Геология и геофизика, 2020, т. 61, № 9, с. 1215—1230

УДК 551.465;550.4.02.550:424

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

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

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/(км^2×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 сейсмотектонической активностью района, газогидратами, наличием очагов концентрирования, каналов миграции этих газов и глубинным строением района. 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.

Распределение метана, потоки метана, Японское море, Татарский пролив.

METHANE FLUXES AT THE WATER–ATMOSPHERE INTERFACE IN THE SOUTHERN TATAR STRAIT OF THE SEA OF JAPAN: DISTRIBUTION AND VARIATION

R.B. Shakirov, M.G. Valitov, N.S. Syrbu, A.V. Yatsuk, A.I. Obzhirov, V.F. Mishukov, E.V. Lifanskii, O.V. Mishukova, and A.S. Salomatin

We present the results of gas-geochemical surveys in the sea surface water layer, water column, and bottom sediments of the Tatar Strait (north of the Sea of Japan) in 2012, 2014, 2015, 2017, and 2018. The distribution of methane fluxes at the water–atmosphere interface is examined, and its relationship with the geologic structure of the Tatar Strait area is discussed. Methane emission has been revealed throughout most of the Tatar Strait area. The most intense methane fluxes at the water–atmosphere interface, up to 482 mol/(km^2×day), are observed on the gas-bearing southwestern shelf and on the gas hydrate slope of Sakhalin Island. The high concentrations of methane in seawater and the high contents of methane, hydrogen, and helium in the shelf and slope bottom sediments are probably due to the seismotectonic activity in the region, the presence of gas hydrates, gas concentration zones, gas migration channels, and the regional deep structure. Application of the model for calculation of the flux and impurity transfer fields to the studied water area has shown high methane emission from the sea surface in areas of vertical gas migration from lithospheric sources. The contribution of hydrodynamic factors to the formation of such zones of high methane emission is less than that of geologic factors. The obtained data on methane flux at the water–atmosphere interface for a shallow sea gave a detailed insight into the main gas discharge zones in the southern Tatar Strait.

Methane distribution, methane fluxes, Sea of Japan, Tatar Strait

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

© 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, 2020

✉e-mail: ren@poi.dvo.ru

DOI: 10.15372/GiG2019184

литосферных источников интенсивно изучаются как в западной, так и восточной частях Тихого океана. Источником поступления метана являются газы, просачивающиеся из углеводородных скоплений: они служат их индикаторами и маркируют участки эмиссии метана в атмосферу. В работе [Mau et al., 2007b] изучены выходы природного газа из прибрежных угольных и нефтяных источников в Тихом океане около г. Санта-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., 2017] отмечают, что в западной части Северного Ледовитого океана поверхностный распресненный слой ограничивал эмиссию метана в атмосферу. Авторы статьи [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 [Suess et al., 2001; Mau et al., 2012]. «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, 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. В работе [Kvenvolden, Rogers, 2005] предположено, что в настоящее время катастрофические выбросы CH_4 при разложении газогидрата, макро- и микропросачивания из грязевых вулканов, магматических вулканов, геотермальных областей и разломных зон океана могли повлиять на глобальные климатические изменения в прошлом. 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 их обратная связь с сейсмотектоникой: сделан вывод о том, что землетрясения в 2002 г. закрыли пути миграции метана и снизили его выбросы [Mau et al., 2007a]. До недавнего времени считалось, что подводные газовые выходы, вызванные землетрясениями, составляют естественный механизм утечки углерода из осадочной толщи в гидросферу и не вносят заметного вклада в бюджет местного или глобального цикла углерода. В настоящее время влияние землетрясений на аномальные выбросы метана установлены в разных районах Мирового океана. Д. Фишер [Fischer et al., 2013] 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. Благоприятные условия для такого сценария особенно хорошо проявлены для присахалинской акватории Охотского и Японского морей [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 и 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 помогает 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…, 2004; Харахинов, 2010] и показана на рис. 1.

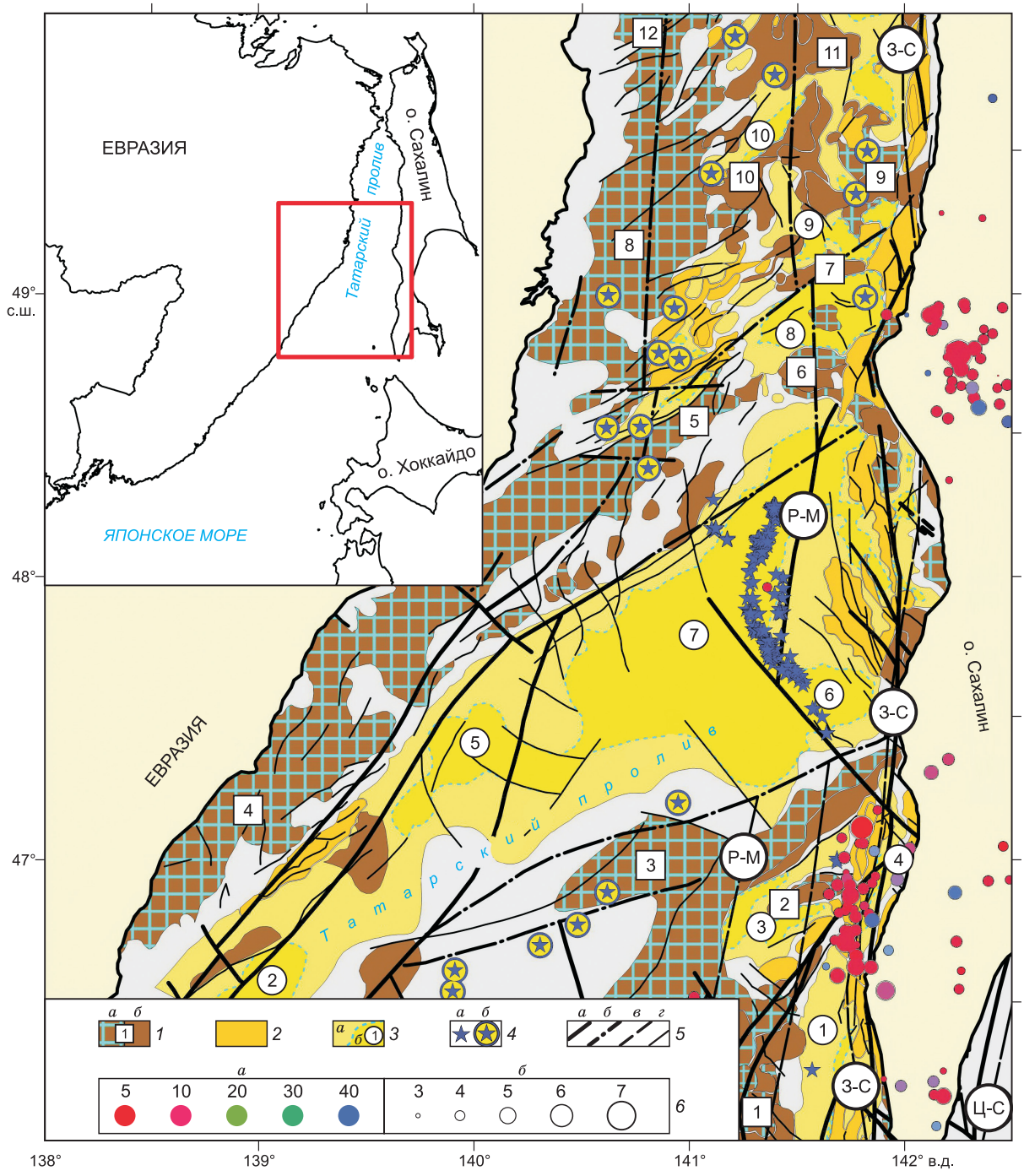


Рис. 1. Структурно-тектоническая схема Южно-Татарского осадочного бассейна.

1 — *а* — тектонические, *б* — вулканотектонические поднятия: 1 — Монеронское, 2 — Холмское, 3 — Пионерское, 4 — Приморское, 5 — Совгаванское, 6 — Красногорское, 7 — Углегорское, 8 — Ванинское, 9 — Черноморское, 10 — Каменское, 11 — Восточно-Сюркумское, 12 — Сюркумское; *2* — антиклинальные структуры в осадочном чехле; *3* — *а* — осадочные бассейны, *б* — депрессии: 1 — Монеронская, 2 — Самаргинская, 3 — Холмская, 4 — Ясноморская, 5 — Нельминская, 6 — Слепиковская, 7 — Тернейский прогиб, 8 — Ламанонский прогиб, 9 — Лесогорская, 10 — Тумнинская; *4* — газопроявления: *а* — донные выходы газа по данным газогеохимических исследований ТОИ ДВО РАН, *б* — «газовые» колонны в осадочном 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 [Шапошников и др., 1994, 1995; Дымович и др., 2016; Геология…, 2004]; *6* — землетрясения: *а* — глубина гипоцентра (км), *б* — магнитуда. На врезке — положение района исследований.

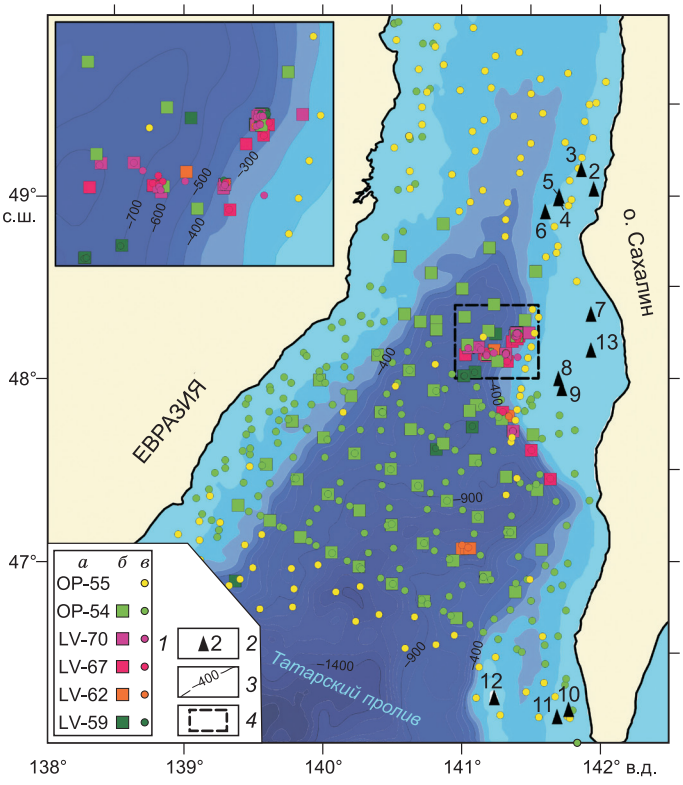
Южно-Татарский прогиб ограничен разломными зонами — с запада Восточно-Приморской, с востока Западно-Сахалинской. С последней зоной разломов связаны вулканы, действовавшие 5—10 млн лет назад [Мельников, Ильев, 1989]. В целом Татарский пролив представляет собой крупный рифтогенный прогиб протяженностью 1200 км и шириной 60—300 км. Западное материковое побережье сложено преимущественно слабодислоцированными кайнозойскими, значительно реже верхнемеловыми вулканитами среднего и основного составов. 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/м^2) и наличие каналов газово-флюидной проницаемости в осадочной толще [Харахинов, 2010; Родников и др., 2014].

Ранее, в ходе исследования газогеохимических полей придонного слоя толщи 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 иностранной 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], т. е. на восточном борте Южно-Татарского прогиба.

Эти и другие особенности Южно-Татарского осадочного бассейна указывают на то, что он должен являться активным поставщиком метана из донных отложений не только 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 (OP-54, сентябрь-октябрь 2017 г.), НИС «Академик Опарин» № 55 (OP-55, октябрь 2018 г.).



Основные работы были выполнены в южной части Татарского пролива, здесь кроме проб воды с поверхностных горизонтов и из водной толщи 2012—2018 гг. отбирались керны донных отложений. В северной части Татарского пролива, в которой расположен Северо-Татарский осадочный бассейн, были взяты только пробы воды с поверхности моря осенью 2017 и 2018 гг. (НИС «Академик Опарин» № 54 и НИС «Академик Опарин» № 55). Три рейса состоялись в начале лета (июнь), один в августе и два осенью. В результате

Рис. 2. Схема района работ.

1 — а — номера рейсов, *б* — станции отбора проб воды, *в* — станции отбора проб донных осадков; *2* — структурно-геологические и нефтегазопоисковые 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; *3* — изобаты (м); *4* — часть района, наиболее детальная съемка которого показана на врезке.

этих экспедиций удалось покрыть район исследований относительно равномерной сетью наблюдений (см. 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 ч осуществлялся по ходу движения судна с помощью судового забортного проточного устройства на глубине 4 м от поверхности моря, которая затем поступала в термосолинограф SBE 21SEACAT (США) для непрерывного определения температуры и солености.

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

Воду отбирали в стеклянные емкости (флаконы) 68 мл, которые герметично закрывались. Затем в них для создания газовой фазы напускали 12 мл особо чистого гелия. Для определения He и H_2 в качестве газовой фазы использовали 12 мл воздуха. Затем пробы встряхивали 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 [Operation Report..., 2013, 2014]. Для опробования донных осадков применяли гидростатический пробоотборник длиной 550 или 350 см. При отборе проб осадка выбирали стандартные опорные горизонты (10, 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300 см). Дополнительные пробы были взяты в случаях контрастной смены литотипа осадка и появлении прослоев органического материала, гидротроилитовых пачек и др.

Осадок отбирали шприцами объемом 12 мл с обрезанными носиками в склянки 43 мл, заполненные насыщенным раствором NaCl с добавлением консерванта (0.5 мл хлоргексидина биглюконата 0.05 %). В качестве газовой фазы применялся гелий (12 мл), который напускали в склянки с помощью газового мешка Tedlar Bag Dual Valve (США) с двумя клапанами. Для определения He и H_2 использовались склянки 68—100 мл, заполненные насыщенным раствором NaCl, в качестве газовой фазы применялся воздух (12 мл). Пробы интенсивно встряхивались не менее 4 ч 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 применяли газовый хроматограф «Хроматэк-Газохром 2000», газ-носитель аргон.

Расчет концентраций метана, гелия, водорода, растворенных в морской воде, определялся методом равновесного парафазного анализа с помощью констант растворимости по методике [Yamamoto et al., 1976] в модификации [Wiessenburg, 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 скоростей ветра на момент отбора проб. Непрерывные метеорологические измерения проводились в течение всех рейсов на портативной метеостанции Davis Vantage Pro2 (США). Расчет осуществлялся по методу, описанному в работах [Мишукова и др., 2007; Vereshchagina et al., 2013]. Использовалась формула $F = \Delta C \cdot K^{общ}$, 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; $K^{общ} = K_т + K_о + K_п$, где $K^{общ}$ — суммарный коэффициент газообмена на границе вода—воздух; $K_т$ — термический коэффициент газообмена; $K_о$ — коэффициент газообмена для обрушений волн; $K_п$ — коэффициент газообмена для схлопывания пузырьков. Степень пересыщения N (%) рассчитывалась для каждой пробы по формуле: $N = (\Delta C/C_{равн})\cdot100$. Лаборатория газогеохимии ТОИ ДВО РАН имеет Свидетельство Росстандарта № 41 (паспорт ПС 1.047-18).

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_l.htm.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Метан на поверхности моря и в водной толще. За все время наблюдений (2012—2018 гг.) на всей исследуемой акватории потоки метана на границе вода—атмосфера составляли –1.6…482 моль/(км^2×сут.); концентрации метана изменялись от 2.3 до 115 нмоль/л, показатель пересыщения вод мета-

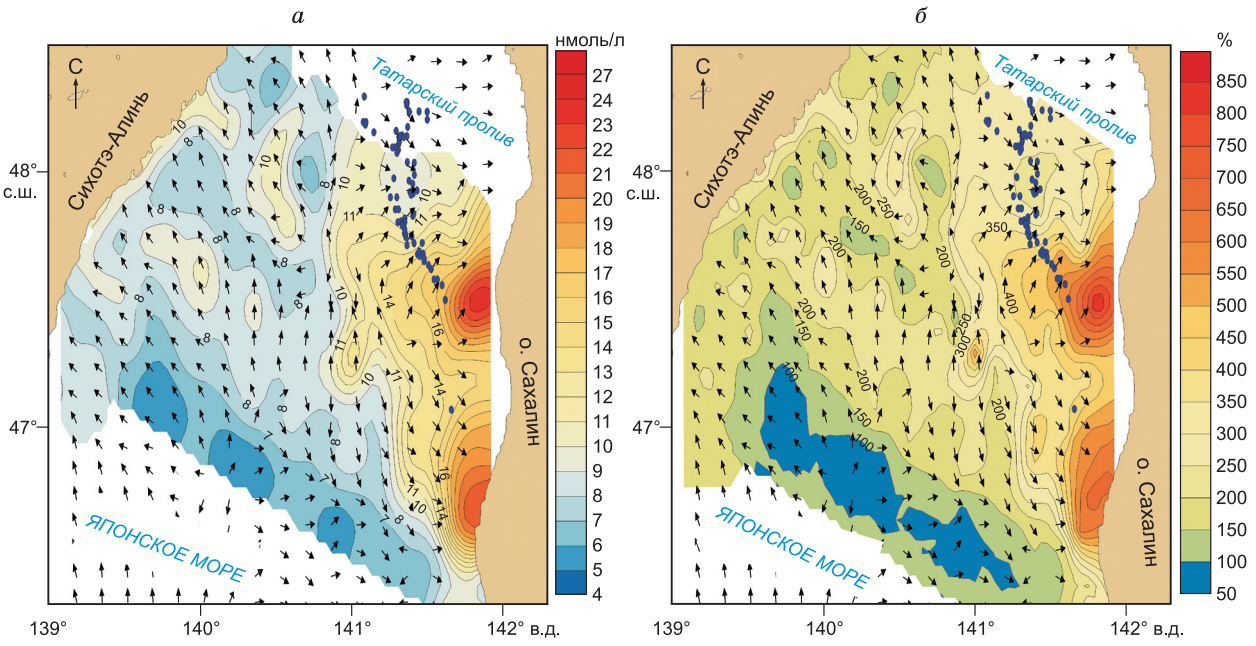


Рис. 3. Распределение метана (*а*), степени пересыщения вод метаном (*б*) в поверхностном 4-метровом слое морской воды.

Стрелками показаны поверхностные течения на акватории Татарского пролива, кружками обозначены положения газовых факелов.

ном 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…112 нмоль/л (минимум в рейсе ОР-55, максимум — LV-70), равновесные концентрации $C_{равн}$ изменялись в диапазоне 2.4—3.4 нмоль/л. В качестве сезонного примера на рис. 3 представлено распределение концентраций метана в поверхностном слое морской воды в южной части Татарского пролива для осени 2017 г.

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. наблюдались в южной глубоководной части полигона.

На рисунке 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 статье [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 рисунке 4 приведено вертикальное распределение концентраций метана в морской воде в двух районах в зоне влияния глубоководных факелов (см. рис. 4, *а*) и факелов, расположенных на глубинах 300—400 м (см. рис. 4, *б*), по данным экспедиций на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV-67 и LV-70). Схема расположения станций показана на рис. 4, *в*. 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

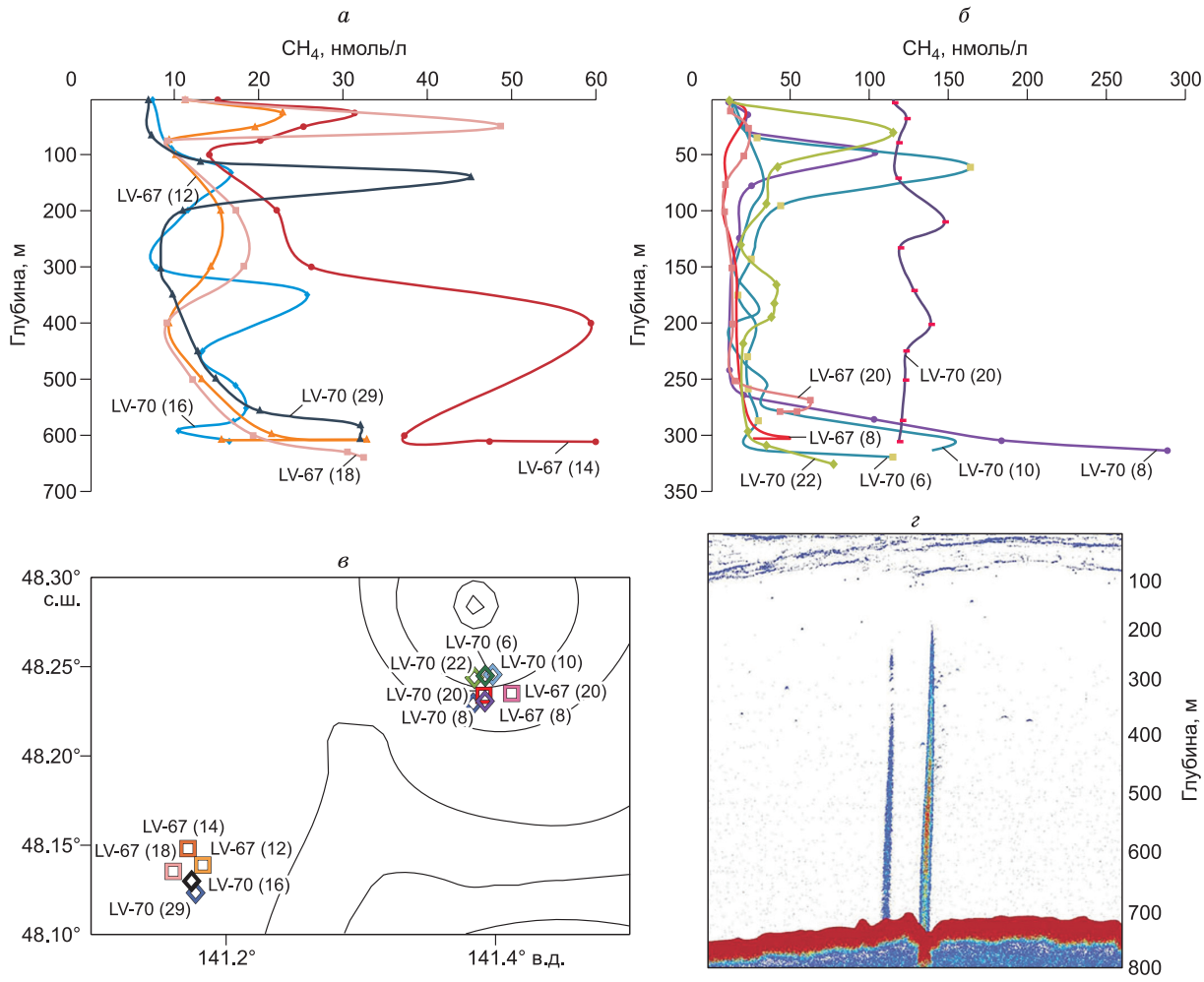


Рис. 4. Вертикальное распределение метана в водной толще Татарского пролива:

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.), *г* — пример эхограмм глубоководного газового факела в Татарском проливе (LV-70). *а*—*в* — в скобках указан порядковый номер станции.

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 рисунке 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, Верещагина, 2011; Обжиров и др., 2016; Мишукова и др., 2017; Мишукова, Шакиров, 2017]. На рисунке 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/(км^2×сут.). В пределах этой зоны максимальными значениями выделяется очаг Ia, глубины моря 300—700 м. В его пределах, по данным четырех рейсов НИС «Академик М.А. Лаврентьев» 2012—2015 гг., 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/(км^2×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/(км^2×сут).

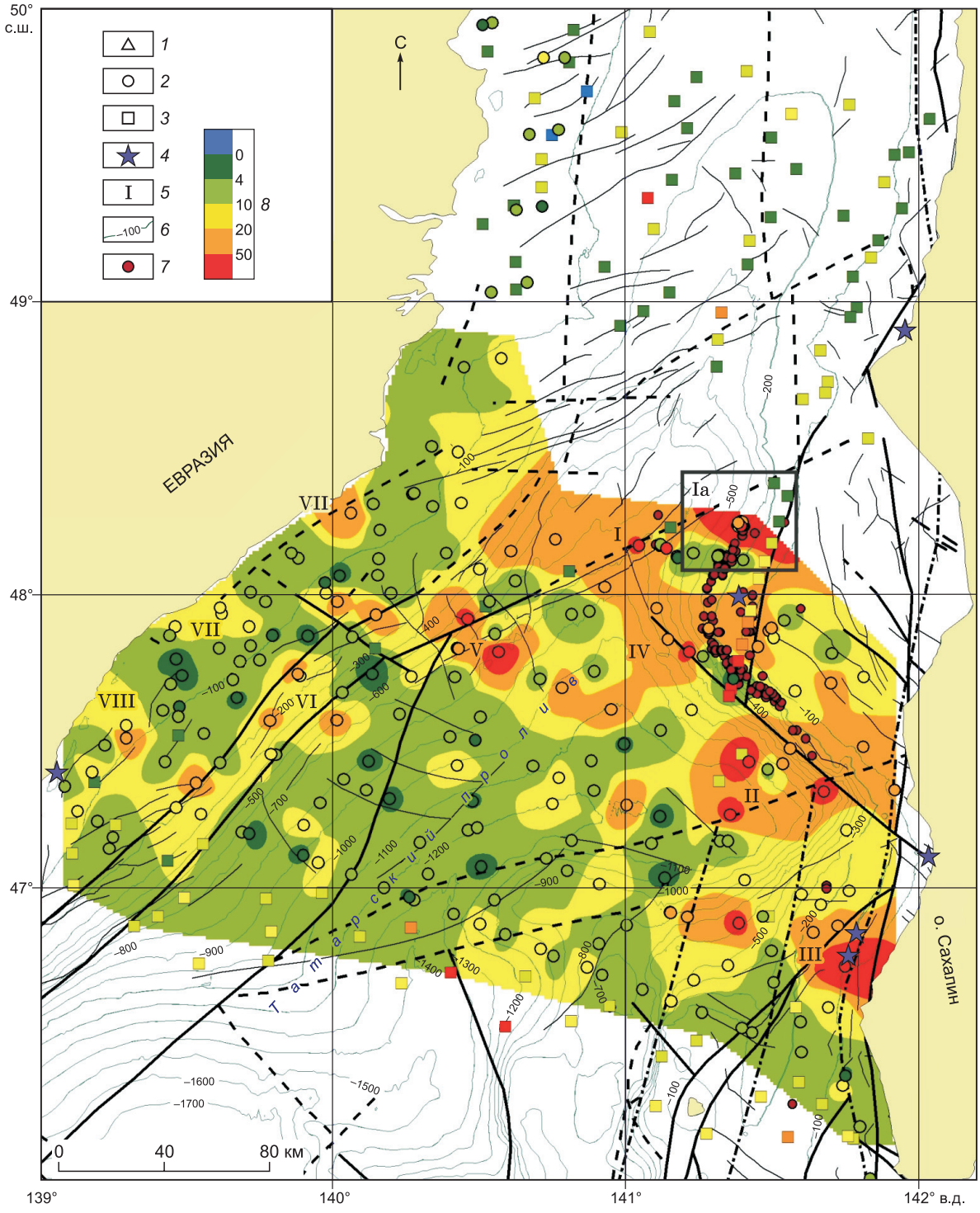


Рис. 5. Распределение потоков метана на границе вода—атмосфера (моль/(км²×сут.)) на карте рельефа дна района исследований.

1 — станции отбора проб воды в рейсах LV-59, LV-62, LV-67; *2* — LV-70, OP-54; *3* — OP-55; *4* — эпицентры крупных землетрясений за 2011—2017 годы; *5* — районы с повышенным значением потока метана (I—VIII — зоны, описание см. в тексте); *6* — изобаты (м); *7* — положения газовых факелов; *8* — поток метана на границе вода—атмосфера (моль/(км²×сут.)) (единая градация для площадного распределения — рейс OP-54 и для отдельных станций). Названия и тип разломов см. на рис. 1. Прямоугольником выделена часть района, в котором была произведена наиболее детальная съемка (см. врезку на рис. 2; рис. 4, *в*).

В юго-восточной части района исследований проявляется очаг III: интенсивная эмиссия метана до 110 моль/(км^2×сут.) наблюдается на акватории шельфа. На участке новообразованных бенчей в результате землетрясения 2007 г. 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/(км^2×сут.). Следует отметить, что очаг эмиссии метана III, как и очаг I, расположен 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/(км^2×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 и 106 моль/(км^2×сут.). В северной части Татарского пролива по результатам съемки в осенние сезоны 2017 и 2018 гг. выделяются две станции с высокими значениями потоков метана 54 моль/(км^2×сут.) (ОР-54) и 127 моль/(км^2×сут.) (ОР-55) и две станции, на которых происходит поглощение метана из атмосферы –0.3 моль/(км^2×сут.), –1.6 моль/(км^2×сут.) (ОР-55).

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 модификации 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, а 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 в тех же районах были получены керны, сплошь заполненные 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 (см. 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 (как правило, более чем на 3 м ниже поверхности дна) были сильно газонасыщены, разбиты многочисленными трещинами [Operation Report…, 2013]. В северо-восточной части района исследования (зона I и подзона Ia) 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 четкая 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, совмещенное с точками замера потоков метана на границе вода—атмосфера с 2012 по 2018 год. Выявлено, что в поверхностных пробах (0—15 см) донных осадков содержание метана варьировало в концентрациях от 0.35 до 683 ppm (медиана 5.25 ppm). Наименьшие концентрации CH_4 были установлены в западной глубоководной части акватории Татарского пролива и не превышали 4 ppm (см. 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 (см. 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 частях осадочного бассейна. Как

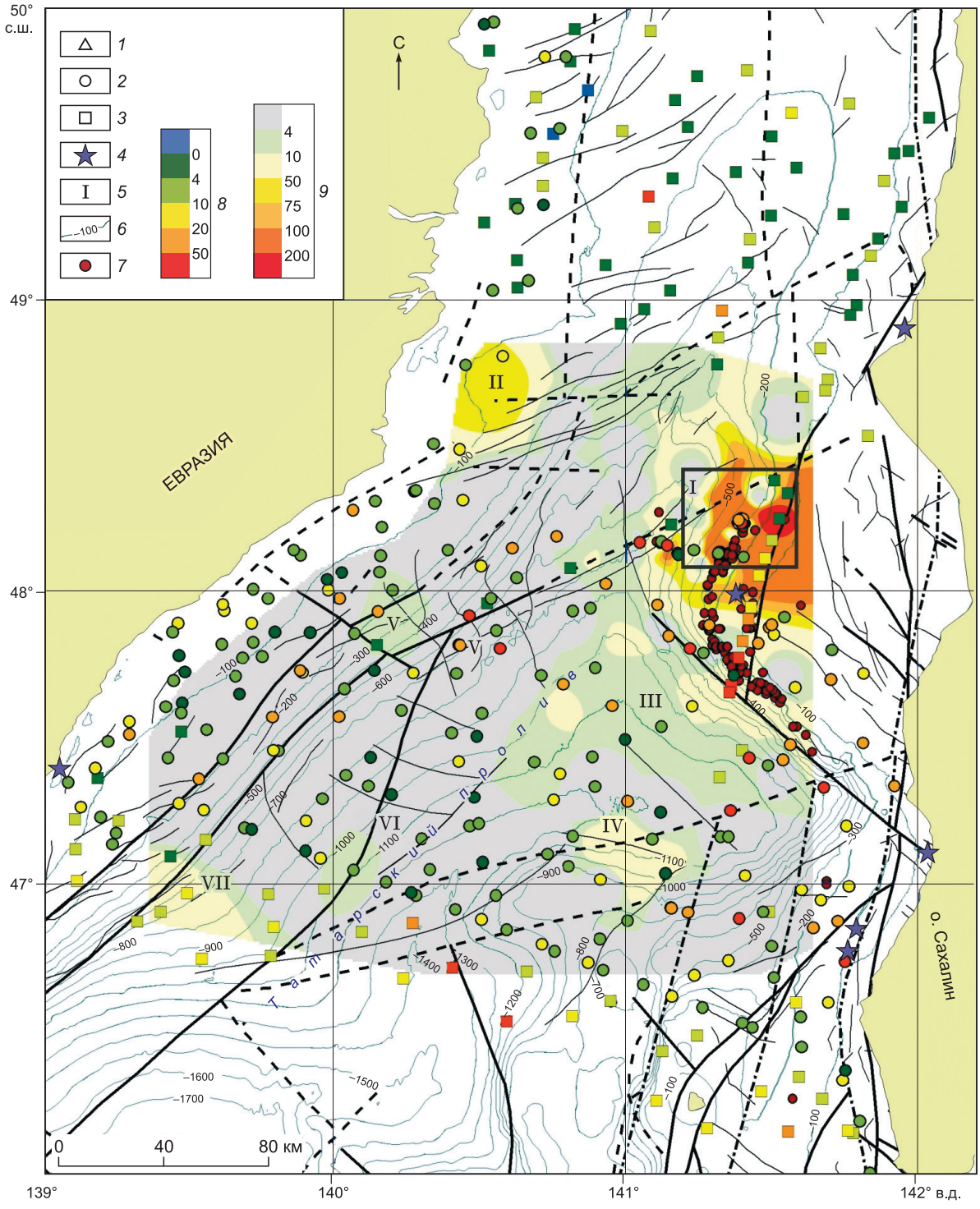


Рис. 6. Распределение потоков метана на границе вода—атмосфера (моль/(км^2×сут.)) и концентраций метана в поверхностном слое (0—15 см) донных осадков в районе исследований.

1 — станции отбора проб воды в рейсах LV-59, LV-62, LV-67; *2* — LV-70, OP-54; *3* — OP-55; *4* — эпицентры сильных землетрясений за 2011—2017 годы; *5* — районы с повышенным значением концентраций метана в поверхностном слое донных осадков; *6* — изобаты (м); *7* — положения газовых факелов; *8* — поток метана на границе вода—атмосфера (моль/км^2×сут.) (градация приведена для всех станций); *9* — распределение метана в поверхностном слое донных осадков (CH_4, ppm). Названия и тип разломов см. на рис. 1. Выделенный квадрат (зона I) соответствует зоне Ia на рис. 5 с повышенными значениями потока метана на границе вода—атмосфера.

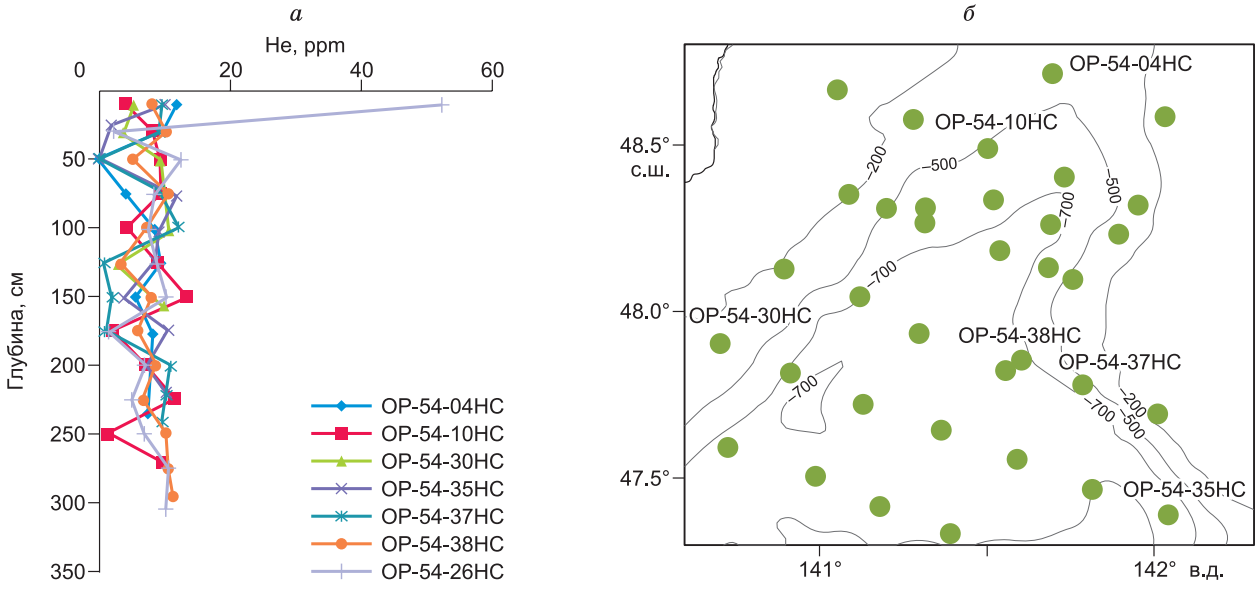


Рис. 7. Распределение гелия (*а*) в кернах осадка Южно-Татарского прогиба и схема станций (*б*) (рейс № 54 НИС «Академик Опарин»).

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 осадков может указывать на колебания динамики восходящего потока газов (рис. 7).

Повышенное содержание в пробе донных отложений до 54 ppm на станции OP-54-26HC 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 $^3He/^4He = (1.0—3.8)\times10^{-6}$ [Лаврушин и др., 1996], что близко к мантийному гелию $^3He/^4He = n\times10^{-5}$ ‰ [Мамырин, Толстихин, 1981]. Сходные данные получены для Камчатки $^3He/^4He \sim 10^{-5}$ ‰ [Чудаев, 2003].

Геологический контроль потоков метана. Изменчивость потоков метана с поверхности моря обусловливается, 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 (очаги I, Ia, см. рис. 5). Эти очаги повышенной эмиссии метана совпадают 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 (см. 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

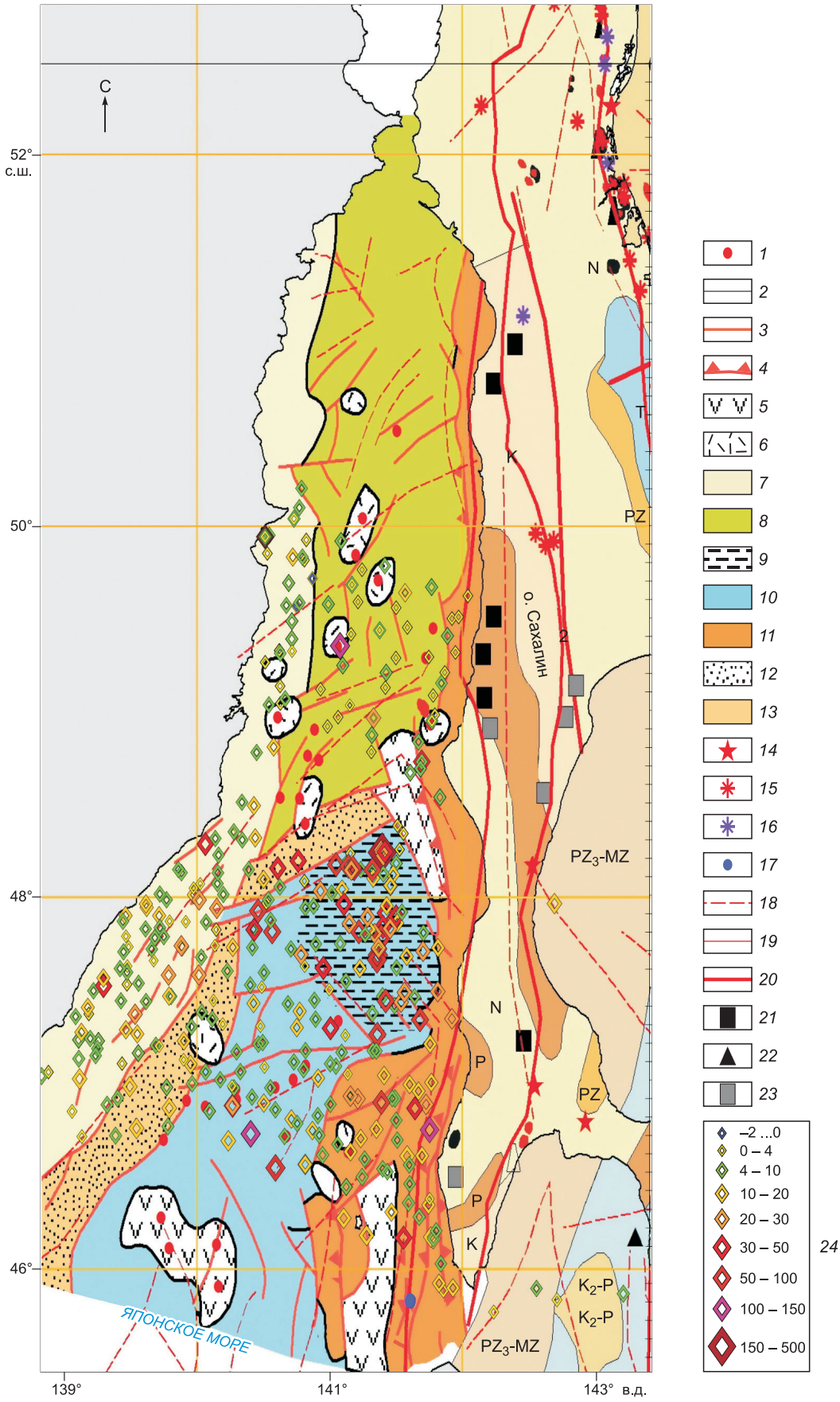

С
52°
с.ш.
50°
48°
46°
139°
141°
143° в.д.
N
T
K
PZ
о. Сахалин
2
PZ3-MZ
N
P
PZ
P
K
K2-P
K2-P
PZ3-MZ
ЯПОНСКОЕ МОРЕ
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
–2 ...0
0 – 4
4 – 10
10 – 20
20 – 30
30 – 50
50 – 100
100 – 150
150 – 500
24

Рис. 8. Распределение потоков метана на карте геологического строения и флюидодинамических характеристик Татарского пролива и западной части о. Сахалин, на основе [Харахинов, 1998, 2010].

1 — субвертикальные геологические тела — индикаторы локальной флюидодинамической активности [Харахинов, 2010]; *2* — изопахиты кайнозойской складчатой области; *3* — сбросы; *4* — взбросонадвиги; *5* — олигоцен-эоценовые вулканотектонические структуры; *6* — ареалы позднемиоцен-плиоценовой вулканотектонической активности; структурные элементы: *7* — субмоноклинальный склоновый западный прибортовой Присихотэалинский блок; *8* — Северо-Татарский грабен (суббассейн) — район частичной деструкции континентальной коры; *9* — 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 бурого угля; *24* — потоки метана (моль/(км^2×сут.)) для всех рейсов за период 2012—2018 гг.

метана и этана, а также повышенными концентрациями водорода и гелия в морской воде и донных отложениях [Шакиров и др., 2016]. Изменчивость потоков метана на границе вода—атмосфера и факелов отражает изменчивость активности донных источников.

Источниками метана в западной части (субмоноклинальный прибортовой блок на рис. 8) могут быть скопления природного газа в локальных структурах (Приморская, Самаргинская и др.) [Харахинов, 2010]. В осадках станции LV-59-27HC аномалий по содержанию гелия и водорода не обнаружено.

Изучение большинства колонок, поднятых в Татарском проливе (станции 40HC, 29HC, 43HC, 42HC, 31HC и др.) в районе газовых факелов и в их окрестностях, подтверждает факт преобладания катагенетической доли углеводородных газов: значения $\delta^{13}(C–CH_4)$ варьируют от –43 до –50 ‰VPDB, а $\delta^{13}(C–C_2H_6)$ от –15 до –23 ‰VPDB.

Восточная, самая активная в отношении потока метана в атмосферу часть Южно-Татарского прогиба входит в газогеохимическую углегазоносную зону с повышенной долей катагенетических газов [Шакиров, Сырбу, 2012]. В эту же зону входит юго-западная часть о. Сахалин. Для южной и юго-западной частей острова установлено поступление газов со средним изотопным составом углерода метана –21…–43 ‰ VPDB. Это обусловлено тектономагматическими и флюидодинамическими особенностями геологического строения и углегазоносностью 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 сейсмотектонической активизации усиливается эмиссия грязевулканических флюидов и газа [Ершов и др., 2011].

В пределах района работ на восточном борте Южно-Татарского прогиба скважинами Старомаячнинская-1, Старомаячнинская-2 и Красногорская вскрыты прослои углей [Харахинов, 2010; Нечаюк, Обжиров, 2010], которые могут быть источниками метана в осадочных бассейнах. Изотопный состав углерода метана газогидратоносных осадков (например, $\delta^{13}(C–CH_4)$ = –47 ‰, LV-59-27HC) совпадает со средними значениями для метана угольных пластов юга Сахалина ($\delta^{13}(C–CH_4)$ = –35.3…–55.9 ‰) [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 М.А. Лаврентьев» № 59, указывает на катагенетическое образование природного газа ($\delta^{13}(C–CH_4)$ = –47 ‰VPDB, $\delta^{13}(C–C_2H_6)$ = –23 ‰VPDB). В связи с этим можно говорить о возможности поступления катагенетических газов через толщу вод Татарского пролива в атмосферу.

В ходе выполнения комплексных геолого-геофизических исследований нами впервые установлена корреляция распределения газовых факелов и газогидратных залежей с особенностями глубинного строения на примере Южно-Татарского осадочного бассейна. Обнаружена четкая приуроченность газопроявлений, газогидратов и аномалий углеводородных газов в осадках к контуру положительной аномалии гравитационного поля изометричной формы [Shakirov et al., 2019], которая картирует приподнятый блок фундамента. Зона газовой проницаемости и благоприятные условия для образования газогидратов сформировались вдоль дугообразной контактовой зоны. Это дает основания для выделения нового прогнозного геолого-геофизического метода поисков газогидратов в морях и океанах: изучение корреляционных особенностей строения гравимагнитных и газогеохимических полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределение повышенных концентраций метана, водорода и гелия в донных осадках и морской воде определяется пространственным распределением и геологическим контролем подводных источни-

ков газа. Геолого-структурное положение выходов катагенного метана на о. Сахалин и прилегающем шельфе и склоне обусловливает 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 могут быть признаком миграции глубинного флюида из зон нефтегазогенерации в Южно-Татарском прогибе. Выявленные закономерности распределения метана, водорода, гелия и термогенного изотопного состава углерода метана обусловлены тектономагматическими и флюидодинамическими особенностями геологического строения Татарского пролива. Доминирующее влияние на возникновение придонных газогеохимических аномалий имеют плотность распределения и активность подводных геологических источников (разломы, газовые факела, газогидраты, газонасыщенные осадки и др.), а также особенности глубинного строения района.

Потоки метана с поверхности моря наряду с газогеохимическими полями в осадках и морской воде являются индикаторами 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.

Авторы благодарят рецензентов за конструктивные замечания, позволившие значительно улучшить работу. 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 (18-05-00153 и 18-35-00047 мол_а, 20-35-70014, 20-55-12010).

ЛИТЕРАТУРА

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. Владивосток, ДВО РАН, 2004, 220 с.

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.

Дымович В.А., Евсеев С.В., Евсеев В.Ф., Нестерова Е.Н., Маргулис Л.С., Атрашенко А.Ф., Беляев И.В., Деркачев А.Н., Зелепугин В.Н., Коноваленко А.А., Опалихина Е.С., Рыбак-Франко Ю.В., Уткин И.В., Хайбулина Г.А., Желебогло О.В., Юрченко Ю.Ю. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист M-54 — Александровск-Сахалинский. Объяснительная записка. СПб., Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016, 524 с.

Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Изотопно-геохимические характеристики свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана и их связь с региональной сейсмичностью // ДАН, 2011, т. 440, № 2, с. 256—261.

Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Прасолов Р.М., Каменский И.Л. 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 шельфа, склона о. Сахалин и впадины Дерюгина (Охотское море) // Вестник ДВО РАН, 2011, № 6, с. 64—71.

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.

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. 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., 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.

Нечаюк А.Е., Обжиров А.И. Структуры и нефтегазоносность бассейнов Татарского пролива // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2010, № 2, вып. № 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, 2014, т. 6, NZ1001.

Харахинов В.В. Тектоника Охотоморской нефтегазоносной провинции: Автореф. дис.… д. г.-м.н. Оха, Сахалин НИПИморнефть, 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.

Шапошников Г.Н., Александров Г.П., Егоров С.В., Ильин К.Б., Соловьев В.В., Стрельников С.И. Государственная геологическая карта. М-б 1: 1 000 000 (новая серия). Лист L-(53), (54) — Кавалерово. Объяснительная записка. СПб., Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 1994, 176 с.

Шапошников Г.Н., Александров Г.П., Егоров С.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (новая серия). Лист L-(54), (55); K-(55) — Южно-Сахалинск. Объяснительная записка. СПб., Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 1995, 146 с.

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

Fenwick L., Capelle D., Damm E., Zimmermann S., Williams W.J., Vagle S., Tortell P.D. Methane and nitrous oxide distributions across the North American Arctic Ocean during summer, 2015 // J. Geophys. Res.: Oceans, 2017, v. 122, № 1, p. 390—412, https://doi.org/10.1002/2016JC012493.

Fischer D., Mogollón J.M., Strasser M., Pape T., Bohrmann G., Fekete N., Spiess V., Kasten S. Subduction zone earthquake as potential trigger of submarine hydrocarbon seepage // Nat. Geosci., 2013, v. 6, № 8, p. 647—651.

Kvenvolden K.A., Rogers B.W. Gaia's breath—global methane exhalations // Mar. Petrol. Geol., 2005, v. 22, № 4, p. 579—590.

Mau S., Rehder G., Arroyo I.G., Gossler J., Suess E. Indications of a link between seismotectonics and CH_4 release from seeps off Costa Rica // Geochem. Geophys. Geosyst., 2007a, v. 8, Article Q04003, doi:04010.01029/02006GC001326.

Mau S., Valentine D.L., Clark J.F., 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., 2007b, v. 34, № 22, Article L22603.

Mau S., Heintz M.B., Valentine D.L. Quantification of CH_4 loss and transport in dissolved plumes of the Santa Barbara Channel, California // Cont. Shelf Res., 2012, v. 32, p. 110—120.

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

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

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

Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project, 2014, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 67 / Eds. Y.K. Jin, H. Minami, B. Baranov, A. Obzhirov. Kitami, New Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology, 2015, 121 p.

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

Shakirov R.B., Valitov M.G., Obzhirov A.I., Mishukov V.F., Yatsuk A.V., Syrbu 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, № 4, p. 581—600.

Suess E., Torres M.E., Bohrmann G., Collier R.W., Rickert D., Goldfinger C., Linke P., Heuser A., Sahling H., Heeschen K., Jung C., Nakamura K., Greinert J., Pfannkuche O., Trehu A., Klinkhammer G., Whiticar M.J., Eisenhauer A., Teichert B., Elvert M. Sea floor methane hydrates at Hydrate Ridge, Cascadia Margin // Natural gas hydrates: occurrence, distribution, and detection / Eds. C.K. Paull, W.P. Dillon. Washington, DC, American Geophysical Union, Geophysical Monograph 124, 2001, p. 87—98.

Vereshchagina O. F., Korovitskaya E. V., Mishukova G.I. Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan // Deep Sea Res. Part II, 2013, v. 86—87, p. 25—33.

Wiessenburg D.A., Guinasso N.L. Equilibrium solubility of methane, carbon dioxide, and hydrogen in water and sea water // J. Chem. Eng. Data, 1979, v. 24, № 4, p. 356—360.

Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and seawater // J. Chem. Engineering Data, 1976, v. 21, № 1, p. 78—80.

Рекомендована к печати 27 ноября 2019 г.
Л.М. Буртейном

Поступила в редакцию 7 февраля 2018 г.,
после доработки — 17 ноября 2019 г.