

УДК 551.463.5; 551.464.34

## ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ, ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И БИООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЛКОВОДНОГО СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ШЕЛЬФА ОСТРОВА САХАЛИН

© 2025 г. Н. А. Липинская\*, Н. С. Сырбу, П. А. Салюк, А. О. Холмогоров

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

*\*e-mail: lipinskaya.na@poi.dvo.ru*

Поступила 13.08.2024 г.

После доработки 09.12.2024 г.

Принята к публикации 26.01.2025 г.

В работе рассматриваются теоретические и практические аспекты связи между биооптическими параметрами (концентрация хлорофилла-а, окрашенное растворенное органическое вещество, мутность) и распределением растворенных газов (метан, гелий, водород, сероводород) в морской воде. Комплексные исследования газогеохимических, гидрологических и биооптических параметров акватории мелководного северо-восточного шельфа о. Сахалин (Охотское море) основаны на данных, полученных в ходе рейса № 68 НИС “Академик Опарин” в августе 2023 г. Показано, что в теплый период года район исследований включает в себя воды с различными биооптическими характеристиками, определяемыми влиянием речного стока, нефтегазоносного шельфа, активным развитием фитопланктона и динамикой вод. Биооптические измерения позволяют различить основную ветвь Восточно-Сахалинского течения и его шельфовую ветвь, в которой содержатся повышенные концентрации растворенных газов, выделяющихся из придонных источников на восточном шельфе о. Сахалин.

**Ключевые слова:** растворенный метан, сероводород, гелий, водород, Охотское море, биооптические параметры морской воды, хлорофилл-а, мутность, окрашенное растворенное органическое вещество

**DOI:** 10.31857/S0030157425030035, **EDN:** GVWCPZ

### ВВЕДЕНИЕ

Морские континентальные окраины Азиатско-Тихоокеанского региона в последние годы стали объектом интенсивных исследований, поскольку в районах этой зоны обнаружены крупные залежи углеводородов в различных формах, включая нефть, газ, газовый конденсат и газовые гидраты.

Обнаружение повышенных концентраций метана в водной толще окраинных морей, как правило, обусловлено активными подводными выходами газа [19, 21, 24, 43]. Генетическая связь подводных выходов метана с залежами нефти и газа, скоплениями газогидратов, глубинными разломами, поверхностными разрывами и складками установлена для многих морей северо-западной части Тихого океана [4, 7]. Вопросы оперативного поиска критериев источников повышенных концентраций метана и других

газов в воде нефтегазоносных регионов остаются по-прежнему актуальными и требуют применения комплексного междисциплинарного подхода [9, 10]. Неотъемлемой частью современных мониторинговых исследований являются дистанционно получаемые данные в видимом спектральном диапазоне вне зоны солнечного блика, позволяющие проводить исследования на больших акваториях со спутников, летательных аппаратов или судов. В таких данных разные типы вод различаются за счет вариаций биооптических характеристик морской воды [28] (содержания фитопланктона, окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ), взвешенных органических и минеральных веществ) либо за счет изменчивости стратификации перечисленных компонентов морской воды в поверхностном слое [6, 26].

Работа посвящена актуальной проблеме исследования газогеохимических параметров

окраинных дальневосточных морей на основе совместного анализа результатов натурных газогеохимических, гидрологических и биооптических исследований. В работе особое внимание уделяется выявлению фоновых и аномальных газогеохимических полей, их взаимосвязи с геологическим строением мелководного нефтегазового северо-восточного шельфа о. Сахалин. Это важно для понимания причин поступления газов из недр в воду и атмосферу, трассирования зон разломов, оценки перспективности площадей на нефть, газ, газогидраты, в экологических исследованиях, гидрогеологических работах.

Выявление признаков повышенного содержания растворенных газов в воде на основе распределения биооптических параметров может быть использовано для предварительного выделения районов, в которых требуются дополнительные исследования с помощью прямых определений концентрации метана и других газов.

Биооптические исследования океана представляют фундаментальный интерес для многих океанографических дисциплин — физической океанографии [17, 25], химии океана [40]. Такие исследования проводятся на стыке наук для лучшего понимания биологического и биогеохимического состояния природных вод [33, 38]. При междисциплинарном подходе возможно оценить роль основных оптически-активных компонентов морской воды в формировании аномальных газогеохимических полей и потоков газа, что оказывает значимое влияние на глобальный биогеохимический баланс в целом и эмиссию метана с акватории окраинных морей.

Распределение биооптических параметров и газов в воде является сложным и взаимозависимым процессом, который оказывает значительное влияние на функционирование водных экосистем. Исследование биооптических параметров основано на прямой связи с оптическими свойствами воды, а также с характером и поведением важных биогеохимических компонентов [29].

Цель данного исследования заключается в применении совместного анализа вертикальных профилей концентрации растворенных газов (метана, гелия, водорода, сероводорода) в воде, гидрологических параметров (температуры, солености) и биооптических параметров (концентрации хлорофилла-а (хл-а), ОРОВ и мутности) морской воды для индикации водных масс с повышенным содержанием растворенных газов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках рейса № 68 на НИС “Академик Опарин” в теплый период года были осуществлены измерения глубинных профилей температуры, электропроводности и давления с помощью встроенных датчиков гидрологического зонда SeaBird SBE-911. С помощью автономного зондирующего измерителя С6Р фирмы Turner были проведены измерения мутности, интенсивностей флуоресценции хл-а и ОРОВ.

Для калибровки флуоресцентных измерений и пересчета интенсивности флуоресценции (хл-а в массовые концентрации — мг/м<sup>3</sup>, ОРОВ — в единицы Quinine Sulfate Units — QSU) проведено сравнение полученных данных со спектрофотометрическими определениями выполненных в лабораторных условиях по ГОСТ 17.1.04.02–90 концентраций в пробах воды, отобранных синхронно с гидрооптическим зондированием. Для определения концентрации ОРОВ были отобраны пробы воды объемом 1–2 л и профильтрованы на фильтрах 0.2 мкм. Для определения концентрации хл-а отобраны пробы воды объемом 1.5 л и профильтрованы на фильтрах 0.45 мкм.

Для газохроматографического анализа отбор проб из батометров “Нискин” осуществлялся на станциях при STD-зондировании в диапазоне глубин от поверхности до дна, а также из проточной системы на горизонте 5 м. Вода из батометров отбиралась методом “тройного перелива” в предварительно простерилизованные медицинские стеклянные бутылки объемом 60 и 100 мл, которые герметично закрывались стерильными резиновыми пробками без доступа в бутылки атмосферного воздуха. Для удаления излишков воды применялись иглы от медицинского шприца.

Газогеохимические исследования на северо-восточном шельфе о. Сахалин проводились в рамках рейса № 68 на НИС “Академик Опарин” (ОР68) в период 12–18 августа 2023 г.

Для анализа содержания метана, сероводорода, гелия и водорода во всех образцах использовался метод равновесных концентраций “HeadSpace” [42].

Для анализа содержания метана при создании газовой фазы в бутылки вводился гелий (10 мл) марки 6.0; для анализа содержания сероводорода, гелия и водорода в бутылки вводился атмосферный воздух (10 мл). Далее образцы интенсивно перемешивались. Перед проведением анализа газовая фаза равновесно извлекалась шприцем

для ввода пробы в газовый хроматограф. Для анализа содержания сероводорода в судовой лаборатории использовался газовый хроматограф “S-Хром”, Россия.

Для хроматографического анализа состава углеводородных газов 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.

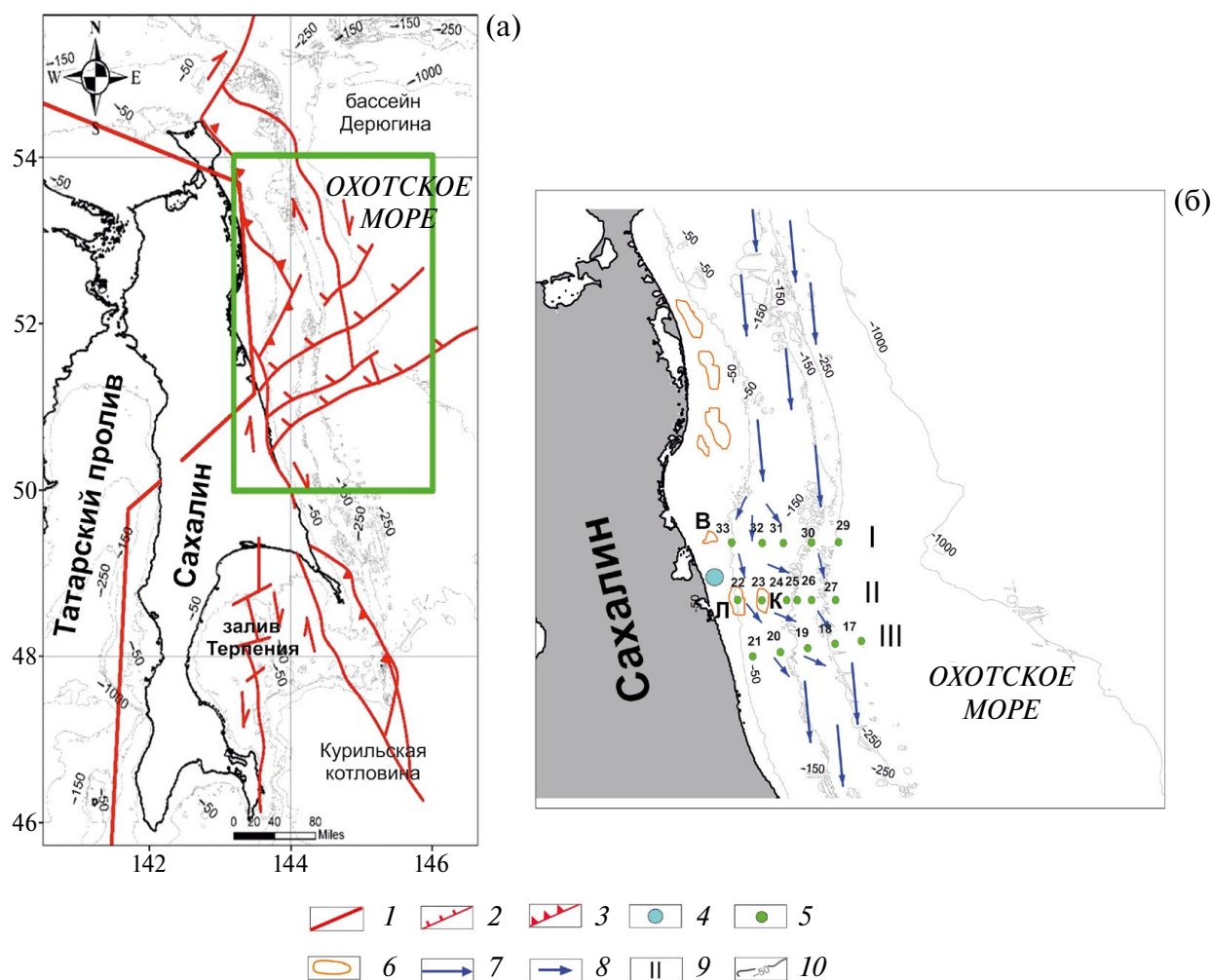
Расчет концентраций метана, гелия, водорода, растворенных в морской воде, проводился методом равновесного парафазного анализа с

помощью констант растворимости по методике [45] в модификации [44].

### ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ распространения и переноса газогеохимических, биооптических и гидрологических параметров в районе работ основан на результатах, полученных с использованием прогностических моделей различного типа [32] для Восточно-Сахалинского течения.

В западной части Охотского моря наиболее устойчивым звеном общего циклонического движения вод [2] является холодное Восточно-Сахалинское течение (рис. 1), несущее воды



**Рис. 1.** Схема района работ и основных тектонических нарушений на северо-восточном шельфе о. Сахалин [1, 3, 13] (а) и схема Восточно-Сахалинского течения на северо-восточном шельфе о. Сахалин со станциями отбора проб в рейсе № 68 на НИС “Академик Опарин” (ОР68) в период 12–18 августа 2023 г. (б). 1 – крупнейшие разрывные нарушения; 2 – сбросы; 3 – взбросы; 4 – газовый факел “Николь”; 5 – станции отбора проб воды в рейсе ОР68; 6 – газоконденсатные месторождения (Л – Лунское, К – Кириновское, В – Венинское); 7 – основной поток Восточно-Сахалинского течения; 8 – мезомасштабные циркуляции в потоке Восточно-Сахалинского течения [43]; 9 – номера разреза со станциями отбора (I – северный; II – центральный; III – южный); 10 – изобаты.

вдоль восточного шельфа и склона о. Сахалин в южном направлении. Восточно-Сахалинское течение важно для переноса тяжелых шельфовых вод, формируемых на северном шельфе Охотского моря [41].

Основные элементы движения и циркуляции вод на северо-восточном шельфе Сахалина — это Восточно-Сахалинское течение [2] и Восточно-Сахалинское противотечение [14, 34], которые присутствуют в разные периоды года постоянно, но интенсивность переноса вод этими потоками меняется в значительных пределах и во времени, и в пространстве. В ноябре—декабре в поверхностных горизонтах доминирующим является движение вод в южном направлении, а в июле — августе — в северном [11]. В структуре общего потока вод Восточно-Сахалинского течения могут быть локальные динамические движения и других направлений, однако общая направленность его с севера на юг общепризнана [31, 32]. Для летнего сезона для восточного побережья о. Сахалин характерно явление апвеллинга, формирующегося под воздействием летнего муссона. В прибрежной зоне Восточно-Сахалинское течение ослаблено, воды низкой солености, обусловленные стоком реки Амур, блокируются и редко наблюдаются южнее  $52^\circ$  с. ш. [14]. Наличие мезомасштабных циркуляций в потоке Восточно-Сахалинского течения обеспечивает водообмен между шельфом и глубоководным бассейном Охотского моря [35]. На северо-восточном шельфе о. Сахалин в августе за счет сильной термохалинной стратификации в периоды адвекции с севера теплых и пресных вод в приповерхностном слое не происходит интенсивный прибрежный апвеллинг даже при благоприятных ветровых условиях. Кроме того, происходит заглубление термоклина (галоклина), которое препятствует подъему холодных и соленых охотоморских вод к поверхности [12].

Анализ распространения и переноса газогеохимических, биооптических и гидрологических параметров в районе работ основан на результатах, полученных с использованием прогностических моделей различного типа [31] для Восточно-Сахалинского течения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Распределение растворенных газов*

В районе северного звена Хоккайдо-Сахалинского глубинного сдвига расположены основные скопления углеводородов региона.

Поперек сдвига в ходе экспедиционных работ было выполнено три гидрологических профиля.

На крайней западной станции № 33 северного разреза у дна (на горизонте 45 м) обнаружена газовая аномалия с локальным максимумом растворенного метана 198 нМ/л (рис. 2а), связанная, вероятно, с областью дегазации на дне. Данная аномалия распространяется на восток, при этом концентрации метана снижаются до 8 нМ/л по мере удаления от источника. Метан распространяется под нижней границей сезонного пикноклина (10 м). Здесь также обнаружены повышенные содержания гелия до 11.1 ppm, который является инертным газом и может образовываться только в результате глубинных процессов. Фоновое содержание гелия в воде для Охотского моря составляет 4.2 ppm [37].

В восточной части разреза при глубине дна 280 м в слое 130–260 м обнаружена область повышенного содержания сероводорода (с локальным максимумом 290 ppb) и гелия (12.2 ppm), что также может указывать на наличие здесь источника газовой эмиссии (рис. 2б, в). Кроме того, выявлена область повышенного содержания водорода (абсолютный максимум 35 ppm) в слое 20–40 м. Фоновые значения водорода в воде для Охотского моря составляют 2.1 ppm (район Курильской котловины) [37].

На западных станциях № 22 и 23 центрального разреза у дна на горизонтах 30 и 84 м соответственно обнаружена газовая аномалия с локальным максимумом растворенного метана 295 нМ/л и гелия 14.1 ppm (рис. 3а). При этом метан распространяется под нижней границей сезонного пикноклина (10–40 м), его заглубление в центральной части разреза связано с влиянием Восточно-Сахалинского течения. Придонные повышенные значения гелия выявлены в центральной (локальный максимум 13.5 ppm) и восточной (абсолютный максимум 17.2 ppm) частях данного разреза (рис. 3в).

Область повышенных содержаний сероводорода с абсолютным максимумом 1337 ppb была найдена только в восточной части центрального разреза (рис. 3б) в слое 75–180 м при глубине дна 284 м. Данная область совпадает с областью повышенных концентраций метана и гелия в районе станции № 26, что может указывать на общий источник. Вероятно, растворенные газы мигрируют от шельфа о. Сахалин в сторону его склона под влиянием Восточно-Сахалинского течения.

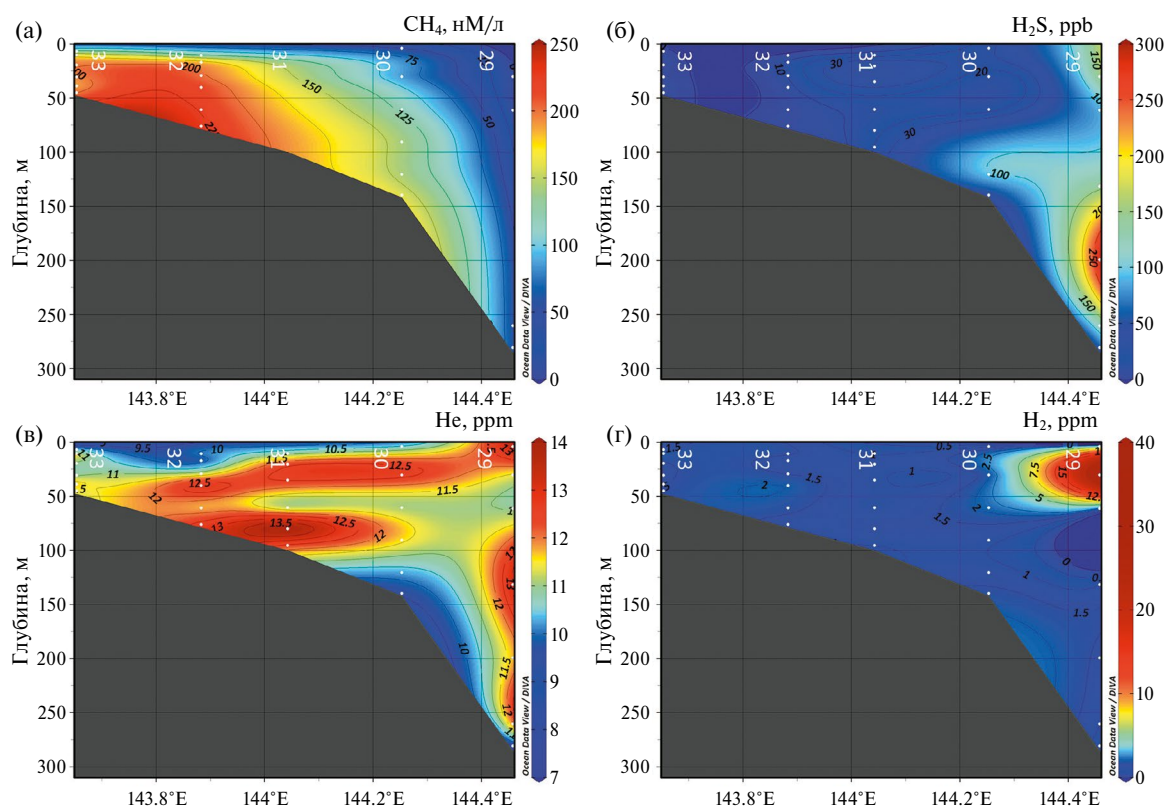


Рис. 2. Распределения метана ( $\text{CH}_4$ ) (а), сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (б), гелия (He) (в), водорода ( $\text{H}_2$ ) (г) на северном разрезе (I).

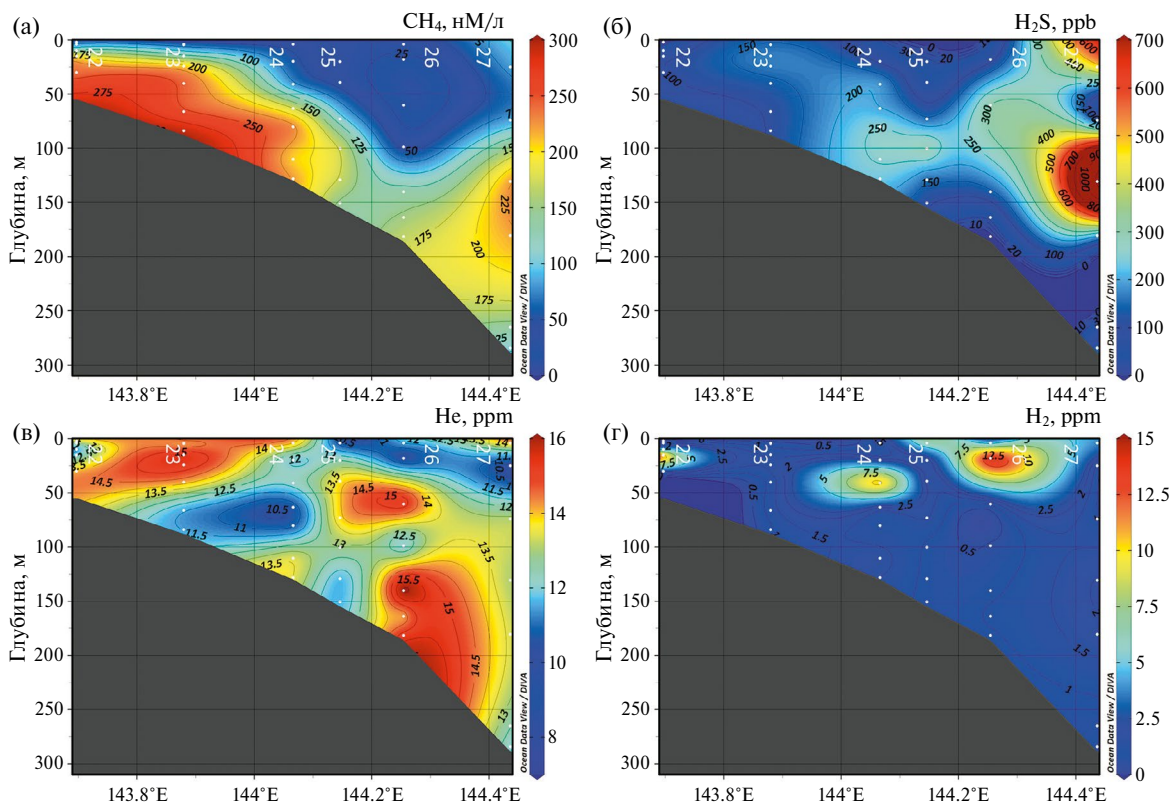
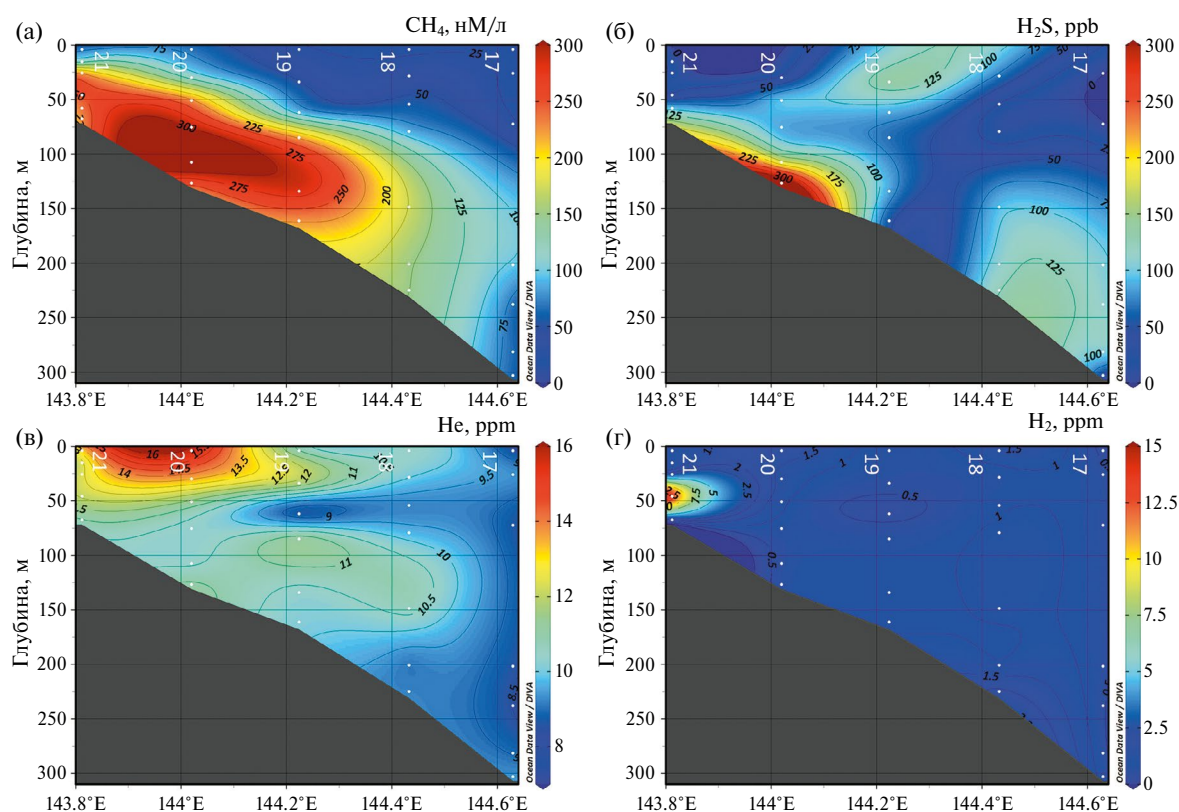


Рис. 3. Распределения метана ( $\text{CH}_4$ ) (а), сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (б), гелия (He) (в), водорода ( $\text{H}_2$ ) (г) на центральном разрезе (II).





**Рис. 4.** Распределения метана ( $\text{CH}_4$ ) (а), сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (б), гелия (He) (в), водорода ( $\text{H}_2$ ) (г) на южном разрезе (III).

На западных станциях № 19, 20 и 21 южного разреза у дна (на горизонтах 161, 126 и 67 м соответственно) обнаружена газовая аномалия с локальным максимумом метана 225 нМ/л, сероводорода — 111.6 ppb и гелия — 11.3 ppm (рис. 4). При этом поле растворенного метана распространяется под нижней границей сезонного пикноклина (15–60 м), его заглубление в центральной части разреза связано с влиянием Восточно-Сахалинского течения.

Области повышенных содержаний водорода 14.6 и 15.2 ppm выявлены только на крайних западных станциях центрального и южного разрезов соответственно.

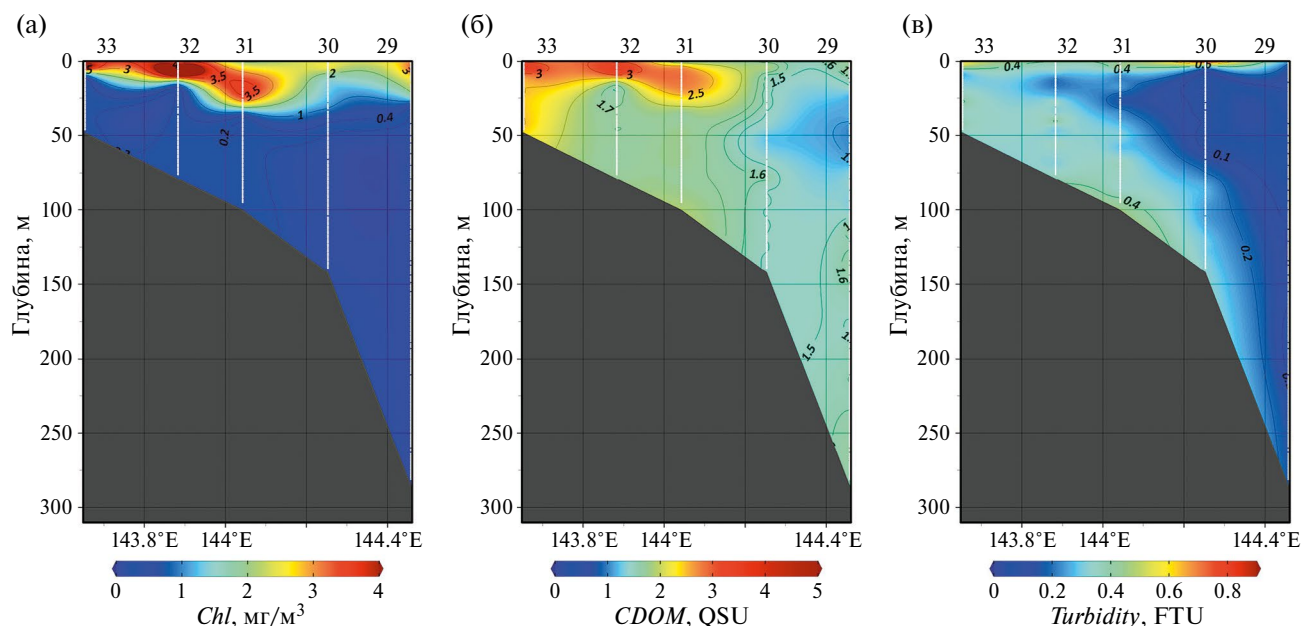
#### *Биооптические параметры*

В ходе экспедиции на восточном шельфе острова Сахалин также был собран ряд качественных судовых биооптических данных, синхронных с газогеохимическими измерениями. Зондирование было выполнено гидрооптическим профилографом Turner C6P на станциях от поверхности до дна.

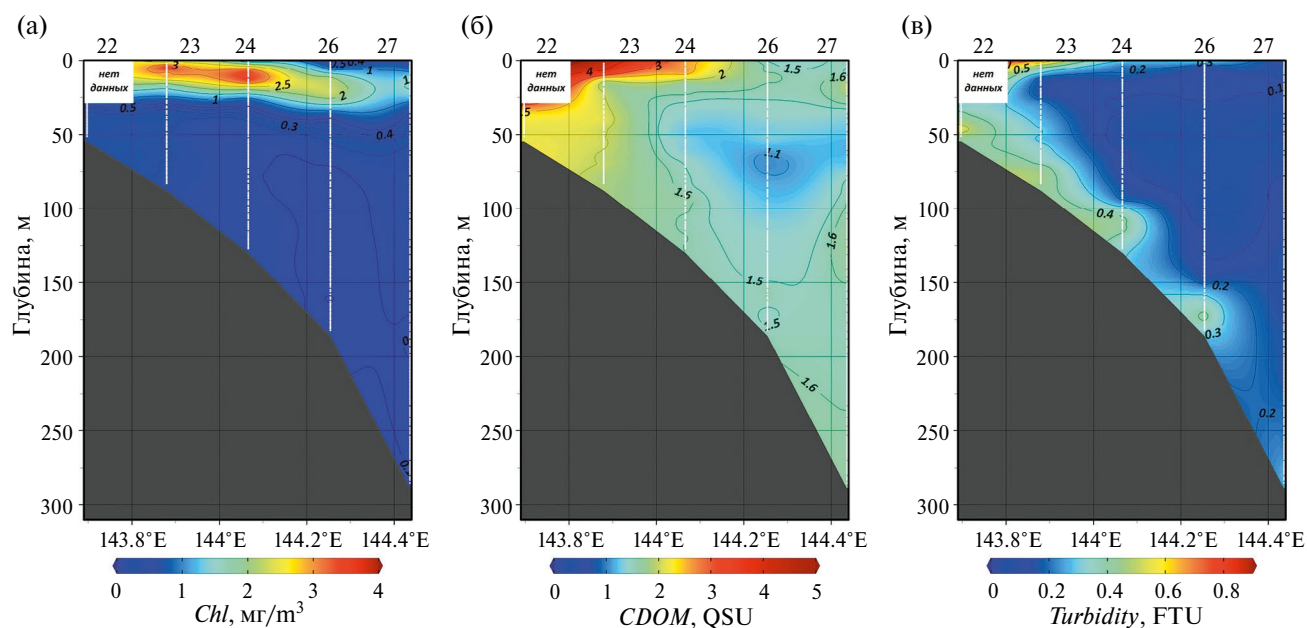
На северном разрезе I (рис. 5) по данным биооптических измерений наблюдалась следующая

картина: в приповерхностном слое, на станциях № 32 и 33 явно выделяются очаги повышенных значений концентрации хл-а (до 5 мг/м<sup>3</sup>), а также данные концентрации ОРОВ более 5 QSU, что может быть обусловлено стоком реки Амур и выносом терригенных веществ [34]. В морской части разреза на станциях № 29–31 влияние материкового стока ослабевает, концентрации хл-а — 2–3 мг/м<sup>3</sup>, ОРОВ — менее 1.5 QSU (примечательно, что в данной области также наблюдается и минимум концентрации растворенного метана в воде (см. рис. 2а)). На станции № 33 выявлен локальный очаг небольшого увеличения мутности в придонном слое (до 0.5 FTU) относительно аналогичных вод на остальных станциях.

На центральном разрезе II (рис. 6а, б) распределение основных биооптических характеристик однородно, слой максимума концентрации хл-а на 20 м локализован, в районе станции № 23 присутствует увеличение концентрации ОРОВ свыше 5 QSU на поверхности и порядка 2 QSU в придонном слое. В придонном слое, как и на разрезе I, в районе станции № 31 (см. рис. 5в), на станции № 23 (рис. 6в), наблюдается увеличение мутности относительно окружающих вод до 0.5 FTU



**Рис. 5.** Северный разрез (I). Глубинные профили биооптических параметров: (а) концентрации хл-а (*Chl*), (б) ОРОВ (*CDOM*), (в) показателя мутности (*Turbidity*).

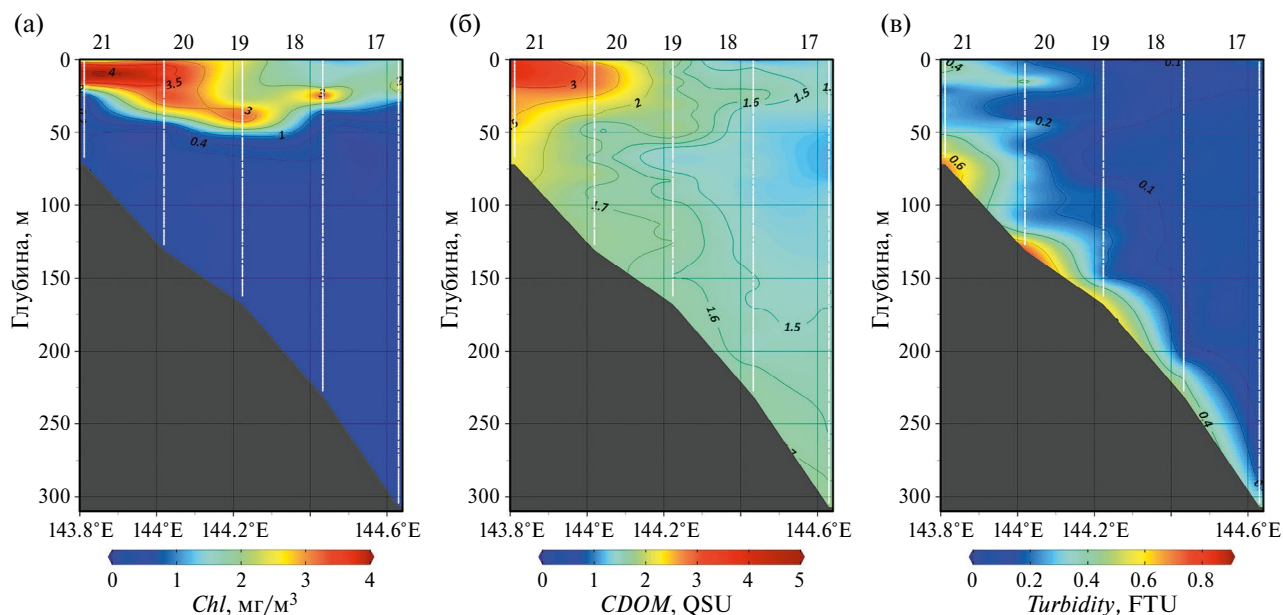


**Рис. 6.** Центральный разрез (II). Глубинные профили биооптических параметров: (а) концентрации хл-а (*Chl*), (б) ОРОВ (*CDOM*), (в) показателя мутности (*Turbidity*).

и концентрации ОРОВ до 1 QSU. Значительное увеличение концентрации ОРОВ и мутности в придонном слое может свидетельствовать о дополнительном источнике ОРОВ, не связанном со стоком реки.

Биооптические характеристики, такие как концентрация хл-а и мутность, могут отражать

процессы биологической активности в водном столбе, в том числе влияние веществ, выходящих из подводных источников. Увеличение концентрации органического вещества и мутности может свидетельствовать о повышенной активности микроорганизмов, реагирующих на поступление газов.



**Рис. 7.** Южный разрез (III). Глубинные профили биооптических параметров: (а) концентрации хл-а (*Chl*), (б) ОРОВ (*CDOM*), (в) показателя мутности (*Turbidity*).

На южном разрезе III (рис. 7) также наблюдается однородное распределение основных биооптических параметров в поверхностном слое, однако на станции № 21 ярко выражено влияние материкового стока: так, концентрации ОРОВ здесь выше 5 QSU (рис. 7б). На станциях № 19–21 в придонном слое наблюдается увеличение показателя мутности до 1 FTU, что может быть вызвано различными факторами, включая как динамические процессы (придонные течения и мезомасштабные вихри [14, 35; 36]), так и придонные процессы, такие как интенсивные выходы газов и других веществ из придонных источников к поверхности [37]. Важно проводить дополнительные исследования для точного определения причин.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные газогеохимические исследования указывают на наличие интенсивных источников дегазации в районе исследований. Причем интенсивность возрастает с востока на запад, к побережью. Мелководный шельф северо-восточного Сахалина лежит в зоне влияния Хоккайдо-Сахалинского глубинного сдвига, где расположены многочисленные месторождения углеводородов региона [13]. Современная высокая сейсмическая активность и разломы, секущие морское дно [15], создают идеальные условия для газопроницаемости. Формирова-

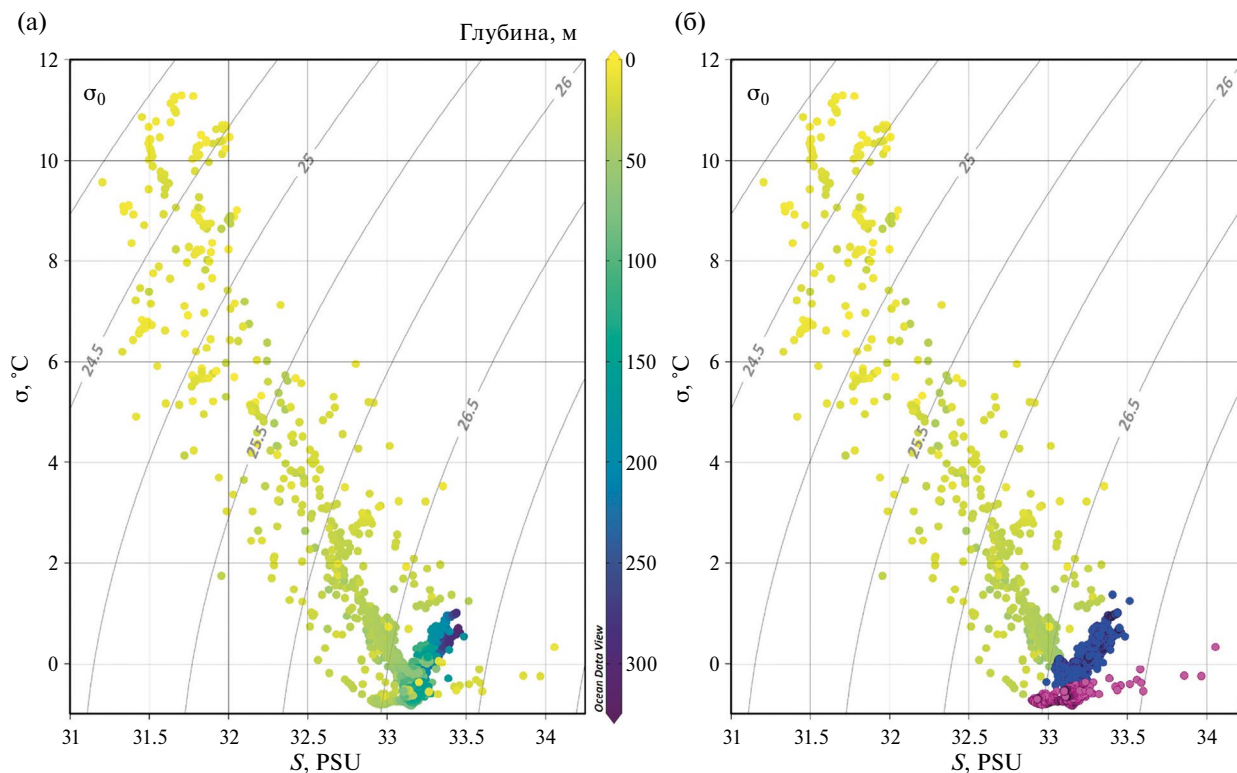
ние аномальных газогеохимических полей метана и гелия в толще воды отражает эту ситуацию. Наличие гелия на северо-восточном мелководном шельфе может быть обусловлено как радиогенным источником в земной коре, таким как угленосные отложения [5, 37], так и дегазацией мантии [39]. А увеличение концентраций сероводорода на шельфе о. Сахалин обусловлено наличием газовых и нефтяных месторождений, формирование которых связано с разложением органического материала, в процессе разложения которого образуется сероводород [8, 16]. Образование сероводорода в районе нефтегазовых залежей объясняется естественными процессами: бактериальным восстановлением сульфатов, термическим крекингом и термохимическим восстановлением сульфатов. Именно термохимическое восстановление сульфатов приводит к образованию наибольшего количества сероводорода [27, 30].

Анализ  $\sigma_t$ - $S$ -диаграммы (потенциальная температура ( $\sigma_t$ ) – соленость ( $S$ )) (рис. 8), биооптических маркеров (рис. 9) и газогеохимических параметров (рис. 9а) позволяет выделить различные классы водных масс на исследуемом участке акватории.

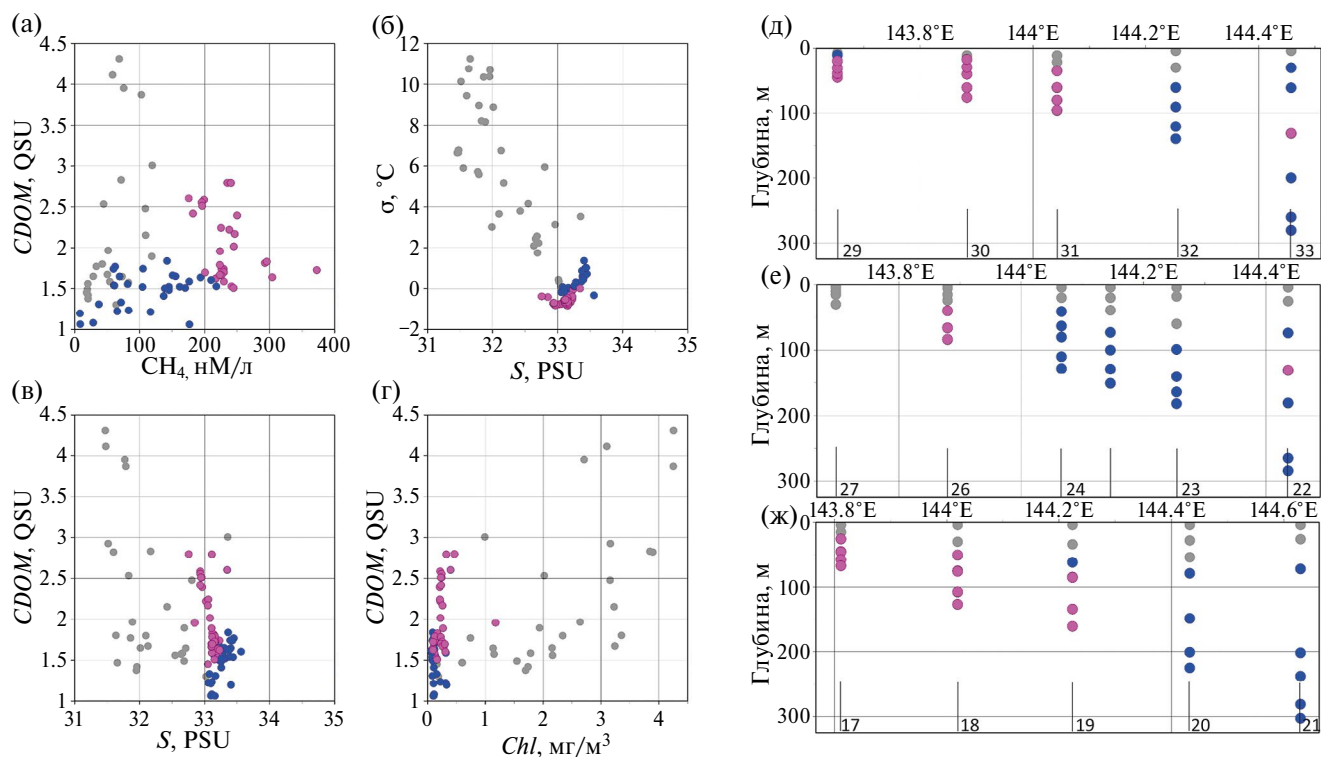
В результате такого анализа выделены три типа водных масс (табл. 1).

Первый класс – поверхностные водные массы (отмечены серым цветом) – характеризуются





**Рис. 8.**  $\sigma_t$ - $S$ -диаграмма по данным CTD-зондирований на всех станциях в исследуемой акватории (а);  $\sigma_t$ - $S$ -диаграмма, где разными цветами выделены классы вод (б).



**Рис. 9.** Диаграммы рассеяния параметров  $CDOM-CH_4$  (а),  $\sigma_t-S$  (б),  $CDOM-S$  (в),  $CDOM-Chl$  (г); станции разреза I (д), станции разреза II (е), станции разреза III (ж) с выделенными водными массами с учетом анализа биооптических и гидрологических параметров.

**Таблица 1.** Характеристики выделенных водных масс района исследования

Параметр \ Тип	Первый класс	Второй класс	Третий класс
	Поверхностные водные массы	Придонные водные массы мелководного шельфа (до 200 м)	Придонные водные массы глубоководного шельфа (более 200 м)
$\sigma$ , °C	0–11.8	–0.8–0.4	–0.8–1.7
$S$ , PSU	31–33.3	32.8–34	33–33.5
$CH_4$ , нМ/л	< 120	200–400	< 220
$Chl$ , мг/м <sup>3</sup>	0.7–4.5	0.5	< 0.1
$CDOM$ , QSU	1.3–4.5	1.5–2.8	1–1.8

наибольшей амплитудой изменений высоты водной толщи в диапазоне глубин от  $\approx 0$  до 80 м. В данном случае температура этих водных масс меняется в пределах от  $\approx 12$  до  $0^\circ\text{C}$ , что свидетельствует о значительной тепловой изменчивости в этом слое. Отмечается также вариация солёности в пределах от  $\approx 31$  до 33 PSU, что указывает на умеренную солёность поверхностных вод. Данный класс характеризуется водами с высоким содержанием ОРОВ в диапазоне 3–4.5 QSU, низким уровнем растворенного метана – до 100 нМ/л (см. рис. 9а). Также заметно, что эти воды имеют повышенное содержание хлорофилла-а – 2–4.5 мг/м<sup>3</sup> (рис. 9г), указывающее на присутствие терригенных веществ в источниках воды.

Второй класс, обозначенный фиолетовым цветом, соответствует холодным водам с температурой от  $\approx -0.8$  до  $\approx 0.4^\circ\text{C}$ . Они имеют высокую солёность от  $\approx 32.8$  до 34 PSU и в основном находятся в придонном слое мелководных станций на глубинах до 100 м. Характеризуется высоким содержанием растворенного метана 200–400 нМ/л, несколько меньшими, чем в поверхностных водных массах, значениями ОРОВ 1.5–2.8 QSU (см. рис. 9а) и низким содержанием хл-а 0.5 мг/м<sup>3</sup> (см. рис. 9г). Также стоит отметить наличие обратной зависимости между солёностью и ОРОВ, что может говорить также о терригенном происхождении ОРОВ.

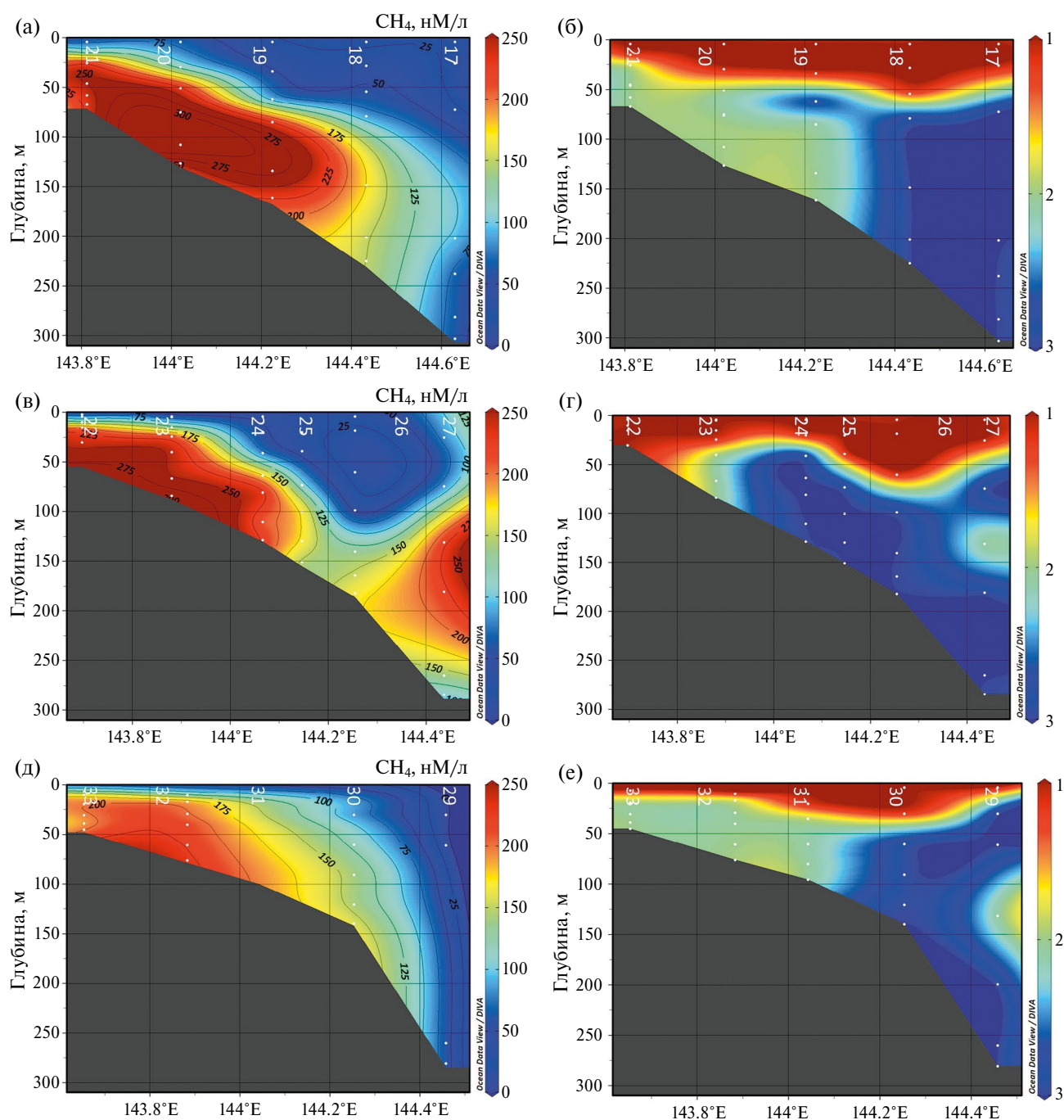
Третий класс (синий цвет) – водные массы, немного теплее по сравнению с водами второго класса, с температурой от  $\approx -0.8$  до  $1.7^\circ\text{C}$ . Они менее солёные относительно водных масс второго класса (минимум солёности  $\approx 33$ –33.5 PSU отмечен в диапазоне плотностей от 26.5 до 26.8 кг/м<sup>3</sup>). Эти водные массы находятся преи-

мущественно ниже пикноклина глубоководных станций (от 100 м и глубже) и характеризуются низким содержанием хлорофилла-а –  $< 0.1$  мг/м<sup>3</sup> (см. рис. 9г), что свидетельствует об отсутствии солнечного освещения и указывает на принадлежность водных масс к глубоководным слоям. Положительная корреляция между содержанием ОРОВ и солёностью (рис. 9в) может быть связана с активными динамическими процессами.

Таким образом, анализ  $\sigma$ ,  $S$ -диаграммы и дополнительный анализ биооптических данных позволяют сделать вывод об идентификации различных типов водных масс и их характерных особенностей на участке акватории (рис. 9д–ж), а также указывает на наличие различных источников органических веществ.

В результате совместного анализа газогеохимических, гидрологических и биооптических данных установлено, что поля повышенных концентраций метана содержатся в холодных водах второго типа (рис. 10). Это обусловлено тем, что метан имеет высокую растворимость в условиях низкой температуры [20]. На шельфе растворенный метан формирует поля повышенных концентраций как вблизи придонного источника, так и под нижней границей сезонного пикноклина. В слое увеличения температуры происходит снижение растворимости метана в воде и, таким образом, формирование полей повышенных концентраций растворенного метана ограничивается нижней границей сезонного пикноклина. Далее растворенный метан переносится течением, что характерно для разных районов Мирового океана [22, 23].

Растворимость метана в воде повышается при понижении температуры [20]. В работе [18] представлены результаты моделирования раствори-



**Рис. 10.** Распределение растворенного  $\text{CH}_4$  в воде (на северном разрезе (I) (а), на центральном разрезе (II) (в), на южном разрезе (III) (д)) и распределение водных масс, выделенных с учетом анализа биооптических и гидрологических параметров (на северном разрезе (I) (б), на центральном разрезе (II) (г), на южном разрезе (III) (е)).

мости метана в зависимости от давления и температуры в их сравнении с экспериментальными данными. Согласно этим результатам при давлении до 50 бар растворимость метана зависит главным образом от температуры, а при повышении давления от 100 до 2000 бар растворимость метана будет зависеть и от температуры, и от давления.

В рассматриваемых районах исследования проводились на глубинах до 400 м, что соответствует давлению порядка 38 бар, поэтому здесь основной фактор растворимости метана – это температура и соленость. В работе [45] приведены коэффициенты растворимости метана в зависимости от температуры и солености.

Из приведенных в вышеуказанных работах данных видно, что коэффициент растворимости метана меняется значительно при ощутимом изменении термохалинных характеристик воды, например, в слое скачка, либо в струе теплого течения, проходящего в слое холодной воды, например в проливе Брансфилд [23]. Однако в нашей статье области с термохалинными характеристиками вод второго и третьего типов обладают сопоставимым потенциалом к растворению метана. Так, для значений солёности 32 и 34 PSU коэффициент растворимости метана при понижении температуры с 0 до  $-2^{\circ}\text{C}$  увеличивается на 0.00275 (с 0.04555 до 0.04830) и 0.0027 (с 0.04489 до 0.04759) соответственно. Такие значения коэффициента растворимости близки к его расчетному максимуму  $-0.04902$  для температуры  $-2^{\circ}\text{C}$  и солёности 32 PSU [45]. Таким образом, выделяющийся на шельфе из придонных источников метан растворяется в холодных шельфовых водах второго типа, практически не распространяясь в мористую часть рассматриваемой акватории.

Воды третьего типа также обладают схожими термохалинными характеристиками, благоприятными для высокой растворимости метана. Однако, согласно результатам биооптических измерений, воды третьего класса принадлежат к основной ветви Восточно-Сахалинского течения, которая проходит над склоном, тогда как холодные воды второго класса с повышенными концентрациями ОРОВ — это шельфовая ветвь Восточно-Сахалинского течения, проходящая в районе мелководного шельфа, где расположены основные придонные источники выделения метана.

Таким образом, показано, что проведение комплексных исследований формирования и распределения полей повышенных концентраций метана с применением методов газогеохимии, гидрологии и оптики позволяют определить происхождение водных масс, содержащих растворенный метан.

## ВЫВОДЫ

В районе мелководного нефтегазоносного северо-восточного шельфа о. Сахалин впервые проведен совместный анализ вертикальных профилей распределения растворенных метана, сероводорода, гелия, водорода и биооптических параметров. Также для данного района представ-

лены газогеохимические данные по растворенному сероводороду.

Нефтегазовые залежи, аномальные содержания метана и гелия, повышенные концентрации сероводорода в воде контролируются сетью пересекающихся тектонических разломов в северо-восточной части о. Сахалин и прилегающего шельфа.

По результатам проведенных оптических измерений видно, что район исследований включает в себя воды с различными биооптическими характеристиками, определяемыми влиянием речного стока, нефтегазоносного шельфа, активным развитием фитопланктона и динамикой вод. Пространственное и вертикальное распределения как биооптических, так и газогеохимических параметров во многом определяются общей циркуляцией вод западной части Охотского моря и влиянием мезомасштабных циркуляций и прибрежного апвеллинга.

Проведенный комплексный анализ газогеохимических, гидрологических и биооптических данных дал возможность более четкого выделения водных масс с повышенным содержанием растворенных газов, что также позволяет получить больше информации о биогеохимических процессах трансформации и переноса соединений с углеродом в водной толще.

Таким образом, необходимо уделить особое внимание в дальнейших исследованиях идентификации и оценке влияния различных источников органических веществ на содержание метана в рассматриваемой области. Это позволит более точно понять процессы, происходящие в водной среде, и их взаимосвязь с оптическими параметрами, а также разработать более точные методики анализа и интерпретации полученных данных.

**Благодарности.** Авторы благодарят начальника экспедиции Лобанова В.Б., научный состав и экипаж 68-го рейса научно-исследовательского судна “Академик Опарин” за организацию и сопровождение работ. Отдельная благодарность Минобрнауки России за содействие в решении вопросов организации экспедиции.

**Финансирование работы.** Работы, связанные с проведением экспедиций, разработкой методики обработки данных и использованием гидрооптического оборудования, были осуществлены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственных заданий



Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук № 124042300003-5 и № 124022100080-0. Газогеохимические и гидрооптические исследования, а также аналитическая работа выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10038.

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Б.В., Рукавишников Д.Д., Прокудин В.Г. и др. Природа замкнутых депрессий на восточном склоне о. Сахалин // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. 21. С. 86–97.
2. Власова Г.А., Глебова С.Ю. Сезонная изменчивость поверхностных течений Охотского моря под влиянием синоптических процессов // Известия ТИНРО. 2008. Т. 154. С. 259–269.
3. Воейкова В.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 2007. 186 с.
4. Кулинич Р.Г., Обжиров А.И. О структуре и современной активности зоны сочленения шельфа Сунда и котловины Южно-Китайского моря // Тихоокеанская геология. 1985. № 3. С. 102–106.
5. Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г. Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, гидрохимическим и геологическим данным) // Литология и полезные ископаемые. 1996. № 6. С. 625–647.
6. Липинская Н.А., Салюк П.А. Исследование проявлений и характеристик внутренних волн по данным спутниковых изображений со сканера цвета моря GOCI-COMS-1 // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 3(37). С. 16–22.
7. Обжиров А.И., Ильичев В.И., Кулинич Р.Г. Аномалия природных газов в придонной воде Южно-Китайского моря // Доклады Академии наук СССР. Геохимия. 1985. Т. 281. № 5. С. 1206–1209.
8. Панкина Р.Г., Мехтиева В.Л. Происхождение  $H_2S$  и  $CO_2$  в углеводородных скоплениях // Геология нефти и газа. 1981. № 12. С. 44–48.
9. Салюк П.А., Буланов В.А., Корсков И.В. и др. Возможность дистанционного обнаружения повышенных концентраций метана в морской воде с использованием методов оптической спектроскопии на подводных телеуправляемых аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2(12). С. 43–51.
10. Соколова Е.Б., Мишукова Г.И., Салюк П.А., Шакиров Р.Б. Совместный анализ вертикальных профилей гидрооптических параметров и концентрации растворенного метана в воде в Беринговом море и в восточном секторе Арктики // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 1(35). С. 60–69.
11. Файман П.А., Пранц С.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю. Моделирование распространения тихоокеанских вод в Охотском море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 3. С. 372–384.
12. Фершалов М.Ю., Степанов Д.В., Штрайхерт Е.А. и др. Влияние термохалинной стратификации на развитие прибрежного апвеллинга на северо-восточном шельфе Сахалина // Метеорология и гидрология. 2022. № 9. С. 20–31.
13. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.
14. Шевченко Г.В., Частиков В.Н., Цхай Ж.Р. и др. Океанологические исследования СахНИРО в начале XXI столетия // Труды СахНИРО. Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях. 2012. Т. 13. С. 3–13.
15. Baranov B.V., Rukavishnikova D.D., Prokudin V.G. et al. The origin of enclosed depressions on the eastern Sakhalin slope // Vestn. Kamchat. Reg. Assots. Ser. Nauki Zemle. 2013. V. 1. P. 86–97.
16. Cai C., Worden R.H., Bottrell S.H. et al. Thermochemical sulphate reduction and the generation of hydrogen sulphide and thiols (mercaptans) in Triassic carbonate reservoirs from the Sichuan Basin, China // Chemical Geology. 2003. V. 202. № 1–2. P. 39–57.
17. Dickey T.D., Simpson J.J. The influence of optical water type on the diurnal response of the upper ocean // Tellus B. 1983. V. 35. № 2. P. 142–154.
18. Duan Z., Mao S. 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. 2006. 70(13): 3369–3386.
19. Etiope G., Italiano F., Fuda L. et al. Deep submarine gas vents in the Aeolian offshore // Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans & Atmosphere. 2000. V. 25(1). P. 25–28.
20. Grabowska J., Blazquez S., Sanz E. et al. Solubility of methane in water: Some useful results for hydrate nucleation // The Journal of Physical Chemistry B. 2022. V. 126. Iss. 42. P. 8553–8570.
21. Heggland R. Gas seepage is an indicator of deeper prospective reservoirs. A study based on exploration 3D seismic data // Marine and petroleum geology. 1998. V. 15. P. 1–9.
22. Kholmogorov A., Ponomarev V., Syrбу N., Shkorba S. Dissolved methane transport in the Tatar Strait and the deepest basin of the Japan (East) Sea from its possible sources // Water. 2023. V. 15. P. 821. DOI: 10.3390/w15040821.
23. Kholmogorov A., Syrбу N., Shakirov R. 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*. 2022. V. 14. P. 3311. DOI: 10.3390/w14203311.
24. *Lammers S., Suess E., Mansurov M.N., Anikiev V.V.* Variations of atmospheric methane supply from the Sea of Okhotsk induced by seasonal ice cover // *Global biogeochemical cycle*. 1995. V. 9. № 3. P. 351–358.
  25. *Lewis M.R.* Phytoplankton and thermal structure in the tropical ocean // *Oceanologica Acta*, Special issue. 1987. P. 91–95.
  26. *Lipinskaya N.A., Salyuk P.A., Golik I.A.* Variations and depth of formation of submesoscale eddy structures in satellite ocean color data in the southwestern region of the Peter the Great Bay // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. № 23. P. 5600. DOI: 10.3390/rs15235600.
  27. *Machel H.G., Krouse H.R., Sassen R.* Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction // *Applied Geochemistry*. 1995. V. 10. № 4. P. 373–389.
  28. *Mobley C.D.* Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters. Academic Press. New York, 1994. 577 p.
  29. *Morel A., Maritorena S.* Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. V. 106. № C4. P. 7163–7180.
  30. *Mougin P., Lamoureux-Var V., Bariteau A., Huc A.Y.* Thermodynamic of thermochemical sulphate reduction // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2007. V. 58. № 3–4. P. 413–427.
  31. *Ohshima K.I., Simizu D.* Particle tracking experiments on a model of the Okhotsk Sea: toward oil spill simulation // *Journal of Oceanography*. 2008. V. 64. P. 103–114.
  32. *Ohshima K.I., Wakatsuchi M., Fukamachi Y., Mizuta G.* Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № C11. P. 3195. DOI: 10.1029/2001JC001005.
  33. *Oubelkheir K., Claustre H., Sciandra A., Babin M.* Bio-optical and biogeochemical properties of different trophic regimes in oceanic waters // *Limnology and oceanography*. 2005. V. 50. № 6. P. 1795–1809.
  34. *Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V., Leonov A.V.* Reconstruction of the annual variations of thermohaline characteristics and water circulation on the north-eastern Sakhalin shelf // *Water Resources*. 2014. V. 41. P. 385–395.
  35. *Prants S.V., Andreev A.G., Uleysky M.V., Budyan-sky M.V.* Mesoscale circulation along the Sakhalin Island eastern coast // *Ocean Dynamics*. 2017. V. 67. № 3. P. 345–356.
  36. *Salyuk P.A., Mosharov S.A., Frey D.I. et al.* Physical and biological features of the waters in the outer Patagonian shelf and the Malvinas Current // *Water*. 2022. V. 14. № 23. P. 3879. DOI: 10.3390/w14233879.
  37. *Shakirov R.B., Syrbu N.S., Obzhirov A.I.* Distribution of helium and hydrogen in sediments and water on the Sakhalin slope // *Lithology and mineral resources*. 2016. V. 51. P. 61–73.
  38. *Smith R.C., Baker K.S.* The bio-optical state of ocean waters and remote sensing // *Limnology and Oceanography*. 1978. V. 23. № 2. P. 247–259.
  39. *Snyder G.T., Sano Y., Takahata N. et al.* Magmatic fluids play a role in the development of active gas chimneys and massive gas hydrates in the Japan Sea // *Chemical Geology*. 2020. V. 535. P. 119462. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2020.119462.
  40. *SooHoo J.B., Kiefer D.A.* Vertical distribution of phaeopigments—I. A simple grazing and photooxidative scheme for small particles // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1982. V. 29. № 12. P. 1539–1551.
  41. *Talley L.D.* An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific // *Deep-Sea Res. Part A*. 1991. V. 38 (suppl.). P. 171–190.
  42. *Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I.* Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2013. V. 86. P. 25–33.
  43. *Vogt P.R., Gardner J., Crane K.* The Norwegian Barents Svalbard (NBS) continental margin: Introducing a natural laboratory of mass wasting, hydrates, and ascent of sediment, pore water, and methane // *Geo-Marine Letters*. 1999. V. 19. № 1. P. 2–21.
  44. *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.
  45. *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.

## GAS-GEOCHEMICAL, HYDROLOGICAL, AND BIOOPTICAL CHARACTERISTICS OF THE SHALLOW NORTHEASTERN SHELF OF SAKHALIN ISLAND

**N. A. Lipinskaya\*, N. S. Syrbu, P. A. Salyuk, A. O. Kholmogorov**

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

*\*e-mail: lipinskaya.na@poi.dvo.ru*

The paper discusses the theoretical and practical aspects of the relationship between bio-optical parameters (chlorophyll-a concentration, colored dissolved organic matter, turbidity) and the distribution of dissolved gases (methane, helium, hydrogen, hydrogen sulfide) in seawater. Comprehensive studies of the gas geochemical, hydrological, and bio-optical parameters of the shallow northeastern shelf of Sakhalin Island (Sea of Okhotsk) are based on data obtained during cruise No. 68 of the RV "Akademik Oparin" in August 2023. It has been shown that during the warm period of the year, the study area includes waters with various bio-optical characteristics, influenced by river runoff, hydrocarbon-rich shelf areas, active phytoplankton development, and water dynamics. Bio-optical measurements allow for distinguishing the main branch of the East-Sakhalin Current and its shelf branch, in which increased concentrations of dissolved gases are present, emanating from benthic sources on the eastern shelf of Sakhalin Island.

**Keywords:** dissolved methane, helium, hydrogen sulfide, hydrogen, Sakhalin Island shelf, Sea of Okhotsk, bio-optical parameters, chlorophyll-a, turbidity, colored dissolved organic matter