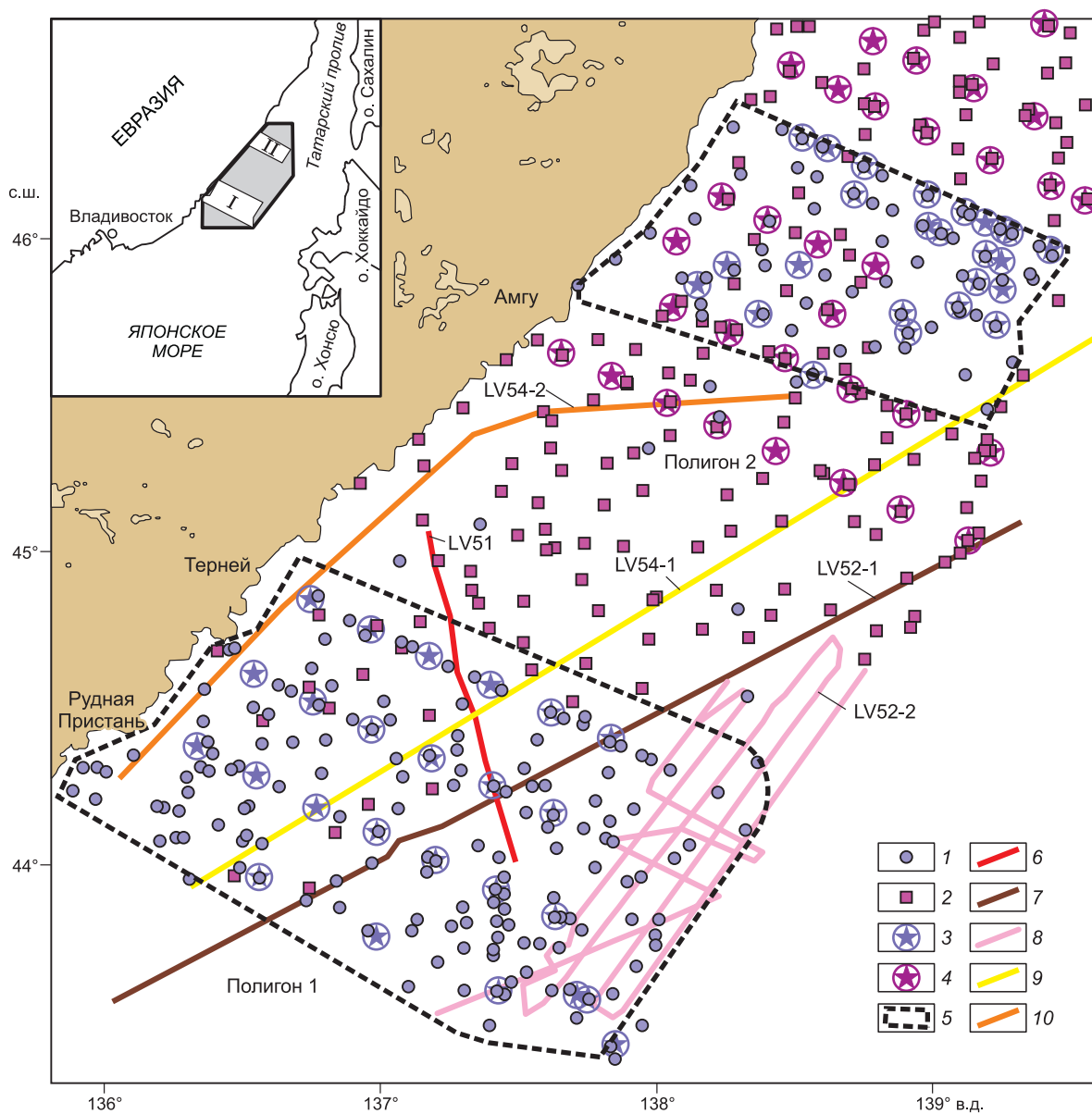


Рис. 1. Карта фактического материала по данным рейсов НИС «Академик М.А. Лаврентьев».

Станции отбора проб воды: 1 — в рейсе LV81, 2 — в рейсе LV85; станции отбора проб донных осадков: 3 — в рейсе LV81, 4 — в рейсе LV85; 5 — границы полигонов работ в рейсе LV81 и их номера; маршруты экспедиций: 6 — LV51, август 2010 г.; 7 — LV52-1, сентябрь 2010 г.; 8 — LV52-2, октябрь 2010 г.; 9 — LV54-1, май 2011 г.; 10 — LV54-2, июнь 2011 г. На врезке показано расположение исследуемой акватории.

Методика отбора проб воды

Отбор проб морской воды для определения концентрации метана с дискретностью 1—2 ч осуществлялся по ходу движения судна с помощью судового заборного устройства на глубине 4 м от поверхности моря. Воду отбирали в стеклянные емкости 68—100 мл. Склянки герметично закрывали. Для создания газовой фазы напускалось 12 мл гелия. Пробы встряхивали на перемешивающем устройстве LS-110, в результате чего в системе устанавливалось равновесие между жидкой и газовой фазами. После перемешивания шприцем отбирали аликвоту газовой фазы для последующего анализа. Всего отобрано и проанализировано 583 пробы, из них в рейсе LV81 — 246 проб, в рейсе LV85 — 337 проб.

Расчет концентраций метана, гелия, водорода, растворенных в морской воде, производился по методике [Yamamoto et al., 1976] в модификации [Wiesenburg, Guinasso, 1979] с использованием констант растворимости.

Методика отбора проб осадков

По результатам рейсов LV81 и LV85 было отобрано 118 кернов осадочных отложений. Из них в статье более детально будут рассмотрены 10 станций геологического опробования.

Отбор и анализ донных осадков осуществлялся по методике морских газогеохимических исследований лаборатории газогеохимии [Operation Report..., 2013, 2014]. Для опробования донных осадков использовался гидростатический пробоотборник длиной 550 или 350 см. Анализ газов в донных осадках осуществлялся по методу «Headspace». Всего в двух рейсах обработано 1212 проб.

Отбор осадка для определения He и H₂ проводился шприцами объемом 20 мл с обрезанными носиками в склянки 120 мл, заполненные насыщенным раствором NaCl. Шаг отбора 50 см. Газовая фаза — воздух (12 мл). Всего в двух рейсах отобрано 606 проб.

Методика анализа проб воды и донных осадков

Для хроматографического анализа газового состава углеводородных и неорганических газов на борту судна использовался хроматограф «Кристалл-Люкс 4000М» (ООО «НПФ «Мета-хром», г. Йошкар-Ола), снабженный пламенно-ионизационным детектором и двумя детекторами по теплопроводности, газ-носитель — гелий. Для анализа гелия и водорода применялся хроматограф «Хроматэк-Газохром 2000» (ОАО «Хроматек», г. Йошкар-Ола) с датчиками теплопроводности повышенной чувствительности (1—2 ppm по гелию и водороду), газ-носитель — аргон. Концентрации метана, гелия, водорода, углеводородных газов (УВГ), диоксида углерода в осадке приводятся в ppm ($1 \cdot 10^{-4}$ %).

Для проведения молекулярно-биологических исследований донных отложений отбирали поверхностный слой керна, а также по всей длине с шагом 50 см с учетом слоев с различным цветом, запахом и консистенцией. Проводился учет микробиологических сообществ: анаэробных, микроаэрофильных и аэробных бактерий. Оценивали интенсивность аэробной и анаэробной деструкции, баланса метаногенез/метанотрофия, сульфатредукции, азотфиксации, нитри- и денитрификации.

Методика расчета потоков метана на границе раздела вода—атмосфера

Потоки метана с поверхности моря были рассчитаны для каждой точки отбора проб по экспериментальным данным концентраций растворенного метана, температуры, солености в поверхностном слое морской воды, содержания метана в приводном слое атмосферы и реальных скоростях ветра на момент отбора проб. Для непрерывных метеорологических измерений использовали портативную метеостанцию Davis Vantage Pro2 (USA). Непрерывные гидрологические измерения температуры и солености поверхностного слоя воды осуществляли с помощью термосолинографа SBE45 (USA). Расчет потоков метана проводился по методологии, описанной в работах [Mischoukov, Mishukova, 1999; Мишукова и др., 2007; Vereshchagina et al., 2013].

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

где $\Delta C = C_{\text{изм}} - C_{\text{равн}}$ — разность между измеренной концентрацией метана и равновесной;

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

где $K^{\text{общ}}$ — суммарный коэффициент газообмена на границе вода—воздух; K_T — термический коэффициент газообмена; K_o — коэффициент газообмена для обрушений волн; K_n — коэффициент газообмена для схлопывания пузырьков.

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

$$N = (\Delta C / C_{\text{равн}}) \times 100. \quad (3)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Потоки метана на границе раздела вода—атмосфера

На рисунке 2 приведено распределение потоков метана на границе раздела вода—атмосфера на изучаемой акватории для двух рейсов НИС «Академик М.А. Лаврентьев» LV81, май 2018 г. и LV85, май—июнь 2019 г.

На всей изучаемой акватории наблюдается эмиссия метана из воды в атмосферу. Значения потоков отличаются неравномерным распределением по площади от 1 до 23 моль/(км²·сут): от 1 до 14 моль/(км²·сут) в 2018 г. и от 2 до 23 моль/(км²·сут) 2019 г. По предложенной нами градации [Легкодимов и др., 2019] среднее значение потока 3.8 ± 2.8 моль/(км²·сут) (LV81) и 3.4 ± 2.6 моль/(км²·сут) (LV85) относится к эмиссии умеренной интенсивности. Для глубоководных районов восточной части

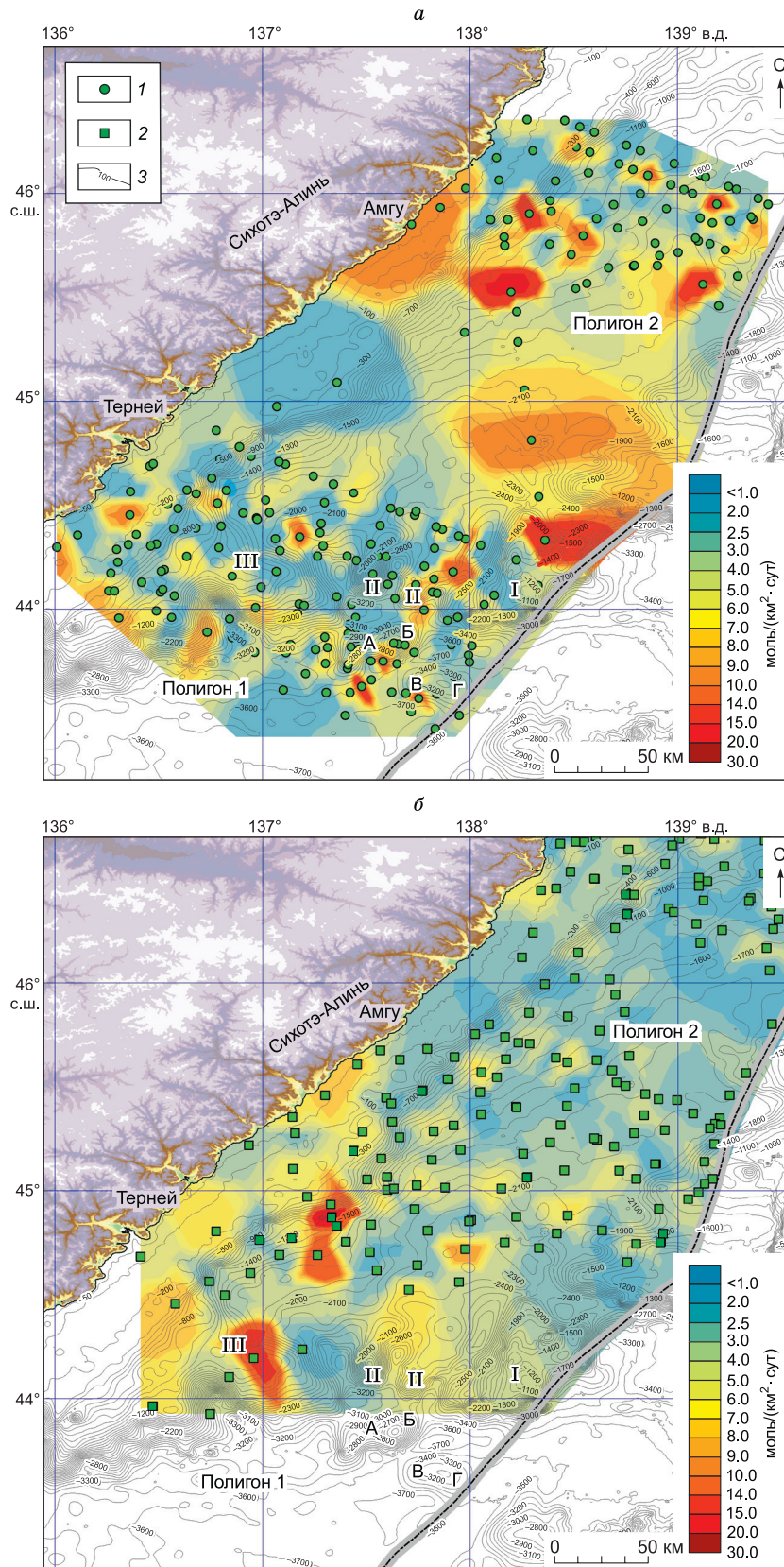


Рис. 2. Карты распределения потоков метана на границе вода—атмосфера на акватории северо-западной части Японского моря НИС «Академик М.А. Лаврентьев»:

а — LV81, май 2018 г.; *б* — LV85, май-июнь 2019 г. 1 — станции отбора проб воды, LV81; 2 — станции отбора проб воды, LV85; 3 — изобаты (м). Подводные возвышенности: I — Витязя, II — Аллатова, III — Лаврентьева. Вулканические постройки (горы): А — Ольги, Б — Владимира, В — Брат-1 и Г — Брат-2. Здесь и на рис. 4, 5: жирный пунктир на сером фоне — ограничительная линия полигонов отбора проб, мористее ее пробы не отбирались.

Японского моря поток метана в атмосферу, приведенный в работе [Gamo et al., 2012], составлял 2.6 ± 1.9 моль/(км²·сут). К этому же рангу можно отнести пелагические районы северо-восточной части Тихого океана (средний поток метана в атмосферу составил 2.9 моль/(км²·сут) [Lamontagne et al., 1973]), акваторию северо-восточной тропической части Тихого океана, потоки метана море—воздух для олиготрофных вод которой изменялись от 0.9 до 3.5 моль/(км²·сут) [Tilbrook, Karl, 1995], и акваторию западной части Тихого океана по разрезу вдоль 165° в.д. от 34° ю.ш. до 40° с.ш. [Watanabe et al., 1995]. Поток на профиле Тихого океана, рассчитанный для каждой станции по данным [Watanabe et al., 1995] и изложенный в работе [Мишукова и др., 2007], изменялся в диапазоне от 0.3 до 4.7 моль/(км²·сут). Среднее значение эмиссии метана с северо-западной акватории Японского моря весной 2018 и 2019 гг. 3.8 ± 2.8 моль/(км²·сут) почти в 4 раза ниже среднего значения для Желтого моря 15.6 ± 5.5 моль/(км²·сут) [Lee et al., 2018]. Кроме эмиссии умеренной интенсивности (от 1 до 4 моль/(км²·сут)) на изучаемой акватории можно выделить локальные участки средней интенсивности от 4 до 10 моль/(км²·сут) и несколько участков с эмиссией высокой интенсивности от 10 до 23 моль/(км²·сут). В шельфовой области потоки с наивысшими значениями до 11—13 моль/(км²·сут) наблюдаются около Рудной пристани и Амгу. В глубоководной части моря фиксируются потоки метана высокой интенсивности: на полигоне 1 до 13 моль/(км²·сут) (LV81) и до 23 моль/(км²·сут) (LV85), на полигоне 2 до 14 моль/(км²·сут) (LV81).

Отчетливо проявляется совпадение локальных зон повышенных потоков метана с акватории с высокими концентрациями метана в поверхностном 4-метровом водном слое. Локальные зоны с повышенными концентрациями метана находятся как в западных шельфовых областях, так и в глубоководных частях полигонов. Измеренные концентрации метана в районе исследований изменялись от 4.2 до 7.3 нмоль/л при средней 5.2 ± 0.3 нмоль/л в 2018 г. и от 4.8 до 28.8 нмоль/л при средней 6.3 ± 2.1 нмоль/л в 2019 г. Весной 2018 и 2019 гг. уровни концентрации метана в поверхностном водном слое были выше, чем для восточной части Японского моря (от 2.6 до 3.8 нмоль/л), по данным японских исследователей [Gamo et al., 2012], а также для открытых вод Японского моря (от 1.6 до 2.2 нмоль/л) [Мишукова и др., 2007] и для западной части Японского моря (от 2.3 до 3.0 нмоль/л) [Vereshchagina et al., 2013].

Изменение содержания метана в поверхностном слое морской воды вызывает неоднородное распределение потоков метана на границе вода—атмосфера, причем этот процесс в значительной мере зависит от степени пересыщения метаном. Низкие значения температуры поверхностного водного слоя в весенний сезон (от 3.2 до 9.0 °С в 2018 г. и от 5.4 до 13.0 °С в 2019 г.) в сочетании с высокими концентрациями метана в приводном слое атмосферы (от 1.84 до 1.92 ppm) обусловили высокие значения равновесных концентраций: от 2.8 до 3.4 нмоль/л. В 2018 и 2019 гг. на всей изучаемой акватории разность между измеренными и равновесными значениями метана была положительная (ΔC) и составила от 1.0 до 4.0 нмоль/л со средним значением 2.0 ± 0.6 нмоль/л в 2018; от 1.8 до 25.8 нмоль/л со средним значением 3.4 ± 2.1 нмоль/л в 2019 г. Степень пересыщения поверхностных вод метаном относительно его равновесных с атмосферой значений изменялась от 33 до 130 % при среднем значении 65 ± 19 % в 2018 г. и от 56 до 886 % при среднем значении 114 ± 71 % в 2019 г.

Через исследуемую акваторию, включая район подводной возвышенности Витязя, проходили маршруты НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV54-1) в мае и (LV54-2) в июне 2011 г.; НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV51) в августе 2010 г.; НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV52-1) в сентябре и в октябре 2010 г. (LV52-2). Потоки метана для исследуемой акватории, содержание метана в водном слое и атмосфере, температура и соленость воды в различные сезоны отличаются изменчивостью. В целом весной и осенью потоки выше, чем летом. При этом отчетливо выделяются локальные участки с повышенными значениями [Mishukova et al., 2019]. На рисунке 3 представлено распределение равновесных концентраций метана относительно его содержания в атмосфере и потоков метана на границе раздела вода—атмосфера для нескольких рейсов НИС «Академик М.А. Лаврентьев», проведенных в различные сезоны. В весенний сезон была осуществлена детальная площадная съемка 2018 г. (LV81-1, LV81-2) и 2019 г. (LV85). В мае и июне 2011 г. равновесные значения и поток были рассчитаны по двум траекториям (LV54-1, LV54-2). В летний сезон (август) 2010 г. на данной акватории равновесные значения и поток были рассчитаны для семи станций по профилю от бровки шельфа (на траверзе п. Терней) в направлении абиссали (250—3360 м) между возвышенностью Лаврентьева и Алпатова (LV51). В осенний сезон (сентябрь, октябрь) 2010 г. в восточной части изучаемой акватории равновесные значения и поток были рассчитаны по ходу движения судна (LV52-1) и по результатам площадной съемки над возвышенностью Витязя (LV52-2), маршруты следования судов показаны на рис. 1.

Самые высокие значения равновесных концентраций метана относительно его содержания в атмосфере от 2.9 до 3.4 нмоль/л; от 2.8 до 3.4 нмоль/л наблюдались в мае—июне 2018 и 2019 гг. соответственно. В мае 2011 г. (LV54-1) и июне 2011 г. (LV54-2) равновесные концентрации были немного ниже и изменялись в меньшем диапазоне (от 2.8 до 3.0 нмоль/л, средняя 2.9 нмоль/л). В августе 2010 г. (LV51) равновесные концентрации метана были значительно ниже и составляли 2.3—2.4 нмоль/л. Самые низ-

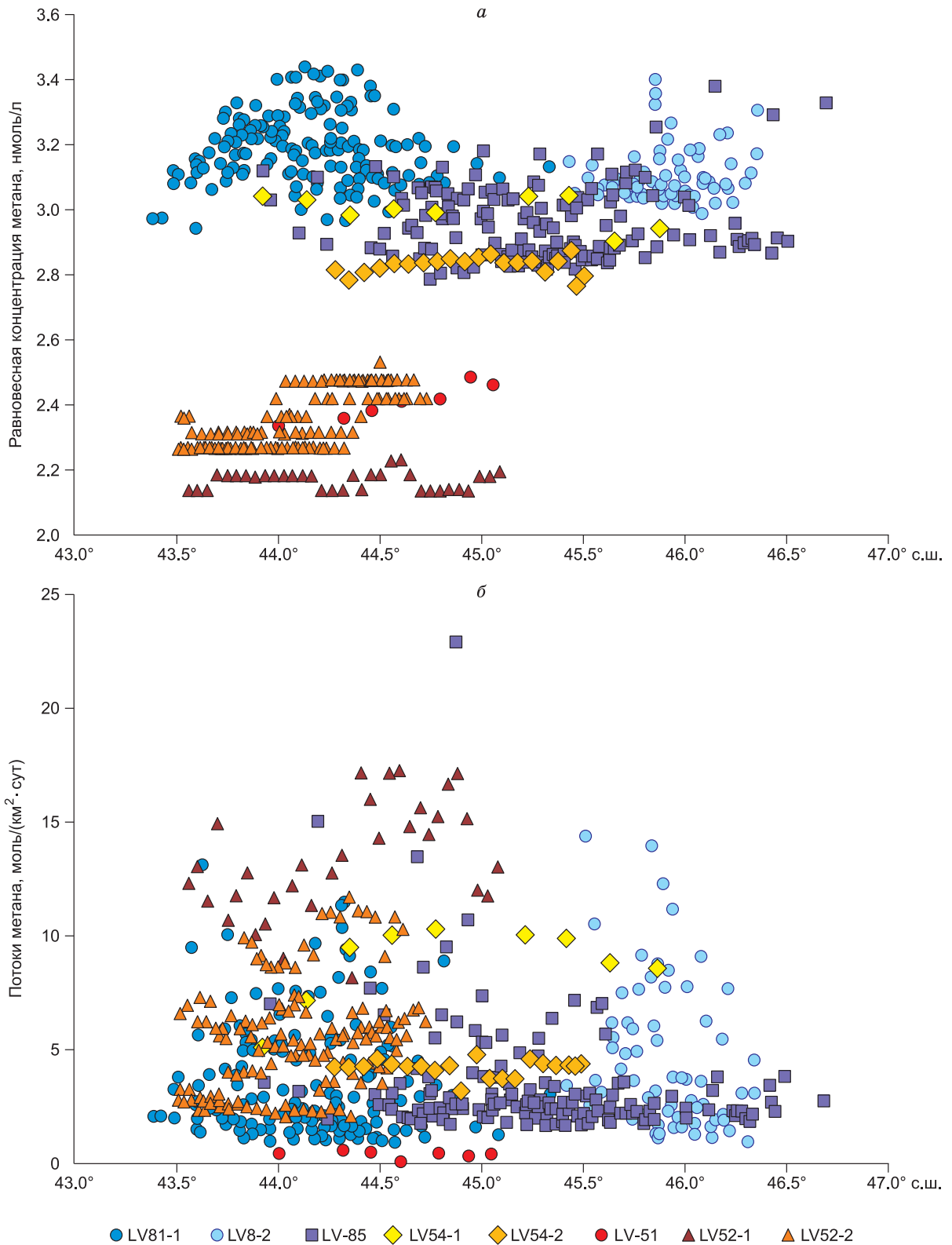


Рис. 3. Графики распределений:

a — равновесных значений концентраций метана (нмоль/л) и *б* — потоков метана с морской поверхности (моль/(км²·сут)), по данным многолетних измерений.

кие и однородные значения равновесных концентраций метана относительно его содержания в атмосфере от 2.1 до 2.2 нмоль/л наблюдались в сентябре 2010 г. (LV52-1), в октябре 2010 г. они были немного выше — от 2.2 до 2.5 нмоль/л (LV52-2).

Распределение потоков имеет более сложный характер. Среднее значение для весны 2018 г. и 2019 г. было ниже, чем отмечено в статье для мая—июня 2011 г. (LV54) среднее 6.0 ± 2.4 моль/(км²·сут); диапазон составлял от 3 до 10 моль/(км²·сут); в сентябре—октябре 2010 г. (LV52) среднее значение 7.0 ± 3.9 моль/(км²·сут); диапазон составлял от 2 до 17 моль/(км²·сут) [Обжиров и др., 2016], но выше, чем отмечено для августа 2010 г. (LV51) среднее значение 0.4 ± 0.1 моль/(км²·сут); диапазон составлял от 0 до 1 моль/(км²·сут) [Vereshchagina et al., 2013]. В мае 2011 г. маршрут НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV54-1) проходил через центральную часть полигона 1 и восточнее полигона 2. Потоки метана весной 2011 г. по предложенной градации относятся к умеренной эмиссии (средний поток составлял 9 моль/(км²·сут), максимальный — 10 моль/(км²·сут), минимальный — 5 моль/(км²·сут)). В июне 2011 г. обратный маршрут (LV54-2) проходил восточнее полигона 2 и через западную часть полигона 1 вдоль побережья Приморского края. Максимальные потоки составляли до 5 моль/(км²·сут), средний поток составлял 4 моль/(км²·сут), минимальный — 3 моль/(км²·сут). Таким образом самые низкие потоки метана на границе вода—атмосфера были зафиксированы для августа 2010 г. (LV51).

Временная изменчивость потоков связана с сезонными изменениями гидрологических и гидрохимических параметров морской воды и структурой течений в исследуемом регионе. Обычно для открытых вод Японского моря (при глубине моря более 1000 м) значения концентраций метана в поверхностном слое воды изменяются в относительно небольшом диапазоне, а концентрация в пелагических подповерхностных слоях воды, как правило, меньше, чем в прибрежной части [Мишукова и др., 2007; Gamo et al., 2012; Vereshchagina et al., 2013]. На континентальном шельфе и склоне происходит вынос метана из донных осадков и образуются зоны повышенной концентрации в придонных слоях, которые за счет адвекции обуславливают формирование слоя с повышенным содержанием метана на промежуточных горизонтах. Высокие скорости приливоотливных течений приводят к быстрому горизонтальному перемещению образовавшегося слоя с повышенным содержанием метана на большие расстояния от места его формирования, объясняя наблюдаемую картину неоднородного послойного распределения метана и формирование горизонтальных слоев, обогащенных растворенным метаном в открытых районах моря [Мишукова и др., 2007, 2010, 2015]. На распределение метана в водной толще и его выход в атмосферу влияет стратификация воды, которая ограничивает вертикальную вихревую диффузию метана в поверхностный перемешанный слой [Мишукова и др., 2015]. В работе [Мишукова и др., 2007] показано, что при летней модификации воды и усилении стратификации поток метана с поверхности моря снижается, растворенный метан начинает переноситься и накапливаться в промежуточных слоях. В осенний период наблюдается повышенная эмиссия метана в атмосферу, обусловленная влиянием конвективного перемешивания морской воды [Мишукова и др., 2007, 2015; Обжиров и др., 2019].

В сентябре 2010 г. (LV52-1) потоки высокой интенсивности до 17 моль/(км²·сут) наблюдались на участке при движении от Владивостока в Охотское море вдоль побережья Приморского края, маршрут проходил через центральную часть полигона 1. Отчетливо выделяется участок с повышенными потоками метана до 17 моль/(км²·сут) (средний поток составлял 13 моль/(км²·сут), минимальный 8 моль/(км²·сут)). При обратном движении в октябре 2010 г. (LV52-2) был выполнен полигон на акватории возвышенности Витязь. Максимальные потоки фиксировались до 12 моль/(км²·сут), средний поток составлял 6 моль/(км²·сут), минимальный 2 моль/(км²·сут). Высокие температуры моря в сентябре и октябре 20.3 и 16.4 °С и значительные скорости ветров 5 и 8 м/с соответственно вызвали интенсивное выделение метана в атмосферу из морской воды, причем потоки метана на маршруте ближе к берегу (LV52-1) были значительно выше, чем в районе возвышенности Витязь (LV52-2).

Таким образом, сезонная изменчивость не вполне описывает наблюдаемое нами неоднородное распределение потоков метана с акватории. В связи с этим предполагается, что локальные области повышенной эмиссии метана могут быть обусловлены комплексом геологических факторов, к которым относятся наличие газоматеринских источников, глубинных разломов, вулканизм, сейсмичность, магматическая деятельность и тектоника.

Газогеохимические исследования донных отложений

На рисунках 4 и 5 приведено распределение метана для всех станций отбора проб осадка (см. рис. 1) для двух опорных горизонтов — в поверхностном слое осадков 0—15 см (см. рис. 4) и в нижнем горизонте опробования (>150 см) (см. рис. 5) (рейсы LV81, LV85).

Исследования показали, что пространственное распределение метана и его гомологов неоднородно как по площади, так и в вертикальном разрезе колонок (см. рис. 4—6). По данным предыдущих работ установлено, что для поверхностного слоя (0—15 см) донных осадков северной части Татарского трога (Южно-Татарский осадочный бассейн, Японского моря) значение регионального фонового показателя

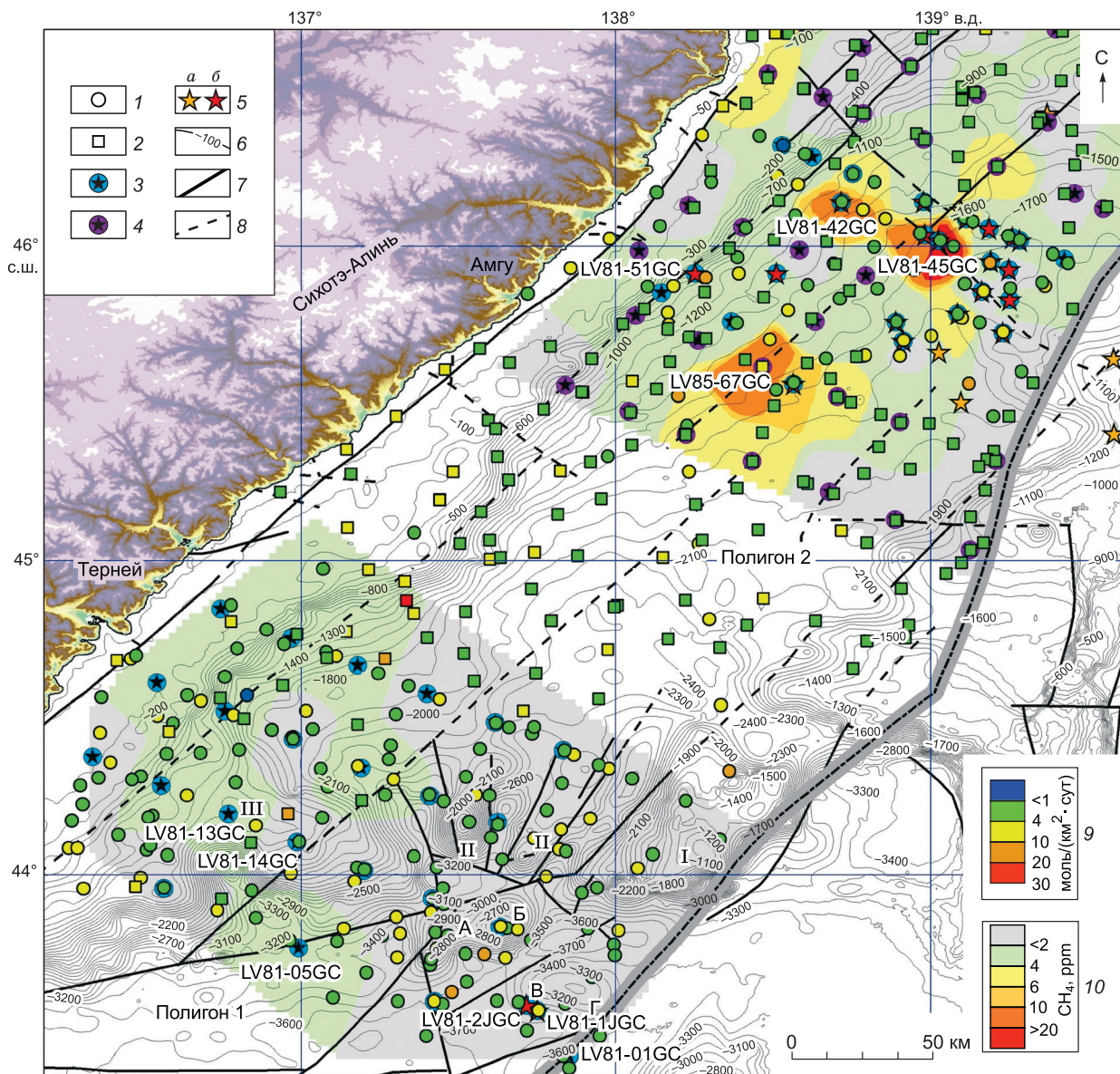


Рис. 4. Карты распределения концентрации метана в поверхностном слое осадков (0—15 см) и потоки метана на границе вода—атмосфера.

1 — станции отбора проб воды в рейсе LV81; 2 — станции отбора проб воды в рейсе LV85; 3 — станции отбора проб донных осадков в рейсе LV81; 4 — станции отбора проб донных осадков в рейсе LV85; 5 — газофлюидные аномалии осадочного чехла по данным: а — рейса LV81, б — литературные данные [Харахинов, 2010]; 6 — изобаты (м) [GEBCO..., 2019]; 7 — установленные глубинные разломы; 8 — предполагаемые глубинные разломы [Государственная..., 1994, 2011]; 9 — поток метана на границе вода—атмосфера (градация приведена для всех станций); 10 — распределение метана в донных осадках (градация приведена для всех станций). Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.

концентраций метана не превышает 5.2 ppm [Yatsuk et al., 2019]. Фоновые содержания водорода в газах донных отложений Южно-Татарского осадочного бассейна составляют 5.4 ppm, а гелия — 5.6 ppm [Шакиров и др., 2016]. На данные показатели можно ориентироваться в оценке интенсивности проявления газогеохимических полей с учетом того, что для более глубоководных районов Японского моря фоновая концентрация природных газов может быть меньше.

Стоит отметить, что детальный анализ газогеохимических особенностей распределения УВГ в донных осадках района исследований будет рассмотрен в отдельной статье. В рамках данной работы представлены 10 колонок осадков с аномальным и повышенным содержанием УВГ, He, H₂ и проведено сопоставление с параметрами эмиссии метана в атмосферу (таблица). Выбранные станции можно от-

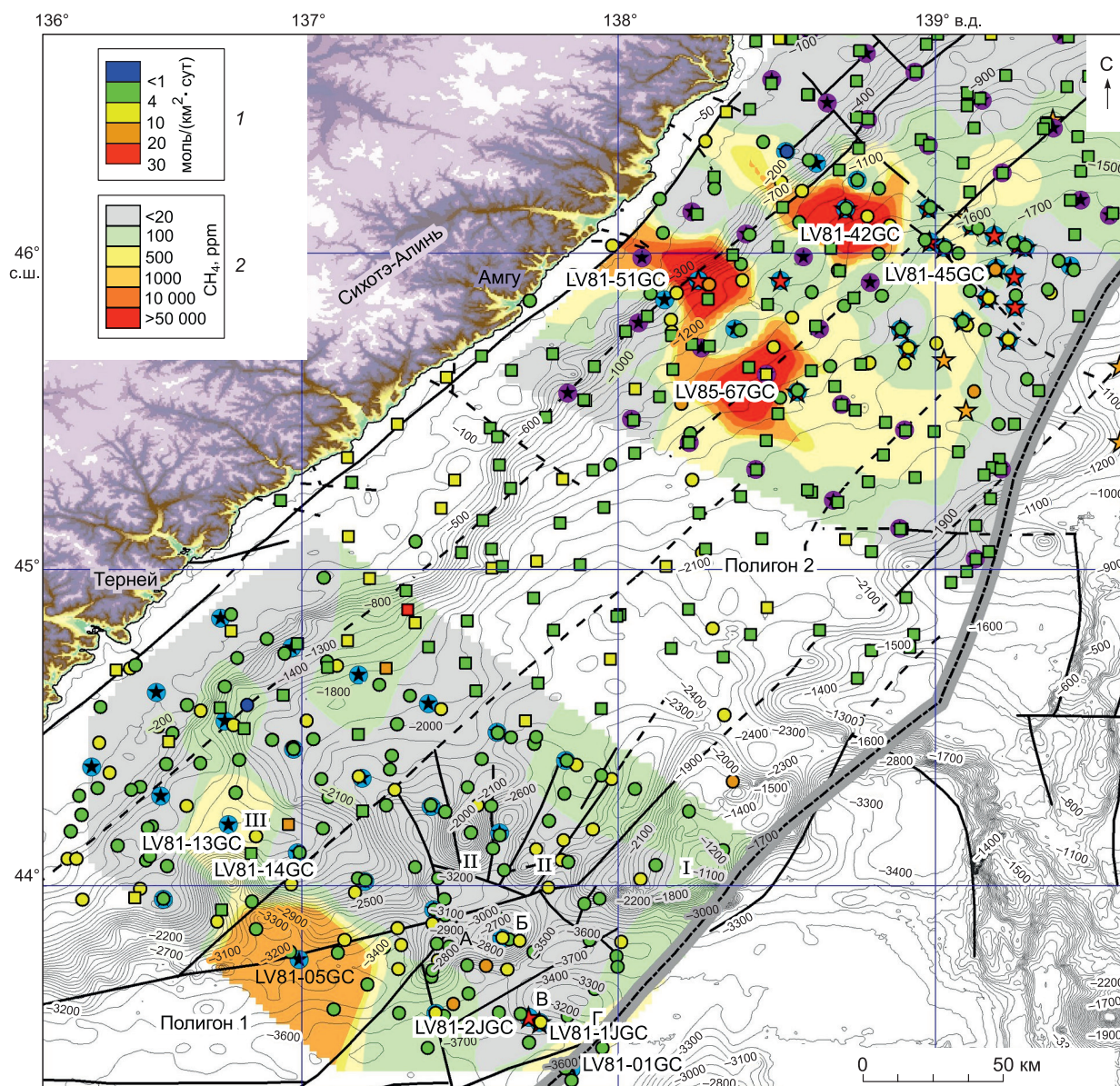


Рис. 5. Карты распределения концентрации метана в нижнем горизонте осадков (>150 см) и потока метана на границе вода—атмосфера.

1 — поток метана на границе вода—атмосфера (градиация приведена для всех станций), 2 — распределение метана в донных осадках (градиация приведена для всех станций). Остальные усл. обозн. см. на рис. 2, 4.

нести к глубоководным (глубины моря от 851 до 3656 м), отобраным на континентальном склоне, подножии континентального склона или абиссали. Несмотря на большие глубины моря, в большинстве отобранных станций на нижнем горизонте керна, а на некоторых станциях полигона 2 и в верхних горизонтах обнаружены повышенные по сравнению с условно фоновыми содержания метана и его гомологов. Это может быть объяснено миграцией газов по разломам в районах предполагаемой флюидной разгрузки в осадочном чехле (gas chimney) [Валитов и др., 2019].

В таблице представлены основные газогеохимические характеристики описываемых геологических станций. Приведены данные по содержанию метана, УВГ, углекислого газа, гелия и водорода, коэффициенту Бернарда [Bernard, 1978] в поверхностном горизонте (0—15 см) и нижнем горизонте (> 150 см). По каждой станции или для близлежащих точек приведены значения рассчитанных потоков метана на границе вода—атмосфера.

На рисунке 6 показано вертикальное распределение УВГ и CO₂ по выбранным геологическим станциям. Сопоставление данных содержания УВГ в двух опорных горизонтах, компонентном составе

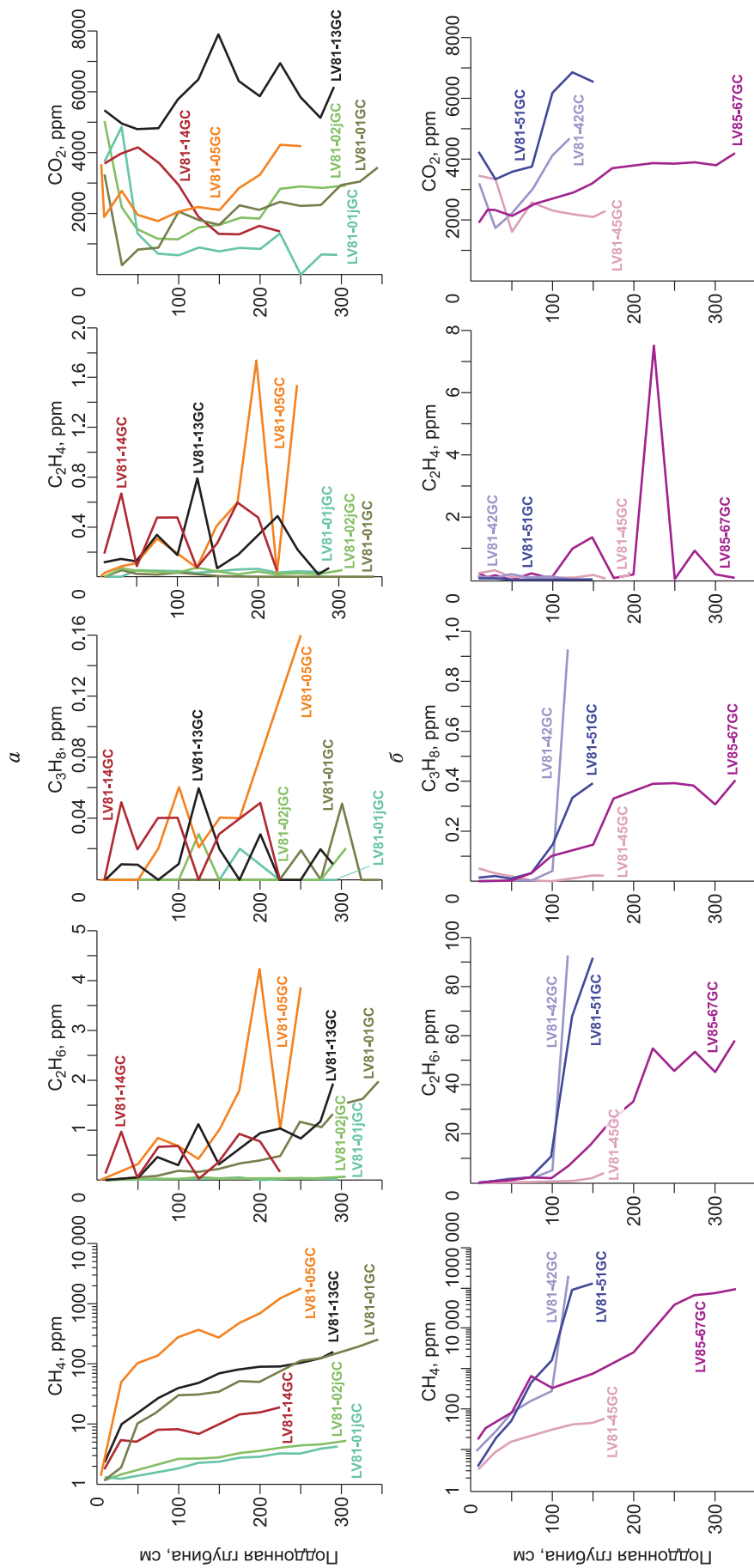


Рис. 6. Графики распределения концентраций углеводородных газов и углекислого газа по разрезу геологических станций:

a — полигон 1; *b* — полигон 2.

Газогеохимическая характеристика выделенных станций отбора донных осадков

Станция	Горизонт отбора, поддонная глубина, см	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₂ —C ₅	C ₁ /(C ₂ +C ₃)	CO ₂	H ₂	He	Поток CH ₄ *
		ppm					ppm			
Полигон 1 (Южный)										
LV81-01GC	10	1.2	Не обн.	Не обн.	Не обн.	—	3259	Не обн.	7.8	2
	345	251.2	1.96	»	2	128	3505	»	13.4	
LV81-1jGC	10	1.3	Не обн.	»	Не обн.	—	3687	»	5.6	2
	295	4.2	»	»	0.04	—	610	77.5	6.7	
LV81-2jGC	10	1.2	»	»	Не обн.	—	5034	0.4	2.1	10
	305	5.3	0.05	0.02	0.12	75	2910	Не обн.	46.8	
LV81-05GC	10	2.8	0.03	Не обн.	0.06	95	3611	3.1	10	3—5
	250	1838.1	3.85	0.16	5.65	458	4187	4.8	13.1	
LV81-13GC	10	2.3	Не обн.	Не обн.	0.11	—	5363	1.9	15.2	3—15
	290	154.4	1.92	0.01	2.02	80	6147	0.7	14.4	
LV81-14GC	10	1.8	0.11	Не обн.	0.3	16	3636	45.7	3.5	2
	225	18.8	0.14	»	0.2	134	1408	5.1	11.5	
Полигон 2 (Северный)										
LV81-45GC	10	3.2	0.27	0.05	0.52	10	3453	Не опр.	Не опр.	11
	165	58.5	4.04	0.02	4.08	14	2282	»	»	
LV81-51GC	10	3.8	0.02	0.01	0.07	128	4252	0.3	10.3	12
	150	128861	91.5	0.39	91.8	1402	6536	1.5	10.2	
LV81-42GC	10	10.7	0.13	Не обн.	0.23	82	3181	Не опр.	Не опр.	2—6
	120	196295	92.4	0.93	93.3	2103	4653	»	»	
LV85-67GC	10	18.2	0.19	Не обн.	0.39	96	1922	»	11.6	6
	325	9503	57.67	0.4	58.3	1636	4195	0.6	18.5	

Примечание. Не обн. — компонент не обнаружен или его концентрация меньше предела аналитического обнаружения. Не опр. — компонент не определялся. Прочерк — отношение C₁/(C₂+C₃) не рассчитывалось для горизонтов, на которых газы не определялись или их содержание меньше предела обнаружения.

* Поток метана (моль/км²·сут) на границе вода—атмосфера, для станций, находящихся непосредственно над геологической станцией или в районе ее расположения.

УВГ и вертикальном распределении позволяет оценить градиент роста концентраций, указывающий на интенсивность восходящей миграции УВГ.

Общей тенденцией по выбранным кернам является четкая закономерность увеличения концентраций метана с глубиной опробования. Рост концентраций УВГ с глубиной был на порядок больше на полигоне 2 (см. рис. 6). Минимальные концентрации УВГ в верхнем слое осадков (0—15 см) могут говорить о хорошей работе «бактериального фильтра» и отсутствии обнаруженных и задокументированных на данный момент активных струйных (адвективных) газопроявлений на морском дне акватории, в отличие от газифлюидоактивного западного склона о. Сахалин (Южно-Татарский осадочный бассейн, Татарский пролив). В данном случае, скорее всего, доминирующую роль в эмиссии УВГ в придонный водный слой играют процессы диффузии и сейсмотектоническая обстановка в данном районе, характеризующая пульсационно-накопительную дегазацию недр. Обнаруженные высокоаномальные содержания метана (до 196 000 ppm) и его гомологов в нижнем интервале опробования кернов, а также сопутствующие аномалии углекислого газа, водорода, гелия, фиксация развития углеводородокисляющих микробных сообществ могут быть индикаторами наличия газифлюидных проявлений. Представленный механизм возникновения аномалий, пути миграций и генезис источников, безусловно, нуждаются в более детальном исследовании и выходят за рамки данной работы.

**Взаимосвязь потоков метана с поверхности моря
и газогеохимических полей донных осадков**

Положение максимальных потоков на границе вода—атмосфера несколько смещено относительно максимальных полей метана в осадке (см. рис. 2, 4, 5). На полигоне 1 максимальные потоки на гра-

нице вода—атмосфера 10—13 моль/(км²·сут) для весны 2018 г. обнаружены в восточной и юго-восточной частях. Однако в окрестностях вулканических построек Ольга, Владимир, Брат-1, Брат-2, где отмечаются потоки метана с морской поверхности умеренной и средней интенсивности, аномальных содержаний метана в кернах осадка не обнаружено. Станции LV81-01jGC и LV81-02jGC отобраны в окрестностях предполагаемых газифлюидных проявлений в осадочном чехле. Судя по распределению газовых компонентов, опробованием не удалось точно попасть в намеченные точки либо на момент опробования разгрузки газа не было. Концентрация метана по этим станциям варьировала от 1.2 до 5.2 г/т (см. рис. 6). Обнаружено присутствие следовых концентраций УВГ (этана, пропана, бутана, изобутана). В то же время южнее данных районов на станции LV81-01GC (самая глубоководная станция, 3656 м) концентрация метана в нижнем горизонте достигает 251 г/т. Зафиксировано плавное увеличение с глубиной концентраций метана и этана, отсутствие неопредельных УВГ ниже горизонта 175 см.

Зоны эмиссии метана средней интенсивности (от 4 до 10 моль/(км²·сут)) и локальные участки эмиссии высокой интенсивности (выше 10 моль/(км²·сут)) отчетливо выделяются в южной части полигона 1 и по центру возвышенности Лаврентьева; в 2019 г. поток достигал 15 моль/(км²·сут) (см. рис. 2). Такое распределение потоков метана позволяет предположить наличие источников в пределах глубоководной Центральной котловины Японского моря. В юго-западной части полигона 1 высокими концентрациями метана в осадках выделяются станции LV81-05GC и LV81-13GC (см. рис. 4—6). Станция LV81-05GC располагается вблизи Северо-Японского глубинного разлома [Безверхний и др., 1988]. Концентрация метана на нижнем горизонте керна достигает 1838 ppm (0.18 об. %). Резкий скачок метана наблюдается с горизонта 150 см (см. рис. 6). В составе газа также присутствуют этан до 4.22 ppm, пропан до 0.16 ppm и этилен до 1.75 ppm. Станции LV81-13GC и LV81-14GC находятся в прибортовых участках узкой осадочной депрессии (мощностью чехла до 3 км) северо-восточного простирания, расположенной между возвышенностью Лаврентьева и материковым склоном Приморья. В керне LV81-13GC обнаружен повышенный уровень концентрации CH₄ до 154 ppm, C₂H₆ до 1.92 ppm в нижнем горизонте и CO₂ по всей длине колонки до 6598 ppm (с максимальными значениями на горизонтах 125—225 см). В керне станции LV81-14GC концентрация CH₄ доходит в нижних горизонтах до 18.4 ppm, C₂H₆ до 0.91 ppm. Отношение C₁/(C₂+C₃) в рассмотренных колонках (LV81-01GC, LV81-01jGC и LV81-02jGC, LV81-05GC, LV81-13GC, LV81-14GC) варьирует от 16 до 458. Предполагаемый генезис углеводородных газов полигона 1 магматический и метаморфогенный с примесью продуктов биохимического преобразования органического вещества. На данной части Японского моря, вероятно, происходит современная слабоинтенсивная или поствулканическая разгрузка флюидов природных газов полигенетического состава. Основными путями вертикальной миграции могут служить наиболее ослабленные и относительно легко проницаемые зоны разрывных нарушений.

В северной части района исследований, центральной глубоководной акватории Татарского трога (полигон 2), в мае 2018 г. (рейс LV81) потоки метана с акватории моря достигали 14 моль/(км²·сут) (см. рис. 2, 4, 5). Зона эмиссии средней интенсивности охватывает южный, восточный и северный краевые участки. В центральной части Татарского трога развиты прогибы фундамента, заполненные мощными осадочными и вулканогенно-осадочными отложениями предполагаемой глубины до 4—6 км. В прибортовых частях данных прогибов, осложненных тектоническими нарушениями, ранее было установлено развитие газогеохимического поля распределения УВГ в донных осадках наподобие кольцеобразной структуры [Основы..., 1993]. Выделенный южнее Самаргинской перспективной нефтегазоносной площади участок, возможно, представляет собой метанопродуктивную зону, авторы предлагают назвать ее «Кузнецовская перспективная зона газонакопления» [Валитов и др., 2020]. Повышенный поток метана обнаружен в прибортовых и приразломных частях осадочного прогиба и данной кольцеобразной газогеохимической структуры (юго-западная часть полигона 2). В этом районе были выполнены станции LV81-51 (глубина 851 м), LV81-42GC (1381 м) и LV85-67GC (1687 м). Станция LV81-51GC отобрана в пределах Восточно-Приморского разлома [Безверхний и др., 1988], в зоне предполагаемых структур газифлюидных проявлений в осадочном чехле. Резкий скачок концентраций метана наблюдается с горизонта 100 см. С этого же горизонта также фиксировалось появление резкого запаха сероводорода. Концентрация метана на забое колонки является сверханомальной 128861 ppm (12.8 об. %), присутствуют в больших концентрациях этан и пропан (см. таблицу, рис. 6). Станция LV81-42GC располагается в северной части полигона 2 в осевой части осадочной депрессии северо-восточного простирания. Концентрация метана на забое станции достигает 196295 ppm (19.6 об. %). Резкий скачок метана также наблюдается с горизонта 100 см. В составе УВГ также присутствуют этан до 92.4 ppm, пропан до 0.93 ppm (см. таблицу, рис. 6). Станция LV85-67GC расположена в центральной части полигона 2, в зоне предполагаемого разлома северо-восточного простирания. В керне колонки также обнаружены сверханомальные концентрации CH₄ до 95032 ppm (9.5 об. %), C₂H₆ до 57.6 ppm, C₃H₈ до 0.4 ppm. Подобный уровень концентраций и характер распределения УВГ встречались нами в донных отложениях Охотского и

Японского морей, содержащих газогидраты, и могут быть индикатором их наличия в более глубоких горизонтах [Шакиров и др., 2016; Yatsuk et al., 2019; Shakirov et al., 2019]. Термобарический фактор также благоприятствует возможным находкам газогидратов в данном районе в будущем. Другим интересным фактом является практически полное отсутствие непредельных гомологов и повышенный уровень содержания этана и пропана как прямого признака глубинного миграционного газового потока.

В северо-восточной области полигона 2 зоны повышенных и пониженных потоков метана перемежаются между собой. В этом районе в рейсе LV81 обнаружены многочисленные субвертикальные зоны газонасыщенных осадков (gas chimney) [Валитов и др., 2019]. Область подобных аномалий выглядит более обширной, чем было известно из опубликованных данных [Харахинов, 2010]. Станция LV81-45GC отобрана над одной из таких аномалий. В керне колонки также обнаружены повышенные концентрации (ppm): CH_4 до 58.5, C_2H_6 до 4, C_3H_8 до 0.02 (см. таблицу, рис. 6). Обнаруженные повышенные концентрации метана и его гомологов в осадочных кернах станций полигона 2 показывают, что по каналам нарушений происходит активная миграция газов из глубоких горизонтов пород к поверхности. Отношение $\text{C}_1/(\text{C}_2 + \text{C}_3)$ в выбранных колонках варьирует от 10 до 2103. Углеводородные газы представлены полигенетическим составом, с преобладанием метана и «сухого» типа УВГ. Наличие мощных осадочных депрессий, флюидных аномалий в осадочном чехле и повышенного теплового потока позволяет предположить присутствие глубинных газоматеринских источников в районе исследований. Генезис этих источников нуждается в специализированных исследованиях.

На восходящий глубинный флюид могут указывать аномалии гелия и в меньшей степени водорода. В результате исследований в данном районе были установлены повышенные концентрации водорода и гелия. Распределение гелия и водорода в осадке неравномерное. Временная изменчивость концентраций гелия и водорода зависит от сейсмостектонической активности, поэтому в периоды отсутствия землетрясений в районе исследований наблюдаемые значения могут снижаться. Этот вывод подтверждается данными работы по Кавказу [Bella et al., 1995], где установлено, что при крупных землетрясениях, активизации сейсмостектонических процессов происходит повышение содержания гелия в воде термальных источников относительно фонового значения для региона. При различных источниках генерации гелий и водород, вероятно, стали спутниками при прохождении по общим глубинным каналам фильтрации. Концентрации свободных (или водорастворенных) водорода и гелия, по-видимому, как и концентрации углеводородных газов зависят от структурных, тектонических, литологических ловушек. При этом мигрирующие из глубин водород и гелий экранируются ловушками с низкопроницаемыми крышками, которые имеют большую глубину залегания. Такими крышками могут выступать и газогидраты. Вероятно, вклад в создание аномалий водорода в регионе вносит источник, сопряженный с очагом генерации углеводородных газов. Наиболее благоприятные места для активной разгрузки флюидов расположены в узле пересечения тектонических разломов, где развиты аномальные газогеохимические поля по содержанию гелия, водорода и углеводородных газов в осадке, а также газогидратов [Shakirov et al., 2019]. Водород, вероятнее всего, мигрирует вместе с природным газом (метаном) через толщу осадочных отложений, разбитую системой трещин. Аномалии гелия свидетельствуют о наличии еще более глубоких газовых источников.

О разгрузке глубинного вещества свидетельствуют и специфические микробиальные сообщества, выявленные в кернах газонасыщенных осадков. Минимальные потоки метана с поверхности моря при глубине от 1500 до 1800 м наблюдаются над станциями, в кернах донных осадков которых были обнаружены метанотрофные бактерии (LV81-01GC, LV81-42GC) (см. рис. 2). Повышенные потоки находятся над станциями, в которых были зафиксированы метаногены и бактерии с генами *narAa*, *narAb* участвующие в биодеградации полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), а численность метанотрофов была очень низкой (LV81-01jGC). На этой станции резко увеличивается численность органотрофных бактерий и интенсивность процессов денитрификации, сульфатредукции и деструкции $\text{C}_{\text{орг}}$. На станциях LV81-01jGC, LV81-14GC обнаружены нокардиоморфные углеводородокисляющие бактерии, относящиеся к видам *Rhodococcus*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Actinobacteria*, *Bacillus*. Кроме этого, отмечается активность сульфатредуцирующих бактерий, относящихся к родам *Desulfonema* ssp., *Desulfosarcina* ssp., способных использовать углеводороды как единственный источник. О сложном процессе разложения ОВ говорит и большое содержание CO_2 и УВГ, а также большие концентрации метана в нижних горизонтах кернов. На станции LV81-05GC полигона 1 наряду с метанотрофными микроорганизмами фиксируются максимальные значения непредельных углеводородов этилена и пропилена на горизонтах 120—210 см, что, вероятно, свидетельствует о процессах деструкции органического вещества.

Таким образом, в газогеохимическом отношении исследуемый район является продолжением активной зоны дегазации литосферы, проявлений вулканизма и метаморфизма в пределах прибрежного шельфа Японского моря.

Наличие повышенных концентраций метана в донных осадках на наш взгляд, отражается (проецируется) на распределении потоков метана на границе вода—атмосфера и характеризует данный район как активный источник эмиссии метана в атмосферу. Пространственная связь наиболее хорошо прослеживается на площади полигона 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В процессе исследований на акватории северо-западной части Японского моря выявлено неоднородное распределение потоков метана на границе вода—атмосфера, в целом совпадающее с пространственным расположением газогеохимических аномалий в донных отложениях и указывающее на существование подводных источников метана (зон газогенерации).

2. Были установлены участки с повышенными концентрациями метана и близкими к равновесным. При общих умеренных значениях потока 1—4 моль/(км²·сут) отчетливо выделяются локальные участки с эмиссией средней интенсивности от 4 до 10 моль/(км²·сут) и эмиссией высокой интенсивности от 10 до 20 моль/(км²·сут); для весны 2019 г. зафиксирована локальная эмиссия очень высокой интенсивности 23 моль/(км²·сут).

3. Локальные зоны повышенных значений потоков метана (более 4 моль/(км²·сут), вероятно, обусловлены особенностями газоактивности осадочной толщи и тектоническим строением дна.

4. Вклад в существование потоков метана вносят его активные подводные источники, индикаторами которых являются специфические бактериальные сообщества и компонентный состав углеводородных газов.

5. Источниками обнаруженных газогеохимических аномалий в донных осадках района могут быть газогенерирующие осадочные толщи, метаморфогенные и магматические газы, характеризующие современную тектоническую активность района исследований. Миграция газов по разломам создает аномалии в донных осадках и при благоприятных термобарических условиях может приводить к формированию газогидратных скоплений.

6. На большом количестве проб показано, что при общих невысоких значениях потока метана отчетливо выделяются локальные участки с повышенными значениями. Приведенные результаты распределения потоков метана могут быть обусловлены геолого-структурными и тектоническими особенностями района исследований. В целом изучаемая акватория является районом устойчивой эмиссии метана в атмосферу, подтвержденная настоящими и предыдущими исследованиями.

7. Проведенное исследование показывает необходимость комплексных исследований газогеохимического режима окраинных морей северо-западной части Тихого океана в целях установления их нефтегазоносного потенциала и оценки эмиссии парниковых газов в атмосферу.

Исследование выполнено в рамках тем госзадания ТОИ ДВО РАН: 0211-2021-0006 и 0211-2021-0012. Исследование поддержано грантом Президента РФ для молодых ученых МК-357.2021.1.5.

ЛИТЕРАТУРА

Безверхний В.Л., Берсенева И.И., Ващенко Н.Г., Горюха М.Т., Леликов Е.П., Цой И.Б. Геологическое строение северного замыкания Центральной глубоководной котловины Японского моря // Тихоокеанская геология, 1988, т. 7, № 4, с. 15—22.

Берсенева И.И., Леликов Е.П., Безверхний В.Л., Ващенко Н.Г., Съедин В.Т., Терехов Е.П., Цой И.Б. Геология дна Японского моря. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1987, 140 с.

Валитов М.Г., Шакиров Р.Б., Яцук А.В., Прошкина З.Н., Ли Н.С., Аксентов К.И., Обжиров А.И., Съедин В.Т., Пономарева А.Л., Карнаух В.Н. Комплексные геолого-геофизические, газогеохимические и океанографические исследования в Японском море и Татарском проливе в 81-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» // Тихоокеанская геология, 2019, т. 38, № 4, с. 97—105, doi: 10.30911/0207-4028-2019-38-4-97-105.

Валитов М.Г., Ли Н.С., Яцук А.В., Прошкина З.Н., Пономарева А.Л., Калинин В.В., Плетнев С.П., Марьина Е.Н., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Швалов Д.А., Бовсун М.А. Комплексные геолого-геофизические, газогеохимические и океанографические исследования в Японском море и Татарском проливе в 85-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» // Тихоокеанская геология, 2020, т. 39, № 3, с. 104—109, doi: 10.30911/0207-4028-2020-39-3-104-109.

Государственная геологическая карта. М-б 1:1 000 000 (новая серия). Лист L-(53), (54). Кавалерова. Объяснительная записка / Ред. Т.В. Брежнева. СПб, ВСЕГЕИ, 1994, 176 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист К-(52), (53). Владивосток / В.М. Анохин, В.И. Рыбалко, А.А. Аленичева, Е.П. Леликов и др. СПб, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011, 332 с.

- Кулинич Р.Г., Валитов М.Г.** Мощность и типы земной коры Японского моря по данным морской и спутниковой гравиметрии // Тихоокеанская геология, 2011, т. 30, № 6, с. 3—13.
- Легкодимов А.А., Мишукова О.В., Швалов Д.А., Максеев Д.С., Шакирова М.В., Бакунина М.С., Еськова Е.И.** К дискуссии об эмиссии метана с акватории Татарского пролива, Японское море (по результатам 55-го рейса НИС «Академик Опарин») // Вестник ДВО РАН, Владивосток, Дальнаука ДВО РАН, 2019, № 2, с. 81—87. doi:10.25808/08697698.2019.204.2.009.
- Максеев Д.С., Аксентов К.И., Шакиров Р.Б., Федоров С.А., Федорова К.С.** Аномальные геохимические поля рудных элементов Южно-Татарского осадочного бассейна (Татарский пролив, Японское море) // Изв. УГГУ, 2020, вып. 2 (58), с. 39—47, <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-00-00>.
- Мишукова Г.И., Шакиров Р.Б.** Пространственная изменчивость распределения метана в морской среде и его потоков на границе вода—атмосфера в западной части Охотского моря // Водные ресурсы, 2017, т. 44, № 4, с. 493—503. doi: 10.7868/S0321059617040137.
- 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.
- Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И.** Особенности проявления метана в природных водах на территории Приморского края России // Вестн. ДВО РАН, 2009, № 6, с. 43—49.
- Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И.** Распределение метана и его потоки на границе вода—атмосфера в некоторых районах Охотского моря // Вестн. ДВО РАН, 2010, № 6, с. 36—43.
- 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.
- Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Окулов А.К.** Распределение метана и его потоков на границе вода—атмосфера на акватории залива Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН, 2013, № 6, с. 120—127.
- Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И., Пестрикова Н.Л., Верещагина О.Ф.** Особенности распределения концентрации метана и его потоков на границе раздела вода—атмосфера на акватории Татарского пролива Японского моря // Метеорология и гидрология. Планета, 2015, № 6, с. 89—96.
- Мишукова Г.И., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И.** Потоки метана на границе вода—атмосфера в Охотском море // ДАН, 2017, т. 475, № 6, с. 697—701. doi: 10.7868/S0869565217240203.
- Никифоров В.М., Кулинич Р.Г., Валитов М.Г., Дмитриев И.В., Старжинский С. С., Шкабарня Г.Н.** Особенности флюидного режима литосферы в зоне сочленения Южного Приморья и Японского моря по комплексу геофизических данных // Тихоокеанская геология, 2013, т. 32, № 1, с. 54—64.
- Обжиров А.И., Пестрикова Н.Л., Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Окулов А.К.** Распределение содержания и потоков метана на акваториях Японского, Охотского морей и прикурильской части Тихого океана // Метеорология и гидрология, Планета, 2016, № 6, с. 71—81.
- Обжиров А.И., Баранов Б.В., Шакиров Р.Б., Прокудин В.Г., Мальцева Е.В.** Оползневые процессы в районе юго-западного склона Курильской котловины Охотского моря // Геосистемы переходных зон, 2018, т. 2, № 2, с. 92—98.
- Обжиров А.И., Мишукова Г.И., Шакиров Р.Б., Мишуков В.Ф., Мальцева Е.В., Соколова Н.Л., Окулов А.К., Яцук А.В., Лифанский Е.В.** Межсезонная изменчивость концентраций и потоков метана на границе вода—атмосфера в западной части Охотского моря // Океанология, 2019, т. 59, № 6, с. 944—951, doi: 10.31857/S0030-1574596944-951.
- Основы теории геохимических полей углеводородных скоплений /** Под ред. А.В. Петухова, И.С. Старобинца. М., Недра, 1993, 327 с.
- Саломатин А.С., Юсупов В.И.** Акустические исследования газовых «факелов» Охотского моря // Океанология, 2011, т. 51, № 5, с. 1—9.
- Харахинов В.В.** Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М., Научный мир, 2010, 276 с.
- Шакиров Р.Б.** Газогеохимические поля морей Восточной Азии. М., ГЕОС, 2019, 341 с.
- Шакиров Р.Б., Мишукова О.В.** Пространственное распределение потоков метана на границе вода—атмосфера в Охотском море // Геосистемы переходных зон, 2019, т. 3, № 1, с. 107—123, doi: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.
- Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И.** Распределение гелия и водорода в отложениях и воде на склоне о. Сахалин // Литология и полезные ископаемые, 2016, № 1, с. 68—81.
- Шакиров Р.Б., Валитов М.Г., Сырбу Н.С., Яцук А.В., Обжиров А.И., Мишуков В.Ф., Лифанский Е.В., Мишукова О.В., Саломатин А.С.** Потоки метана на границе вода—атмосфера в южной части Татарского пролива Японского моря: особенности распределения и изменчивости // Геология и геофизика, 2020а, т. 61 (9), с. 1215—1230, doi: 10.15372/GiG2019184.

Шакиров Р.Б., Мау С., Мишукова Г.И., Обжиров А.И., Шикирова М.В., Мишукова О.В. Особенности потоков метана в Западной и Восточной Арктике. Обзор. Часть I // Геосистемы переходных зон, 2020б, т. 4, № 1, с. 4—25.

Bange H.W., Bartell U.H., Rapsomanikis S., Andreae M.O. Methane in the Baltic and the North Seas and a reassessment of marine emissions of methane // *Global Biogeochem. Cycles*, 1994, v. 8 (4), p. 465—480, <https://doi.org/10.1029/94gb02181>.

Bella F., Biagi P.F., Caputo M., Cozzi E., Della Monica G., Ermini A., Plastino W., Sgrigna V., Zilpiani D. Helium content in thermal waters in the Caucasus from 1985 to 1991 and correlations with the seismic activity // *Tectonophysics*, 1995, v. 246, p. 263—278.

Bernard B.B. Light hydrocarbons in marine sediments. PhD Dissertation. Texas, 1978.

Conrad R., Seiler W. Methane and hydrogen in seawater (Atlantic Ocean) // *Deep-Sea Res. Part A*, 1988, v. 35, p. 1903—1917, [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90116-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90116-1).

Gamo T., Tsunogai U., Hirota A., Nakayama N., Kang D., Kim K. First measurements of methane and its carbon isotope ratio in the Japan Sea (East Sea) // *Mar. Chem.*, 2012, p. 92—99.

GEBCO Bathymetric Compilation Group 2019. The GEBCO_2019 Grid — a continuous terrain model of the global oceans and land. British Oceanographic Data Centre, National Oceanography Centre, NERC, UK, 2019.

Lamontagne R.A., Swinnerton J.W., Linnenbom V.J., Smith W.D. Methane concentrations in various marine environments // *J. Geophys. Res.*, 1973, v. 78, p. 5317—5324. <https://doi.org/10.1029/jc078i024p05317>.

Lee J.-H., Woo H.J., Son S.-K., Kim M., Lee D.-H., Tsunogai U., Jeong K.-S. Flux and distribution of methane (CH₄) in the Gunsan Basin of the southeastern Yellow Sea, off the Western Korea / *J. Environ. Sci. Health, Part A*, 2018, v. 53 (5), p. 457—466. <https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1409026>.

Mischoukov V., Mishukova G. White caps and bubble mechanisms of gas exchange between ocean and atmosphere // *Proceedings of the 2nd International Symposium «CO₂ in the Oceans»* / Ed. Y. Nojiri. Publ. Environ. Agency of Japan, 1999, p. 517—520.

Mishukova O., Shakirov R., Yatsuk A. Methane fluxes on the water—atmosphere interface in the north-west of the Sea of Japan during spring—summer—autumn (2010—2018) // *Marine science and technology for sustainable development: Abstracts of the 26th International conference of Pacific Congress on Marine Science and Technology (PACON-2019)*, July 16—19, 2019, Vladivostok, Russia. Vladivostok, POI FEB RAS, 2019, p. 84.

Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2012, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 59, Korea Polar Research Institute / Eds. Y.K. Jin, H. Shoji, A. Obzhairov, B. Baranov. Incheon, 2013, 163 p.

Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project II, 2013, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 62, New Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology / Eds. H. Shoji, Y.K. Jin, B. Baranov, N.A. Nikolaeva, A. Obzhairov. Kitami, 2014, 111 p.

Saunois M., Bousquet Ph., Poulter B., Peregón A., Ciais Ph., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Etiope G., Bastviken D., Houweling S. et al. The global methane budget 2000—2012 // *Earth System Sci. Data*, 2016, v. 8, p. 697—751.

Shakirov R.B., Valitov M.G., Obzhairov A.I., Mishukov V.F., Yatsuk A.V., Syrбу N.S., Mishukova O.V. Methane anomalies, its flux on the sea-atmosphere interface and their relations to the geological structure of the South-Tatar sedimentary basin (Tatar Strait, the Sea of Japan) // *Mar. Geophys. Res.*, 2019, v. 40, p. 581—600, <https://doi.org/10.1007/s11001-019-09389-3>.

Tseng H.-C., Chen C.-T.A., Borges A. V., Delvalls T.A., Chang Y.-C. Methane in the South China Sea and the Western Philippine Sea // *Cont. Shelf Res.*, 2017, v. 135, p. 23—34, doi:10.1016/j.csr.2017.01.005

Tilbrook B.D., Karl D.M. Methane sources, distributions and sinks from California coastal waters to the oligotrophic North Pacific gyre // *Mar. Chem.*, 1995, v. 49, p. 51—64.

Tsurushima N., Watanabe S., Tsunogai S. Methane in the East China Sea water // *J. Oceanogr.*, 1996, v. 52 (2), p. 221—233, <https://doi.org/10.1007/bf02235671>.

U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center. World Data Center for Seismology, http://neic.usgs.gov/neis/bulletin/neic_edau_1.html.

Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G. Methane in water columns and sediments of the northwestern Sea of Japan // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, v. 86—87, p. 25—33.

Watanabe S., Higashitani N., Tsurushima N., Tsunogai S. Methane in the Western North Pacific // *J. Oceanogr.*, 1995, v. 51 (1), p. 39—60, <https://doi.org/10.1007/bf02235935>.

Weber T., Wiseman N.A., Kock A. Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters // *Nat. Commun.*, 2019, v. 10, 4584, doi: 10.1038/s41467-019-12541-7.

Wiesenburg D.A., Guinasso N.L. Equilibrium solubility of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and seawater // J. Chem. Eng. Data, 1979, v. 24 (4), p. 356—360.

Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and seawater // J. Chem. Eng. Data, 1976, v. 21 (1), p. 78—80.

Yatsuk A., Shakirov R., Gresov A., Obzhirov A. Hydrocarbon gases in seafloor sediments of Tatar Strait, Northern Sea of Japan // Geo-Mar. Lett., 2019, <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00628-5>.

*Поступила в редакцию 8 июня 2020 г.,
принята в печать 16 марта 2021 г.*