

ПОТОКИ МЕТАНА НА ГРАНИЦЕ ВОДА-АТМОСФЕРА В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ТАТАРСКОГО ПРОЛИВА ЯПОНСКОГО МОРЯ: ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ИЗМЕНЧИВОСТИ

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., Швалов Д. А.

Аннотация

В работе отражены результаты применения газогеохимической съемки в верхнем слое и толще морских вод, а также в донных осадках Татарского пролива (север Японского моря) в 2012, 2014, 2015 и 2017 гг. Выявлены особенности распределения метана, водорода и гелия в толще вод и в осадках Татарского пролива. Повышенные концентрации метана, водорода и гелия в донных отложениях и воде юго-западного шельфа и склона о. Сахалин, вероятно, связаны с сейсмо-тектонической активностью района, газогидратами, наличием очагов и каналов миграции этих газов. Со всей акватории южной части Татарского пролива происходит эмиссия метана, концентрации которого в поверхностном слое морской воды превышают равновесные с атмосферой значения ($C^*=2.2\div3.6$ нмоль/л). Разность между измеренными и равновесными значениями метана (ΔC) составила $1.1\div112$ нмоль/л. Самые интенсивные потоки метана на границе вода-атмосфера достигают до 482 моль/($\text{км}^2\times\text{сут.}$) и наблюдаются на газоносном юго-западном шельфе и газогидратоносном склоне о. Сахалин. Применение модели расчета полей течений и переноса примесей для исследованной акватории показало, что формирование повышенной эмиссии метана с поверхности моря находится на участках, где может происходить вертикальная его миграция из литосферных источников. Роль гидродинамики в формировании зон повышенной эмиссии метана с поверхности акватории находится в подчиненном значении к геологическим факторам. Охарактеризованы перспективы прогнозирования углеводородных скоплений по данным о потоке метана с поверхности неглубокого моря.

Ключевые слова:

распределение метана, потоки метана, Японское море

**ПОТОКИ МЕТАНА НА ГРАНИЦЕ ВОДА-АТМОСФЕРА В ЮЖНОЙ ЧАСТИ
ТАТАРСКОГО ПРОЛИВА ЯПОНСКОГО МОРЯ: ОСОБЕННОСТИ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ИЗМЕНЧИВОСТИ**

**Р.Б. Шакиров, М.Г. Валитов, Н.С. Сырбу, А.В. Яцук, А.И. Обжиров, В.Ф.
Мишуков, Е.В. Лифанский, О.В. Мишукова, А.С. Саломатин**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
ren@poi.dvo.ru*

**R.B. SHAKIROV, M.G. VALITOV, N.S. SYRBU, A.V. YATSUK, A.I. OBZHIROV,
V.F. MISHUKOV, E.V. LIFANSKIY, O.V. MISHUKOVA, A.S. SALOMATIN**

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

В работе отражены результаты газогеохимической съемки в поверхностном водном слое и толще морских вод, а также в донных осадках Татарского пролива (север Японского моря) в 2012, 2014, 2015, 2017 и 2018 гг. Выявлены основные особенности распределения потоков метана на границе вода-атмосфера и обсуждена их связь с геологическим строением Татарского пролива. Установлено, что на большей части акватории Татарского пролива происходит эмиссия метана. Самые интенсивные потоки метана на границе вода-атмосфера до 482 моль/(км²×сут.) наблюдаются на газоносном юго-западном шельфе и газогидратоносном склоне о. Сахалин. Повышенные концентрации метана в воде, а также метана, водорода и гелия в донных отложениях на юго-западном шельфе и склоне о. Сахалин, вероятно, связаны с сейсмо-тектонической активностью района, газогидратами, наличием очагов концентрирования и каналов миграции этих газов. Применение модели расчета полей течений и переноса примесей для исследованной акватории показало, что формирование повышенной эмиссии метана с поверхности моря находится на участках, где может происходить вертикальная миграция из литосферных источников. Роль гидродинамики в формировании зон повышенной эмиссии метана с поверхности акватории находится в подчиненном значении к геологическим факторам. По данным о потоке метана на границе вода-атмосфера для неглубокого моря детально охарактеризованы основные участки разгрузки газов в южной части Татарского пролива.

Ключевые слова: распределение метана, потоки метана, Японское море, Татарский пролив.

ВВЕДЕНИЕ

Газогеохимические исследования дают информацию о составе, генезисе, механизмах распространения природных газов и количественных параметрах их миграции на границах взаимодействия литосферы, гидросферы и атмосферы окраинных морей. Этот вопрос особенно важен для учета роли окраинных морей в балансе парниковых газов в атмосфере. Процессы поступления газа из различных литосферных источников интенсивно изучаются как в западной, так и в восточной частях Тихого океана. Источником поступления метана, являются газы, просачивающиеся из углеводородных скоплений: они служат их индикаторами и маркируют участки эмиссии метана в атмосферу. Авторы работы [Mau et al., 2007] изучали выходы природного газа из прибрежных угольных и нефтяных источников в Тихом океане около Барбара, Калифорния. Метан был определен количественно на 79 станциях, область изучения составила 280 км^2 , при этом повышенные значения потоков метана в атмосферу занимают площадь не менее 70 км^2 . Такие исследования также усиливаются и в Арктике, где существуют свои особенности газогенерации и газопереноса. Исследователи [Fenwick et al., 2015] отмечают, что в западной части Северного Ледовитого океана поверхностный распресненный слой ограничивал эмиссию метана в атмосферу [Fenwick et al., 2017]. Авторы работы [Mau et al., 2017], изучая крупную область вдоль западной окраины Шпицбергена (с 74° до 79° с.ш.), где были зафиксированы тысячи мест выхода газа (сипы), показали, что растворенный шлейф метана составляет сотни километров в длину. Такие метановые «плюмы» зарегистрированы в окраинных акваториях Тихого океана [Mau et al., 2012; Suess et al., 2001; Shakirov et al., 2004]. «Плюмы» или аномальные поля концентраций метана в водной толще наблюдаются в виде дискообразных областей на разных глубинах на восточном шельфе и склоне о. Сахалин в Охотском море [Мишукова и др., 2007; Мишукова и др., 2010] и недавно выявлены на акватории Татарского пролива Японского моря [Мишукова и др., 2015]. Тем не менее, механизмы газовой разгрузки из геологических структур в водную толщу и далее в атмосферу до настоящего времени являются плохо изученными. Kvenvolden K.A. и Rogers B.W. полагают, что в настоящее время катастрофические выбросы при разложении газогидрата CH_4 , макро и микро-просачивания из грязевых вулканов, магматических вулканов, геотермальных областей и разломных зон океана могли повлиять на глобальные климатические изменения в прошлом [Kvenvolden, Rogers, 2005]. Сейсмическая активность является одним из важных факторов контроля эмиссии метана, при этом может наблюдаться не только усиление потоков, но и их ослабление. Например, при изучении выходов метана на побережье Коста-Рики была выявлена обратная связь сейсмотектоники и выходов метана: сделан

вывод о том, что землетрясения в 2002 г. закрыли пути миграции метана и снизили его выбросы [Mau et al., 2007]. До недавнего времени считалось, что подводные газовые выходы, вызванные землетрясениями, составляют естественный механизм утечки углерода из осадочной толщи в гидросферу и не вносит заметного вклада в бюджет местного или глобального цикла углерода. В настоящее время влияние землетрясений на аномальные выбросы метана установлены в разных районах Мирового океана. David Fischer с соавторами полагают, что сейсмическая активизация в Аравийском море, особенно после землетрясения магнитудой 8.1 в 1945, нарушила сохранность газогидратоносных толщ, что создало условия для интенсивной свободной миграции газа: произошло существенное увеличение метановых сипов [Fischer et al., 2014]. Благоприятные условия для такого сценария особенно хорошо проявлены для присахалинской акватории Охотского и Японского морей [Obzhirov et al., 2004; Шакиров и др., 2016].

Растворенные в воде метан, водород и гелий используются в качестве индикаторов зон разломов, прогноза сейсмических активизаций, экологической оценки окружающей среды, для поисков месторождений углеводородов [Обжиров, 1993; Шакиров др., 2016]. Эти газы являются также важными газогеохимическими индикаторами альтернативных видов каустобиолитов, таких как газогидраты [Шакиров и др., 2016]. Совмещенные в пространстве аномалии метана и гелия могут указывать на наличие восходящего глубинного флюида. Газометрические исследования позволяют картировать проницаемые разрывные нарушения, а исследования взаимосвязи распределения гелия, углеводородных газов, водорода и их изотопных характеристик с особенностями геологического строения представляют интерес для выделения долгоживущих очагов газогенерации и проницаемых зон различной степени активности.

В целом, подходы к оценке эмиссии метана на границе вода-атмосфера требуют дальнейшего развития: методы дистанционного зондирования все еще не точны, а экспериментальные исследования *in situ* недостаточно системны. При исследовании эмиссии метана – одного из наиболее активных компонентов формирования парникового эффекта, крайне важен комплексный подход с учетом геологических, гидрологических и метеорологических факторов. Этот подход помогают реализовывать комплексные геолого-геофизические и океанографические площадные экспедиционные исследования.

Цель настоящей работы – обсудить новые данные о распределении потоков метана на границе вода-атмосфера в Татарском проливе, проанализировать влияние геологических и гидрометеорологических факторов на содержание метана в воде и в донных отложениях.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования охватывает площадь Южно-Татарского осадочного бассейна, занимающего одноименный прогиб в южной части Татарского пролива.

Схема тектонического строения с упрощениями и дополнениями авторов выполнена на основе [Геология, геодинамика и перспективы нефтегазоносности осадочных бассейнов Татарского пролива, 2004, Харахинов, 2010] и показана на рисунке 1.

Южно-Татарский прогиб ограничен разломными зонами – с запада Восточно-Приморской с востока Западно-Сахалинской. С последней зоной разломов связаны вулканы, действовавшие 5-10 млн. лет назад [Мельников, Ильев, 1989]. В целом Татарский пролив представляет собой крупный рифтогенный прогиб протяженностью 1200 км и шириной 60-300 км. Западное, материковое побережье сложено преимущественно слабо-дислоцированными кайнозойскими, значительно реже – верхнемеловыми вулканитами среднего и основного состава. Вдоль прилегающей к проливу части о. Сахалин в пределах Западно-Сахалинского прогиба обнажены местами дислоцированные терригенные, а на локальных участках – и вулканогенные образования позднего мела, палеогена и неогена. Эти же образования, в том числе угленосные, прослеживаются и западнее, в основании пролива. Рифтовая природа прогиба обусловила повышенные значения теплового потока (от 67 до 171 мВт/м²) и наличие каналов газово-флюидной проницаемости в осадочной толще [Харахинов, 2010; Родников и др., 2014].

Ранее, в ходе исследования газогеохимических полей придонного слоя толщ вод Татарского пролива, был получен ряд важных результатов [Обжиров, 1993], указывающих на наличие аномальных полей метана (концентрации до 45 нмоль/л) в соответствии с перспективами нефтегазоносности. Позже, в ходе проекта SSGH [Operation Report..., 2013] выявлено, что верхняя часть осадочного разреза преимущественно в восточной части Южно-Татарского прогиба характеризуется распространением многочисленных структур газовых выходов (в иностр. литературе "chimney"). К ним, как правило, приурочены газовые факелы и проявления газогидратов в верхнем слое осадочных отложений. В районе этих структур проведены исследования распределения углеводородных газов, изотопного состава углерода метана и этана, концентраций водорода и гелия, которые позволили обнаружить в скоплениях газогидратов преобладание катагенетических газов [Шакиров и др., 2016]. Газогидратоносные структуры картировались главным образом в

области склона о. Сахалин [Operation Report, 2016], то есть на восточном борте Южно-Татарского прогиба.

Эти и другие особенности Южно-Татарского осадочного бассейна указывают на то, что он должен являться активным поставщиком метана не только из донных отложений в толщу вод, но и в атмосферу.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на акватории южной части Татарского пролива Японского моря. Схема района работ показана на рис. 2. Были использованы материалы экспедиций: НИС «Академик М.А. Лаврентьев» №59 (LV-59, август 2012 г.), НИС «Академик М.А. Лаврентьев» №62 (LV-62, июнь 2013 г.), НИС «Академик М.А. Лаврентьев» №67 (LV-67, июнь 2014 г.), НИС «Академик М.А. Лаврентьев» №70 (LV-70, июнь 2015 г.), НИС «Академик Опарин» №54 (ОР-54, сентябрь-октябрь 2017 г.), НИС «Академик Опарин» №55 (ОР-55, октябрь 2018 г.).

Основные работы были выполнены в южной части Татарского пролива, здесь кроме проб воды отобранных с поверхностных горизонтов и в водной толще 2012-2018 г., отбирались керны донных отложений. В северной части Татарского пролива, в которой расположен Северо-Татарский осадочный бассейн были отобраны только пробы воды с поверхности моря осенью 2018 и 2017 г. (НИС «Академик Опарин» №54 и НИС «Академик Опарин» № 55). Три рейса состоялись в начале лета (июнь), один в августе, и два осенью. В результате этих экспедиций удалось покрыть район исследований относительно равномерной сетью наблюдений (рис. 2), что является важным условием для интерпретации потоков метана.

Методика отбора проб и анализа воды

Отбор проб морской воды для определения концентрации метана с дискретностью 1-2 часа осуществлялся по ходу движения судна с помощью судового заборного проточного устройства на глубине 4 м от поверхности моря, которая затем поступала в термосолинограф SBE 21SEACAT (USA, Washington) для непрерывного определения температуры и солености.

На станциях отбор проб морской воды производился оборудованием Rosette с 12 поливинилхлоридными батометрами системы Нискина объемом 10 литров. Rosette комбинирована с многопараметрическим CTD-зондом.

Воду отбирали в стеклянные емкости (флаконы) 68 мл, которые герметично закрывались. Затем в них для создания газовой фазы напускалось 12 мл особо чистого гелия. Для определения He и H₂ в качестве газовой фазы использовали 12 мл воздуха. Затем пробы встряхивались на перемешивающем устройстве LS-110, в результате чего в

системе устанавливалось равновесие между жидкой и газовой фазами. После перемешивания шприцем отбиралась аликвота газовой фазы для последующего анализа на хроматографе.

Методика отбора проб и анализа осадков.

При отборе и анализе донных осадков использовалась методика морских газогеохимических исследований лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН смены [OperationReport..., 2013, OperationReport..., 2014]. Для опробования донных осадков был использован гидростатический пробоотборник длиной 550 или 350 см. При отборе проб осадка выбирались стандартные опорные горизонты (10, 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300 см). Дополнительные пробы отбирались в случаях контрастной смены литотипа осадка и появлении прослоев органического материала, гидротроилитовые пачки и др.

Осадок отбирался шприцами объемом 12 мл с обрезанными носиками в склянки 43 мл, заполненные насыщенным раствором NaCl с добавлением консерванта (0.5 мл хлоргексидинабиглюконата 0.05%). В качестве газовой фазы применялся гелий (12 мл), который напускался в склянки с помощью газового мешка “Tedlar Bag Dual Valve” (USA) с двумя клапанами. Для определения He и H₂ применялись склянки 68-100 мл, заполненные насыщенным раствором NaCl, в качестве газовой фазы применялся воздух (12 мл). Пробы интенсивно встряхивались не менее 4-х часов на перемешивающем устройстве LS 110 (Россия), обрабатывались в ультразвуковой ванне FineSonicE05, затем газовая фаза извлекалась шприцем, и проба газа вводилась в хроматограф.

Для хроматографического анализа состава углеводородных газов на борту судна использовался хроматограф «Кристалл-Люкс 4000М», снабженный пламенно-ионизационным детектором и двумя детекторами по теплопроводности. Для хроматографического анализа гелия и водорода - использовался газовый хроматограф «Хроматэк-Газохром 2000», газ-носитель аргон.

Расчет концентраций метана, гелия, водорода, растворенных в морской воде, определялся методом равновесного парафазного анализа с использованием констант растворимости по методике S. Yamamoto [Yamamoto et al. 1976] в модификации D. Wiesenburg and N. Guinasso [Wiesenburg, Guinasso, 1979]. Концентрации метана и гелия в осадке приводятся в ppm (1×10⁻⁴%).

Методика расчета потоков метана на границе «вода-атмосфера».

Потоки метана с поверхности моря были рассчитаны для каждой точки отбора проб по результатам измерений концентраций растворенного метана в поверхностном слое морской воды с учетом температуры и солености, содержаний метана в приводном слое атмосферы и скоростях ветра на момент отбора проб. Непрерывные метеорологические

измерения проводились в течение всех рейсов на портативной метеостанции Davis Vantage Pro2 (USA). Расчет проводился по методу, описанному в работах [Мишукова и др., 2007; Vereshchagina et al., 2013]. Использовалась формула $F = \Delta C \cdot K^{общ}(1)$, где: $\Delta C = C_{изм} - C_{равн}$ - разность концентраций метана в морской воде, рассчитывается как разность между измеренной концентрацией метана и равновесной концентрацией, которую имел бы атмосферный метан в морской воде при данной температуре, солености и при атмосферном давлении; $K^{общ} = K_t + K_o + K_p$, (2) $K^{общ}$ - суммарный коэффициент газообмена на границе вода-воздух; K_t - термический коэффициент газообмена; K_o - коэффициент газообмена для обрушений волн; K_p - коэффициент газообмена для схлопывания пузырьков. Степень пересыщения $N(\%)$ рассчитывался для каждой пробы по формуле: $N = (\Delta C / C_{равн}) \cdot 100$ (3).

Данные о положении эпицентров, времени и магнитудах землетрясений за 2011-2017 гг. для учета влияния сейсмической ситуации района на момент проведения экспериментальных исследований взяты из электронного ресурса http://neic.usgs.gov/neis/bulletin/neic_edau_1.htm.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Метан на поверхности моря и в водной толще

За все время наблюдений (2012-2018 г.г.) на всей исследуемой акватории потоки метана на границе вода-атмосфера составляли $-1.6 \div 482$ моль/(км²×сут.; концентрации метана изменялись от 2,3 до 115 нмоль/л, показатель пересыщения вод метаном $N(\%)$ от -12 до 4170 %. Для двух станций в рейсе ОР-55 в 2018 г. в северной части Татарского пролива наблюдалось недосыщение и, как следствие, происходило поглощение метана из атмосферы. На всей остальной исследуемой акватории концентрации метана превышали равновесные с атмосферой значения. Разность между измеренной и равновесной концентрациями метана (ΔC) составила $-0.3 \div 112$ нмоль/л (минимум в рейсе ОР-55, максимум - LV70), равновесные концентрации $C_{равн}$ изменялись в диапазоне $2.4 \div 3.4$ нмоль/л. В качестве сезонного примера на рисунке 3 представлено распределение концентраций метана в поверхностном слое морской воды в южной части Татарского пролива для осени 2017 года.

Максимальные концентрации метана в морской воде до 27 нмоль/л фиксируются в восточной части района исследований. В северо-восточной и северной частях акватории концентрации ниже, но выделяются зоны с локальными повышенными значениями до 10 нмоль/л, а в западной части, контролируемой подводным продолжением Сихотэ-Алинского вулканогена, концентрации еще ниже. Равновесные с атмосферой

концентрации изменялись от 2.4 до 3.4 нмоль/л в основном из-за изменения температуры воды. В сентябре-октябре 2017 г., измеренные концентрации метана превышали равновесные значения в 2-9 раз. Показатель пересыщения поверхностных вод метаном N (%) составлял 60-880 %, минимальные значения менее 100 % осенью 2017 г. наблюдалась в южной глубоководной части полигона.

На рис. 3 приведено также распределение поверхностных течений на период отбора проб морской воды для конца сентября – середины октября. Течение в направлении с юга на север по центральной части пролива имеет несколько ответвлений на запад и восток, где образуются многочисленные разнонаправленные вихревые циркуляции, что согласуется с работой [Пищальник и др., 2011].

Как было показано в работе [Мишукова и др., 2015] сильное выделение метана из подводных источников в виде устойчивых струй газовых пузырьков на западном шельфе и склоне о. Сахалин приводит к формированию горизонтально ориентированных слоев с повышенными содержаниями метана. На рис. 4 приведено вертикальное распределение концентраций метана в морской воде в двух районах в зоне влияния глубоководных факелов (рис. 4а) и факелов, расположенных на глубинах 300 - 400 м (рис. 4б), по данным экспедиций на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV67 и LV70). Схема расположения станций показана на рис. 4в. Вблизи этих станций были подняты газогидраты.

Из данного рисунка видно, что наблюдается неоднородное распределение растворенного метана по глубине, экстремумы образуются на нескольких горизонтах: в придонном горизонте, на некотором расстоянии от дна, на промежуточных глубинах и в поверхностном слое. Присутствие хорошо прогретого распресненного поверхностного слоя морской воды в августе гасит турбулентный обмен на границе вода-атмосфера и препятствует выходу метана в атмосферу, который накапливается в толще морских вод на разных горизонтах. В осенний период процессы конвекции будут способствовать выносу метана сосредоточенному в промежуточных горизонтах на поверхность и увеличивать вынос метана в атмосферу, что подтверждается приведенными данными.

Распределение потоков метана на границе вода-атмосфера

Полученные результаты говорят о том, что южная часть Татарского пролива является районом устойчивой эмиссии метана в атмосферу. На рис. 5 показано распределение потоков метана в южной части Татарского пролива. За основу взяты значения потоков метана в атмосферу для рейса ОР-54, осенью 2017 г.

Поле значений потоков метана в атмосферу в районе исследования отличается неравномерным распределением, как и в соседних районах Японского моря и на акватории Охотского моря [Мишукова, и др., 2011; Обжиров, и др., 2016; Мишукова, и др., 2017, Мишукова, Шакиров, 2017]. На рис. 5 хорошо видно, что зоны с повышенными значениями потоков метана окаймляют Южно-Татарский осадочный бассейн вдоль его западного, северного и восточного бортов.

Зона (очаг) I обнаружена в центральной части пролива, со значениями потоков 25-71 моль/(км²×сут). В пределах этой зоны максимальными значения выделяется очаг Ia, глубины моря 300-700 м. В его пределах по данным 4 рейсов НИС «Академик М.А. Лаврентьев» 2012-2015 г.г. можно отметить три группы высоких значений потока метана, приуроченных к факелам, в окрестностях которых были подняты газогидраты. Максимальные значения потока метана составили до 482 моль/км²×сут.

Зона II картируется в восточной части района занимая глубоководную, склоновую и шельфовую области. Эта зона проявления многочисленных газовых факелов вдоль юго-западного склона о. Сахалин характеризуется очень сильной изменчивостью потоков от 8 до 95 моль/км²×сут.

В юго-восточной части района исследований проявляется очаг III: интенсивная эмиссия метана до 110 моль/км²×сут наблюдается на акватории шельфа. На участке новообразованных бенчей в результате землетрясения 2007 года вблизи Невельска по материалам работ авторов 2014 г. концентрации метана в морской воде достигали 3000 нмоль/л, что указывает на пузырьковый перенос газа. В склоновой области потоки с поверхности моря составляют 54 моль/км²×сут. Следует отметить, что очаг эмиссии метана III, как и очаг I, расположены в зоне сильных современных землетрясений.

В глубоководной части (глубины >700 м) южнее очага I можно выделить зоны IV и V. Наличие локальных очагов эмиссии метана меньшей интенсивности 20-40 моль/км²×сут. в западной части Южно-Татарского осадочного бассейна как в склоновой области – зоны VI, VII, так и в шельфовой – зона VIII, указывает на то, что здесь, вероятно, существуют источники метана. Это, как будет показано ниже, согласовывается с распределением зон высоких концентраций метана в осадочных отложениях.

Кроме выделенных зон повышенных значений потоков метана в атмосферу были закартированы и локальные участки, как эмиссии, так и стока этого газа. Так, осенью 2018 г. (ОР-55) в южной части исследуемой акватории на двух станциях зафиксированы повышенные потоки 135 моль/км²×сут. и 106 моль/км²×сут. В северной части Татарского пролива по результатам съемки в осенние сезоны 2017 и 2018 г.г. выделяются 2 станции с высокими значениям потоков метана 54 моль/км²×сут. (ОР54) и 127 моль/км²×сут. (ОР55)

и 2 станции, на которых происходит поглощение метана из атмосферы $-0,3 \text{ моль/км}^2 \times \text{сут.}$; $-1,6 \text{ моль/км}^2 \times \text{сут.}$ (OP55).

В целом, потоки метана в 2013, 2014, 2015, 2017, 2018 гг. в южной части района исследований были более высокими по сравнению с 2012 г. Этому может быть несколько причин: 1) вероятно, в результате землетрясений могли активизироваться газовые выходы; 2) во время проведения экспедиционных исследований в 2013, 2014, 2015, 2017, 2018 гг. преобладали более высокие скорости ветра, чем в 2012 г.; 3) для вод летней модификацией потоки метана с поверхности моря будут меньше, несмотря на то, что на акватории есть активные источники метана; 4) повышенные потоки в сентябре - октябре 2017 г., наблюдались вследствие осенней конвекции, способствующей выносу метана из промежуточных горизонтов, также высоких скоростей ветров, приводящих к быстрому обновлению водной поверхности. В пользу первой причины также косвенно свидетельствует то, что в 2012 г. в осадках были обнаружены проявления газогидратов в основном в виде мелких включений и линз [Operation report, 2013], а в последующие годы, на тех же районах вплоть до кернов, сплошь заполненных крупными включениями газогидратов [Operation report, 2015].

Метан и гелий в кернах донных осадков

Кроме проб воды за период исследований в Татарском проливе 2012-2018 гг. было изучено 119 кернов (1420 проб) осадочных отложений (рис. 2), показавших неравномерное распределение углеводородных газов и асимметричное строение газогеохимического поля Южно-Татарского осадочного бассейна. В пределах структур газовых выходов («каналов») во многих кернах осадков зафиксированы признаки газонасыщения, концентрации метана в свободной фазе превышали 5% об., отмечалось "вздутие" осадка и потрескивание при нажатии из-за лопающихся газовых пузырьков, признаки и проявления аутигенной карбонатной минерализации (псевдоморфозы глендонитов). Некоторые керны были сильно газонасыщены (как правило, ниже поверхности дна более 3 м), разбиты многочисленными трещинами [Operation Report, 2013]. В северо-восточной части района исследования (зоны I и I а) в приповерхностных отложениях (до глубины 5 м ниже поверхности дна) установлены скопления газогидратов (11 кернов).

Метан установлен во всех пробах, отобранных из донных отложений в концентрациях от 0.35 ppm до 14.9% (медиана - 176 ppm). Общей тенденцией по всем отобранным кернам является чёткая закономерность увеличения концентраций метана с глубиной опробования. Обнаружены также положительные корреляционные связи с этаном и пропаном. Градиент возрастания концентраций был максимальным в кернах, содержащих газогидраты и газонасыщенные слои осадка. В целом, содержание метана в

нижних горизонтах опробования было от 1 до 5 порядков выше, чем в верхнем слое осадков.

На рисунке 6 показано распределение метана в поверхностном слое (0-15 см) донных отложений, совмещённое с точками замера потоков метана на границе вода-атмосфера за с 2012 по 2018 годы. Выявлено, что в поверхностных пробах (0-15 см) донных осадков содержание метана варьировало в концентрациях от 0.35 ppm до 683 ppm (медиана – 5.25 ppm). Наименьшие концентрации CH_4 были установлены в западной части и глубоководной акватории Татарского пролива, и не превышали 4 ppm (рис. 6). Максимальные содержания метана в поверхностном горизонте (0-15 см) были обнаружены в северо-восточной части Тернейского прогиба (зона I), в кернах, отобранных в районе газопроявлений и скоплений газогидратов. В данной области также зафиксирован максимальный поток метана на границе вода-атмосфера (рис. 5). Обширная площадь (зона III) повышенных значений метана, до 12 ppm находится в центральной части Татарского пролива, центральной части Тернейского прогиба. Остальные аномалии метана (зоны II, IV-VII) в поверхностном слое донных осадков распространены локальными участками в северо-западной, западной, юго-западной и южной части осадочного бассейна. Как правило, распространение этих аномалий приурочено к зонам поднятий и к тектоническим нарушениям различного ранга.

Высокие концентрации метана и гелия на одних и тех же участках могут указывать на существование глубинных зон проницаемости, а также быть индикаторами углеводородного флюида. В результате исследований содержания гелия и водорода в данном районе (2012-2017 гг.) в районах метановых сипов и газонасыщенных структур выявлено, что в приповерхностном слое осадков содержание гелия носит весьма изменчивый характер. Неравномерное распределение гелия со средними вариациями от 5 до 15 ppm в кернах осадках может указывать на колебания динамики восходящего потока газов (рис. 7).

Повышенное содержание в пробе донных отложений до 54 ppm на станции ОР54-26НС нуждается в дополнительном исследовании. Концентрации такого порядка авторами были обнаружены ранее в газогидратоносном интервале на северо-западном борте Курильской котловины [Шакиров и др., 2016]. Высокие концентрации гелия (вне зависимости от времени наблюдения) обнаружены авторами в Пугачевском и Южно-Сахалинском грязевых вулканах (до 52 ppm в свободном газе), а также в Синегорских источниках (до 105 ppm растворенного в воде гелия) и газах угольных месторождений о. Сахалин (до 15 ppm в выбросах газов) которые близко расположены к району исследования. Для сравнения, атмосферный фон по гелию составляет 5 ppm [Яницкий,

1979]. Изотопные отношения гелия сахалинских грязевых вулканов имеют значения $^3\text{He}/^4\text{He}$ $(1.0-3.8) \times 10^{-6}$ [Лаврушин и др., 1996], что близко к мантийному гелию $^3\text{He}/^4\text{He} \approx 10^{-5} \text{‰}$ [Мамырин, Толстихин, 1981]. Сходные данные получены для Камчатки $^3\text{He}/^4\text{He} \sim 10^{-5} \text{‰}$ [Чудаев, 2003].

Геологический контроль потоков метана

Изменчивость потоков метана с поверхности моря обуславливается, вероятно, и различием литосферных источников по площади и интенсивности.

Основные скопления факелов и самые высокие значения потоков метана с поверхности моря наблюдались в 2013-2017 гг. там, где были зарегистрированы землетрясения, магнитудой от 4.2 до 4.7 баллов, на глубине 9-32 км (очаг I, Ia рис. 5). Этот очаг повышенной эмиссии метана совпадает пространственно с зоной интенсивной деструкции субокеанической коры (рис. 8). Очаги в восточной части района исследований контролируются блоками Хоккайдо-Сахалинской складчатой системы, вдоль западной части, которой простирается Западно-Сахалинская разломная зона (рис. 1,8). Примечательно, что локальные субвертикальные геологические тела, маркирующие флюидодинамические системы на рис. 2, 8 и расположенные в южной и центральной частях района исследования не проявлены в потоке метана. Вероятно, это связано с тем, что они находятся достаточно глубоко по разрезу и перекрыты сверху осадочной толщей, а также районы их распространения менее подвержены влиянию сильных землетрясений.

Миграция газа из осадочной толщи к поверхности по разломам судя по полученным данным и активности факелов происходит пульсационно. Источники, дренируемые разломами, находятся, вероятно, на глубине не ниже зоны «нефтяного окна», что подтверждается изотопным составом углерода метана и этана, а также повышенными концентрациями водорода и гелия в морской воде и донных отложениях. Изменчивость потоков метана на границе вода-атмосфера и факелов отражает изменчивость активности донных источников.

Источниками метана в западной части (субмоноклинальный прибортовой блок на рис. 2) могут быть скопления природного газа в локальных структурах (Приморская, Самаргинская и др.) [Харахинов, 2010]. В осадках станции LV59-27НС аномалий по содержанию гелия и водорода не обнаружено.

Изучение большинства колонок, поднятых в Татарском проливе (станции 40НС, 29НС, 43НС, 42НС, 31НС и др.) в районе газовых факелов и в их окрестностях подтверждают факт преобладания катагенетической доли углеводородных газов: значения $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ варьируют от -43 до -50 ‰VPDB, а $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_2\text{H}_6$ от -15 до -23 ‰VPDB.

Восточная, самая активная в отношении потока метана в атмосферу часть Южно-Татарского прогиба входит в газогеохимическую углегазонасную зону с повышенной долей катагенетических газов [Шакиров, Сырбу, 2012]. В эту же зону входит юго-западная часть о. Сахалин. Для южной и юго-западной части острова установлено поступление газов со средним изотопным составом углерода метана $-21 \div -43\text{‰ VPDB}$. Это обусловлено тектоно-магматическими и флюидодинамическими особенностями геологического строения и углегазонасностью юго-западной части острова. В ее пределах активная вертикальная разгрузка флюидов проявляется в виде выходов углеводородов, грязевых вулканов и термальных источников, углегазовых проявлений которые приурочены к бортам складчатых структур и разломным зонам разных рангов. Установлено, что во время сейсмо-тектонической активизации усиливается эмиссия грязевулканических флюидов и потоков газа [Ершов и др., 2011].

В пределах района работ на восточном борте Южно-Татарского прогиба скважинами Старомаячинской 1 и 2, и Красногорской вскрыты прослои углей [Харахинов, 2010; Нечаюк, Обжиров, 2010], которые могут быть источниками метана в осадочных бассейнах. Изотопный состав углерода метана газогидратонасных осадков (например, $\delta^{13}\text{C} - \text{CH}_4 - 47\text{‰}$, LV59-27HC) совпадает со средними значениями для метана угольных пластов юга Сахалина ($\delta^{13}\text{C} - \text{CH}_4 - 35.3 \div - 55.9\text{‰}$) [Гресов и др., 2009.].

В 2012 и 2013 гг. в пределах самой активной зоны газовыделения Ia (глубина воды 320-350 м) были подняты газогидраты. Изотопный состав углерода метана и этана, отобранных из кернов двух станциях в этой области на НИС «Академик Лаврентьев» №59 указывают на катагенетическое образование природного газа ($\delta^{13}\text{C} - \text{CH}_4 - 47 \text{‰ VPDB}$, $\delta^{13}\text{C} - \text{C}_2\text{H}_6 - 23 \text{‰ VPDB}$). В связи с этим, можно говорить о возможности поступления катагенетических газов через толщу вод Татарского пролива в атмосферу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределение повышенных концентраций метана, водорода и гелия в донных осадках и морской воде определяется пространственным распределением и геологическим контролем подводных источников газа. Геолого-структурное положение выходов катагенного метана на о. Сахалин и прилегающем шельфе и склоне обуславливает активное его выделение в толщу морских вод и атмосферу. В целом, по повышенным потокам метана в атмосферу выделяются бортовые (западная, северная и восточная) части Южно-Татарского прогиба.

Повышенные потоки метана с поверхности моря являются важными показателями активности геологических процессов. Повышенные значения гелия, быть признаком

миграции глубинного флюида из зон нефтегазогенерации в Южно-Татарском прогибе. Выявленные закономерности распределения метана, водорода, гелия и термогенного изотопного состава углерода метана обусловлено тектономагматическими и флюидодинамическими особенностями геологического строения Татарского пролива.

Потоки метана с поверхности моря наряду с газогеохимическими полями в осадках и морской воде могут являться индикаторами наличия еще не обнаруженных углеводородных залежей, при этом максимальными значениями потока картируются скопления газогидратов. К газовым факелам и структурам газовых выходов типа «чимней» приурочены максимальные рассчитанные величины потоков метана.

Экспедиции выполнены при поддержке Совета по гидросфере Земли ФАНО РФ, финансирование обеспечено фондом ФАНО РФ и частично международными проектами. Исследование выполнено в рамках ФНИ "Газогеохимические поля морей Востока Азии, геодинамические процессы и потоки природных газов, влияющие на формирование геологических структур с залежами углеводородов и аутигенной минерализации в донных осадках". Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 18-05-00153А, РФФИ 18-35-00047 мол_а и Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых МК-2286.2017.5. Авторы благодарят рецензентов за конструктивные замечания, позволившие значительно улучшить работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дымович В. А., Евсеев С. В., Евсеев В. Ф., Нестерова Е. Н., Маргулис Л. С., Атращенко А. Ф., Беляев И. В., Деркачев А. Н., Зелепугин В. Н. и др., Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-54 – Александровск-Сахалинский. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 524 с.

Геология, геодинамика и перспективы нефтегазоносности осадочных бассейнов Татарского пролива / А.Э. Жаров, Г.Л. Кириллова, Л.С. Маргулис, Л.С. Чуйко, В.В. Куделькин, В.Г. Варнавский, В.Н. Гагаев; отв. ред. Кириллова Г.Л. Владивосток: ДВО РАН, 2004, 220 с. (Серия «Осадочные бассейны Востока России» / гл. ред. член-корреспондент РАН А.И. Ханчук; т. 2).

Гресов А.И., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока России и перспективы ее промышленного освоения. Т. I. Углеметановые бассейны Приморья, Сахалина и Хабаровского края. Владивосток: Дальнаука, 2009, 246 с.

Государственная геологическая карта. Масштаб 1: 1 000 000 (новая серия). Лист L-(53), (54) – Кавалерово. Объяснительная записка. СПб., 1994. 176 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000000 (новая серия). Лист L-(54), (55); K-(55) – Южно-Сахалинск. Объяснительная записка. СПб., 1995. 146 с.

Ершов В.В., Шакиров А.И., Обжиров А.И. Изотопно-геохимические характеристики свободных газов южно-сахалинского грязевого вулкана и их связь с региональной сейсмичностью // Доклады Академии Наук, 2011, Т. 440, № 2, с. 256-261.

Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г. Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, гидрохимическим и геологическим данным) // Литология и полезные ископаемые, 1996, №6, с. 625-647.

Мамырин Б.А., Толстихин И.Н. Изотопы гелия в природе. М.: Энергоиздат, 1981, 222 с.

Мельников О.А., Ильев А.Я. О новых проявлениях грязевого вулканизма на Сахалине // Тихоокеанская геология, 1989, №3, с. 42-48.

Мишукова Г.И., Верещагина О.Ф. Распределения метана и его потоков на границе вода-атмосфера на акваториях впадины Дерюгина, шельфа и склона о-ва Сахалин Охотского моря // Вестник ДВО РАН, Владивосток: Дальнаука, 2011, №6, с. 64-71.

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. М., 2015, №6, с. 89-96.

Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И. Распределение метана и его потоки на границе вода–атмосфера в некоторых районах Охотского моря // Вестник ДВО РАН. 2010, № 6. С. 36–43.

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., Шакиров Р. Б. Пространственная изменчивость распределения метана в морской среде и его потоков на границе вода–атмосфера в западной части Охотского моря // Водные ресурсы. М. Наука, 2017, т. 44, № 4, с.493-503.

Мишукова Г.И., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Потоки метана на границе вода-атмосфера в Охотском море // Доклады Академии Наук. М. Наука, 2017, т. 475, № 6, с. 697-701.

Нечаюк А.Е., Обжиров А.И. Структуры и нефтегазоносность бассейнов Татарского пролива // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2010, №2, выпуск №16, с. 27-34.

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

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, 2016, №3, с. 71-81.

Пищальник В.М., Леонов А.В., Архипкин В.С., Мелкий А.В. Математическое моделирование условий функционирования экосистемы Татарского пролива. Южно-Сахалинск, Изд-во СахГУ, 2011, 104. с.

Родников А.Г., Забаринская Л.П., Сергеева Н.А. Глубинное строение сейсмоопасных регионов Земли (о.Сахалин) // Вестник ОНЗ РАН, Т.6, 2014, NZ1001.

Харахинов В.В. Тектоника Охотоморской нефтегазоносной провинции: Дисс. ... д-ра геол. - минерал. наук. Оха-на-Сахалине, 1998, 77 с.

Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010, 276 с.

Чудаев В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2003, 391 с.

Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С. Природные источники метана и углекислого газа на о. Сахалин и их вклад в формирование эколого-газогеохимических зон // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2012, №4, с. 344-353.

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.

Яницкий И.Н. Гелиевая съемка, М.: Недра, 1979, 96 с.

Fenwick, L., Capelle, D., Damm, E., Zimmermann, S., Williams, W. J., Vagle, S., and Tortell, P. D.: Methane and nitrous oxide distributions across the North American Arctic Ocean during summer, 2015 // J. Geophys. Res.-Oceans, 2017, Vol. 122, p 390-412. <https://doi.org/10.1002/2016JC012493>

Fischer D, Mogollón JM, Strasser M, Pape T, Bohrmann G, Fekete N, Spiess V, Kasten S Subduction zone earthquake as potential trigger of submarine hydrocarbon seepage // Nature Geoscience, 2013, Vol. 6, p.647-651.

Kvenvolden KA, Rogers BW () Gaia's breath-global methane exhalations // Mar Pet Geol., 2005, Vol.22(4), p.579-590.

Mau S, Heintz MB, Valentine DL Quantification of CH₄ loss and transport in dissolved plumes of the Santa Barbara Channel, California // *Cont Shelf Res.*, 2012, Vol. 32, p.110-120.

Mau, S., Rehder, G., Arroyo, I. G., Gossler, J., and Suess, E.: Indications of a link between seismotectonics and CH₄ release from seeps off Costa Rica // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2007, Vol. 8, Q04003, doi:10.1029/2006GC001326

Mau, S., Römer, M., Torres, M. E., Bussmann, I., Pape, T., Damm, E., Geprägs, P., Wintersteller, P., Hsu, C.-W., Loher, M., and Bohrmann, G.: Widespread methane seepage along the continental margin off Svalbard - from Bjørnøya to Kongsfjorden // *Sci. Rep.*, 2017, Vol.7:42997, p.1-13.

Mau S, Valentine DL, Clark JF, Reed J, Camilli R, Washburn L. Dissolved methane distributions and air-sea flux in the plume of a massive seep field, Coal Oil Point, California // *Geophys Res Lett*, 2007, Vol. 34: L22603.

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

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

Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project, 2015, R/V Akademik M. A. Lavrentyev Cruise 70, New Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology / ed. H. Minami, Y.K. Jin, B. Baranov, N.A. Nikolaeva, A. Obzhairov. Kitami, 2016, 119 p.

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.I. Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, V.86–87, p. 25–33.

Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and seawater // *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1976, Vol, 21, № 1, p. 78–80.

Suess E, Torres ME, Bohrmann G. et al. Sea floor methane hydrates at Hydrate Ridge, Cascadia Margin, Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection // *Geophys. Monogr. Ser.* 2001, 124 p. (eds. Pauli CK, Dillon WP), AGU, Washington, D. C: 2001:87–98).

Wiessenburg DA, Guinasso NL. Equilibrium solubility of methane, carbon dioxide, and hydrogen in water and sea water // *J Chem Eng Data Texas*, 1979, Vol. 4, p. 356–360.

Рис. 1. Структурно тектоническая схема Южно-Татарского осадочного бассейна. 1 – а) тектонические, б) – вулкано-тектонические поднятия: Монеронское (1), Холмское (2), Пионерское (3), Приморское (4), Совгаванское (5), Красногорское (6), Углегорское (7), Ванинское (8), Черноморское (9), Каменское (10), Восточно-Сюркумское (11), Сюркумское (12); 2 – антиклинальные структуры в осадочном чехле; 3 – а) осадочные бассейны, б) депрессии: Монеронская (1), Самаргинская (2), Холмская (3), Ясноморская (4), Нельминская (5), Слепиковская (6), Тернейский прогиб (7), Ламанонский прогиб (8), Лесогорская (9), Тумнинская (10); 4 – газопроявления: а) донные выходы газа по данным газогеохимических исследований ТОИ ДВО РАН, б) «газовые» колонны в осадочной чехле (чимни) [Харахинов, 2010]; 5 – разломы: а) достоверные, б) скрытые, в) предполагаемые, г) прочие, Ц-С – Центрально-Сахалинский, З-С – Западно-Сахалинский, Р-М – Ребун-Монеронский [Государственная геологическая карта РФ 1994, 1995, 2016; Жаров и др., 2004]; 6 – землетрясения: а) глубина гипоцентра в км, б) магнитуда. На врезке – положения района исследований.

Рис. 2. Схема района работ. 1-Номера рейсов-а; станции отбора проб воды-б; станции отбора проб донных осадков-в. 2- структурно-геологические и нефтегазопромысловые скважины: 2- Гавриловская-1; 3 - Гавриловская-2; 4 – Изыльметьевская-1; 5 – Изыльметьевская-2; 6 – Надеждинская-1; 7 – Красногорская-1; 8 – Старомаячинская-1; 9 – Старомаячинская-2; 10 – Виндская-1; 11 – Кузнецовская-1; 12 – Монеронская; 13 – Ильинская.

Рис. 3. Распределение метана, нмоль/л (а), степени пересыщения вод метаном, % (б) в поверхностном 4 м слое морской воды. Стрелками показаны поверхностные течения на акватории Татарского пролива, кружками обозначены положения газовых факелов.

Рис. 4. Вертикальное распределение метана, нмоль/л в водной толще Татарского пролива: а) на глубоководных станциях с глубиной до 700 м; б) на станциях с глубиной до 400 м, в) схема расположения этих станций для экспедиций НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (рейс № 67, июнь 2014 г.; рейс №70, июнь 2015 г.), пример эхограмм глубоководного газового факела в Татарском проливе (LV70).

Рис. 5. Распределение потоков метана на границе вода-атмосфера, моль/км²×сут. на карте рельефа дна района исследований. Условные обозначения: 1 – станции отбора проб воды в рейсах LV59, 62, 67; 2 – LV70, OP54; 3 – OP55. 4 - эпицентры крупных землетрясений за

2011-2017 годы; 5 - районы с повышенным значением потока метана; 6 – изобаты; 7 - положения газовых факелов; 8 – поток метана на границе вода-атмосфера моль/км²×сут. (единая градация для площадного распределения – рейс ОР54 и для отдельных станций). Названия и тип разломов см. рис. 1.

Рис. 6. Распределение потоков метана на границе вода-атмосфера, моль/км²×сут. и концентраций метана в поверхностном слое (0-15 см) донных осадков в районе исследований. Условные обозначения: 1 – станции отбора проб воды в рейсах LV59, 62, 67; 2 – LV70, ОР54; 3 – ОР55. 4 - эпицентры крупных землетрясений за 2011-2017 годы; 5 - районы с повышенным значением концентраций метана в поверхностном слое донных осадков; 6 – изобаты; 7 - положения газовых факелов; 8 – поток метана на границе вода-атмосфера моль/км²×сут. (градация приведена для всех станций); 9 –распределение метана в поверхностном слое донных осадков, CH₄ ppm. Названия и тип разломов см. рис. 1. Выделенный квадрат соответствует зоне Ia с повышенными значениями потока метана на границе вода-атмосфера.

Рис. 7. Распределение гелия (а) в кернах осадка Южно-Татарского прогиба и схема станций (б) (рейс №54 НИС «Академик Опарин»)

Рис. 8. Распределение потоков метана на карте геологического строения и флюидодинамических характеристик Татарского пролива и западной части о. Сахалин. На основе [Харахинов, 2010; Харахинов, 1998]. Условные обозначения: 01 - субвертикальные геологические тела – индикаторы локальной флюидодинамической активности [Харахинов, 2010]; 02 - изопакиты кайнозойской складчатой области; 03 - сбросы; 04 - взбросо-надвиги; 05 - олигоцен-эоценовые вулканотектонические структуры; 06 - ареалы позднемиоцен-поиоценовой вулканотектонической активности; структурные элементы: 07 - субмоноклиальный склоновый западный прибортовой Присихотэалинский блок; 08 - Северо-Татарский грабен (суббассейн) – район частичной деструкции континентальной коры; 09 - зона интенсивной деструкции субокеанической коры; 10 - Южно-Татарская глубоководная котловина (суббассейн) с субокеанической корой; 11 - блоки Хоккайдо-Сахалинской складчатой системы; 12 - ареалы позднемиоцен-плиоценовой вулканотектонической активности; 13 - зональные рифтогенные грабены с частичной деструкцией континентальной коры; 14 – грязевые вулканы; 15 – нефтепроявления; 16 – газопроявления; 17 – газовые факелы; 18 – разломы, преимущественно сдвиги, предполагаемые; 19 – разломы установленные; 20 - разломные

зоны; 21– месторождения каменного угля; 22 – месторождения нефти; 23 – месторождения нефти и газа; 24 – месторождения газа; 25-- месторождения бурого угля; 26 – потоки метана (моль/ км²×сут.) для всех рейсов за период 2012-2018 г.г.















