

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.84:556

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.gah-1>

<https://elibrary.ru/wvbsfw>

Опубликована online first 18.04.2025

Геологические и гидрологические факторы формирования полей повышенных концентраций метана на восточном шельфе острова Сахалин

А. О. Холмогоров, Н. С. Сырбу, В. Б. Лобанов, П. Д. Жердев, Е. В. Мальцева[@]

^{@E-mail:} ekor@poi.dvo.ru

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

Резюме. Статья продолжает серию исследований формирования и распределения полей повышенных концентраций метана, гелия и водорода на мелководном восточном шельфе о. Сахалин. В ходе комплексной океанографической экспедиции 2024 г. были проведены многочисленные измерения, позволившие выявить локализованные участки выхода газов со дна. Установлены высокие концентрации растворенного метана – 139 нМ/л, гелия – 12 ppm, водорода – 135 ppm, а также углекислого газа – 0.47 %, что может свидетельствовать о глубинном источнике этих газов. Показано, что области формирования полей повышенного содержания метана контролируются региональной системой разломов. Связь между тектоникой и распределением газов является важным фактором для понимания геохимических процессов в этом районе. Анализ данных, полученных в течение различных сезонов, показал существенную сезонную изменчивость в распространении полей повышенных концентраций метана. В теплый период года зоны высоких концентраций метана локализуются в области холодных промежуточных вод Охотского моря. Эти зоны располагаются под нижней границей сезонного пикноклина. Распространение метана к поверхности ограничено, что обусловлено сложной структурой водных масс и процессами вертикальной диффузии. Исследуемая акватория восточного шельфа о. Сахалин подвержена влиянию Восточно-Сахалинского течения, которое играет ключевую роль в распространении растворенных газов, поступающих из источников на дне. Это подчеркивает сложность и многогранность процессов, регулирующих миграцию и распределение газов в морской среде западной части Охотского моря.

Ключевые слова: растворенный метан, гелий, водород, остров Сахалин, восточный шельф, Восточно-Сахалинское течение, Охотское море

Geological and hydrological factors of dissolved methane distribution on the eastern shelf of Sakhalin Island

Andrey O. Kholmogorov, Nadezhda S. Syrbu, Vyacheslav B. Lobanov,

Pavel D. Zherdev, Elena V. Maltseva[@]

^{@E-mail:} ekor@poi.dvo.ru

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. This paper continues a series of studies on the formation and distribution of dissolved methane, helium, and hydrogen on the shallow eastern shelf of Sakhalin Island. Numerous measurements, conducted during a comprehensive oceanographic expedition in 2024, revealed localized areas of gas emission from the seabed. The absolute maximum of dissolved methane was 139 nM/l; helium, 12 ppm; hydrogen, 135 ppm; and carbon dioxide, 0.47 percent, which could indicate the underlying source of these gases. It was shown that the formation of areas of high methane concentrations is controlled by a regional fault system. Tectonic activity has a significant impact on the gas distribution, which is important for understanding geochemical processes in a given area. Analysis of the data collected over different seasons showed a noticeable seasonal variability in the distribution of areas of high methane concentrations. During the warm season, these areas form within cold intermediate waters of the Sea of Okhotsk below the lower boundary of the sea-

sonal pycnocline. Methane diffusion to the surface is limited due to the complex water structure and vertical diffusion processes. The studied water area of the eastern shelf of Sakhalin Island is affected by the East Sakhalin Current, which plays a significant role in the distribution of dissolved gases from the seabed sources. This emphasizes the complexity and versatility of the processes regulating the migration and distribution of gases in the marine environment of the western Sea of Okhotsk.

Keywords: dissolved methane, helium, hydrogen, Sakhalin Island, eastern shelf, East Sakhalin Current, Sea of Okhotsk

Для цитирования: Холмогоров А.О., Сырбу Н.С., Лобанов В.Б., Жердев П.Д., Мальцева Е.В. Геологические и гидрологические факторы формирования полей повышенных концентраций метана на восточном шельфе острова Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 2. с. 164–181. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.gah-1>; <https://elibrary.ru/wvbsfw>

For citation: Kholmogorov A.O., Syrbu N.S., Lobanov V.B., Zherdev P.D., Maltseva E.V. Geological and hydrological factors of dissolved methane distribution on the eastern shelf of Sakhalin Island. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 2. p. 164–181. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.gah-1>; <https://elibrary.ru/wvbsfw>

Финансирование и благодарности

Работы, связанные с проведением экспедиций, осуществлены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ТОИ ДВО РАН (№ 124022100078-7). Газогеохимические исследования, а также аналитическая работа выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-77-10038). Авторы благодарят научный состав и экипаж 88-го рейса НИС «Профессор Гагаринский» за организацию и сопровождение работ. Отдельная благодарность с.н.с. ТОИ ДВО РАН А.Ф. Сергееву за организацию палубных работ экспедиции, полезные наблюдения и сбор проб.

Funding and Acknowledgements

Marine expeditions were carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task of the POI FEB RAS (No. 124022100078-7). Gas-geochemical studies, as well as analytical work were funded by a Russian Science Foundation grant (No. 23-77-10038). The authors thank research group and crew of cruise 88 of the R/V «Professor Gagarinsky», and especially Aleksandr Sergeev for organizing deck work and efficient observations and sampling.

Введение

Континентальные окраины представляют собой обширные, динамичные геологические структуры, являющиеся переходными зонами между континентальной корой и океанической [1–5]. Их изучение критически важно по множеству причин, выходящих далеко за рамки простого научного любопытства.

Континентальные окраины – это зоны активных геологических процессов, где происходит взаимодействие тектонических плит, проявляющееся в виде землетрясений, вулканизма, грязевого вулканизма и формирования горных хребтов [6, 7]. Континентальные окраины являются также перспективными регионами для поиска и добычи углеводородов. Пороговые пространства осадочных пород на шельфе и склоне служат ловушками для нефти и газа. Глубоководные месторождения, расположенные на больших глубинах, требуют все более

совершенных технологий разведки и добычи, а изучение геологического строения окраин помогает определить наиболее перспективные участки. Кроме того, исследования позволяют оценить потенциальные экологические риски, связанные с добычей углеводородов.

Актуальность исследования связана и с проблемой изменения газогеохимических параметров в морях и прибрежных зонах. Выходы метана и других газов из донных отложений оказывают существенное влияние на биогеохимические циклы и вносят вклад в процессы изменения климата [8–11]. Исследования концентрации растворенных газов, в частности метана, в прибрежных водах, а также изучение газовых гидратов, залежи которых распространены на склонах континентальных окраин, позволяют оценить объемы выбросов и их влияние на окружающую среду. Генетическая связь подводных выходов метана с залежами нефти и газа, скоплениями газогидратов, глубинными

разломами установлена для многих морей северо-западной части Тихого океана [12–15].

В современных тектонических исследованиях структура Восточно-Азиатской континентальной окраины рассматривается как коллизионно-аккреционная, сформировавшаяся в результате сложного сочетания в пространстве и времени аккреционных и коллизионных процессов, а также трансформных перемещений как отдельных террейнов, так и их ансамблей [16–20]. В настоящее время считается доказанной взаимосвязь формирования геологической структуры о. Сахалин и прилегающих акваторий с развитием фанерозойских активных тихоокеанских окраин [16, 17, 21–23]. Хорошо выражена поперечная тектоническая зональность складчатой системы, которая прослеживается от южных частей Хоккайдо до п-ова Шмидта на севере Сахалина.

В связи с этим недооценка материковой и прибрежно-шельфовой части окраинных морей приводит к неполному пониманию процессов распределения газогеохимических полей, напрямую связанных с основными геологическими структурами, тектоникой и углеводородным потенциалом территории. Исследования мелководного нефтегазоносного северо-восточного шельфа о. Сахалин позволяют углубить понимание процессов выходов метана в дальневосточных окраинных морях, обусловленных геологическими источниками. При исследовании эмиссии метана необходимо применять комплексный подход, интегрирующий методы нескольких дисциплин – геологии, океанологии, геохимии.

Целью данной работы является обсуждение влияния основных геологических и гидрологических факторов на концентрации растворенных газов и их изменчивость на восточном мелководном шельфе о. Сахалин.

Наблюдения за сезонными изменениями концентраций метана в водных колонках помогут повысить достоверность расчета вклада метана, поступающего с поверхности воды и восточного шельфа

Сахалина в атмосферу. Для достижения поставленной цели в ходе рейса № 88 НИС «Профессор Гагаринский» (Ga 88) с 23 августа по 20 сентября 2024 г. были осуществлены измерения концентраций растворенного метана, гелия, водорода и углекислого газа в центральной части восточного шельфа о. Сахалин. Выполнено 2 разреза (10 станций) (рис. 1).

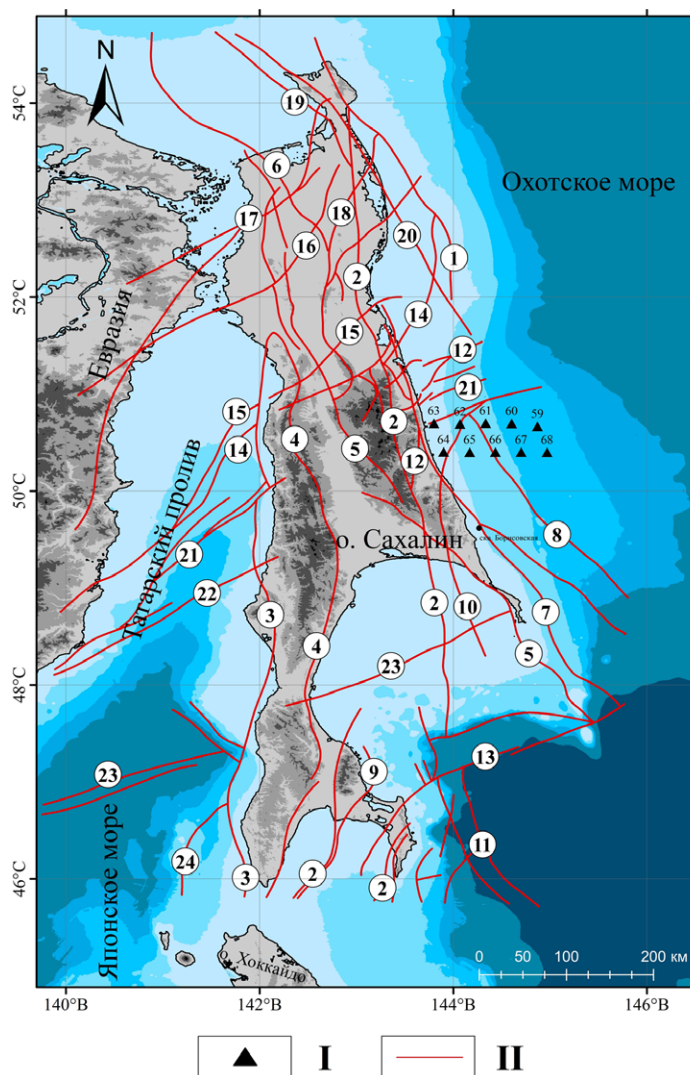


Рис. 1. Карта района исследований. I – станции отбора проб воды в рейсе Ga 88, II – региональные разломы [25]: 1 – Восточно-Сахалинский; 2 – Хоккайдо-Сахалинский, 3 – Западно-Сахалинский, 4 – Центально-Сахалинский, 5 – Срединно-Сахалинский, 6 – Западно-Байкальский, 7 – Пограничный, 8 – Тюлений, 9 – Сусунайский, 10 – Лиманский, 11 – Владимировский, 12 – Прибрежный, 13 – Мордвиновский, 14 – Аукан-Лунский, 15 – Тымский, 16 – Гыргыланьинский, 17 – Восточно-Байкальский, 18 – Верхне-Пильтунский, 19 – Западно-Шмидтовский, 20 – Западно-Одоптинский, 21 – Совгаванский, 22 – Бошняковский, 23 – Слепиковский, 24 – Монеронский.

Fig. 1. Map of the research area. I, water sampling stations of the cruise Ga 88; II, regional faults [25]: 1, East-Sakhalin; 2, Hokkaido-Sakhalin; 3, West Sakhalin; 4, Central Sakhalin; 5, Medium-Sakhalin; 6, West-Baikal; 7, Pogranichny; 8, Tyuleny; 9, Susunaysky; 10, Limansky; 11, Vladimirovsky; 12, Pribrezhny; 13, Mordvinovsky; 14, Aukan-Lunsky; 15, Tymsky; 16, Gyrgylaninsky; 17, East-Baikal; 18, Verkhne-Piltunsky; 19, West-Shmidtovsky; 20, West-Odoptinsky; 21, Sovgavansky; 22, Boshnyakovsky; 23, Slepikovsky; 24, Moneron.

Исследования стали продолжением серии работ, проведенных на охотоморском шельфе о. Сахалин в 2023 г. [24]. В данном районе до глубины 500 м расположено множество локальных нефтегазоносных структур, на северо-восточном побережье Сахалина обследованы многочисленные проявления термальных вод: Дагинские, Луньские, Паромайские.

Материалы и методы

Газогеохимические исследования позволяют оценить изменчивость содержания метана, гелия и водорода в морской воде по горизонтам, выявить источники поступления газа, а также получить информацию для дальнейшей оценки взаимосвязи фоновых и аномального содержания с морфоструктурными и тектоническими элементами. Растворенные в воде метан, водород и гелий используются в качестве индикаторов зон разломов, для прогнозирования сейсмической активности, оценки состояния окружающей среды и поиска месторождений углеводородов.

Работы на восточном шельфе о. Сахалин проводились в рейсе № 88 НИС «Профессор Гагаринский» в период с 23 августа по 20 сентября 2024 г.

Отбор проб воды из батометров системы Нискина осуществлялся на станциях при СТД-зондировании в диапазоне глубин от поверхности до дна в период 8–9 сентября 2024 г. Всего для анализа было отобрано 118 проб воды.

Содержания метана, гелия и водорода во всех образцах определяли методом равновесных концентраций «HeadSpace» [26]. Вода из батометров отбиралась методом «тройного перелива» в предварительно простерилизованные медицинские стеклянные бутылки объемом 68 и 100 мл, которые герметично закрывались стерильными резиновыми пробками без доступа в бутылки атмосферного воздуха. Для удаления излишков воды применяли иглы от медицинского шприца.

Для анализа содержания метана при создании газовой фазы в бутылки вводили гелий (10 мл) марки 6.0, для анализа содержания ге-

лия и водорода – атмосферный воздух (10 мл). Далее содержимое образца интенсивно перемешивали. Перед проведением анализа газовую фазу равновесно извлекали шприцем для ввода пробы в газовый хроматограф. Метан определяли в лаборатории ТОИ ДВО РАН на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 9000»; концентрации гелия и водорода – на газовом хроматографе «Хроматэк-Газохром 2000» (ОАО «Хроматэк») с датчиками теплопроводности повышенной чувствительности (1–2 ppm по гелию и водороду).

Концентрации метана, растворенного в морской воде, рассчитывали методом равновесного парафазного анализа с помощью констант растворимости по методике [27] в модификации [28].

Гидрологические особенности района исследований

Восточно-Сахалинское течение (ВСТ) является важным компонентом циркуляции вод Охотского моря, представляя собой западную часть обширного циклонического круговорота, охватывающего данный регион (рис. 2). Течение переносит вдоль восточного шельфа и склона о. Сахалин в южном направлении холодную воду с низкой соленостью из северо-западной части Охотского моря, наиболее изолированного района, где медленно тающие плавучие льды застаиваются до начала лета [29–33]. Летом низкая соленость вод обусловлена стоком р. Амур. На промежуточных глубинах благодаря ВСТ холодная и тяжелая вода дихотермического слоя Охотского моря распространяется на юг к Курильским проливам, где способствует вентиляции промежуточного слоя северной части Тихого океана [34].

Средняя скорость течения составляет 10–12 см/с, а в фазу прилива она может увеличиваться до 20–40 см/с [32]. Структура течения характеризуется сильной сезонной изменчивостью.

Дрифтеры и инструментальные измерения течений, проведенные в 1998–2001 гг. [35], показали, что ВСТ состоит из двух ветвей. Одна ветвь проходит вблизи берега, на глубинах

50–150 м, со скоростью 30–40 см/с. Вторая находится над континентальным склоном, с глубинами 300–900 м и скоростью 20–30 см/с. Такую структуру ВСТ детально подтверждают численное моделирование, представленное в работах [35–38], и данные спутниковой альтиметрии [39], которые также показывают сезонные и межгодовые колебания течения.

В работах [40, 41] приведены результаты моделирования циркуляции в Охотском море для каждого месяца и на различных уровнях от поверхности до горизонта 500 м, демонстрирующие сезонные изменения скорости и направления течения, а также возможность обратного течения, но его общее среднее направление с севера на юг является общепризнанным.

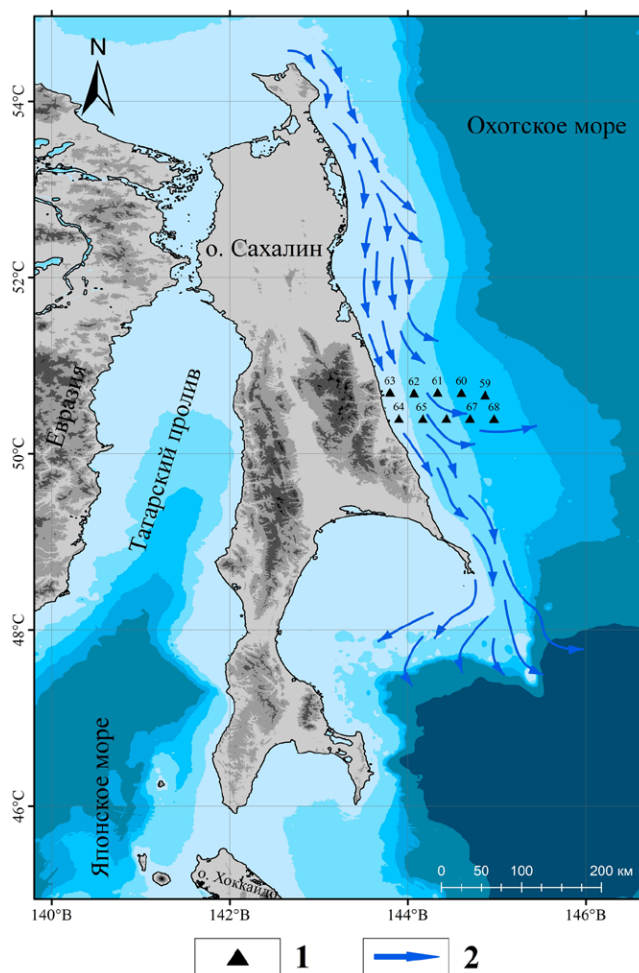


Рис. 2. Схема течений в районе исследований на 9 сентября 2024 г. (<https://earth.nullschool.net/>). 1 – станции отбора проб в рейсе Ga 88, 2 – схематическое направление Восточно-Сахалинского течения.

Fig. 2. Scheme of the currents in the research area for September 9, 2024 (<https://earth.nullschool.net/>). 1, sampling stations of the cruise Ga 88; 2, schematic direction of the East Sakhalin current.

Измерения автономными буйковыми станциями [42] и анализ спутниковых данных [31] показывают, что преобладающие летом южные ветры создают зону сезонного апвеллинга вдоль побережья о. Сахалин, когда более холодная вода поднимается к поверхности. Температура поверхностного слоя воды повышается с удалением от берега.

В результате многолетних (около 40 лет) STD-наблюдений (conductivity, temperature, depth) на гидрографических разрезах [43] установлено, что Восточно-Сахалинское течение и Восточно-Сахалинское противотечение являются основными и устойчивыми элементами циркуляции вод на северо-восточном шельфе и склоне о. Сахалин. Они постоянно присутствуют в любое время года, но их интенсивность значительно варьирует как во времени, так и в пространстве [40, 41, 44].

Сильное приливное движение является важным компонентом динамики вод на восточном шельфе о. Сахалин [29–32]. Суточные приливы формируют шельфовые волны, которые захватываются в северо-западной части шельфа [31]. Это приводит к мезомасштабным изменениям в потоках. В работе [45] показано также наличие особенностей мезомасштабной циркуляции в Восточно-Сахалинском течении. Авторы связывают образование мезомасштабных вихрей с прибрежным апвеллингом, вызванным северными ветрами и положительным ветровым напряжением вдоль побережья о. Сахалин. Наибольшая интенсивность апвеллинга на восточном шельфе наблюдается в июле–августе [46, 47]. Такие мезомасштабные циклоны и антициклоны обеспечивают водообмен между шельфом и глубокой частью Охотского моря.

Геологические особенности района исследований

Сахалин и присахалинский шельф являются частью Охотоморского региона, который находится в Азиатско-Тихоокеанской зоне перехода от континента к океану и представляет собой гигантскую межблоковую структуру глобального уровня и область интенсивной

разрядки глубинной энергии, активной позднемезозойско-кайнозойской и современной геодинамики [25].

Согласно ряду последних представлений, Охотоморская плита, сдавливаемая Евроазиатской, Амурской, Североамериканской и Тихоокеанской плитами [48, 49], вращается против часовой стрелки. Об этом косвенно свидетельствует также правосторонний тектогенез в зонах субширотных литосферных разломов Охотоморской плиты [25]. Анализ особенностей строения осадочных бассейнов Охотоморского региона показывает, что подавляющее их большинство контролируется тектоническими прогибами, развивавшимися в условиях деструктивного тектогенеза. Деструктивные рифтогенные процессы не только обеспечили формирование крупных осадочных бассейнов, но и создали благоприятные условия для интенсивного образования, накопления и разрушения углеводородных скоплений. При этом рифты, как наиболее эффективные проводники глубинного тепла Земли, не только сформировали здесь оптимальную для процессов образования нефти и газа термодинамическую обстановку, но и, являясь крупнейшими проницаемыми структурами литосферы, служат проводниками восходящих флюидных потоков [25].

Весь Сахалинский регион расположен в сейсмически активной зоне и относится к Тихоокеанскому подвижному поясу. Сейсмическая активность является индикатором напряженно-деформированного состояния земной коры, влияющего на процессы нефтегазонакопления. Эпицентры большинства землетрясений приурочены к глубинным зонам разломов [50]. Данные по сейсмичности говорят о важной роли глубинных разломов в формировании геологической структуры острова. Сфера влияния глубинных разломов в момент тектонических подвижек распространяется на 60 км, наибольшие напряжения отмечаются в приразломной полосе 3–4 км. Вдоль Хоккайдо-Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов вертикальная амплитуда смещения блоков составляет 400–600 м [51]. В периоды землетрясений в районе глубоких тектонических прогибов может происходить смешива-

ние глубинных флюидов и миграция флюидов в проницаемые зоны. Флюиды заполняют трещины и выдавливаются вверх по разлому. Если разлом перекрыт осадочным чехлом (северо-восточная часть о. Сахалин), то флюиды скапливаются в пластах пористых и трещиноватых пород, а если разлом сообщается с земной поверхностью (южная и юго-западная часть Сахалина), то флюиды выходят на поверхность.

Район исследований расположен в центральной части восточной акватории о. Сахалин в пределах Пограничного осадочного бассейна. Пограничный бассейн занимает акваторию шельфа юго-восточного Сахалина и территорию одноименной межгорной депрессии. Прогиб шириной до 40 км имеет крутой, интенсивно дислоцированный западный борт, осложненный приразломными структурами Пограничного надвига [25]. В пределах Пограничного бассейна докайнозойские аккреционные массивы надвинуты на позднемеловые и кайнозойские блоки. Здесь в структурном отношении шельф представляет собой серию продольных чередующихся поднятий и впадин, которые в свою очередь практически полностью компенсированы осадками, осадочными кайнозойскими толщами мощностью до 4–6 км.

На шельфе пробурена скважина Борисовская (см. рис. 1). Скважиной вскрыт разрез от олигоцена до среднего миоцена, сложенный глубоководными и морскими кремнисто-глинистыми, глинистыми породами с прослоями алевролитов.

В акватории и прибрежной зоне Сахалина, в пределах Пограничного нефтегазоносного бассейна, расположено несколько перспективных локальных нефтегазовых месторождений. Среди наиболее известных можно выделить Южно-Окружное, Восточно-Окружное, Восточно-Рыминское, Витницкое и Богатинское. Эти месторождения тесно связаны с геологической структурой региона, а именно – с Пограничным разломом. Этот крупный тектонический разлом простирается вдоль восточного побережья Сахалина, представляя собой сложную систему надвигов и сбросов. В южной части бассейна разлом характеризуется интенсивными надвиговыми дислокациями, где мощные пласты горных пород надвигаются друг на друга, образуя

сложные складчатые структуры, благоприятные для скопления углеводородов. К северу Пограничный разлом выражен в виде сбросовых дислокаций, где ему соответствуют локальные нефтегазоносные структуры Ныйской антиклинальной зоны: Венинская, Лунская, Набильская. Пограничная разломная зона, несмотря на свою сложность, характеризуется высокой проницаемостью. Это связано с сильной трещиноватостью пород, образующейся в зонах тектонических деформаций. Присдвиговые деформации, включающие в себя как сжатие, так и растяжение, создали условия для активных флюидодинамических процессов, способствующих миграции углеводородов из глубинных источников. Наличие зон растяжения вдоль разлома является ключевым фактором, позволяющим углеводородным флюидам мигрировать на значительные расстояния.

Результаты

В рейсе № 88 НИС «Профессор Гагаринский» в южной части восточной акватории о. Сахалин выполнены 2 разреза (10 станций) для определения содержаний растворенных метана, гелия, водорода и углекислого газа (рис. 2). Рассмотрим гидрологические характеристики исследуемого района по результатам STD-зондирований, выполненных вдоль этих разрезов (рис. 3). Распределение температуры воды и солености показывает типичную для летнего сезона вертикальную структуру с прогретым и распресненным поверхностным слоем (12.3–13.8 °C и 28.4–31.1 епс), ниже которого располагаются холодные промежуточные воды Охотского моря (до –0.9 °C), соленость которых возрастает с глубиной до 33.2–33.5 епс. Резкий сезонный термоклин

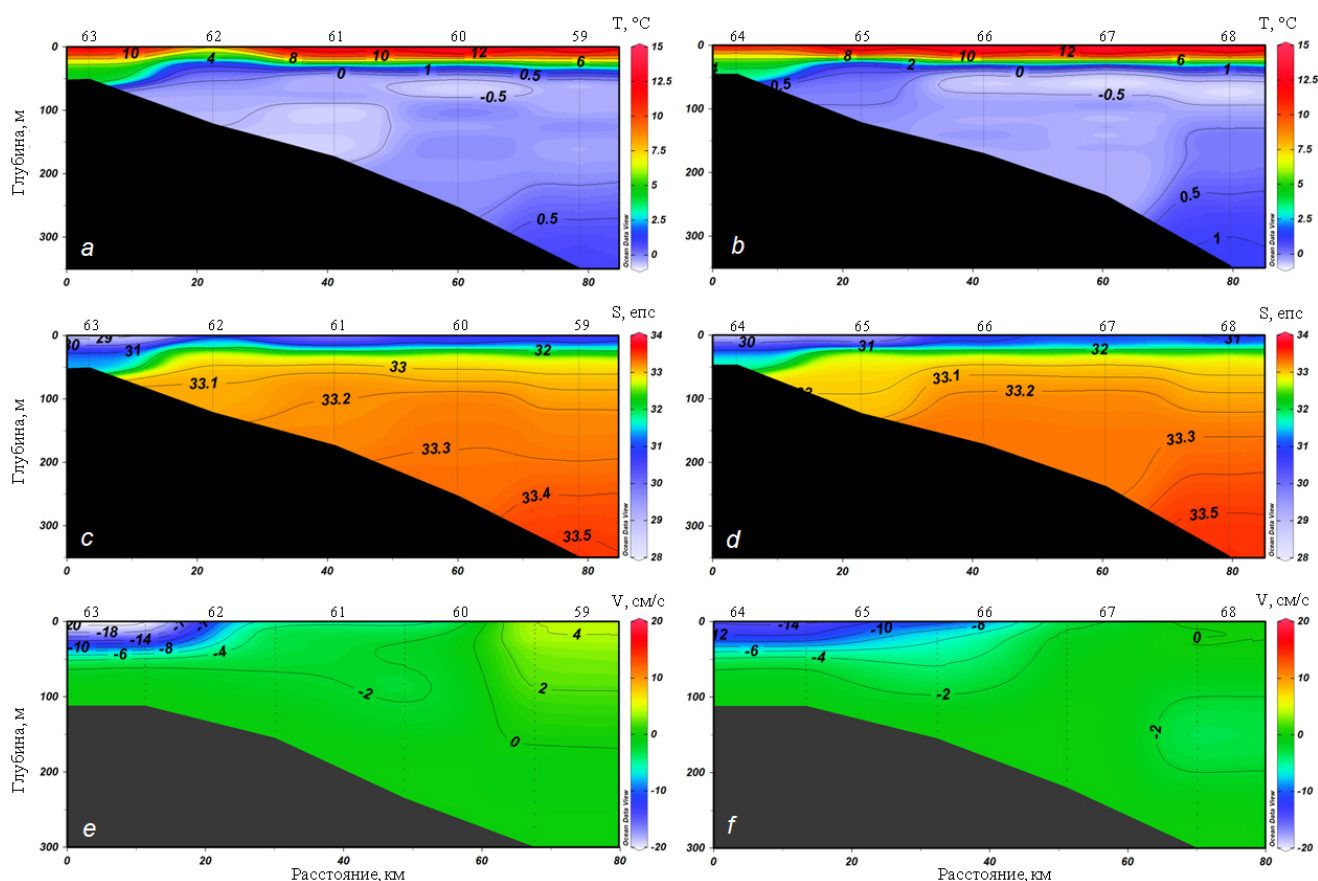


Рис. 3. Вертикальное распределение температуры воды (a, b), солености (c, d) и меридиональной составляющей скорости геострофических течений (e, f) по результатам STD-зондирований вдоль северного (a, c, e) и южного (b, d, f) разрезов на шельфе о. Сахалин 8–9 сентября 2024 г. На верхней оси указаны номера станций. Положительное направление течений – на север.

Fig. 3. Vertical distribution of water temperature (a, b), salinity (c, d), and the meridional component of geostrophic current velocity (e, f) based on the results of CTD soundings along the northern (a, c, e) and southern (b, d, f) sections on the Sakhalin shelf on September 8–9, 2024. The station numbers are shown above. The positive direction of the currents is to the north.

и галоклин, а соответственно и пикноклин находятся в слое 15–30 м. У берега, на глубинах менее 70 м, они расщепляются и заглубляются под воздействием приливного перемешивания. Здесь у дна вода значительно теплее (3.5–5 °C), чем в мористой части. Термохалинная структура вод практически одинакова на северном и южном разрезах.

Геострофические расчеты показывают поток вод южного направления в прибрежной части разрезов (рис. 3 е, ф), который, очевидно, соответствует Восточно-Сахалинскому течению. Как известно, Восточно-Сахалинское течение максимально в конце осени – начале зимы, а в летний период выражено слабо [31, 52]. Тем не менее, скорости направленных на юг геострофических течений достигали 22.6 см/с на северном разрезе и 16.3 см/с на южном. Максимальные течения отмечались в поверхностном слое 0–30 м, выше сезонного пикноклина. Этот поток переносит наиболее распресненную воду, соленость которой составляет 28.4–29.0 епс, очевидно под воздействием речного стока, а также водообмена с прибрежными лагунами. Направленное на юг течение, но со слабыми скоростями (1–4 см/с) наблюдается на большей части разрезов, за исключением мористой части северного разреза, где отмечен поток северного направления (рис. 3 д). Вероятно, это соответствует Восточно-Сахалинскому противотечению, на присутствие которого в летнее время указывалось в нескольких публикациях [43].

Сравнение картины течений на северном и южном разрезах – более интенсивный прибрежный южный поток на севере и размытый и слабый на юге, а также северное противотечение на мористом краю северного разреза – указывает на неоднородность поля течений в летний сезон и формирование мезомасштабных возмущений, что отмечалось в других работах [45].

Распределение растворенных газов на этих разрезах показано на рис. 4 и 5. В придонном слое обнаружены участки повышенных концентраций растворенного метана.

На северном разрезе в районе станций № 61–62 в слое 160–80 м при глубине 116–163 м соответственно обнаружена область повышенных концентраций метана – более

100 нМ/л, имеющая горизонтальный масштаб около 40 км. Вероятно, она связана с локальной областью дегазации (рис. 4 а). Абсолютный максимум метана (139 нМ/л) находится в районе станции № 62 у дна на глубине 162 м. При этом на станции № 62 метан распространяется от дна до нижней границы сезонного пикноклина – 25 м (рис. 4 а). Данная аномалия продолжается на восток, в слое 150–250 м.

На крайней восточной станции № 59 в этом слое выявлена область повышенных концентраций метана с локальным максимумом 137 нМ/л на горизонте 200 м при общей глубине станции 325 м. Эта область не имеет явной связи с придонным источником. Вероятно, данное поле метана – результат горизонтальной адвекции вод Восточно-Сахалинским течением с севера.

На этом разрезе обнаружены и две области повышенного содержания гелия – 11.5 ppm в районе станции № 63 и 11.5–12.3 ppm в районе станции № 59 (рис. 4 с), при этом фоновые содержания гелия в воде для Охотского моря составляют 4.2 ppm [53].

Поля повышенного содержания водорода 94 ppm и 135 ppm (рис. 4 d) в районе станций № 59 и № 60 также не имеют однозначной связи с придонным источником. Их наличие в середине водной толщи, как и полей гелия на станции № 59, может быть связано с переносом растворенных газов Восточно-Сахалинским течением. Этот аспект нуждается в дополнительных исследованиях.

Область повышенного содержания растворенного CO₂ до 0.4 % (рис. 4 b) также находится в холодных промежуточных охотоморских водах (рис. 3 а) и распространяется от дна до горизонта 25 м в районе станций № 60–62. Примечательно, что внутри этой области содержание CO₂ составляет 0.35 % и выше.

На южном разрезе (рис. 5) тоже обнаружены области повышенных концентраций растворенного метана (рис. 5 а).

Первая, придонная область находится в районе станций № 64–66, с концентрацией более 100 нМ/л и локальным максимумом 126 нМ/л у дна станции № 65 на глубине 119 м. Данная область распространяется от дна до нижней границы сезонного пикноклина 25 м.

Вторая область, с концентрациями растворенного метана 100–115 нМ/л, расположена в районе станций № 67–68 в слое 75–135 м при глубине 230–345 м соответственно (рис. 5 а) и не имеет явной связи с каким-либо придонным источником.

Содержание гелия до 12.5 ppm на южном разрезе (рис. 5 с) также превышает известные фоновые значения 4.2 ppm [54], но количественно ниже значений He для северного раз-

реза (рис. 4 с). Содержание водорода составило до 6.6 ppm у дна на станции № 66 (рис. 5 d).

Область повышенного содержания растворенного CO_2 до 0.4 % (рис. 5 b) находится, как и на северном разрезе, в холодных промежуточных охотоморских водах (рис. 3 b) и распространяется от дна до горизонта 25 м в районе станций № 65–67. Внутри этой области содержание CO_2 составляет 0.35 % и выше.

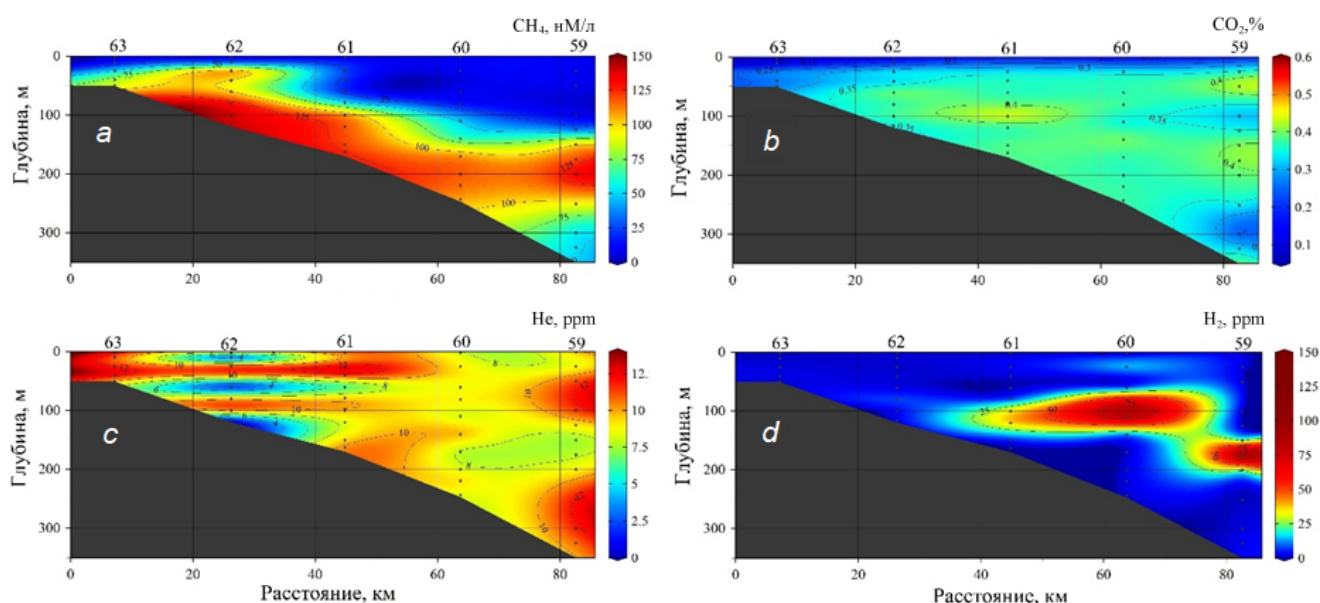


Рис. 4. Вертикальное распределение метана (а), углекислого газа (б), гелия (с) и водорода (д) на северном разрезе.

Fig. 4. Vertical distribution of methane (a), carbon dioxide (b), helium (c), and hydrogen (d) in the northern section.

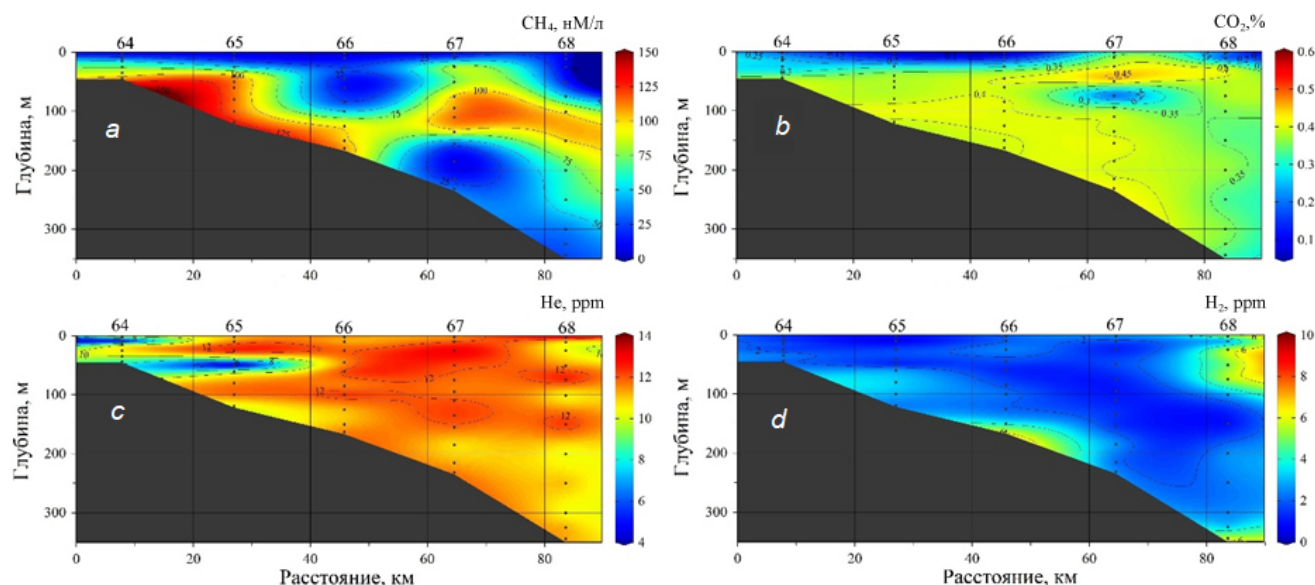


Рис. 5. Вертикальное распределение метана (а), углекислого газа (б), гелия (с) и водорода (д) на южном разрезе.

Fig. 5. Vertical distribution of methane (a), carbon dioxide (b), helium (c), and hydrogen (d) in the southern section.

Обсуждение

Проведенные работы стали продолжением экспедиционных исследований распределения полей газов в воде мелководного восточного склона о. Сахалин, выполненных в 2023 г. [24].

Газогеохимические исследования в районе центральной мелководной части восточного шельфа указывают на наличие интенсивных источников дегазации. Подтверждено, что источником метана в исследуемом районе являются подстилающие породы – коллекторы нефти и газа, содержащие флюиды. Нефтегазоносные породы охватывают не только шельф, но и значительные береговые участки острова, где установлены многочисленные термопроявления с преобладанием метана в газовом составе. Совпадение аномалий метана и гелия подтверждает поступление газов из недр в воду по зонам разломов и трещинам из углеводородных залежей.

Газогеохимические исследования южной части восточного шельфа Сахалина также выявили интенсивную дегазацию морского дна, что связано в первую очередь с тектоническими особенностями региона. Существенные сдвиги в блоке, ограниченном с запада Хоккайдо-Сахалинским, с востока Пограничным, а с юго-запада Срединно-Сахалинским глубинными разломами, привели к образованию субмеридиональных и диагональных надвигов. Эти надвиги располагаются практически с одинаковым интервалом в 18–20 км. Такие геодинамические процессы способствовали формированию значительных по размеру Пограничного, Лунского и других узких кайнозойских грабенов вдоль восточного побережья Сахалина. Современная высокая сейсмическая активность и активные разломы, секущие морское дно [25, 54], создают идеальные условия для газопроницаемости. Формирование аномальных концентраций метана и гелия в водной толще – прямое следствие этой интенсивной дегазации. Проведенные исследования показали не только увеличение концентраций этих газов к побережью, но и наличие градиентов концентраций, что позволяет судить о направлении и интенсивности дегазации.

Исследования гелия как инертного газа полезны для изучения природы газовой эмиссии, так как газ является природным инертным индикатором, который переносится без химической реакции с вмещающими породами. Гелий в придонных водах может образовываться из трех источников с различными изотопными характеристиками, позволяющими проследить происхождение и перенос флюидов [55]: атмосферный, коровый и мантийный. Наличие гелия на прилегающем мелководном восточном шельфе Сахалина может быть обусловлено либо радиогенным источником в земной коре, таким как угленосные отложения [53, 56], либо дегазацией мантии [57]. В единственном исследовании на острове, посвященном изотопам гелия, указано, что грязевые вулканы, расположенные на юге Сахалина, содержат мантийный гелий ($^3\text{He}/^4\text{He}$ достигает $3.3 R_{\text{air}}$ (R_{air} текущее атмосферное соотношение $^3\text{He}/^4\text{He}$) [56], в то время как горячие источники и минеральные воды, расположенные на северо-восточном побережье острова, показывают некоторое влияние радиогенного гелия ($^3\text{He}/^4\text{He} = \sim 0.6 R_{\text{air}}$ [56]).

Повышенные концентрации водорода, вероятно, распространяются в направлении от шельфа, что связано с активной микробиологической продукцией свободного водорода в фотическом слое морской воды [58]. На жизненный цикл фитопланктона в прибрежных водах восточного Сахалина большое влияние оказывает динамика вод. Процессы биопродукции резко усиливаются с развитием мезомасштабной динамики вод. Присутствие водорода и метана может также указывать на биodeградацию длинноцепочечных углеводородов [59, 60].

На TS-диаграмме (рис. 6) видно, что повышенные концентрации растворенного метана расположены в области холодной воды с высокой соленостью.

Растворимость метана в воде при давлении до 50 бар (глубина 500 м) зависит главным образом от температуры и солености воды [61], при этом растворимость повышается при понижении температуры [62]. В районе исследования работы были проведены на глубинах

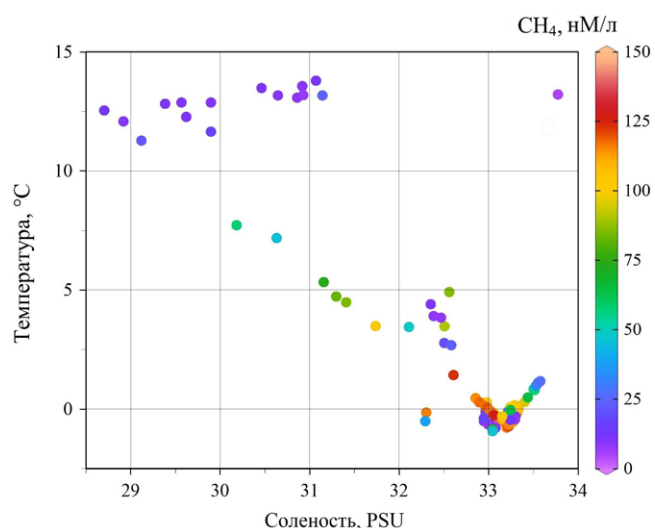


Рис. 6. TS-диаграмма растворенного метана по данным измерений в рейсе Ga 88.

Fig. 6. TS diagram of dissolved methane according to measurements of the cruise Ga 88.

до 400 м, что соответствует около 38 бар давления, и в этом случае главными факторами растворимости метана остаются температура и соленость. Коэффициент растворимости метана [27] значительно изменяется при резких колебаниях термохалинных характеристик воды, например в слое скачка или в потоке теплого течения, проходящем через холодные воды, как это наблюдается в прол. Брансфилд [63] и т.п. Таким образом, метан, выделяющийся из донных источников в шельфовых зонах, растворяется в холодной промежуточной охотоморской водной массе в слое от дна до нижней границы сезонного пикноклина, практически не проникая в поверхностный слой.

Обращают на себя внимание участки с высокими уровнями метана в районе станции № 59 на севере (рис. 4 а) и станций № 67–68 на южном разрезе (рис. 5 а), которые не демонстрируют явной связи с подводными источниками.

Распространение метановых полей, вероятно, связано с адвекцией вод Восточно-Сахалинским течением. Область в районе станций № 67–68 (рис. 5 а) может формироваться метаном, переносимым с севера из района станции № 59 (рис. 4 а), поскольку эти области находятся в районе глубин дна 250–300 м. Вертикальный масштаб данных областей совпадает (125 м), однако область на южном разрезе расположена в слое 25–150 м, а на северном – 125–250 м.

Локальный максимум метана снижается в этих областях с севера на юг от 137 до 105 нМ/л. Адвекция полей метана может быть также обусловлена мезомасштабной динамикой вод, развивающимися вихревыми образованиями, интенсивными приливными течениями.

Необходимо также учитывать стратификацию вод и влияние термоклина. Возможно, метан, высвобождающийся со дна в северной области (ст. № 59), поднимается до термоклина и затем распространяется вдоль него на юг, формируя аномалии, наблюдаемые в слое 25–150 м на южном разрезе. Не исключено формирование метановых полей *in situ*, обусловленное локальными источниками, такими как микропросачивание из донных отложений [64, 65] или разложение органического вещества [66]. В таком случае влияние динамики вод может заключаться в перераспределении метановых областей.

Заключение

В ходе газогеохимических и океанологических исследований, проведенных в 2024 г. на южной части восточного шельфа о. Сахалин, были обнаружены значительные зоны интенсивной дегазации. Интенсивность выделения газов заметно увеличивается по направлению с востока на запад, приближаясь к побережью острова. Глубинный характер выделяемых придонными источниками газов подтверждается их компонентным составом: высоким содержанием метана (до 139 нМ/л), гелия (12 ppm), водорода (135 ppm), что подчеркивает сложную природу флюидных потоков. Связь повышенных концентраций растворенных газов в воде с региональной геологической структурой – Пограничным разломом – и локальными месторождениями нефти и газа позволяет предположить, что глубинная флюидодинамика играет ключевую роль в формировании газогеохимических особенностей восточного шельфа Сахалина.

Восточно-Сахалинское течение, один из ключевых элементов гидродинамической системы региона, оказывает существенное

воздействие на перенос газов, выделяющихся из придонных источников. Выделяемый из этих источников метан растворяется в холодных промежуточных водах Охотского моря. Однако помимо зон, непосредственно примыкающих к придонным источникам, повышенные концентрации метана были обнаружены и в основной ветви Восточно-Сахалинского течения. Это говорит о том, что течение переносит растворенный метан на значительные расстояния, перемещая его с севера на юг вдоль побережья.

Таким образом, выявленная картина свидетельствует о комплексной системе взаимодействия глубинных геологических процессов и гидродинамики. Глубинные флюидные потоки, связанные с тектонической активностью и нефтегазовыми месторождениями, являются источником значительных количеств метана, гелия и водорода. Эти газы, растворяясь в морской воде, затем переносятся Восточно-Сахалинским течением, формируя характерное пространственное распределение аномалий, отмечающееся высокой интенсивностью дегазации в западной части исследуемого района шельфа.

Список литературы

1. Talwani M., Eldholm O. **1973**. Boundary between continental and oceanic crust at the margin of rifted continents. *Nature*, 241: 325–330. <https://doi.org/10.1038/241325a0>
2. Moore J.C., Vrolijk P. **1992**. Fluids in accretionary prisms. *Reviews of Geophysics*, 30: 113–135. <https://doi.org/10.1029/92rg00201>
3. Казанин Г.С., Барабанова Ю.Б., Кириллова-Покровская Т.А., Черников С.Ф., Павлов С.П., Иванов Г.И. **2017**. Континентальная окраина Восточно-Сибирского моря: геологическое строение и перспективы нефтегазоносности. *Разведка и охрана недр*, 10: 51–55.
4. Khain V., Polyakova I. **2008**. Oil and gas potential of continental margins of the Pacific Ocean. *Lithology and Mineral Resources*, 43: 81–92. <https://doi.org/10.1134/S0024490208010082>
5. Konyukhov A.I. **2009**. Continental margins: Global belts of oil and gas accumulation. *Lithology and Mineral Resources*, 44: 513–530. <https://doi.org/10.1134/S0024490209060017>
6. Oliver J., Isacks B.L., Barazangi M. **1974**. Seismicity at continental margins. In: Burk C.A., Drake C.L. (eds) *The geology of continental margins*. Berlin, Heidelberg, Springer, p. 85–92. https://doi.org/10.1007/978-3-662-01141-6_7
7. Orange D.L., Greene H.G., Reed D., Martin J.B., McHugh C.M., Ryan W., Maher N., Stakes D., Barry J. **1999**. Widespread fluid expulsion on a translational continental margin: Mud volcanoes, fault zones, headless canyons, and organic-rich substrate in Monterey Bay, California. *Geological Society of America Bulletin*, 111(7): 992–1009. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111<0992:wfeoa>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111<0992:wfeoa>2.3.co;2)
8. Reeburgh W.S. **2007**. Oceanic methane biogeochemistry. *Chemical Reviews*, 107: 486–513. <https://doi.org/10.1021/cr050362v>
9. Römer M., Sahling H., Pape T., Bohrmann G., Spieß V. **2012**. Quantification of gas bubble emissions from submarine hydrocarbon seeps at the Makran continental margin (offshore Pakistan). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C10): C10015. <https://doi.org/10.1029/2011jc007424>
10. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. **2010**. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 327: 1246–1250. <https://doi.org/10.1126/science.1182221>
11. Weber T., Wiseman N.A., Kock A. **2019**. Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters. *Nature Communication*, 10: 4584. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12541-7>
12. Обжиров А.И., Ильичев В.И., Кулинич Р.Г. **1985**. Аномалия природных газов в придонной воде Южно-Китайского моря. *Доклады Академии наук СССР*, 281(5): 1206–1209.
13. Кулинич Р.Г., Обжиров А.И. **1985**. О структуре и современной активности зоны сочленения шельфа Сунда и котловины Южно-Китайского моря. *Тихоокеанская геология*, 3: 102–106.
14. Abrams M. **1992**. Geophysical and geochemical evidence for subsurface hydrocarbon leakage in the Bering Sea, Alaska. *Marine and Petroleum Geology*, 9(2): 208–221. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(92\)90092-s](https://doi.org/10.1016/0264-8172(92)90092-s)
15. Hovland M., Croker P.F., Martin M. **1994**. Fault – associated seabed mounds (carbonate knolls?) off western Ireland and north-west Australia. *Marine and Petroleum Geology*, 11(2): 232–246. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(94\)90099-x](https://doi.org/10.1016/0264-8172(94)90099-x)
16. Рождественский В.С. **1976**. О сдвиговых смещениях вдоль зоны Тымь-Поронайского разлома на о. Сахалин. *Доклады АН СССР*, 230(3): 678–780.

17. Ханчук А.И. **1993.** Геологическое строение и развитие континентального обрамления северо-запада Тихого океана: автореферат дис. ... д-ра геол.-минер. наук. Москва, Геологический институт РАН.
18. Чехович В.Д. (ред.) **1993.** Тектоника и геодинамика складчатого обрамления малых океанических бассейнов. М.: Наука, 271 с.
19. Isozaki Y. **1996.** Anatomy and genesis of a subduction-related orogen: A new view on the geotectonic subdivision and evolution of the Japanese Islands. *The Island Arc*, 5: 289–320. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1996.tb00033.x>
20. Maruyama S., Isozaki Y., Kimura G., Terabayashi M. **1997.** Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *The Island Arc*, 6: 121–142. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1997.tb00043.x>
21. Гранник В.М. **2005.** Сопоставление структурных элементов Сахалина и Хоккайдо. *Доклады Академии наук*, 400(5): 654–659. EDN: OONLDT
22. Гранник В.М. **2013.** Восточно-Сахалинская островодужная система охотоморского региона. *Литосфера*, 1: 36–51.
23. Zharov A.E. **2005.** South Sakhalin tectonics and geodynamics: A model for the Cretaceous-Paleogene accretion of the East Asian continental margin. *Russian Journal of Earth Sciences*, 7: ES5002. <https://doi.org/10.2205/2005ES000190>
24. Syrбу N., Kholmogorov A., Stepanchik I., Lobanov V., Shkorba S. **2024.** Formation of abnormal gas-geochemical fields and dissolved gases transport at the shallow northeastern shelf of Sakhalin Island in warm season: Expedition data and remote sensing. *Water*, 16: 1434. <https://doi.org/10.3390/w16101434>
25. Харахинов В.В. **2010.** Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 276 с.
26. Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I. **2013.** Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan. *Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 86–87: 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.08.017>
27. Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. **1976.** Solubility of methane in distilled water and seawater. *J. of Chemical & Engineering Data*, 21(1): 78–80. <https://doi.org/10.1021/jc60068a029>
28. Wiessenburg D.A., Guinasso N.L. **1979.** Equilibrium solubility of methane, carbon dioxide, and hydrogen in water and sea water. *J. of Chemical & Engineering Data*, 24(4): 356–360. <https://doi.org/10.1021/jc60083a006>
29. Леонов А.К. **1960.** Региональная океанография. Л.: Гидрометеиздат, 165 с.
30. Власова Г.А., Глебова С.Ю. **2008.** Сезонная изменчивость поверхностных течений Охотского моря под влиянием синоптических процессов. *Известия ТИНРО*, 154: 259–269.
31. Власова Г.А., Васильев А.С., Шевченко Г.В. **2008.** Пространственная и временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря. М.: Наука, 359 с.
32. Лучин В.А. **1998.** Непериодические течения. В кн.: *Гидрометеорология и гидрохимия морей*. Т. 9: *Охотское море*, вып. 1: *Гидрометеорологические условия*. СПб.: Гидрометеиздат, 233–256.
33. Ohshima K.I., Wakatsuchi M., Fukamachi Y., Mizuta G. **2002.** Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 107: 11. <https://doi.org/10.1029/2001jc001005>
34. Talley L.D. **1991.** An Okhotsk Sea water anomaly: Implications for ventilation in the North Pacific. *Deep-Sea Research A. Oceanographic Research Papers*, 38(S1): S171–S190. [https://doi.org/10.1016/s0198-0149\(12\)80009-4](https://doi.org/10.1016/s0198-0149(12)80009-4)
35. Simizu D., Ohshima K.I. **2002.** Barotropic response of the Sea of Okhotsk to wind forcing. *Journal of Oceanography*, 58(6): 851–860.
36. Shimada Y., Kubokawa A., Ohshima K.I. **2005.** Influence of current width variation on the annual mean transport of the East Sakhalin Current: A simple model. *Journal of Oceanography*, 61: 913–920. <https://doi.org/10.1007/s10872-006-0009-y>
37. Simizu D., Ohshima K.I. **2006.** A model simulation on the circulation in the Sea of Okhotsk and the East Sakhalin Current. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 111: 05016. <https://doi.org/10.1029/2005jc002980>
38. Ohshima K.I., Simizu D. **2008.** Particle tracking experiments on a model of the Okhotsk Sea: Toward oil spill simulation. *Journal of Oceanography*, 64: 103–114. <https://doi.org/10.1007/s10872-008-0008-2>
39. Ebuchi N. **2006.** Seasonal and interannual variations in the East Sakhalin Current revealed by the TOPEX/Poseidon altimeter data. *Journal of Oceanography*, 62: 171–183. <https://doi.org/10.1007/s10872-006-0042-x>
40. Файман П.А. **2018.** Атлас течений Охотского моря. Владивосток: Дальневост. региональный науч.-исслед. гидрометеорологический инст., 133 с.
41. Файман П.А., Пранц С.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю. **2021.** Моделирование распространения тихоокеанских вод в Охотском море. *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, 57: 329–340.
42. Rybalko S.I., Shevchenko G.V. **2003.** Seasonal and spatial variability of sea currents on the Sakhalin northeastern shelf. *Pacific Oceanography*, 1(2): 168–178.

43. Пищальник В.М., Архипкин В.С., Леонов А.В. **2014**. Восстановление годового хода термохалинных характеристик и циркуляции вод на северо-восточном шельфе Сахалина. *Водные ресурсы*, 41(4): 362–374. doi:10.7868/S0321059614040129; EDN: SFAKND
44. Fayman P., Prants S., Budyansky M., Uleysky M. **2020**. New circulation features in the Okhotsk Sea from a numerical model. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 56: 618–631. <https://doi.org/10.1134/s0001433820060043>
45. Prants S., Andreev A., Budyansky M., Uleysky M. **2017**. Mesoscale circulation along the Sakhalin Island eastern coast. *Ocean Dynamics*, 67: 345–356. <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1031-x>
46. Полупанов П.В. **2007**. Возникновение и существование апвеллинга у северо-восточного побережья о. Сахалин. *Труды СахНИРО*, т. 9: 257–263.
47. Жабин И.А., Дмитриева Е.В. **2016**. Сезонная и межгодовая изменчивость ветрового апвеллинга у восточного побережья о-ва Сахалин по данным скаттерометра SeaWinds спутника QuikSCAT. *Исследование Земли из космоса*, 1-2: 105–115. doi:10.7868/S0205961416010152; EDN: VTOVNB
48. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Соловьев В.М., Горнов П.Ю., Шибаев С.В. **2013**. Зона сочленения Евразийской, Охотоморской и Амурской плит по геофизическим данным. В кн.: *50 лет сейсмологического мониторинга Сибири*: Тез. докл. Всерос. конф. с междунар. участием, 21–25 окт. 2013 г. Новосибирск: ИНГГ, с. 218–221.
49. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б., Рашидов В.А., Сергеева Н.А., Филатова Н.И. **2005**. Геотраверс региона Охотского моря. *Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле*, 5: 45–58. EDN: HRSVKV
50. Сим Л.А., Каменев П.А., Богомолов Л.М. **2020**. Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений). *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 372–383. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>
51. Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К. **1986**. Генерация и распространение волн вдоль глубинных разломов. *Известия АН СССР. Физика Земли*, 10: 3–13.
52. Лучин В.А. **1987**. Циркуляция вод Охотского моря и особенности ее внутригодовой изменчивости по результатам диагностических расчетов. *Труды ДВНИГМИ*, 36: 3–13. EDN: VPXBBX
53. Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И. **2016**. Распределение гелия и водорода в отложениях и воде на склоне о. Сахалин. *Литология и полезные ископаемые*, 1: 68–81.
54. Воейкова В.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. **2007**. *Неотектоника и активные разрывы Сахалина*. М.: Наука, 186 с.
55. Ballentine C.J., Burgess R., Marty B. **2002**. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47: 539–614. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.13>
56. Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Каменский И.Л. **1996**. Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, гидрохимическим и геологическим данным). *Литология и полезные ископаемые*, 6: 625–647.
57. Snyder G.T., Sano Y., Takahata N., Matsumoto R., Kakizaki Y., Tomaru H. **2020**. Magmatic fluids play a role in the development of active gas chimneys and massive gas hydrates in the Japan Sea. *Chemical Geology*, 535: 119462. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119462>
58. Тищенко П.П. **2022**. Первичная продукция фитопланктона на северо-восточном шельфе острова Сахалин в летний период. *Морской биологический журнал*, 7(4): 81–97. doi:10.21072/mbj.2022.07.4.07
59. Charlou J.L., Donval J.P., Fouquet Y., Jean-Baptiste P., Holm N. **2002**. Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14' N, MAR). *Chemical Geology*, 191(4): 345–359. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00134-1](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00134-1)
60. Chen J., Liu Yi-F., Zhou L., Irfan M., Hou Z-W., Li W., Mbadinga S.M., Liu J.-F., Yang Shi-Zh., Wu X.L., Gu Ji-D., Mu Bo-Zh. **2020**. Long-chain n-alkane biodegradation coupling to methane production in an enriched culture from production water of a high-temperature oil reservoir. *AMB Express*, 10(63): 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-00998-5>
61. Duan Z., Mao S. **2006**. Thermodynamic model for calculating methane solubility, density and gas phase composition of methane-bearing aqueous fluids from 273 to 523 K and from 1 to 2000 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(13): 3369–3386. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.03.018>
62. Grabowska J., Blazquez S., Sanz E., Zerón I., Al-gaba J., Míguez J., Blas F., Vega C. **2022**. Solubility of methane in water: Some useful results for hydrate nucleation. *The Journal of Physical Chemistry B*, 126(42): 8553–8570. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c04867>
63. Kholmogorov A., Syrбу N., Shakirov R. **2022**. Influence of hydrological factors on the distribution of methane fields in the water column of the Bransfield Strait: Cruise 87 of the R/V «Academik Mstislav Keldysh», 7 December 2021 – 5 April 2022. *Water*, 14(20): 3311. <https://doi.org/10.3390/w14203311>

64. Shakirov R.B., Obzhairov A.I., Biebow N., Salyuk A.N., Tsunogai U., Terekhova V.E., Shoji H. **2005**. Classification of anomalous methane fields in the Okhotsk Sea. *Polar Meteorology and Glaciology*, 19: 50–66.
65. Obzhairov A.I., Shakirov R., Salyuk A., Suess E., Biebow N., Salomatin A. **2004**. Relations between methane venting, geological structure and seismo-tectonics in the Okhotsk Sea. *Geo-Marine Letters*, 24: 135–139. <https://doi.org/10.1007/s00367-004-0175-0>
66. Yoshida O., Yoshikawa-Inoue H., Watanabe S., Noriki S., Wakatsuchi M. **2004**. Methane in the western part of the Sea of Okhotsk in 1998–2000. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109: C09S12, Article B09204. <https://doi.org/10.1029/2003JC001910>
8. Reeburgh W.S. **2007**. Oceanic methane biogeochemistry. *Chemical Reviews*, 107: 486–513. <https://doi.org/10.1021/cr050362v>
9. Römer M., Sahling H., Pape T., Bohrmann G., Spieß V. **2012**. Quantification of gas bubble emissions from submarine hydrocarbon seeps at the Makran continental margin (offshore Pakistan). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C10): C10015. <https://doi.org/10.1029/2011jc007424>
10. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. **2010**. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 327: 1246–1250. <https://doi.org/10.1126/science.1182221>
11. Weber T., Wiseman N.A., Kock A. **2019**. Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters. *Nature Communication*, 10: 4584. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12541-7>
12. Obzhairov A.I., Il'ichev V.I., Kulinich R.G. **1985**. Natural gas anomaly in bottom waters of South China Sea. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 281(5): 1206–1209. (In Russ.).
13. Kulinich R.G., Obzhairov A.I. **1985**. On the structure and current activity of the junction zone of the Sunda shelf and the South China Sea basin. *Geology of the Pacific Ocean*, 3: 102–106. (In Russ.).
14. Abrams M. **1992**. Geophysical and geochemical evidence for subsurface hydrocarbon leakage in the Bering Sea, Alaska. *Marine and Petroleum Geology*, 9(2): 208–221. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(92\)90092-s](https://doi.org/10.1016/0264-8172(92)90092-s)
15. Hovland M., Croker P.F., Martin M. **1994**. Fault – associated seabed mounds (carbonate knolls?) off western Ireland and north-west Australia. *Marine and Petroleum Geology*, 11(2): 232–246. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(94\)90099-x](https://doi.org/10.1016/0264-8172(94)90099-x)
16. Rozhdestvenskiy V.S. **1976**. [Shear displacements along the Tym-Poronai fault zone on Sakhalin Island]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 230(3): 678–780. (In Russ.).
17. Khanchuk A.I. **1993**. [The geological structure and development of the continental margin of the North-west Pacific Ocean]: extended abstract of the thesis of Dr. of Geology and Mineralogy. Moscow, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences. (In Russ.).
18. Chekhovich V.D. (ed.) **1993**. [Tectonics and geodynamics of folded framing of small oceanic basins]. Moscow: Nauka, 271 p.
19. Isozaki Y. **1996**. Anatomy and genesis of a subduction-related orogen: A new view on the geotectonic subdivision and evolution of the Japanese

References

1. Talwani M., Eldholm O. **1973**. Boundary between continental and oceanic crust at the margin of rifted continents. *Nature*, 241: 325–330. <https://doi.org/10.1038/241325a0>
2. Moore J.C., Vrolijk P. **1992**. Fluids in accretionary prisms. *Reviews of Geophysics*, 30: 113–135. <https://doi.org/10.1029/92rg00201>
3. Kazanin G.S., Barabanova Yu.B., Kirillova-Pokrovskaya T.A., Chernikov S.F., Pavlov S.P., Ivanov G.I. **2017**. Continental margin of the East Siberian Sea: geological structure and hydrocarbon potential. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*, 10: 51–55.
4. Khain V., Polyakova I. **2008**. Oil and gas potential of continental margins of the Pacific Ocean. *Lithology and Mineral Resources*, 43: 81–92. <https://doi.org/10.1134/S0024490208010082>
5. Konyukhov A.I. **2009**. Continental margins: Global belts of oil and gas accumulation. *Lithology and Mineral Resources*, 44: 513–530. <https://doi.org/10.1134/S0024490209060017>
6. Oliver J., Isacks B.L., Barazangi M. **1974**. Seismicity at continental margins. In: Burk C.A., Drake C.L. (eds) *The geology of continental margins*. Berlin, Heidelberg, Springer, p. 85–92. https://doi.org/10.1007/978-3-662-01141-6_7
7. Orange D.L., Greene H.G., Reed D., Martin J.B., McHugh C.M., Ryan W., Maher N., Stakes D., Barry J. **1999**. Widespread fluid expulsion on a translational continental margin: Mud volcanoes, fault zones, headless canyons, and organic-rich substrate in Monterey Bay, California. *Geological Society of America Bulletin*, 111(7): 992–1009. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111<0992:wfeoat>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111<0992:wfeoat>2.3.co;2)

- Islands. *The Island Arc*, 5: 289–320. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1996.tb00033.x>
20. Maruyama S., Isozaki Y., Kimura G., Terabayashi M. **1997**. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *The Island Arc*, 6: 121–142. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1997.tb00043.x>
21. Grannik V.M. **2005**. Correlation of structural units of Sakhalin and Hokkaido. *Doklady Earth Sciences*, 401(2): 177–181.
22. Grannik V.M. **2013**. The East-Sakhalin island arc system of the Okhotsk Sea region. *Lithosphere (Russia)*, 1: 36–51. (In Russ.).
23. Zharov A.E. **2005**. South Sakhalin tectonics and geodynamics: A model for the Cretaceous-Paleogene accretion of the East Asian continental margin. *Russian Journal of Earth Sciences*, 7: ES5002. <https://doi.org/10.2205/2005ES000190>
24. Syrbu N., Kholmogorov A., Stepanchkin I., Lobanov V., Shkorba S. **2024**. Formation of abnormal gas-geochemical fields and dissolved gases transport at the shallow northeastern shelf of Sakhalin Island in warm season: Expedition data and remote sensing. *Water*, 16: 1434. <https://doi.org/10.3390/w16101434>
25. Kharakhinov V.V. **2010**. [Oil-and-gas geology of the Sakhalin region]. Moscow: Nauchnyy mir, 276 p. (In Russ.).
26. Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I. **2013**. Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan. *Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 86–87: 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.08.017>
27. Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. **1976**. Solubility of methane in distilled water and seawater. *J. of Chemical & Engineering Data*, 21(1): 78–80. <https://doi.org/10.1021/jc60068a029>
28. Wiessenburg D.A., Guinasso N.L. **1979**. Equilibrium solubility of methane, carbon dioxide, and hydrogen in water and sea water. *J. of Chemical & Engineering Data*, 24(4): 356–360. <https://doi.org/10.1021/jc60083a006>
29. Leonov A.K. **1960**. [Regional oceanography]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 165 p. (In Russ.).
30. Vlasova G.A., Glebova S.Yu. **2008**. Seasonal variability of surface currents in the Okhotsk Sea under influence of atmospheric processes. *Izv. TINRO*, 154: 259–269.
31. Vlasova G.A., Vasiliev A.S., Shevchenko G.V. **2008**. [Spatial and temporal variability of the water structure and dynamics of the Sea of Okhotsk]. Moscow: Nauka, 359 p. (In Russ.).
32. Luchin V.A. **1998**. Non-periodic currents. In: *Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas*. Vol. 9: *The Sea of Okhotsk*, vol. 1: *Hydrometeorological conditions*. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, p. 233–256. (In Russ.).
33. Ohshima K.I., Wakatsuchi M., Fukamachi Y., Mizuta G. **2002**. Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 107: 11. <https://doi.org/10.1029/2001jc001005>
34. Talley L.D. **1991**. An Okhotsk Sea water anomaly: Implications for ventilation in the North Pacific. *Deep-Sea Research A. Oceanographic Research Papers*, 38(S1): S171–S190. [https://doi.org/10.1016/s0198-0149\(12\)80009-4](https://doi.org/10.1016/s0198-0149(12)80009-4)
35. Simizu D., Ohshima K.I. **2002**. Barotropic response of the Sea of Okhotsk to wind forcing. *Journal of Oceanography*, 58(6): 851–860.
36. Shimada Y., Kubokawa A., Ohshima K.I. **2005**. Influence of current width variation on the annual mean transport of the East Sakhalin Current: A simple model. *Journal of Oceanography*, 61: 913–920. <https://doi.org/10.1007/s10872-006-0009-y>
37. Simizu D., Ohshima K.I. **2006**. A model simulation on the circulation in the Sea of Okhotsk and the East Sakhalin Current. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 111: 05016. <https://doi.org/10.1029/2005jc002980>
38. Ohshima K.I., Simizu D. **2008**. Particle tracking experiments on a model of the Okhotsk Sea: Toward oil spill simulation. *Journal of Oceanography*, 64: 103–114. <https://doi.org/10.1007/s10872-008-0008-2>
39. Ebuchi N. **2006**. Seasonal and interannual variations in the East Sakhalin Current revealed by the TOPEX/POSEIDON altimeter data. *Journal of Oceanography*, 62: 171–183. <https://doi.org/10.1007/s10872-006-0042-x>
40. Fayman P.A. **2018**. *Atlas of the Sea of Okhotsk*. Vladivostok: Dal'nevost. Regional. Nauch.-Issled. Gidrometeorologicheskiiy Inst. (DVNIGMI), 133 p.
41. Fayman P.A., Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. **2021**. Simulated pathways of the northwestern pacific water in the Okhotsk Sea. *Izv. Atmospheric and Oceanic Physics*, 57: 329–340. <https://doi.org/10.1134/s000143382103004x>
42. Rybalko S.I., Shevchenko G.V. **2003**. Seasonal and spatial variability of sea currents on the Sakhalin northeastern shelf. *Pacific Oceanography*, 1(2): 168–178.
43. Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V. **2014**. Reconstruction of the annual variations of thermohaline characteristics and water circulation on the northeastern Sakhalin shelf. *Water Resources*, 41(4): 385–395. <https://doi.org/10.1134/s0097807814040113>

44. Fayman P., Prants S., Budyansky M., Uleysky M. **2020**. New circulation features in the Okhotsk Sea from a numerical model. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 56: 618–631. <https://doi.org/10.1134/s0001433820060043>
45. Prants S., Andreev A., Budyansky M., Uleysky M. **2017**. Mesoscale circulation along the Sakhalin Island eastern coast. *Ocean Dynamics*, 67: 345–356. <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1031-x>
46. Polupanov P.V. **2007**. Upwelling along the northeastern coast of Sakhalin Island: origination and existence. In: *Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas*. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhNIRO, p. 257–263. (Transactions of the Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography; vol. 9).
47. Zhabin I.A., Dmitrieva E.V. **2021**. Seasonal and inter-annual variability of wind-driven upwelling near the east coast of Sakhalin Island based on Quikscat/Sea-winds scatterometer data. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 57(12): 1680–1689. <https://doi.org/10.1134/s000143382112029x>
48. Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V., Soloviev V.M., Gornov P.Yu., Shibaev S.V. **2013**. [The zone of junction of the Eurasian, Okhotsk and Amur plates according to geophysical data]. In: [50 years of seismological monitoring of Siberia]: Abstracts. All-Russian conf. with international participation, October 21–25, 2013. Novosibirsk: INGG, p. 218–221.
49. Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Piip V.B., Rashidov V.A., Sergeyeva N.A., Filatova N.I. **2005**. The Okhotsk Sea geotraverse. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Earth Sciences Bulletin of KRAESC*, 5: 45–58. (In Russ.).
50. Sim L.A., Kamenev P.A., Bogomolov L.M. **2020**. New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 372–383. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>
51. Nikolayevsky V.N., Ramazanov T.K. **1986**. Generation and propagation of waves along deep faults. *Izvestia AN SSSR, Fizika Zemli*, 10: 3–13. (In Russ.).
52. Luchin V.A. **1987**. [Water circulation in the Sea of Okhotsk and patterns of its intra-annual variations as inferred from the results of diagnostic calculations]. *Trudy Dal'nevost. Nauch.-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 36: 3–13. EDN: VPXBBX
53. Shakirov R.B., Syrбу N.S., Obzhirov A.I. **2016**. Distribution of helium and hydrogen in sediments and water on the Sakhalin slope. *Lithology and Mineral Resources*, 51(1): 61–73. <https://doi.org/10.1134/s0024490216010065>
54. Voeikova V.A., Nesmeyanov S.A., Serebryakova L.I. **2007**. [Sakhalin neotectonics and active faults]. M.: Nauka, 186 p.
55. Ballentine C.J., Burgess R., Marty B. **2002**. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47: 539–614. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.13>
56. Lavrushin V.Yu., Polyak B.G., Prasolov E.M., Kamensky I.L. **1996**. Sources of material in mud volcano products (based on isotopic, hydrochemical, and geological data). *Lithology and Mineral Resources*, 31: 557–578.
57. Snyder G.T., Sano Y., Takahata N., Matsumoto R., Kakizaki Y., Tomaru H. **2020**. Magmatic fluids play a role in the development of active gas chimneys and massive gas hydrates in the Japan Sea. *Chemical Geology*, 535: 119462. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119462>
58. Tishchenko P.P. **2022**. Phytoplankton primary production on the northeastern Sakhalin Island shelf in summer. *Marine Biological Journal*, 7(4): 81–97. doi:10.21072/mbj.2022.07.4.07
59. Charlou J.L., Donval J.P., Fouquet Y., Jean-Baptiste P., Holm N. **2002**. Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14' N, MAR). *Chemical Geology*, 191(4): 345–359. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00134-1](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00134-1)
60. Chen J., Liu Yi-F., Zhou L., Irfan M., Hou Z-W., Li W., Mbadinga S.M., Liu J.-F. Yang Shi-Zh., Wu X.L., Gu Ji-D., Mu Bo-Zh. **2020**. Long-chain n-alkane biodegradation coupling to methane production in an enriched culture from production water of a high-temperature oil reservoir. *AMB Express*, 10(63): 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-00998-5>
61. Duan Z., Mao S. **2006**. Thermodynamic model for calculating methane solubility, density and gas phase composition of methane-bearing aqueous fluids from 273 to 523 K and from 1 to 2000 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(13): 3369–3386. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.03.018>
62. Grabowska J., Blazquez S., Sanz E., Zerón I., Algaba J., Míguez J., Blas F., Vega C. **2022**. Solubility of methane in water: Some useful results for hydrate nucleation. *The Journal of Physical Chemistry B*, 126(42): 8553–8570. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c04867>
63. Kholmogorov A., Syrбу N., Shakirov R. **2022**. Influence of hydrological factors on the distribution of methane fields in the water column of the Bransfield Strait: Cruise 87 of the R/V «Academik Mstislav

- Keldysh», 7 December 2021 – 5 April 2022. *Water*, 14(20): 3311. <https://doi.org/10.3390/w14203311>
64. Shakirov R.B., Obzhairov A.I., Biebow N., Salyuk A.N., Tsunogai U., Terekhova V.E., Shoji H. **2005**. Classification of anomalous methane fields in the Okhotsk Sea. *Polar Meteorology and Glaciology*, 19: 50–66.
65. Obzhairov A.I., Shakirov R., Salyuk A., Suess E., Biebow N., Salomatin A. **2004**. Relations between methane venting, geological structure and seismo-tectonics in the Okhotsk Sea. *Geo-Marine Letters*, 24: 135–139. <https://doi.org/10.1007/s00367-004-0175-0>
66. Yoshida O., Yoshikawa-Inoue H., Watanabe S., Noriki S., Wakatsuchi M. **2004**. Methane in the western part of the Sea of Okhotsk in 1998–2000. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109: C09S12, Article B09204. <https://doi.org/10.1029/2003JC001910>

Об авторах

Сотрудники Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия:

Холмогоров Андрей Олегович (<https://orcid.org/0000-0002-6259-1614>), кандидат географических наук, младший научный сотрудник лаборатории комплексных исследований окружающей среды и минеральных ресурсов, kholmogorov.ao@poi.dvo.ru

Сырбу Надежда Сергеевна (<https://orcid.org/0000-0002-1441-6133>), кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией комплексных исследований окружающей среды и минеральных ресурсов, syrbu@poi.dvo.ru

Лобанов Вячеслав Борисович (<https://orcid.org/0000-0001-9104-5578>), кандидат географических наук, заведующий лабораторией физической океанологии, lobanov@poi.dvo.ru

Жердев Павел Дмитриевич (<https://orcid.org/0009-0008-5739-7543>), старший инженер лаборатории газогеохимии, zherdev.pd@poi.dvo.ru

Мальцева Елена Валерьевна (<https://orcid.org/0000-0003-3230-7042>), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории газогеохимии, ekor@poi.dvo.ru

About the Authors

Employees of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia:

Kholmogorov, Andrey O. (<https://orcid.org/0000-0002-6259-1614>), Cand. Sci. (Geography), Junior Researcher of the Laboratory of integrated research of environment and mineral resources, kholmogorov.ao@poi.dvo.ru

Syrbu, Nadezhda S. (<https://orcid.org/0000-0002-1441-6133>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of integrated research of environment and mineral resources, syrbu@poi.dvo.ru

Lobanov, Vyacheslav B. (<https://orcid.org/0000-0001-9104-5578>), Cand. Sci. (Geography), Head of the Laboratory of physical oceanology, lobanov@poi.dvo.ru

Zherdev, Pavel D. (<https://orcid.org/0009-0008-5739-7543>), Senior Engineer of the Laboratory of gas geochemistry, zherdev.pd@poi.dvo.ru

Maltseva, Elena V. (<https://orcid.org/0000-0003-3230-7042>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Laboratory of gas geochemistry, ekor@poi.dvo.ru

Поступила 26.02.2025

Принята к публикации 21.03.2025

Опубликована online 18.04.2025

Received 26 February 2025

Accepted 21 March 2025

Published online 18.04.2025