

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ТИХООКЕАНСКИЙ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. В.И. ИЛЬЧЕВА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



Холмогоров Андрей Олегович

**ПЕРЕНОС РАСТВОРЕННОГО МЕТАНА ТЕЧЕНИЯМИ В
НЕКОТОРЫХ РАЙОНАХ МИРОВОГО ОКЕАНА**

Специальность 1.6.17 «Океанология»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель
доктор геолого-минералогических наук, доцент
Шакиров Ренат Белалович

Владивосток – 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ	11
1.1. Изученность газогеохимических полей метана в окраинных морях западной части Тихого океана.....	12
1.2. Изученность газогеохимических полей метана в Японском море	13
1.2.1. Морские исследования российских ученых в Японском море	14
1.2.2. Морские исследования иностранных ученых в Японском море	19
1.3. Исследования Южно-Китайского моря.....	19
1.3.1. Исследования российских ученых	22
1.3.2. Исследования иностранных ученых	22
Вывод по Главе 1	24
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.....	26
2.1. Фактический материал и район работ	27
2.2. Методы исследования	29
2.2.1. Отбор проб	30
2.2.2. Анализ газа.....	32
ГЛАВА 3 ПЕРЕНОС РАСТВОРЕННОГО МЕТАНА В ТАТАРСКОМ ПРОЛИВЕ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ КОТЛОВИНЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ	34
3.1. Океанографические особенности района исследований	34
3.2. Перенос растворенного метана в приповерхностном слое Татарского пролива от его источников	37
3.3. Перенос растворенного метана в Татарском проливе под сезонным пикноклином	39
3.4. Распределение растворенного метана в мезомасштабном квазистационарном вихре и его перенос.	43
Выводы по главе 3	46
ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ГЕНЕЗИС И МИГРАЦИЮ МЕТАНА В ШЕЛЬФОВЫХ ВОДАХ ВОСТОЧНОГО ВЬЕТНАМА	48
4.1. Тектонические структуры района исследований	50
4.2. Гидродинамический режим Южно-Китайского моря в районе исследований	54
4.3. Исследование распределения метана в придонной осадке и в воде в районе исследований.....	56
4.4. Перенос метана под сезонным пикноклином системой течений ЮКМ. Влияние ТЦ НАКРИ	65

Выводы по главе 4	66
ГЛАВА 5. ПЕРЕНОС МЕТАНА ТЕЧЕНИЯМИ В ПРОЛИВЕ БРАНСФИЛД, ЮЖНЫЙ ОКЕАН	69
5.1. Гидрологический режим и основные геологические особенности района работ	70
5.2. Перенос метана системой течений пролива Брансфилд.....	70
Выводы по главе 5	76
ГЛАВА 6. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ МАКСИМУМОВ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА ПОД СЕЗОННЫМ ПИКНОКЛИНОМ В РИНГАХ ЮЖНОГО АТЛАНТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ	78
6.1. Источники метана в юго-западной части Атлантического океана.....	78
6.2. Океанографические особенности района исследований	80
6.3. Перенос метана под пикноклином течениями: сопоставление результатов газогеохимических, океанологических измерений и численного моделирования.	82
Вывод по главе 6.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	98

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Газогеохимические методы широко используются в исследованиях нефтегазоносного потенциала океана. Неравномерное распределение метана в океане обусловлено его локальными эндогенными, биогенными и антропогенными источниками. Очаги его высоких концентраций в морской воде являются косвенными признаками залежей углеводородов. Кроме того, при оценке поступления метана, как парникового газа, в атмосферу важны исследования источников метана и его переносов в океане.

В российских [68; 17] и зарубежных [76; 110; 128] исследованиях показано множество подводных очагов разгрузки углеводородных, главным образом метаноносных, флюидов вдоль склонов океанических котловин и шельфа. Крупные очаги метана и углеводородных флюидов расположены в Тихоокеанских и Атлантических нефтегазоносных районах [17; 215; 240; 75; 78; 149; 160].

Количество обнаруживаемых подводных участков эмиссии природных газов растет год от года [17; 51; 37], увеличивается разнообразие газопроявлений, появляются новые сведения об условиях залегания газовых гидратов и новые факты о связи газовых потоков и сейсмотектонической активности [68; 93; 113; 173; 241].

В северо-восточной части Тихого океана одними из наиболее детально исследованных являются газопроявления на континентальном склоне штата Орегон [151]. Известны и другие районы, например, только в северной части канала Санта-Барбара (штат Калифорния, США) на дне насчитывается более 1500 сосредоточенных выходов, из которых выделяются углеводородные газы и нефть. Всего в пределах подводной калифорнийской окраины насчитывается около 4000 оспинообразных структур (покмаков) на дне океана [256], которые образованы локальными потоками термогенного природного газа.

В Атлантическом океане подобных районов с локальными выходами природных газов обнаружено более 30, включая потоки абиогенного метана в гидротермальных системах зоны спрединга САХ [38]. Наиболее многочисленные выходы углеводородных газов термогенного (нефтегазового) генезиса в Атлантическом океане установлены в Мексиканском заливе; известны выходы природных газов вблизи Азорских островов, в заливе Кадиз (северо-западный склон Испании) [77] и в других районах. Подводные выходы природных газов, не связанные с гидротермальной деятельностью, распространены в пределах материковых окраин на шельфе и материковом склоне [17; 24; 88; 152; 231].

Участки с выходами природных газов, обнаруживаются в пределах мощных (свыше 2 км) осадочных толщ, содержащих различные скопления углеводородов: залежи нефти и газа, газогидраты, насыщенные метаном осадки. Необходимым условием для углеводородной дегазации таких участков является, как правило, наличие разрывных нарушений [135], дополнительными – складчатые дислокации и повышенная сейсмичность. Эти признаки также наблюдаются в районах склонов котловин и шельфа Дальневосточных морей, в том числе в Татарском проливе Японского моря [66; 68].

Распределение газогеохимических полей в слое осадка контролируется комплексом геологических и геофизических характеристик изучаемого района. При дальнейшем выделении в придонный слой воды и распространении в Мировом океане - это распределение формируется под влиянием системы течений. При изучении распределения газогеохимических полей важно учитывать совокупное влияние газогеохимических и океанографических факторов, на что также указывается в работах отечественных и зарубежных исследователей [62; 164].

Несмотря на знания источников метана и его распределения в морской воде в контексте геологических особенностей, мало изученными остаются механизмы, обуславливающие распределение и перенос метана течениями от его источников. Этот вопрос частично освещается в работах [42; 67; 202; 205] и подробно показан для бассейнов Центральной Арктики [253].

Рассматриваемый в работе механизм переноса метана выглядит следующим образом: метан выделяется из придонных источников и попадает в морскую воду в виде пузырьков свободного газа. Пока внутреннее давление пузырька уравновешено внешним давлением воды, пузырек движется к поверхности и может достичь атмосферы. Если пузырек схлопнется на каком-либо водном горизонте, то часть метана растворится в морской воде. Растворимость метана в воде зависит от ее температуры [103; 227]: при ее увеличении растворимость метана снижается [127]. В представленных ниже главах 4-6 показано, что растворенный метан формирует поля повышенных концентраций (а) вблизи придонного источника, при этом концентрация снижается по мере удаления от источника, (б) под нижней границей сезонного пикноклина. При движении к поверхности в пикноклине происходит скачек температуры, увеличение которой снижает растворимость метана в воде, таким образом, вертикальное распространение полей повышенных концентраций растворенного метана ограничивается нижней границей сезонного пикноклина. При этом под нижней границей сезонного пикноклина наблюдаются максимумы векторов скорости течений. Таким образом, растворенный метан переносится течениями под пикноклином.

Часто в экспедиционных исследованиях могут быть обнаружены поля повышенных концентраций метана вдали от источников и, на первый взгляд, никак с ними не связанными. Например, в главе 6 описано исследование происхождения локальных максимумов метана в юго-западной части Атлантического океана. Здесь, в районе Аргентинской котловины, на значительном удалении от берега, при общей глубине более 3000 м и отсутствии придонных источников в слое 70-150 м было обнаружено поле повышенных концентраций метана. Представленное комплексное исследование показало, что это поле метана было привнесено сюда от удаленного источника на шельфе. Механизм переноса метана схематически показан на рисунке 1.

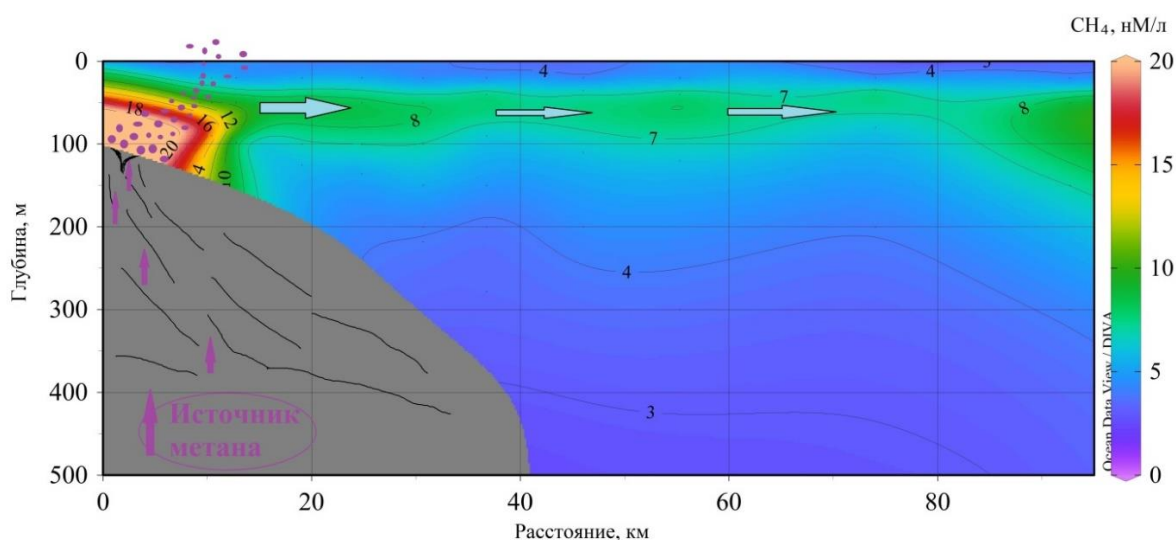


Рисунок 1 – Схема переноса растворенного метана течением (направление показано голубыми стрелками). Фиолетовые стрелки показывают вертикальную миграцию метана от источника через разломы (черные линии), фиолетовые точки – пузыри метана.

Газогеохимия создавалась как универсальная дисциплина, объединяющая геологию и геохимию с целью выявлять специфическими методами и интерпретировать проявления газифлюидодинамики газогеохимических полей и их эндогенных источников. Современные исследования расширяют совокупность дисциплин, входящих в газогеохимию. В последнее время газогеохимия тесно связана с микробиологией, рассматривающей микробиологические сообщества, жизненный цикл которых связан с выделением и/или поглощением метана.

В диссертационной работе исследуется связь газогеохимии с физической океанологией, поскольку метан распространяется в морской среде под влиянием разномасштабных гидродинамических процессов. Знания механизмов распределения и переноса метана актуальны как при выявлении косвенных признаков залежей

углеводородов, так и при решении задач эмиссии метана, как парникового газа, в атмосферу, а также проблем, связанных с охраной окружающей среды, что приобретает несомненную актуальность в рамках «климатической повестки».

Выполненное в диссертации исследование соответствует основным направлениям участия Российской Федерации в Десятилетии ООН, посвященном науке об океане в интересах устойчивого развития (2021-2030 гг.), задачам по реализации положений Морской доктрины Российской Федерации, а также стратегии развития морской деятельности РФ.

Объект исследования: Центральная котловина и Татарский пролив Японского моря, Вьетнамский шельф и континентальный склон Южно-Китайского моря, западная часть Южной Атлантики и пролив Брансфилд в Южном океане.

Предмет исследования: особенности пространственного распределения метана в районах исследования.

Цель: определение особенностей распределения метана в области струйных бароклинных течений, мезомасштабных вихрей и основных влияющих факторов.

Задачи исследования:

1. Определить особенности распределения метана и направление его переноса течениями от его источников в Татарском проливе в период экспедиционных измерений.
2. Показать океанографические факторы, обуславливающие особенности изменения концентрации метана с глубиной в Восточно-Корейском течении у склона поднятия Ямато и мезомасштабном антициклоническом вихре в прилегающей части Центральной котловины Японского моря на 134°в.д.
3. Определить влияние гидрометеорологических факторов на распределение и перенос метана течениями на Вьетнамском шельфе и склоне Южно-Китайского моря в период океанографических измерений.
4. Провести измерения концентраций растворенного метана в проливе Брансфилд, определить особенности его распределения и переноса течениями в период измерений.
5. Определить концентрации растворенного метана в рингах Южного Атлантического течения, выявить области повышенных концентраций и их вероятные источники на основе результатов гидрофизических измерений и моделирования.

Научная новизна полученных результатов. Благодаря комплексному анализу на стыке газогеохимии и океанологии автором впервые показан перенос метана от его придонных источников течениями под нижней границей сезонного пикноклина. Впервые сопоставлены данные экспедиционных газогеохимических, гидрофизических, океанографических измерений, а также результатов математического моделирования.

Показаны общие особенности распределения метана в области струйных бароклинических течений, мезомасштабных вихрей в различных, не связанных между собой, районах Мирового океана, что говорит о схожести основных влияющих факторов для всех акваторий, при этом некоторые факторы (глубина нижней границы пикноклина, снижение концентрации по мере удаленности от источника) могут различаться в зависимости от района.

Практическая значимость. Показаны особенности распределения метана в области струйных бароклинических течений, мезомасштабных вихрей и основные влияющие факторы. Повышенные концентрации метана переносятся под нижней границей сезонного пикноклина течениями от его источника, что позволяет без применения сложных методик определять области потенциальных залежей углеводородов. Растворенный в морской воде метан также может указывать на области концентрации микробиологических сообществ, в том числе являющихся кормовой базой промысловых биологических видов. Результаты также применимы для реализации научно-исследовательских программ в рамках «климатической повестки», а также для решения задач рационального природопользования.

Проведенные исследования являются современными и актуальными в соответствии с национальным планом действий в Десятилетии ООН, посвященном изучению Мирового океана в интересах устойчивого развития (2021-2030) и Рабочей группы ВЕСТПАК по комплексному изучению газовых гидратов и потоков метана в Индо-Тихоокеанском регионе под руководством ТОИ ДВО РАН (CoSGas).

Апробация работы. По теме работы опубликовано 17 статей (в том числе 14 из списка рекомендованных ВАК), материалы диссертации были представлены на российских и международных конференциях, опубликовано 10 тезисов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, включающих обзор литературы и собственные исследования, заключение, а также список литературы. Работа изложена на 119 страницах, иллюстрирована 45 рисунками и содержит 2 таблицы. Список литературы включает 257 источников.

Положения, выносимые на защиту:

1. Растворенный в морской воде метан, поступающий из придонных источников, переносится течениями под нижней границей сезонного пикноклина.
2. В мезомасштабных вихрях растворенный метан концентрируется под нижней границей пикноклина на периферии вихрей.
3. Перенос растворенного метана в приповерхностном слое морской воды подтверждается результатами лагранжева анализа происхождения вод.

Личный вклад. Личный вклад автора состоит в выдвижении научной проблемы, в непосредственном участии в проведении морских и экспедиционных исследований, экспериментальном подтверждении и апробации результатов, в разработанной методике, подготовке публикаций и докладов по теме работы, в формулировке научных положений. Все положения и выводы, содержащиеся в диссертации и выносимые на защиту, разработаны соискателем лично, имеют научную новизну, практическую, экономическую и социальную значимость. Вся обработка и интерпретация данных выполнена лично автором.

С 2013 г. - участие в исследованиях лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН (зав. лаб., д.г.-м.н. Шакиров Р.Б.) по теме диссертации. За время работы по теме диссертационного исследования Холмогоров А.О. принял участие в ряде экспедиций, где непосредственно занимался сбором проб, их пробоподготовкой и анализом, а также дальнейшей интерпретацией в рамках своей темы исследований.

1. Участие в организации и проведении прибрежной экспедиции на северном шельфе Вьетнама, отбор газогеохимических проб в заливе Тонкин, Северный Вьетнам, 10-28 октября 2013 г.

2. Провел газогеохимические исследования воды гидрологических скважин и источников на островах, а также водной толщи и донных отложений Тонкинского залива: выполнена комплексная газогеохимическая съемка с отбором проб донных отложений и морской воды, а также приземной атмосферы, 19 апреля - 20 мая 2014 г.

3. В составе научного коллектива выполнил ежегодные газогеохимические исследования для детализации обнаруженных ранее особенностей распределения природных газов в гидрологических скважинах, колодцах, пещерных озерах и морской воде залива Тонкин. Район работ – северный Вьетнам, острова архипелага Катба. 4-13 октября 2015 г.

4. Провел газогеохимические исследования в III Российско-Вьетнамской комплексной геолого-геофизической экспедиции в заливе Тонкин Южно-Китайского моря. 03-16 апреля 2016 г.

5. Принял участие в отборе проб с последующей интерпретацией полученных данных в Третьем этапе газогеохимических исследований в районе глубинного рифта Красной реки в период 10-27 апреля 2017 г.

6. Холмогоровым А.О. проведены исследования по распределению и потоку природных газов в термальных и источниках северо-западного Вьетнама. Также были отобраны геологические образцы. Приблизительная протяженность маршрута составила

1800 км. Опробованы источники в северных провинциях Вьетнама: Хоабинь, Футхо, Шонла, Дьенбьен, Лайтяу, Йенбай. 10 марта – 1 апреля 2019 г.

7. Холмогоровым А.О. проведены береговые газогеохимические и гидрологические исследования в рамках взаимосвязанного по «Дорожной карте» проекта ДВО РАН – ВАНТ с целью проведения газогеохимических исследований подпочвенного газа и вод термальных источников на архипелаге Катба и в окрестностях г. Ханой. Работы являются частью программы морских научных исследований «Комплексные геолого-геофизические, газогеохимические и океанографические исследования в территориальных водах Вьетнама Южно-Китайского моря» на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (рейс № 88, 25 октября – 8 декабря 2019 г.). Руководитель д.г.-м.н. Шакиров Р.Б. (ТОИ ДВО РАН).

8. Организована экспедиция на Южно-Сахалинский грязевой вулкан с целью отбора свободных газов основных дегазирующих грифонов грязевого вулкана с последующим газохроматографическим анализом, интерпретацией и сопоставлением натуральных данных с результатами дистанционных наблюдений. 6–10 сентября 2021 г.

9. Провел газогеохимические исследования, включающие в себя отбор проб с последующим газохроматографическим анализом на борту судна и интерпретацией полученных данных в «Комплексной экспедиции ресурсных исследований криля и экосистемы Южного океана (Атлантический сектор Антарктики)» – 87 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Южный океан с 7 декабря 2021 г. по 5 апреля 2022 г. Руководитель д.ф.-м.н. Е.Г. Морозов (ИО РАН).

10. В качестве руководителя газогеохимических работ принял участие в рейсе НИС «Академик Опарин» на северо-восточном шельфе Сахалина и в районе западно-камчатского шельфа. Автором поставлена задача исследований, определены полигоны проботбора, проведен отбор проб и газохроматографический анализ на борту. 8 августа – 19 сентября 2023 г.

Благодарности.

Автор выражает благодарность и признательность своему научному руководителю д.г.-м.н. Ренату Белаловичу Шакирову и всему коллективу ТОИ ДВО РАН за отзывчивость, помощь и поддержку, оказанную на всех этапах работы. Автор благодарен к.ф.-м.н. Пономареву В.И. за консультации и огромную помощь, к.г.н. Власовой Г.А. за совместную работу, а также д.г.-м.н. Кулиничу Р.Г, к.ф.-м.н. Салюк П.А, к.г.-м.н. Сырбу Н.С. и к.ф.-м.н. Будянскому М.В. за совместную работу над статьями. Выражаю глубокую признательность оппонентам за объективные отзывы, а также членам океанологического семинара ТОИ ДВО РАН за ценные замечания.

ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

В исследованиях [17; 20; 37; 39; 50; 142166ж 167; 170; 193; 215, 186; 44; 69; 203] были освещены вопросы распределения, генезиса и других научных аспектов, связанных с потоками природных газов в Мировом океане и его континентальном обрамлении: низкотемпературными сипами, газогидротермами, потоками газов из угленосных толщ, грязевыми вулканами и особенно газогидратами (источники энергии в будущем).

Установлено, что распределение и формирование газо-гидротермальных систем может контролироваться зонами сквозных трансструктурных линеаментов [35], одним из наиболее крупных в Дальневосточном регионе исследования является Япономорский линеамент [40; 140]. Можно отметить некоторые работы, в которых обсуждаются взаимосвязь сеймотектонических процессов и изменчивость газовых потоков в местах их разгрузки в Дальневосточном регионе [2; 36, 63; 216].

Также необходимо отметить резко увеличивающийся рост знаний о влиянии потоков природных газов на распределение химических элементов в осадках, аутигенное минералообразование, формирование сообществ микроорганизмов и изменчивость концентраций парниковых газов [37].

Российскими и зарубежными исследователями обнаружены тысячи наземных и подводных очагов разгрузки углеводородных, главным образом метаноносных флюидов, вдоль континентальных окраин (рисунок 2). Основные очаги и проявления природных газов и углеводородных флюидов расположены в Тихоокеанском нефтегазоносном регионе [17; 215; 240].

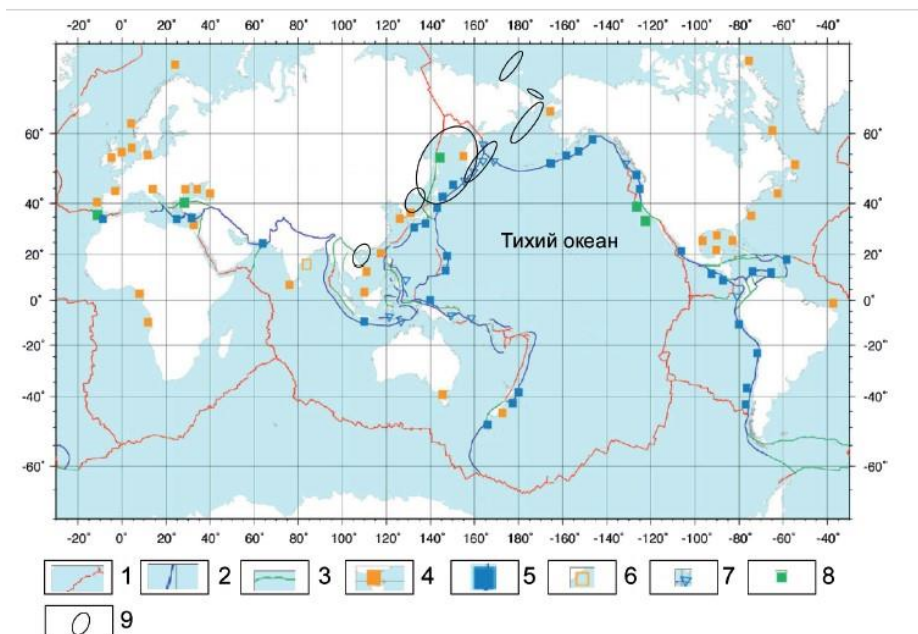


Рисунок 2 – Карта основных участков потоков метана и распределения газогидратов [215]

1 – границы литосферных плит и планетарные разломные зоны; 2 – активные континентальные окраины; 3 – трансформные литосферные границы; 4 – проявления подземных вод и углеводородного флюида; 5 – активные выходы природного газа; 6 – места палеовыходов метана около западной Индии; 7 – газопроявления, зафиксированные по бентосной фауне; 8 – участки наиболее интенсивных потоков метана, связанных с газогидратами; 9 – районы исследований лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН [68]

1.1. Изученность газогеохимических полей метана в окраинных морях западной части Тихого океана.

Газогеохимические исследования дают информацию о составе, генезисе, механизмах распространения природных газов и количественных параметрах их миграции на границах взаимодействия литосферы, гидросферы и атмосферы окраинных морей.

Наблюдения за изменениями концентраций метана в воде призваны повысить достоверность расчета вклада метана, поступающего с поверхности воды в атмосферу в течение года. Эти данные используются при выяснении причин роста концентраций метана в атмосфере, который может оказать воздействие на процесс глобального изменения (потепления) климата. Исследования баланса метана и углекислого газа также должны учитывать их эмиссию из нефтегазовых и угольных месторождений и локальных, но активных систем газовой разгрузки (грязевые вулканы, геотермальные системы, водоминеральные источники и другие).

Исследованиям в области геохимических методов поисков нефти и газа посвящены работы: [50, 59, 3, 28, 53, 60; 61]. Изучения газогеохимических полей метана непосредственно связано с практической целью: поисками нефтегазовых месторождений [96].

Изучение потоков метана способствует решению проблемы происхождения углеводородных полезных ископаемых, которая все теснее становится связанной с вопросами нефтегазоносности кристаллических пород и глубинного флюида. В активных зонах перехода континент – океан на относительно небольших площадях могут быть представлены разнообразные типы дегазации литосферы и скоплений углеводородов: потоки метана, грязевые вулканы, газогидраты, углегазоносные месторождения, нефтегазовые залежи, геотермальные и гидротермальные системы [201].

Аномальные газогеохимические поля Японского и Южно-Китайского морей имеют в целом углеводородную специализацию, а их характеристики позволяют диагностировать источники природного газа. Особенности связи качественных и количественных характеристик газовых потоков с флуктуациями сеймотектонических

процессов важны для оценки безопасности населенных территорий. В этом аспекте особую важность имеют превентивные измерения (мониторинг) концентраций ряда природных взрывоопасных (метан, угарный газ, сероводород) и токсичных газов (углекислый газ и др.). Закономерности геологического контроля газогидратоносности и распределения аномальных газогеохимических полей в Азиатско-Тихоокеанском регионе раскрывают взаимосвязь углеводородных скоплений различного генезиса [201].

Источниками метана в атмосфере в доиндустриальную эпоху предполагались: болота (70%), животные, термиты, сгорание биомассы, океаны, пресные воды и газогидраты, которые давали 255 млн. тонн CH_4 в год [90; 196]. Основным стоком рассматривалось окисление метана в атмосфере за счет реакции с ОН-радикалами, причем вдобавок учитывалось поглощение CH_4 землей - 30 млн. тонн в год [131]. Такой баланс источников и стоков дает значение концентрации метана в атмосфере на уровне 0.75 ppm в северном полушарии в течение 1600-1800 годов, что согласуется с результатами измерений в кернах льда [213]. Кроме этого, в эти годы начинает проявляться и расти вклад антропогенных источников (таких, как рисовые поля, домашние животные, земледелие, сгорание биомассы, добыча природных газов и углей), которые обусловили рост концентрации метана в атмосфере на 0,3% в год в 1650-1750 гг., 0,39 % в год в 1750-1850 гг., 0,86 % в год в 1850-1930 гг. и 0,9 % в год с 1931 г. по настоящее время.

Исходя из глобального роста концентрации метана в атмосфере (приблизительно со средней скоростью 1% в год) в работе [94] рассчитано, что глобальная эмиссия метана в атмосферу составляет 540 млн. тонн в год, из них около 98% вносят наземные источники. Вклады океанов и континентальных шельфов остаются неопределенными и составляют от 0.005% до 3% глобальной продукции [99]. Недавняя оценка показала, что глобальная морская эмиссия метана лежит в диапазоне от 11 до 18 млн. тонн/год, причем 75% этого потока приходится на шельфовые районы [76].

Некоторые исследователи [109; 147] считают, что основные региональные источники поступления метана в атмосферу также связаны с хозяйственной деятельностью человека (в миллионах тонн в год) а именно: рисовые поля в Китае и Корее и скотоводство в степных районах Китая и Монголии. Тем не менее, существующие оценки могут быть значительно исправлены после оценки реальных объемов потоков метана в атмосферу из природных источников Мирового океана.

1.2. Изученность газогеохимических полей метана в Японском море

Зона перехода «континент-океан» представляет собой зону потенциального источника, связанного с углеводородными залежами. Изучение региона началось с

континентальной его части, далее основное внимание сфокусировалось на акватории Японского моря, комплексные исследования зоны перехода континент-океан проводились мало, оставив данный аспект не до конца раскрытым.

Несмотря на хорошую изученность япономорского региона [52; 43; 5; 6; 55 и другие] целый ряд важнейших научных вопросов, имеющих непосредственное практическое значение, до сих пор остается слабоизученным или недостаточно разработанным. В частности, к ним относятся условия формирования, распределения нормальных и аномальных газогеохимических полей в зоне перехода «континент-океан», оценка наиболее важных геологических факторов, способствующих этим процессам, а также связь потоков метана с сейсмостектонической активностью и геодинамикой региона. Развитая на стыке континента и океана сеть глубинных разломов способствует проникновению глубинных газов к поверхности. Можно полагать, что геологические факторы и сейсмостектоническая активность в таких областях играют важную роль в формировании газогеохимических полей и потоков метана.

Зоны перехода от океанической к континентальной коре, особенно такие сложные как северо-западная внутренняя часть Тихоокеанского пояса, являются ключевыми, с точки зрения понимания фундаментальных геологических процессов, формирующих структуру земной коры различных типов, а также выяснение закономерностей локализации полезных ископаемых в разновозрастных структурных элементах земной коры [18].

1.2.1. Морские исследования российских ученых в Японском море

Пространственное распределение потоков метана на границе вода-атмосфера имеет большое значение в формировании климатических условий Земли. Метан, несмотря на незначительное содержание в атмосфере, играет исключительно важную роль в формировании климатических условий всей нашей планеты. Он активно участвует в фотохимических реакциях в стратосфере и способствует разрушению озонового слоя, кроме этого является одним из парниковых газов и оказывает определенное влияние на процесс глобального изменения климата. Кроме того, растворенный в воде метан используется в качестве индикатора для прогноза и обнаружения месторождений углеводородов, трассирования зон разломов, прогноза сейсмической активности и экологической оценки окружающей среды [26; 54].

Изучение пространственного и временного распределения метана в водной среде необходимо для определения источников и механизмов, влияющих на его содержание. Часто метан, растворенный в воде, используется в качестве индикатора для обнаружения

углеводородов (нефтяных, угольных, газовых месторождений и залежей газогидратов) [37]. В местах диффузного выхода метана протекают интенсивные биогеохимические процессы, приводящие к образованию биологических матов, развитию бентосного и планктонного сообществ, в состав которых входят симбиотрофные и гетеротрофные животные [37].

Японское море изучено сравнительно хорошо. В истории его исследований выделяется четыре периода.

Первый период был наиболее длительным (1866-1928 гг.) и в основном характеризовался накоплением общих сведений о рельефе дна. В 1870 г. на Дальнем Востоке была организована гидрографическая служба. В 1924 г. японскими гидрографами составлена первая батиметрическая карта Японского моря, на которой показаны возвышенности и впадины.

Второй период (1929-1956 гг.) начался планомерными промерами глубин. Изучением рельефа дна занимались советские и японские океанографические экспедиции на больших площадях. С 1949 г. Институт океанологии АН СССР на НИС «Витязь» проводит замеры глубин дна глубоководным эхолотом с непрерывной записью. К концу 1956 г. по систематизированным данным о глубинах Япономорской впадины были составлены батиметрические и геоморфологические карты, которые стали основой для новых исследований.

Третий период (1957-1978 гг.) интенсивно накапливается фактический материал по морфологии, геологии, геохимии и глубинному строению Японского моря. Научные экспедиции работают по международным программам, предусматривающим полный комплекс геолого-геофизических работ. Исследования проводятся институтами и академическими подразделениями АН СССР, МГУ, Тихоокеанской экспедицией ВНИИморгео и научно-производственным институтом Южморгео, океанографическими организациями Японии, США и других стран.

В 1957 г. Токийским университетом под руководством С.Уеда и К.Хораи [234] начаты измерения величины теплового потока в северо-западной части Тихого океана. В Японском море первые измерения этого параметра выполнялись специалистами Морской геофизической обсерватории в г. Майдзуру и Сейсмическим научно-исследовательским институтом в г. Токио [252].

С 1964 г. японскими геофизиками исследуются юго-восточная и центральная области Японского моря методами ГСЗ и непрерывного сейсмического профилирования (НСП) [132]. Одновременно в 1969 году в Японском море проводят съемку магнитного поля сотрудники СахКНИИ ДВНЦ АН СССР [31].

В 1967 г. в северной части моря в районе острова Хоккайдо сейсмические работы выполнялись геофизиками Хоккайдского университета. Параллельно продолжались гравиметрические исследования на Японских островах.

В 1967 г. в 42-ом рейсе на НИС «Витязь» геолого-геофизические работы выполнял ИО АН СССР [13]. Тогда же начаты широкомасштабные планомерные исследования магнитного поля всех крупных морфоструктур дна Японского моря.

В 1970 г. в 47-рейсе НИС «Витязь» ИО АН СССР и его тихоокеанским отделением при участии японских геофизиков были выполнены комплексные геолого-геофизические исследования, а также отбор проб коренных пород и донных осадков с помощью драг и трубок. В пределах возвышенности Ямато установлена кора субконтинентального типа, на окраинах Японских островов выделены активные зоны разломов [30; 223].

Одновременно (1968-1972 гг.) гидрографической службой и нефтяными компаниями проводились детальные исследования на нефть шельфа и островного склона по всей длине островной дуги, на возвышенностях Ямато, Садо и Окусири, на банках Оки и Мусаси, в Цусимском прогибе. Работы выполнялись по проектам DSDP, JPOD, ODP, DELP [197; 199; 228; 137].

Большой вклад в детальное изучение дна Японского моря внесли геологи и геофизики ТОИ ДВО АН СССР, выполнившие более 30 рейсов на НИС «Первенец» и «Каллисто». Исследования на НИС «Первенец» были начаты в 1969 г. методом отраженных волн (МОВ) и были направлены на изучение структуры осадочного чехла Прикорейских возвышенностей. Геологические исследования проводились с применением геофизических методов [29; 7].

К началу 1973 г. в Япономорском регионе и прилегающей части Тихого океана было проведено свыше 15 советских и японских экспедиций. В 1973 г. буровым судном «Гломар Челленджер» в Центральной котловине Японского моря были пробурены скважины 299-302, которые вскрыли позднекайнозойские отложения [136].

В 1974-1976 гг. сотрудниками ТОИ на НИС «Каллисто» исследовалась северная часть Японского моря и возвышенность Ямато. Одновременно на НИС «Морской геофизик», «Агат» и «Атна» комплексно исследовалась материковая ступень Приморья [4].

К концу третьего периода вышли из печати первые работы, наиболее полно обобщающие геолого-геофизические исследования в Японском море. Это монографии Н.П. Васильковского с соавторами «Основные черты геологического строения дна Японского моря» (1978 г.), Ю.В. Шевалдина «Аномальное магнитное поле Японского

моря» (1978 г.), В.М. Ковылина «Строение земной коры в области Японского моря» (1979 г.).

Четвертый (современный) период, начало которого относится к концу 1979-х гг., характеризуется детальным изучением главных морфоструктур дна и фундаментальностью исследований. Сотрудниками ТОИ ДВО РАН и ИО РАН за 1978-1987 гг. выполнены экспедиции на НИС «Первенец», «Каллисто», «Дмитрий Менделеев», «Борей», «Профессор Гагаринский», «Профессор Богоров». Геологами ТОИ ДВО РАН составлена и издана в 1985 г. геологическая карта дна Японского моря масштаба 1:2 500 000 (редакторы И.И. Берсенев, Л.И. Красный) [12].

Японскими специалистами по результатам экспедиций 1978-1983 гг. опубликована серия геолого-геофизических карт восточной и центральной частей Японского моря масштаба 1:1 000 000. В 1989 г. пробурены скважины по проекту ODP – Legs, 127, 128.

В 1991-1996 гг. вышло из печати несколько монографий, посвященных геологии дна Японского моря и его обрамлению. Е.П. Леликовым (1991 г.) обобщен материал по метаморфическому комплексу пород дна Японского и других окраинных морей Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода.

В 1996 г. в Токио опубликована коллективная российско-японская монография «Geology and Geophysics of the Japan Sea», в которой в форме статей обобщены геолого-геофизические материалы, полученные за последние 60 лет, работа содержит большой объем фактических данных в табличной форме и множество иллюстраций.

Системное изучение геологического строения дна Японского моря начато в 70-х гг. прошлого века, в основном усилиями сотрудников ТОИ ДВНЦ АН СССР (в настоящее время ТОИ ДВО РАН). Основным методом было геологическое драгирование (не менее 1000 станций), сопровождаемое сейсмическим профилированием.

С 2012 гв северной и западной частях Японского моря проводятся исследования ТОИ ДВО РАН по поискам газогидратов, палеоокеанологические и геофизические исследования. Основной объем экспедиционных работ приходится на комплексные геолого-геофизические и океанологические исследования. Ряд результатов геолого-геофизических исследований ТОИ ДВО РАН последних лет опубликованы в третьей книге четырехтомного издания «Дальневосточные моря России» (2007 г.).

Первые региональные комплексные геофизические исследования на всей акватории Татарского пролива были выполнены в 1978 году также силами ТЭ НПО «Союзморгео» под руководством Г.Ф. Балабко. В результате были выделены Северо- Татарский, Чеховский, Монеронский и Тернейский кайнозойские прогибы, а также установлено более 20 локальных антиклинальных структур.

В 1987 году в двух районах западного присахалинского шельфа были проведены газогеохимические исследования с целью обнаружения месторождений нефти и газа. Исследования проводились Тихоокеанским океанологическим институтом ДВО РАН под руководством Обжирова А.И. В северной части Татарского пролива изучен район Александровской структуры, в средней части – территории Гавриловской, Изыльметьевской и Надеждинской площадей. На основании отсутствия аномалии углеводородов был сделан отрицательный прогноз нефтегазоносности этой площади. Были сделаны выводы о насыщении углеводородами разреза осадочных отложений, в связи, с чем отмечено обширное равномерное поле метана в придонной воде с концентрациями, несколько превышающими фон, но без залежей в недрах, аномально возмущающих это поле. Скважина, пробуренная на Александровской площади до глубины 3248 м, подтвердила прогноз об отсутствии залежи углеводородов. Предполагается наличие в проливе промышленных запасов углеводородов [47; 12; 1; 41].

Экспедиционные исследования ТОИ ДВО РАН в международных проектах КОМЕХ (1998–2004 гг.), CHAOS (2003–2006 гг.), SSGH (2007–2014 гг.) позволили собрать уникальный материал о газогеохимических характеристиках газогидратоносных отложений и потоках метана в Охотском и Японском морях [123; 48].

В период 2017–2021 гг. Отдел геологии и геофизики ТОИ ДВО РАН выполняет фундаментальную научную экспедиционную программу «Комплексные геолого-геофизические, газогеохимические и океанографические исследования в Японском море и Татарском проливе». Материал, полученный за 2017–2018 гг. (54-й рейс НИС «Академик Опарин» и 81-й рейс НИС «Академик М.А. Лаврентьев», руководитель экспедиций к.г.-м.н. М.В. Валитов, заведующий лабораторией гравиметрии ТОИ ДВО РАН), позволил впервые выявить закономерности распределения аномальных газогеохимических полей углеводородных газов, гелия, водорода, азота и углекислого газа на шельфе, склоне и глубоководной части северного района Центральной котловины, южной части Татарского трога, а также на юго-западном континентальном склоне Японского моря (район залива Посьет и Гамовского каньона). Сотрудниками лаборатории газогеохимии закартированы самые глубоководные в Японском море АГП нефтегазового генезиса (до 3700 м) и высокоинтенсивные аномалии метана в южном окончании Татарского трога, которые позволяют прогнозировать новые скопления газогидратов [68].

Полученные в этих экспедициях данные дают возможность ставить вопрос о поиске новых газогидратных скоплений в районе исследований в интервале глубин 600–2000 метров: аномальные концентрации метана в осадках достигали 11% в свободной фазе (метод headspace).

Проведенные в этих экспедициях микробиологические исследования вод позволили впервые установить уникальные самые глубоководные сообщества метано- и нефтеокисляющих микроорганизмов в Японском море [191].

В целом, полученные результаты комплексных экспедиций доказывают существование ранее неизвестных, активизированных по газовой эмиссии и развитию необычных микробиологических сообществ глубоководных зон в северной и южной частях Японского моря. Наличие этих зон, возможно, указывает на газогеохимический отклик тектоносферы района исследований на современную сейсмотектоническую и вулкано-магматическую активизацию региона дальневосточных морей.

1.2.2. Морские исследования иностранных ученых в Японском море

В 2007 году японские ученые Akihiro Hiruta, R. Matsumoto, G. T. Snyder, Hitoshi Tomaru [71; 72] провели исследования потоков метана на отроге Умитака и возвышенности Уэцу, восточной окраине Японского моря. Места метанового плюма характеризуются небольшими насыпями, активным выходом газа, наличием газовых гидратов на морском дне и связанными с ними химическими аномалиями. Было извлечено более 30 кернов (длиной 4 ~ 12 м). Некоторые керны показывают характерные профили в отношении концентрации инертного хлорида (Cl⁻) в поровой воде. Керны, извлеченные из мест газовых сипов, часто содержат газовые гидраты. В этих кернах были исследованы миграции не только газов, но и жидкой фазы. Выявлен ряд особенностей, свидетельствующих о высоком потоке метана, таких как газовые шлейфы, поднимающиеся через толщу воды [71].

В 2016 году был выполнен анализ с высоким разрешением совокупности кристаллов арагонита в карбонатных конкрециях, образованных метаном, который выявил эволюцию геохимии поровых вод, связанную с увеличением потока метана на участке выхода газа, трог Умитака в Японском море.

В районе Цусимской котловины глубоководное бурение показало наличие метана в придонном осадке [121]. Акустическими методами обнаружены покмарки и газонасыщенный слой донного осадка толщиной 90м [156]. В исследовании [143] приведено описание признаков наличия газовых гидратов в донных осадках. В работе [136] определён вклад метанпродуцирующих бактерий в дебит метана в данной области.

1.3. Исследования Южно-Китайского моря

Южно-Китайское море является одним из крупнейших окраинных морей Мирового океана и относится к бассейну Тихого океана. Основные морфоструктурные элементы дна

Южно-Китайского моря представлены подводной окраинной Азиатского континента, глубоководной впадиной и Тайвань-Филиппино-Калимантанской горной системой, разделяющей Южно-Китайское и Филиппинское моря.

Практическая значимость научных исследований Южно-Китайского моря значительно возросла в последние десятилетия в связи с активным освоением его биологических, минеральных и энергетических ресурсов. Несмотря на свою значимость, данная акватория имеет достаточно короткую историю океанографических исследований – ее по-настоящему масштабное изучение началось лишь в первой половине прошлого столетия.

До 1955 г. почти все научные исследования были проведены учеными развитых стран, в основном датскими, французскими, японскими, английскими и американскими.

Первый, предварительный этап (до 1920 г.). Первые отрывочные сведения о Южно-Китайском море были получены в XIX в. в период проведения здесь общих океанологических работ. Первые, в основном гидрографические, наблюдения в различных районах моря были проведены в 1874 г. экспедицией под руководством шотландского натуралиста Чарлза Уайвилла Томсона на британском корвете «Челленджер», в 1875 г. группой ученых под руководством океанографа Георга Бальтазара Неймайера на немецком корвете «Газелле» и в 1899 г. экспедицией под руководством профессора зоологии Карла Фридриха Хуна на немецком пароходе «Вальдивия» [14].

Второй этап: первые гидрологические станции и съемки (1920–1944 гг.). Большой вклад в изучение гидрологических условий моря внесли французские ученые. Первый обобщающий материал о гидрометеорологических наблюдениях в Южно-Китайском море вплоть до 1935 г. был получен Нидерландским метеорологическим институтом в 1936 г. Это были данные и сведения о прибрежных зонах и мелководной части моря. И только летом 1941 г. была проведена первая крупномасштабная съемка вод моря японскими океанологами [14].

Третий этап: исследования по национальным и межправительственным программам (1945–1964 гг.).

С 1950 г. по 1961 г. в Тонкинском заливе проводились гидрометеорологические работы в рамках программы китайско-вьетнамского сотрудничества (China – Vietnam Investigations Cooperation, CVIC). В 1960-е гг. стартовала советско-вьетнамская программа по исследованию океанологических условий экономической зоны моря. Параллельно с ними в 1959–1961 гг. проводилась и американская национальная программа по изучению волновых процессов в морях Юго-Восточной Азии.

Американскими учеными были подробно исследованы Таиландский залив и район, прилегающий к побережью Южного Вьетнама [14].

Четвертый этап: стационарные и экспедиционные исследования (1965–1974гг.). После 1965 г. начался этап интенсивных комплексных стационарных и экспедиционных исследований Южно-Китайского моря. Особенно широкий размах они получили в комплексной программе «Совместное изучение Курошио и прилегающих районов» (Japan Study Kuroshio, JSK) в 1965–1975 гг. Большинство работ этого периода посвящено комплексному изучению отдельных районов моря. В это же время появились и новые атласы, в которых были приведены более детальные, по сравнению с предыдущими, схемы поверхностных течений и наиболее полный набор распределения основных параметров морской среды Южно-Китайского моря [14].

Пятый этап: комплексные исследования морской среды (1975–1990гг.). Новый этап исследований Южно-Китайского моря начался после окончания войны во Вьетнаме (1975г.), когда были развернуты комплексные работы по изучению гидрологического режима моря. Китайскими учеными были проведены исследования в северной части моря.

Научные морские учреждения разных стран осуществили целый ряд экспедиций в акватории моря. В этом числе были и российские экспедиции в 1970–1990-х гг. на научно-исследовательских судах Дальневосточного отделения АН СССР (РАН) (Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева, Институт биологии моря им. А. В. Жирмунского (в настоящее время ННЦМБ ДВО РАН), Тихоокеанский институт биоорганической химии), Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института Росгидромета и Тихоокеанского института рыбного хозяйства Росрыболовства.

В 1985 году Обжиров А.И., Ильичев В.И., Кулинич Р.Г. исследовали аномалии природных газов в придонной воде Южно-Китайского моря [49]. По результатам изучения природных газов придонной воды прослежена на 180 миль тектонически активная зона, проходящая вдоль границы шельфа и склона дна Южно-Китайского моря. Прослеженную зону необходимо учитывать при поисковых работах на нефть и газ как фактор, способствующий генерации углеводородов и их миграции. Природные газы придонной воды и некоторые гидрохимические параметры можно использовать в качестве индикаторов при геологическом картировании [49].

Шестой этап: современные исследования (1990 г. – по настоящее время). В настоящее время изучением Южно-Китайского моря активно занимаются не только все страны данного бассейна, но и страны Азиатско-Тихоокеанского региона и Европы. Тем

не менее, по сравнению с другими морями Мирового океана Южно-Китайское море на сегодняшний день остается недостаточно изучено [14].

1.3.1. Исследования российских ученых

Комплексные геолого-геофизические экспедиции в Южно-Китайском море были организованы ТОИ ДВОРАН, например, НИС «Александр Несмеянов» (1983 г.), «Морской геофизик» (1989 г.), «Профессор Богоров» (1995 г.) и др. В этих геолого-геофизических экспедициях закладывалась основа изучения геологического строения Привьетнамской части Южно-Китайского моря, которая способствовала пониманию тектонического строения дна и открытию залежей углеводородов. Начало газогеохимических исследований тесно связано с нефтепоисковыми работами СССР во Вьетнаме. Группа из лаборатории газогеохимии под руководством А.И. Обжирова занималась изучением распределения природных газов (метана, тяжелых углеводородов и других газов) в придонном слое воды на шельфе и склоне для газогеохимического прогноза залежей углеводородов. В экспедициях были обнаружены аномальные поля метана и УВГ. На перспективных структурах с участием треста «Дальморгеофизразведка» (г. Южно-Сахалинск) были выполнены геофизические и буровые работы, в результате которых были открыты месторождения нефти и газа на шельфе южной части Вьетнамского моря (Меконгская впадина и другие структуры).

Исследованиями лаборатории газогеохимии в 80-х гг. в западной части Южно-Китайского моря обнаружена резкая изменчивость концентраций метана в придонной воде. Аномальные концентрации метана обнаружены в северной и южной частях Привьетнамского шельфа.

1.3.2. Исследования иностранных ученых

В Китае исследования в области газовых гидратов начались сравнительно поздно. Только в середине 80-х годов XX века появились переводы и сообщения об изучении и результатах исследования газовых гидратов за рубежом [107].

Начиная с 1995 года, при поддержке Китайской ассоциации по исследованиям и освоению океанских минеральных ресурсов и тогда существовавшего Министерства геологии и минеральных ресурсов КНР, Китаем были произведены исследования по двум проблемам: «Исследование перспектив и методов ведения работ по разведке газовых гидратов в западной части Тихого океана» и «Геофизические исследования газовых гидратов в территориальных водах Китая» [251].

В 1998 году Государственным планом развития высокотехнологичных исследований (План 863) был также запущен исследовательский проект «Основополагающие технологии для работ по разведыванию газовых гидратов на морском дне». На демонстрационном участке в северной части Южно-Китайского моря экспериментально было произведено предварительное изучение технологии обработки BSR (bottom simulating reflectors) и методов исследования геохимии и геотермик. Начиная с октября 1999 года, Центр исследований морской геологии города Гуанчжоу (GMGS) первый начал съемку месторождений газовых гидратов на северном шельфе Южно-Китайского моря. С этого момента исследования газовых гидратов в Китае вступили в этап быстрого развития. В настоящее время в лабораториях газовых гидратов в Китае ведутся исследования по многочисленным направлениям, включая моделирование, изучение физико-химических свойств, оценку ресурсов и т.д. Проводится изучение потенциала ресурсов газовых гидратов на акватории страны [107].

В Южно-Китайском море газогидраты вскрыты бурением в северной части акватории [248] в осадках осадочного бассейна дельты реки Жемчужная. Китай в настоящее время выходит в мировые лидеры по исследованию газогидратных ресурсов. На сегодняшний день Геологическая служба Министерства земель и ресурсов КНР провела 40 экспедиций по исследованию газогидратов в Южно-Китайском море [242]. Наиболее значительным достижением является обнаружение многочисленных слоев многоярусной гидратоносной толщи. Газогидраты подтверждены в интервале 170–230 м ниже поверхности дна [248].

Зоны исследования газовых гидратов в Китае сосредоточены, в основном, в северной части Южно-Китайского моря, в меньшей степени на других его участках, а также на акватории Восточно-Китайского моря [92]. В рамках изучения газогидратов Китайский центр геологических исследований в 2007 г. начал отбирать пробы газогидратов на участке Шэньху. Участок Шэньху стал 12-й в мире зоной, где пробы газогидратов были отобраны в глубоких скважинах. На этом участке на глубине 1200 м в трех точках были отобраны пробы газогидратов в глинисто-карбонатных осадках морского дна [107]. Как показывают результаты работ китайских ученых, основным источником газа в газогидратах Южно-Китайского моря является глубинный термогенный метан с небольшой примесью биогенного метана [107].

Кроме того, исследовались изотопные и геохимические характеристики поровой воды, распределение сульфидов в донных осадках и т.д. Все полученные материалы подтверждают высокую вероятность существования скоплений газогидратов на всей

акватории северной части Южно-Китайского моря площадью не менее 22 000 тыс. км² [251, 249].

В 2012 г. продолжились исследования района Шенху [248] как одного из самых перспективных районов для разведки газовых гидратов в северной части Южно-Китайского моря. Предполагается, что прогиб Байюнь и Южное поднятие являются потенциальными районами разведки газовых гидратов.

Вывод по Главе 1

Несмотря на незначительное содержание в атмосфере, метан играет исключительно важную роль в формировании климатических условий всей нашей планеты. Он активно участвует в фотохимических реакциях в стратосфере и способствует разрушению озонового слоя, кроме этого является одним из парниковых газов. Кроме того, растворенный в воде метан используется в качестве индикатора для прогноза и обнаружения месторождений углеводородов, трассирования зон разломов, прогноза сейсмической активности и экологической оценки окружающей среды

В качестве источников метана выделяют воздействие природных подводных выходов метана, имеет значение в транзитной зоне, также сброс загрязненных веществ. Изменение концентраций метана также связано с активизацией сейсмотектонических процессов, сопровождающихся увеличением содержания этого газа в водах и атмосфере.

В общем случае концентрации метана в толще вод монотонно уменьшаются при движении от мелководных станций в более глубоководные районы; данное распределение нарушается на станциях, где обнаружено резкое повышение содержания метана, обусловленное наличием подводных источников. В поверхностном слое морской воды содержания метана значительно меньше, чем в придонном, а зоны повышенных концентраций несколько смещены относительно придонных аномалий.

Вероятно, метан из донных отложений поступает в воды придонного слоя и переносится за счет турбулентного перемешивания, выносится в вышележащие водные массы, что в некоторых случаях приводит к образованию органических пленок на поверхности морской воды.

Поскольку максимальные значения концентраций метана в придонном слое коррелируют с аномалиями метана в кернах донных отложений, существует вероятность того, что метан из донных осадков в шельфовой зоне привносится в вышележащие воды. Повышенные концентрации метана в поверхностном водном слое, на промежуточных глубинах, в придонном слое обусловлены поступлением газов в водную толщу из донных осадков. Выделение метана в атмосферу происходит пульсациями, и сопровождается

изменением концентрации метана в морской воде, как в пространстве, так и во времени, в зависимости от сейсмостектонического режима и гидрометеорологической обстановки акватории.

Активность газообмена на границе «дно-вода-атмосфера», обусловлена активным выходом CH_4 из донных отложений и контролируется комплексом геологических и гидрологических факторов.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методики газогеохимических исследований закреплены в Паспорте лаборатории газогеохимии ПС 1.051-21, утвержденном Свидетельством Росстандарта №58 от 21.12.2021, в патентах и публикациях [50; 235]. Основой методологии являются экспедиционно-аналитические исследования в Японском, Южно-Китайском морях и Южном океане с теоретическим анализом полученных материалов в ТОИ ДВО РАН, а также анализ и систематизация газогеохимических, гидрологических и океанографических данных, полученных предшественниками в данном районе. Основными методами исследования являются:

1. Газогеохимический. Метод является сочетанием оригинальных методических приемов натуральных, лабораторных и теоретических исследований. В основе газогеохимического метода коллектива ТОИ ДВО РАН лежит технология представительного отбора газовых проб из различных сред, газохроматографический анализ и применение комплекса критериев анализа фонового и аномального газогеохимических полей.

2. Геоструктурный. Анализ геологических факторов, влияющих на распределение газогеохимических полей. Особенно важным является сопоставление выявленных и прогнозируемых газогидратных скоплений с глубинными геологическими структурами (трещиноватый переходный фундамент, глубинные зоны проницаемости, линаменты, вулканоматматические очаги, пояса сейсмичности и повышенного теплового потока и др.). Автор владеет достаточным оригинальным фактическим материалом и базами литературных данных для проведения такого анализа. Реализация метода выполняется в геоинформационных системах ArcGIS, RockWorks и др.).

3. STD-зондирование и пробоотбор колонок воды для измерения газа. Изучение температуры, солености и газового состава колонок воды важно для понимания характера и масштаба поступления метана из донных отложений в воду. Эти данные используются как индикаторы для поиска нефтегазовых залежей и газогидратов и дают информацию для изучения вклада газовых потоков на состояние окружающей среды.

Измерения температуры и солености морской воды на ходу судна выполнялись с помощью термосолинографа Seabird SBE-45 в проточной системе, в которую вода закачивалась с глубины 5м. Все измерения были калиброваны на заборные STD измерения, чтобы учесть влияние судна на проточную систему и откалибровать измерения термосолинографа.

4. Лагранжев анализ был использован для того, чтобы определить происхождение вод на океанографическом разрезе в южном секторе Атлантического океана и связать

потенциальные источники метана с результатами натуральных измерений. Кроме этого, был проведен анализ возможных траекторий переноса рассматриваемых частиц воды. Лагранжев анализ выполнен к.ф.-м.н. М.Е. Будянским для совместной статьи.

Первый тип Лагранжева анализа заключался в том, что в районе ограниченного координатами от 36° ю.ш до 44° ю.ш. и от 41° з.д. до 49° з.д. в заданную дату засеивалось 1 000 000 точек после чего рассчитывались их обратные траектории в течение года. При этом были заданы отрезки, ограничивающие различные нефтегазоносные бассейны или пересекающие стрежни основных течений. Каждая анализируемая точка, пересекая такой отрезок, получала соответствующий флаг. Таким образом, возможно построение карт в районе проведения океанографического разреза только тех точек, которые пересекли какой-либо один рассматриваемый отрезок.

Во втором типе Лагранжева анализа синтетические точки засеивались в малой окрестности 0.01° вокруг рассматриваемой географической точки, которые были двух видов: (1) положение судовой станции; (2) положение скопления точек, полученных из первого типа Лагранжева анализа. Далее рассчитывались обратные траектории синтетических точек в течении года. Расчет имел смысл до тех пор, пока изначальное плотное скопление засеянных синтетических точек не распадалось на хаотические местоположения данных точек, распределенные в районах размером более 5° . Такое разъединение синтетических точек связано с присутствием различного рода неустойчивостей в районе исследований, в которых происходит расхождение водных масс. Это, например, вихри, апвеллинги, зоны конвергенции, гиперболические точки.

2.1. Фактический материал и район работ

В данной работе используются данные (таблица 1) газогеохимических съемок и STD измерений, выполненных в морских экспедициях в рамках государственных и международных проектов ТОИ ДВО РАН на НИС «Академик Опарин», рейс 54 (OP54), на НИС «Академик М.А. Лаврентьев», рейсы 85 (LV85), 88 (LV88), НИС «Академик Мстислав Келдыш», рейс 87 (AMK87).

В рейсах 54 НИС «Академик Опарин» и 87 НИС «Академик Мстислав Келдыш» по принятой методике отбирались пробы воды на содержание растворенного метана и ряда его газообразных гомологов (этана, пропана, бутана), в приповерхностном слое моря из проточной системы, а во всех слоях моря из батометров NISKIN, закрываемых в процессе подъема 24х позиционной Розетты («Rosset») с остановками на горизонтах, выбранных при STD зондировании от приповерхностного пограничного слоя моря до придонного. В

рейсе 85 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» пробы отбирались только из батометров Розетты.

Таблица 1. Материалы исследования

Рейс	Район работ	Период	Пробы воды		Пробы осадка	Аналитик
			Проточная система	Батометры		
ОР54	Татарский пролив, Японское море	октябрь – ноябрь 2017	407	251		Лифанский Е.В., к.г.-м.н. Яцук А.В.
LV85	Татарский пролив, Японское море	май 2019		123		к.г.-м.н. Яцук А.В.
LV88	Южно-Китайское море	ноябрь 2019		183	485	Легкодимов А.А., Швалов Д.А., Лифанский Е.В.
АМК87	Атлантический океан, Южный океан, прол. Брансфилд, море Уэдделла	декабрь 2021 – апрель 2022	369	712		Холмогоров А.О

Полученные данные позволяют определить пространственное распределение растворенного в морской воде метана и ряда его газообразных гомологов (этана, пропана, бутана), связь распределения с неоднородностью полей температуры, солености, плотности и характерными для конкретного сезона течениями.

Карта-схема расположения районов работ показана на рисунке 3. Работы были проведены на акваториях северной части Японского моря и привьетнамской части Южно-Китайского моря. Для изучения других районов Японского и Южно-Китайского морей и сравнения с оригинальными данными были дополнительно привлечены материалы исследований лаборатории газогеохимии, полученные при исследованиях полей метана в Японском и Охотском морях в период 1989 – 2012 гг. Также проведены работы в проливах Брансфилд и Антарктика, выполнена сеть CTD-станций в море Уэдделла, а также на трансатлантическом разрезе в широтном диапазоне 40° с.ш. – 56° ю.ш.

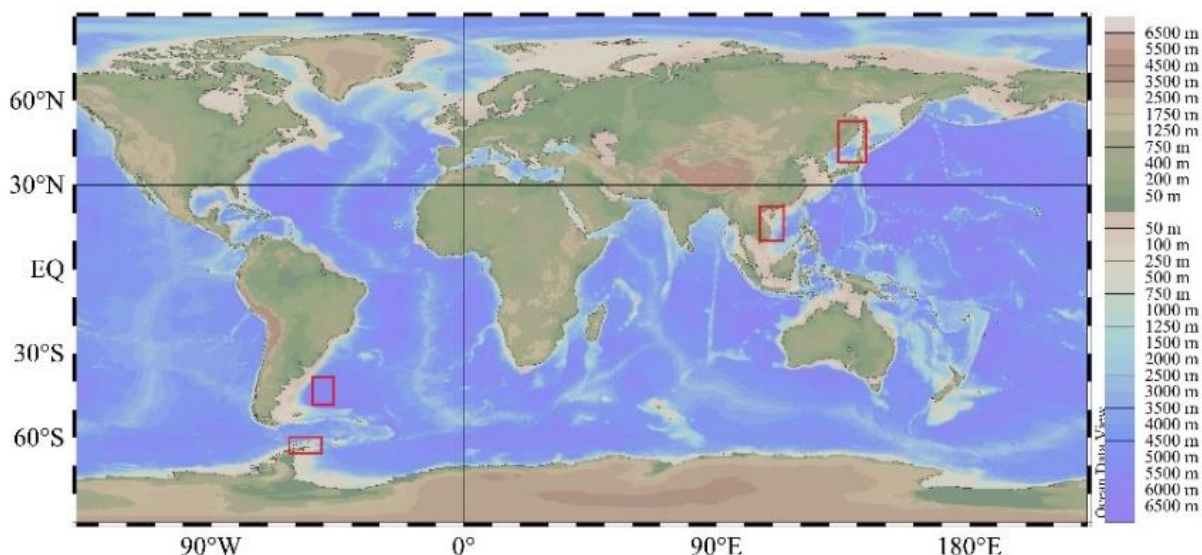


Рисунок 3 – Карта-схема фактического материала и районы работ (красные прямоугольники)

Выбор районов работ обусловлен их различием с точки зрения углеводородного потенциала, а также различных гидрометеорологических особенностей. Японское и Южно-Китайское моря находятся в разных широтных поясах и обладают высоким оцененным углеводородным потенциалом. Район Аргентинской котловины в Атлантическом океане и пролив Брансфилд в Южном океане не имеют признаков нефтегазоносности и также расположены в различных широтных поясах, в работе они рассматриваются как фоновые районы. Таким образом, универсальность предлагаемого механизма переноса растворенного метана показана на примере не связанных между собой районах Мирового океана по данным экспедиционных исследований, что позволяет применять данный подход для любых других акваторий Мирового океана.

2.2. Методы исследования

Для изучения полей концентраций метана в Японском и Южно-Китайском морях, а также в рассматриваемых районах Атлантического и Южного океанов была применена оригинальная методика газогеохимических исследований на море [50]. Выбор метода обусловлен качеством и быстротой измерений, а также необходимостью использования единых с предшественниками методических приемов для корректного сопоставления оригинальных газогеохимических данных с результатами прежних исследований. Данные сопоставлялись с результатами геолого-геофизических и океанографических наблюдений, выполненных под руководством к.ф.-м.н. Салюка П.А., к.г.н. Лобанова В.Б., к.г.-м.н. Валитова М.Г, д.ф.-м.н. Морозова Е.Г. Используемая методика морских газогеохимических исследований состоит из следующих основных операций: отбор проб

воды, извлечение газа из воды, качественный и количественный анализ газовых проб, компьютерная обработка данных (статистический анализ и визуализация фактического материала).

2.2.1. Отбор проб

Японское море

Исследование проводилось на акватории южной части Татарского пролива Японского моря. Были использованы материалы экспедиций: НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 62 (LV-62, июнь 2013 г.), НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 70 (LV-70, июнь 2015 г.), НИС «Академик Опарин» № 54 (ОР-54, сентябрь-октябрь 2017 г.), НИС «Академик Опарин» № 55 (ОР-55, октябрь 2018 г.), НИС «Академик М.А. Лаврентьев» №85 (LV-85, май 2019 г.).

Основные работы были выполнены в южной части Татарского пролива, здесь кроме проб воды с поверхностных горизонтов и из водной толщи 2012—2018 гг. отбирались керны донных отложений. В северной части Татарского пролива, в которой расположен Северо-Татарский осадочный бассейн, были взяты только пробы воды с поверхности моря осенью 2017 и 2018 гг. (НИС «Академик Опарин» № 54 и НИС «Академик Опарин» № 55). В результате этих экспедиций удалось покрыть район исследований относительно равномерной сетью наблюдений (метод площадной съемки), что является важным условием для интерпретации газогеохимических полей метана в воде.

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

На станциях отбор проб морской воды производился оборудованием Rosette с 12 поливинилхлоридными батометрами системы Нискина объемом 10 л. Rosette комбинирована с многопараметрическим STD-зондом. Воду отбирали в стеклянные ёмкости (склянки) 68 мл, которые герметично закрывались. Затем в них для создания газовой фазы напускали 12 мл особо чистого гелия. Пробы встряхивали на перемешивающем устройстве LS-110, в результате чего в системе устанавливалось равновесие между жидкой и газовой фазами. После перемешивания газовая фаза из склянки отбиралась шприцем для последующего анализа на хроматографе.

Южно-Китайское море

В последнее десятилетие Южно-Китайское море и территория Вьетнама начали активно исследоваться методами газогеохимии [73; 232; 207; 217; 218; 219; 220; 159].

Среди них ряд работ были посвящены распределению метана в морской воде [159; 232] и эмиссии метана на границе раздела вода–атмосфера [207].

Газогеохимические исследования в 88-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» были сосредоточены в трех районах западной части Южно-Китайского моря: осадочный бассейн Намконсон – юго-западная часть Южно-Китайского моря, осадочный бассейн Фухань – центральный вьетнамский шельф и склон, а также район осадочного бассейна Красной реки.

Для отбора проб воды на борту использовалась 6-позиционная розетка (США) в сочетании с зондом CTD. Зондирующий комплекс был оснащен кассетой с батометрами NISKIN (6 батометров). Отбор проб воды проводился на разных горизонтах с учетом вертикального распределения температуры, солености и других гидрологических параметров, выявленных при выполнении CTD зондирования.

В ходе исследования были изучены горизонты, характеризующиеся значительными градиентами океанографических параметров, таких как температура, соленость, мутность и т.д., для дальнейшей детализации распределения концентраций метана в толще воды.

Отбор проб проводился на шести горизонтах; стандартными были 0 (поверхностный), 20, 50, 200 и 600 метров. Для газохроматографического анализа воды использовался метод равновесных концентраций “head space”. Для более точного и детального анализа концентраций метана и количества его гомологов (этан, пропан, бутан) в морской воде также был проведен отбор проб для получения газовой фазы методом вакуумной дегазации.

Отбор донных осадков проводился с помощью гидростатического пробоотборника диаметром 138 мм и длиной 575 см. Внутри него закладывались двухсекционные (распиленные вдоль на две части и плотно зафиксированные) пластиковые трубы меньшего диаметра (125 мм) для быстрого извлечения осадков из пробоотборника. После его поднятия на борт судна, пластиковая труба с осадком переносилась в лабораторию, где колонка разрезалась на две части для дальнейшей обработки по стандартной схеме – фотографирование, описание осадка и отбор на различные виды анализов.

Осадок отбирался шприцами объемом 10 мл в склянки 68 мл, заполненные насыщенным раствором NaCl с добавлением консерванта (0.5 мл хлоргексидина биглюконата 0.05%). При измерениях метана в качестве газовой фазы применялся гелий, который напускался в склянки с помощью газового мешка «Tedlar Bag Dual Valve» (USA) с двумя клапанами. Через один клапан мешка, снабженный иглой, производился напуск гелия во время вытягивания 12 мл водного раствора шприцем через другой клапан. Пробы

интенсивно встряхивались не менее 4-х часов на перемешивающем устройстве LS 110 (Россия), затем газ вводился в хроматограф.

Атлантический и Южный океаны

Отбор проб воды в рейсе АМК87 производился двумя способами: насосом из носового кингстона (уровень забора воды 4 м от поверхности моря) на ходу судна временной дискретностью от 2 до 6 часов, а также на станциях батометрами на отдельных горизонтах от 2 до 500м с учетом вертикального распределения температуры, солености и других выявленных в ходе STD-зондирования гидрологических параметров.

При пробоотборе фиксировались время отбора и навигационная привязка к маршруту движения судна. Данные измерений интегрировались непосредственно в массив цифровых гидрологических данных в ходе наблюдений. Для определения температуры и солености морской воды в проточной системе использовался проточный термосалинограф SBE 21 SEACAT.

Концентрация метана в пробах из проточной системы также определялась методом «HeadSpace» [235]. Для анализа содержания метана во всех образцах воды использовался метод равновесных концентраций «HeadSpace». Вода отбиралась в предварительно простерилизованные медицинские стеклянные флаконы объемом 68 мл, которые герметично закрывались стерильными резиновыми пробками без доступа атмосферного воздуха. Для удаления излишков воды применялись иглы от медицинского шприца.

2.2.2. Анализ газа

Одним из наиболее перспективных и широко используемых методов для количественного и качественного анализа состава углеводородных газов в наше время является метод газовой хроматографии [153]. Для хроматографического анализа газового состава использовался хроматограф «КристалЛюкс-4000М», снабженный пламенно-ионизационным детектором, двумя детекторами по теплопроводности и двумя металлическими набивными колонками (сорбенты HayeSep D и NaX). Газ-носитель – гелий. С учетом ошибок пробоотбора максимальная погрешность измерений составляет не более 10%.

Для анализа содержания метана во всех пробах воды использовался метод равновесных концентраций «HeadSpace» [235]. Расчет концентраций метана, растворенного в морской воде, производился по методике [250] в модификации [245] с использованием расчетных констант растворимости метана. Вода из батометров отбиралась методом «тройного перелива» в предварительно простерилизованные медицинские стеклянные бутылки объемом 68 мл, которые герметично закрывались стерильными резиновыми пробками без доступа в бутылки атмосферного воздуха. При

измерениях метана, тяжелых углеводородов, углекислого газа и азота в качестве газовой фазы применялся гелий,. Пробы интенсивно встряхивались не менее 4-х часов на перемешивающем устройстве LS 110 (Россия), затем газ вводился в хроматограф.

Для расчетов и систематизации полученных в рейсе данных применялись электронные таблицы MicrosoftExcel. Для оперативной визуализации и интерпретации, получаемые после анализа на хроматографе газогеохимические данные, вводились в геоинформационные приложения (ArcGIS 10.4.1, OceanDataView 5.2.1). Данные использовались также для лагранжева анализа.

ГЛАВА 3 ПЕРЕНОС РАСТВОРЕННОГО МЕТАНА В ТАТАРСКОМ ПРОЛИВЕ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ КОТЛОВИНЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Выявлены особенности распределения метана, растворенного в морской воде на океанографических разрезах в южной части Татарского пролива. Другая рассматриваемая область расположена вдоль 134° Восточной долготы в Центральной котловине Японского моря, где теплое Восточно-корейское течение вблизи поднятия Ямато пересекает квазистационарный мезомасштабный антициклонический вихрь с центром на 41° Северной широты. Приведены данные газогеохимических и СТД измерений в двух экспедициях, а именно 54-го рейса НИС "Академик Опарин" 29 сентября – 29 октября 2017 года и 85-го рейса НИС "Академик М.А. Лаврентьев" в период с 22 мая по 19 июня 2019 года.

3.1. Океанографические особенности района исследований

Основные элементы (рисунок 4) крупномасштабной циркуляции воды в Японском море включают циклонический вихрь над Центральной котловиной и основные холодные и теплые течения, указанные в опубликованных схемах циркуляции [233; 57; 204; 254].

Направленное на юг-юго-запад холодное Приморское течение над континентальным склоном Центральной котловины переходит в холодное Северное Корейское течение южнее залива Петра Великого на широте 42°N. Направленное от Корейского пролива на север теплое Восточно-Корейское течение поворачивая на Восток огибает северный склон поднятия Ямато и разделяется на две ветви. Одна из ветвей направлена на восток в Сангарский пролив, а вторая продолжается на север в Татарский пролив вдоль восточного склона Центральной котловины и кромки шельфа Японских островов. Шельфовая и склоновая ветви теплого Цусимского течения [254] переносят субтропические воды от Корейского пролива вдоль шельфа Японских островов и склона поднятия Ямато соответственно в район моря, прилегающий к Сангарскому проливу, где они сопрягаются с Восточно - Корейским течением. Часть соленых субтропических вод отмеченных теплых течений выносятся в Тихий океан через Сангарский пролив, а остальная часть распространяется на север в Татарский пролив. В холодный сезон наиболее выражена шельфовая ветвь Цусимского течения, а склоновая значительно ослабевает и деградирует севернее 39°с.ш.

Холодное Приморское течение в зимний сезон отклоняется от западного берега на восток на траверзе залива Петра Великого и сопрягается с продолжением Восточно-Корейского течения в виде отдельной струи у склона поднятия Ямато, усиливая

горизонтальный градиент температуры, солености и плотности на субарктическом фронте Японского моря [254] (рисунок 4).

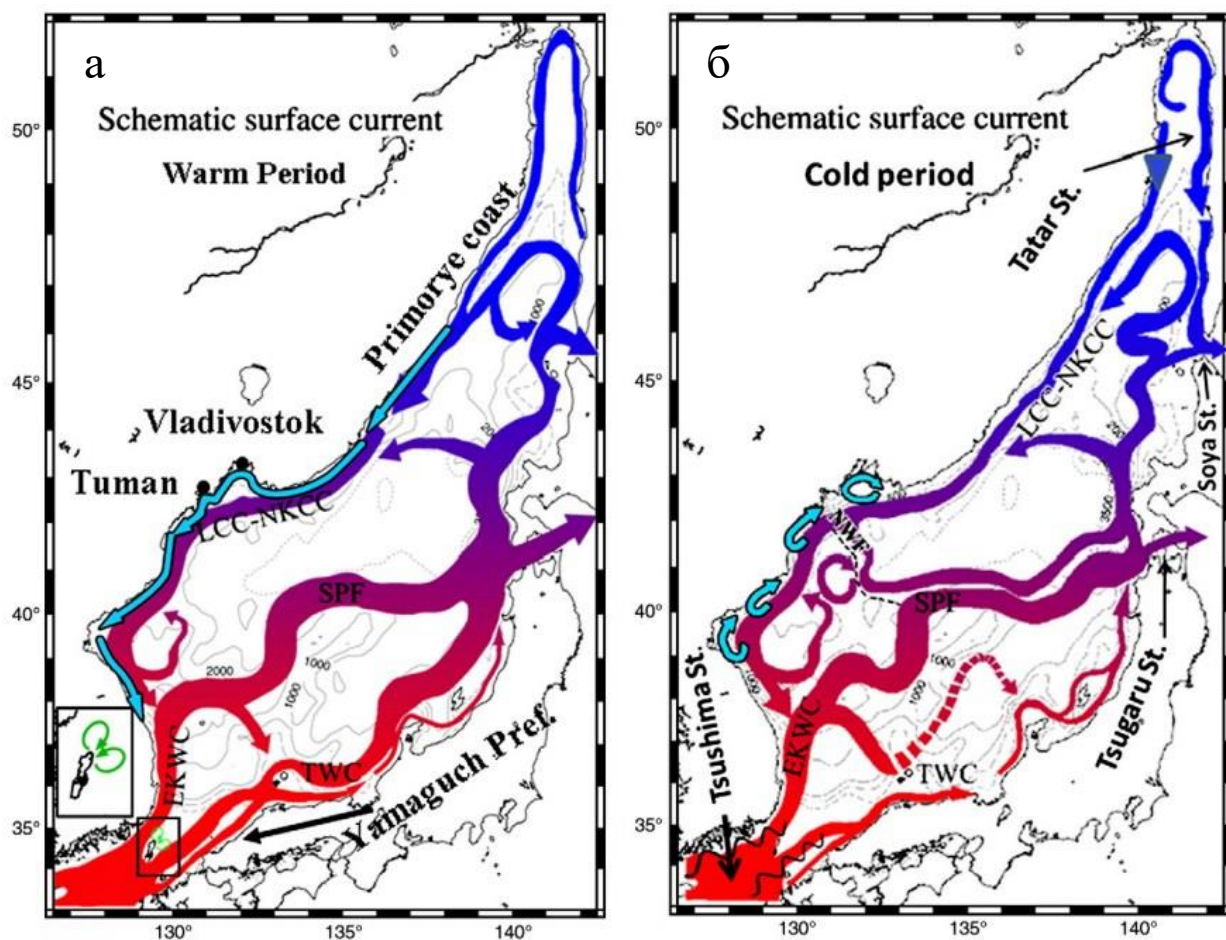


Рисунок 4 – Система поверхностных течений Японского моря в теплое (а) и холодное (б) время года, полученная в результате численного эксперимента с RIAM OM. Теплый период (слева) и холодный период (справа). TWC (теплое Цусимское течение), LCC–NKCC (холодное Приморское течение – Северокорейское холодное течение), EKWC (Восточно-Корейское теплое течение), SPF (Субполярный фронт) [254].

Основные течения в Татарском проливе и их сезонная изменчивость также показаны на рисунке 5. Холодное Приморское течение круглый год направлено на юг вдоль континентального шельфа, в то время как Западно-Сахалинское течение меняет свое направление от теплого периода года (на север) к холодному (на юг), что также подтверждается [189] с учетом сезонной изменчивости мезомасштабного течения. В теплое время года над осью Татарского прогиба между Приморским и Западно-Сахалинским течениями образуется циклоническая мезомасштабная вихревая цепь. В холодное время года в проливе обычно севернее 48° северной широты образуется антициклоническая мезомасштабная вихревая цепь к западу от струи Сахалинского

течения, в то время как циклоническая мезомасштабная вихревая цепь возникает к востоку от струи Приморского течения. Противоток, направленный на север, образуется вдоль пролива между упомянутыми выше вихревыми цепями [189]. Это встречное течение в приповерхностном слое подтверждается дрейфом льда на север при слабом ветре в северной части Татарского пролива зимой, показанным в работе [163].

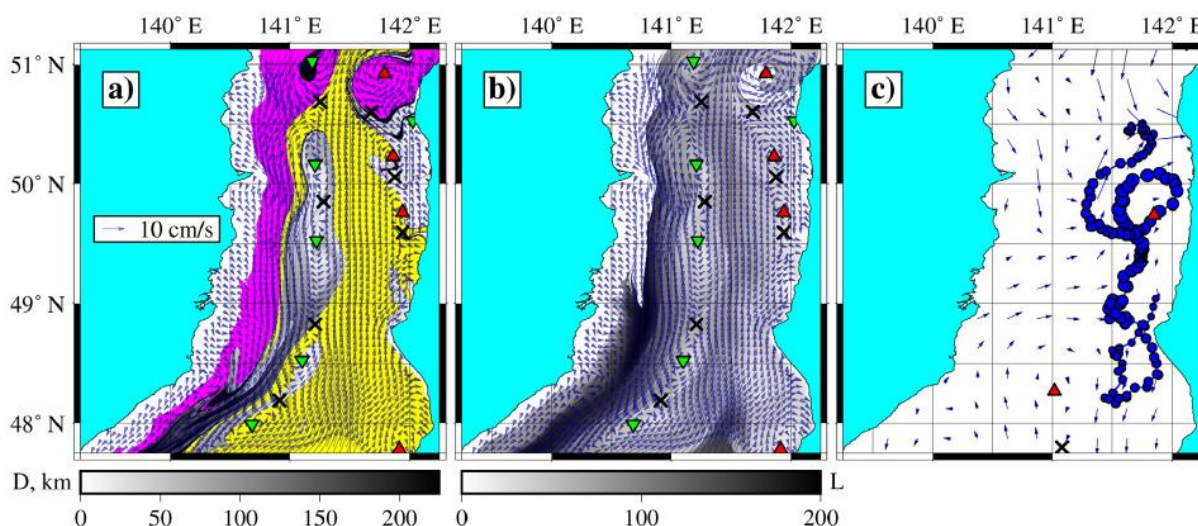


Рисунок 5 – а) Лагранжева карта происхождения вод в обратном направлении во времени, объединенная с D-картой от 5 сентября 1994 г., показывает, что в теплый период Западно-Сахалинское течение переносит трансформированную субтропическую воду на север вдоль западного побережья Сахалина (“желтая” вода в онлайн-версии). Приморское течение переносит воду вдоль западного шельфового разлома с севера (“розовая” вода в онлайн-версии). б) Лагранжева L-карта, выполненная в обратном направлении во времени на ту же дату, демонстрирует мезомасштабный антициклонический вихрь с центром примерно на 51° северной широты, $141,5^\circ$ восточной долготы на северо-восточном мелководье Татарского пролива, цепь антициклонических вихрей вблизи западного побережья Сахалина (красные треугольники, ориентированные вверх) и мезомасштабная циклоническая вихревая цепь в центральной части пролива между Приморским и Западно-Сахалинским течениями (зеленые треугольники, ориентированные вниз). Стрелки в а) и б) представляют смоделированное поле скоростей на глубине 15 м 5 сентября 1994 года. в) Карта с фрагментом траектории буя № 67169 летом 2007 года. Стрелки представляют поле скоростей AVISO на 3 сентября 2007 года [189].

Траектория дрейфа буя № 67169 в поверхностном слое моря летом 2007 года (рисунок 5с) подтверждает наличие антициклонических мезомасштабных вихрей. На этом рисунке показано поле скоростей геострофических течений, рассчитанное по спутниковым данным об уровне моря (AVISO с разрешением $\frac{1}{4}^\circ$ от 3 сентября 2007 года)

[189]. Этого разрешения недостаточно для получения мезомасштабных вихрей в геострофическом поле скоростей в Татарском проливе.

3.2. Перенос растворенного метана в приповерхностном слое Татарского пролива от его источников

В исследовании используется Лагранжева карта происхождения в обратном направлении во времени в сочетании с D-картой (рисунок 5а), чтобы показать наблюдаемое распределение концентрации метана в тот же сезон, и в том же районе Татарского пролива.

На рисунок 6 представлены особенности распределения концентрации растворенного метана в приповерхностном слое Татарского пролива и его источников на дне моря. Диапазон концентраций метана в поверхностной морской воде, отобранной с помощью проточной системы на горизонте 4 м, составляет 4.3 – 37.2 нМ/л при среднем значении 8.8 нМ/л для рейса 54 НИС "Академик Опарин", октябрь 2017 г. (ОР54). Как показано на рисунке 6, самые высокие концентрации CH_4 (15-37 нМ/л) характерны для шельфовой зоны острова Сахалин. Средние и низкие значения в основном наблюдаются по оси пролива и вдоль континентального шельфа. Такая неоднородность распределения метана может быть связана с его преобладающим выходом из донных отложений на восточном склоне Татарского пролива и шельфе острова Сахалин.

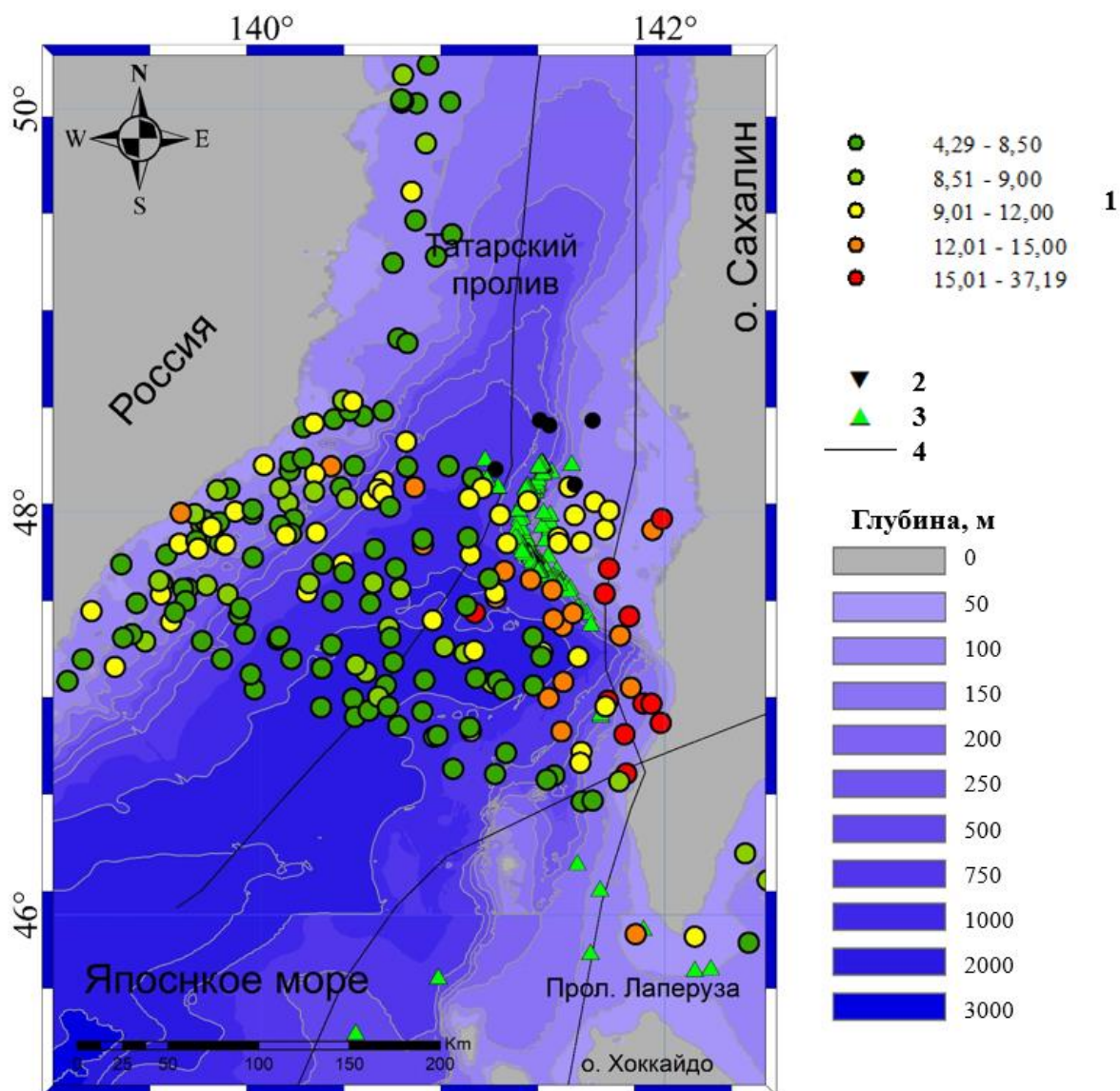


Рисунок 6 – Концентрация растворенного метана (1) в приповерхностном слое (4 м) Татарского пролива по данным измерений во время рейса 54 НИС "Академик Опарин", 29 сентября - 22 октября 2017 г., газовые гидраты (2), газовые факелы (3) и схематические линии разломов (4), как источники поступления метана в толщу воды.

Распределение концентрации растворенного метана в приповерхностном слое может быть связано с поступлением метана из осадочной толщи и системой многомасштабной циркуляции в Татарском проливе, приводящей к адвекции метана. Как показано на рисунке 7, воды юго-восточной части Татарского пролива с высокой концентрацией метана переносятся на север, в то время как воды Приморского течения переносят гораздо меньшее количество растворенного CH_4 с севера на юг в западной части пролива.

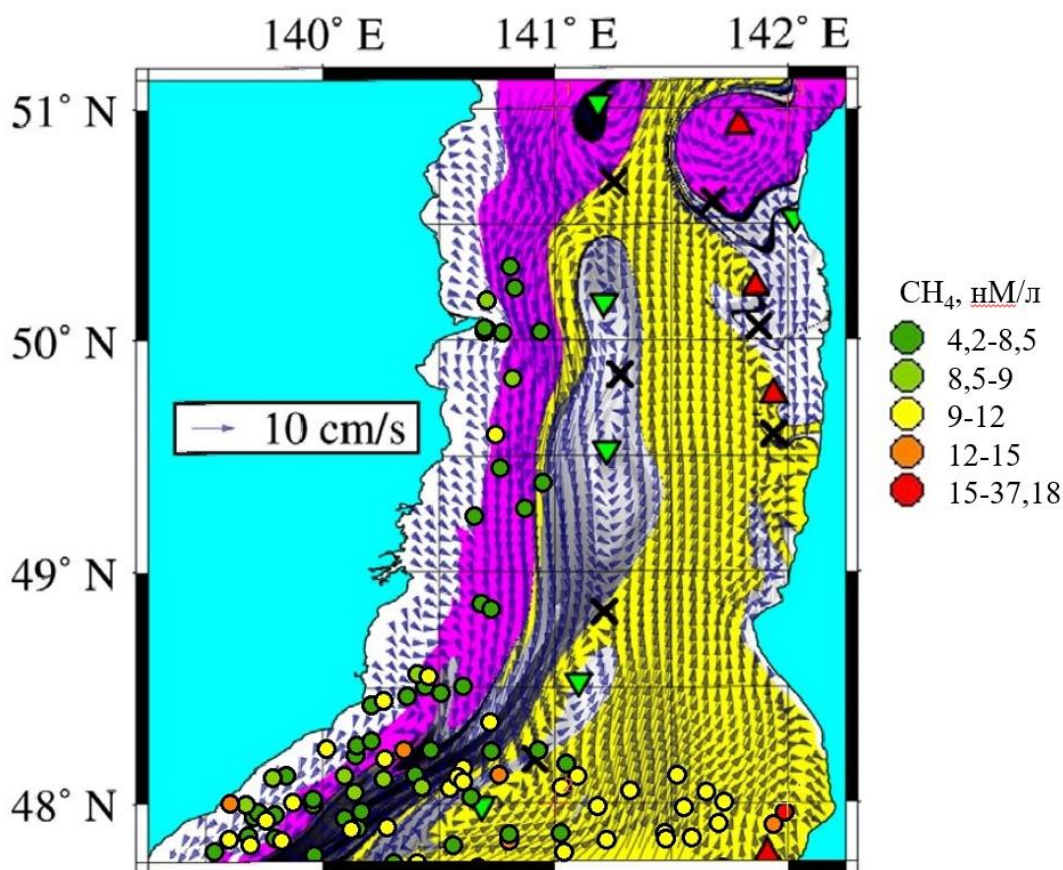


Рисунок 7 – Распределение концентрации растворенного метана в приповерхностном слое Татарского пролива к югу от 51° северной широты, наложенное на комбинированный вектор скорости течения на уровне 15 м 5 сентября 1994 г. по результатам численного эксперимента с моделью RIAM и Лагранжевой картой происхождения вод в Татарском проливе, смоделированное поле скорости течения, полученное путем обратного интегрирования уравнений Лагранжа во времени [189].

3.3. Перенос растворенного метана в Татарском проливе под сезонным пикноклином

Газовые гидраты (черные точки на рисунке 8), газовые факелы (зеленые треугольники на рисунке 8а), а также зоны проницаемости, расположенные вблизи зон влияния тектонических разломов (черные линии на рисунке 8а) являются вероятными источниками выброса метана в водные массы в исследуемом районе Татарского пролива.

Два зональных разреза STD и растворенного метана были выполнены вдоль параллелей 48° и 48.2° северной широты (рисунок 8) в 85-м рейсе НИС "Академик М.А. Лаврентьев" (май 2019 г.). На этих участках пробы морской воды были взяты из батометров, которые закрывались на различных горизонтах от поверхности моря до дна в ходе STD измерений.

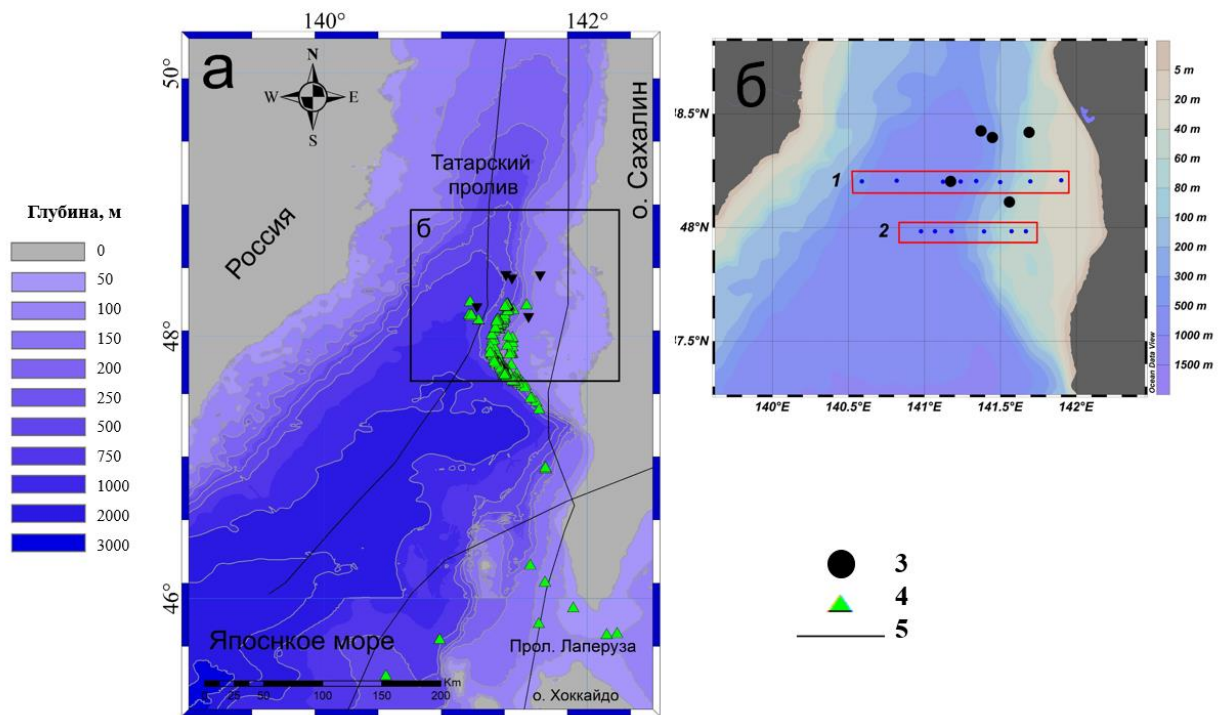


Рисунок 8– Район исследований (а) с обозначением газогидратов (3) и газовых факелов (4), как источников поступления метана в толщу воды, а также схематичных линий разломов (5). Прямоугольник (б) показывает разрезы 1 и 2, отмечающие измерения STD и станции отбора проб воды (синие точки) 21-23 мая 2019 года в рейсе LV85. Рельеф дна показан цветовой шкалой.

На разрезе 1 (рисунок 9а) показаны две придонные аномалии высокой концентрации метана. Одна находится на оси Татарского пролива (станция 5) 124 нмоль/л на глубине 723 м, вторая - на шельфовом склоне острова Сахалин (станция 9) 84.4 нмоль/л на глубине 62 м. Глубоководную метановую аномалию можно объяснить обнаруженными здесь газовыми гидратами (расположены E141.1619; N48.21194), их разрушение связано с выделением метана [8].

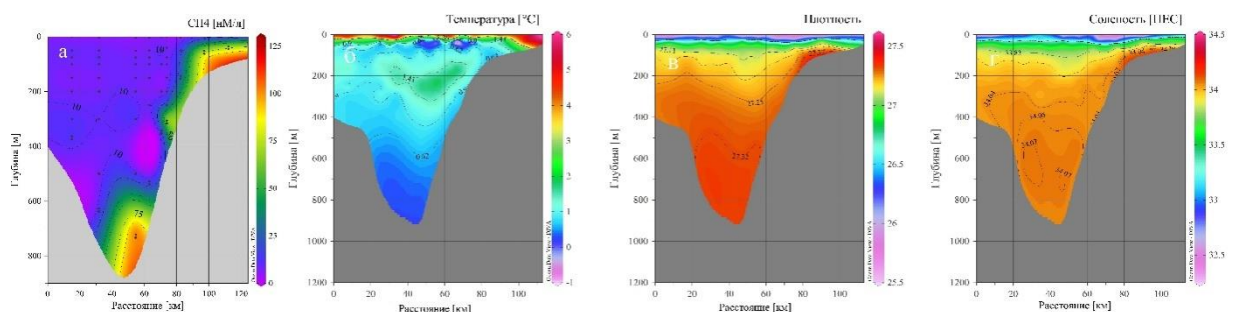


Рисунок 9. Концентрация растворенного метана (а), температура (б), плотность (в) и соленость (г) на северном зональном участке 1 в Татарском проливе, рейс LV85, 21-23 мая 2019 года.

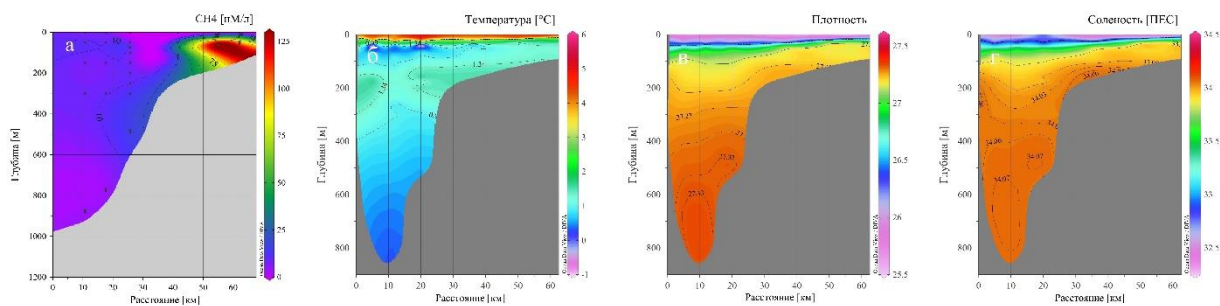


Рисунок 10– Концентрация растворенного метана (а), температура (б), плотность (в) и соленость (г) на южном зональном участке 2 в Татарском проливе, рейс LV85, 21-23 мая 2019 года.

Низкая концентрация растворенного метана 10 нМ/л наблюдалась в морской части южного разреза 2, в основном в промежуточном и придонном слоях на станциях 13, 14 рейса LV 85, а также в верхнем 100-метровом слое на станциях 15,16 (рисунок 10а). Зона высокой концентрации метана с максимальным значением 155.6 нМ/л была обнаружена на том же разрезе 2 на шельфовом склоне острова Сахалин на глубине 75 м и 65 м на станциях 17, 18 соответственно (рисунок 10а). Эта зона наблюдается во всем слое снизу-вверх до сезонного пикноклина (нижняя граница верхнего смешанного слоя) на уровне 25 м (рисунок 11а, б, в и 12а, б, в).

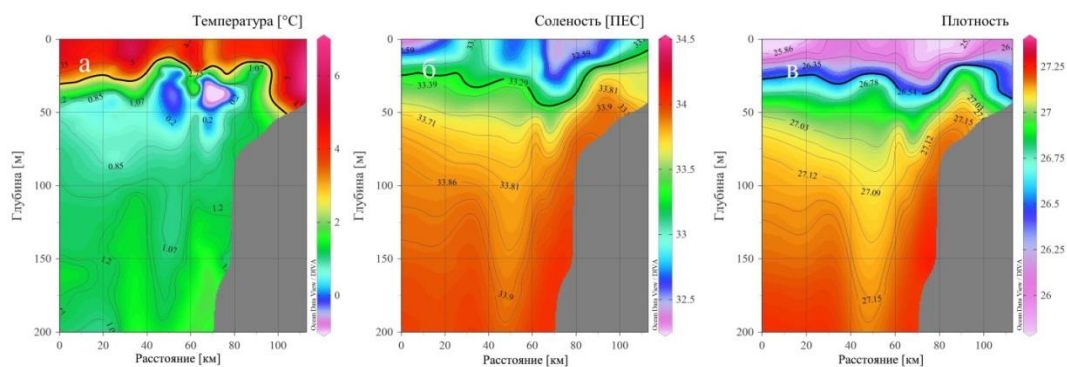


Рисунок 11– Распределение температуры (а), солености (б) и плотности (в) на северном зональном участке 1 для рейса LV85 21-23 мая 2019 года. Жирной линией обозначена граница сезонного пикноклина для соответствующего сезона.

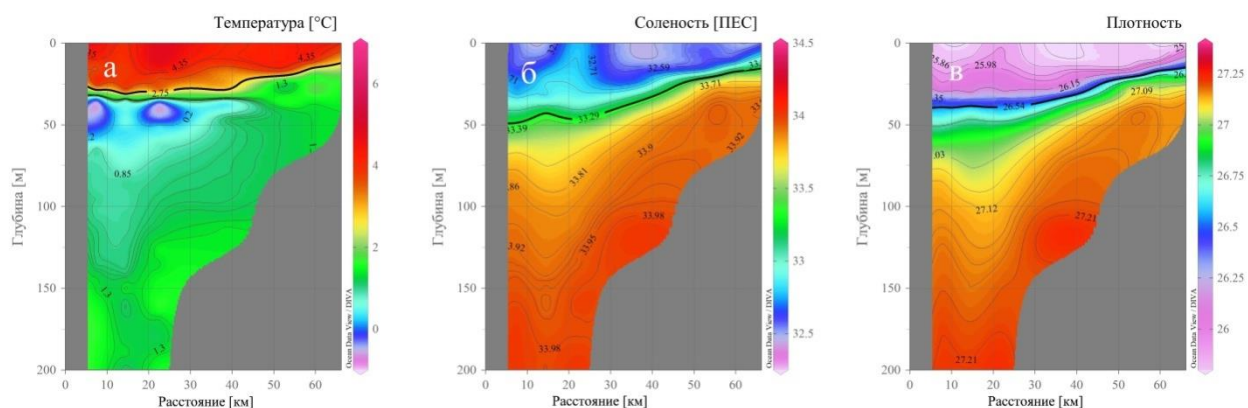


Рисунок 12 – Распределение температуры (а), солености (б) и плотности (в) на южном зональном участке 2 для рейса LV85 21-23 мая 2019 года. Жирной линией обозначена граница сезонного пикноклина для соответствующего сезона.

На рисунках 9 и 10 показаны северные и южные разрезы температуры, солености и плотности в слое воды 0-200 метров. Эта шкала позволяет определить сезонную пикноклинали. Разрезы температуры (рисунок 11а, 12а), солености (рисунок 11б, 12б) и плотности (рисунок 10в, 11в) также указывают на мезомасштабные вихри, упомянутые выше.

Значимыми источниками метана, обеспечивающими его поступление в придонные воды Татарского пролива, являются как дегазация литосферы, проявляющаяся в виде газовых выбросов в зоне влияния тектонических разломов, так и выделение метана при разрушении газогидратов [176; 177]. Результаты газогеохимических исследований донных осадков Татарского пролива представлены в работе [208]. Максимальные концентрации метана в донных осадках были обнаружены в восточной и северо-восточной частях Южно-Татарского осадочного бассейна, а также вдоль шельфового склона острова Сахалин. Повышенные концентрации метана в верхнем слое осадочных пород характеризуют этот регион как зону выброса углеводородных газов, а также указывают на наличие крупномасштабных глубинных источников. Источником метана, питающим крупнейшую аномалию в Татарском проливе (рисунок 9а), также могут быть газовые гидраты (обнаруженные ранее в слое донных отложений вна этом же участке 48.13583с.ш.; 141.5547 в.д.) [8; 179; 208; 172].

Придонный слой морской воды на северном разрезе 1 (станция 9), примерно такой же толщины, как и на южном разрезе 2, содержит локальную максимальную концентрацию метана 84.4 нМ/л. В то же время локальные максимумы концентрации метана для северного разреза примерно в 2 раза меньше, чем для южного разреза (расстояние между разрезами составляет 22 км). Метан, вероятно, переносится из донного

источника разреза 2 вдоль шельфа на север Западно-Сахалинским течением, которое хорошо выражено в теплое время года [254; 189]. Соответственно, как показано на рисунках 9 и 10, концентрация метана уменьшается по мере удаления от его источника. Сезонный пикноклин значительно предотвращает распространение метана в верхний перемешанный слой.

Метан попадает в морскую среду вблизи флюидопроводящих геологических структур, где он распространяется под воздействием перемешивания воды и переносится течениями. Высвобожденный из литосферы CH_4 поступает в придонный слой морской воды в юго-восточной части глубоководной зоны Татарского пролива и шельфа острова Сахалин, где в теплый период растворенный метан переносится Восточно-Сахалинским течением на север и вовлекается в многомасштабную циркуляцию (рисунки 9 и 10).

3.4. Распределение растворенного метана в мезомасштабном квазистационарном вихре и его перенос.

В районе Цусимской котловины глубоководное бурение показало наличие метана в придонном осадке [121]. Акустическими методами обнаружены покмарки и газонасыщенный слой донного осадка мощностью до 90 м [156]. В исследовании [143] приведено описание признаков и фактического наличия газовых гидратов в донных осадках. Вклад метанпродуцирующих бактерий в дебит метана в данной области определен в работе [139; 195]. Кроме того, содержащие растворенный метан воды Восточно-Китайского моря [82; 257] поступают в Японское море через Корейский пролив и вовлекаются в систему течений Японского моря.

В октябре 2017 г. в 54-м рейсе НИС «Академик Опарин» (ОР54) в центральной части Японского моря выполнен меридиональный СТД разрез вдоль 134°в.д. от поднятия Ямато до побережья Приморского края (20 океанографических станций). Пробы морской воды отбирались батометрами на различных горизонтах (в глубокой части котловины до 15 проб) от придонного слоя моря до приповерхностного.

На рисунке 13 показаны концентрации растворенного в морской воде метана от поверхности ко дну на этом меридиональном разрезе с указанием станций отбора проб 24-27 октября 2017 года. В своей северной части разрез пересекает холодное Приморское течение, а в южной части разрез пересекает теплое Восточно-Корейское течение (рисунок 4) по склону возвышенности Ямато.

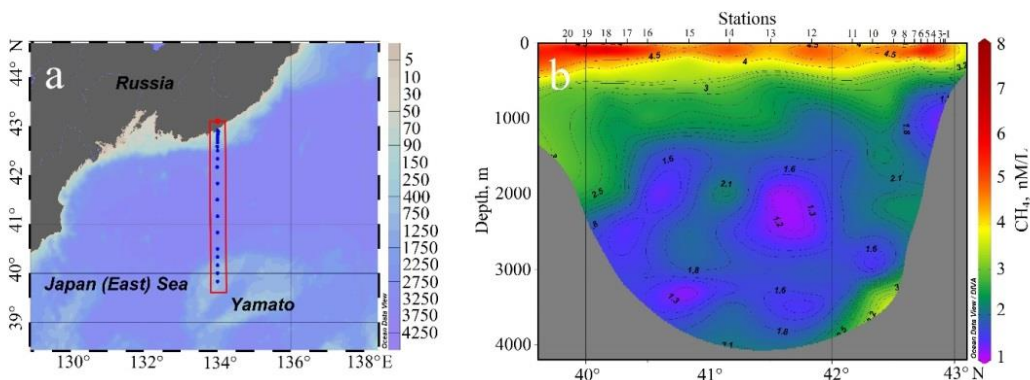


Рисунок 13– Разрез (а) вдоль 134° восточной долготы, по результатам измерений в ОР54 в октябре 2017 года. Синие точки указывают станции отбора проб. Концентрация растворенного метана (б) на разрезе[146].

Низкие концентрации метана (менее 1.5 нМ/л) в холодных субарктических водах Приморского течения были обнаружены над континентальным склоном (рисунок 13а) в слое 750-1500 м (рисунок 13б) на северных океанографических станциях 1-6. В южной части разреза (станции 18, 19, 20) в районе субарктического фронта и Восточно-Корейского течения у склона поднятия Ямато концентрация метана в слое 750-2000 м выше и достигает 2.5 нМ/л.

Разрез солености на рисунке 14б показывает ядро мезомасштабного антициклонического вихря, расположенного в широтной зоне 41°-41,5° северной широты. Этот квазистационарный вихрь наблюдался в этой области ранее [221; 192].

На рисунке 14 показаны участки температуры (рисунок 14а), солености (рисунок 14б) и концентрации растворенного метана (рисунок 14в) вдоль 134° восточной долготы (станции 11-20) в верхнем 300–метровом слое, а на рисунке 15 - аналогичные участки температуры воды [195], основанные на полученных данных CTD во время рейса НИС "Профессор Хромов" в августе 1999 года в рамках международного проекта CREAMS [225].

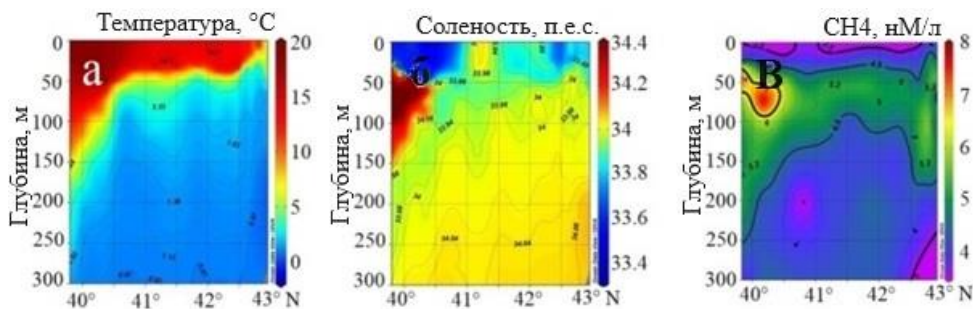


Рисунок 14 – Разрезы температуры (а), солености (б) и метана (в) вдоль 134° восточной долготы от склона поднятия Ямато до континентального склона Японского моря (измерения в рейсе ОР54, октябрь 2017 г.) [146].

На рисунке 15в показаны результаты численного моделирования с использованием модели слоистой циркуляции океана МНІ [211; 169].

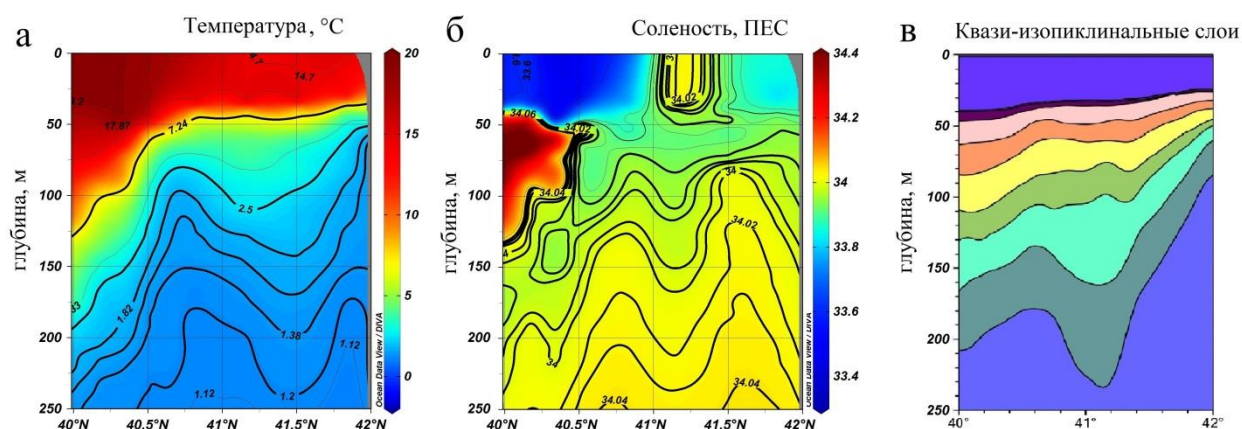


Рисунок 15 – Температура (а), соленость (б) и квазиизопиклиальные слои (в) [192] численной модели циркуляции МНІ на меридиональных разрезах вдоль 134° восточной долготы через мезомасштабный антициклонический вихрь в области 40°-42° северной широты по данным измерений OP54 CTD в октябре 2017 года (а, б), а летом 1999 года (в) [222].

Средняя концентрация метана в общей толще воды на участке вдоль 134° северной широты составляет 4 нМ/л. Повышенная концентрация метана (от 5,2 до 8,2 нМ/л) наблюдается в основном морском действенном слое по всему разрезу с увеличением толщины этого слоя в сочетании со струйными течениями на южной и северной перифериях разреза (рисунок 14в).

На разрезе (рисунок 14в) показаны две области повышенной концентрацией метана. Первая – с абсолютной максимальной концентрацией 8,2 нМ/л в слое 25-100 м наблюдается в Восточно-Корейском теплом течении в районе 40°-40,5° северной широты (слева на рисунке 14в). Вторая с локальным максимумом CH_4 5,7 нМ/л – в том же слое обнаружено в Приморском течении в районе 42° северной широты над континентальным склоном (рисунок 14в). В центральной части мезомасштабного антициклонического вихря локальный максимум растворенного метана 5,2 нМ/л находится в слое 50-100 м. Все промежуточные слои, описанные выше, расположены ниже сезонной границы пикноклина и связаны с абсолютным максимумом градиента скорости течения на его вертикальном профиле в обоих течениях (холодном Приморском [70] и теплом Восточно-Корейском [188]).

Центральная часть разреза и циклонический круговорот над Центральной котловиной характеризуются значительным уменьшением толщины этого слоя и

максимальным подъемом изолинии CH_4 (4.5 нМ/л) вблизи $41,5^\circ$ северной широты из-за возрастающей вертикальной скорости на периферии антициклонического вихря и в центре антициклонического вихря. На рисунке 15 показан антициклонический вихрь в разрезах температуры и солености, основанный на измерениях STD в октябре 2017 года, а также разрез квазиизопиклиальных слоев в исследуемой области Центральной котловины, смоделированный и приведенный в [192], с использованием численной модели циркуляции, разработанной [211; 169].

В целом, растворенный метан распространяется ниже сезонного пикноклина в слое максимальной скорости течения, куда он переносится течениями различного масштаба в Японском море, аналогично переносу растворенного метана в Атлантическом секторе Южного океана (пролив Брансфилд [145]), и в рингах Южного Атлантического течения [165].

Выводы по главе 3

Определены основные особенности распределения метана как в Татарском проливе, так и на разрезе вдоль 134° восточной долготы от возвышенности Ямато до континентального склона Японской котловины.

Татарский пролив характеризуется сложной системой течений и мезомасштабными вихрями противоположных знаков, формирующимися над проливом. Установлено, что в мае–июне, растворенный в морской воде метан поступает из его источников, расположенных на западном шельфе острова Сахалин и в глубоководной зоне вблизи оси Татарского прогиба. В начале теплого сезона растворенный метан переносится на север Западно-Сахалинским течением вдоль Восточного шельфа Татарского пролива в слое под сезонным пикноклином.

Показано поступление CH_4 из донных отложений и перенос растворенного метана течениями в Татарском проливе. Абсолютная максимальная концентрация CH_4 (155.6 нМ/л) наблюдалась на западном шельфе о. Сахалин в придонном слое на глубине 65 м. Локальный максимум 84.4 нМ/л был обнаружен к северу от абсолютного максимума в струйном течении под сезонным пикноклином.

В теплом Восточно-Корейском течении вблизи склона Ямато в Центральной котловине Японского моря локальная максимальная концентрация метана в 8.2 нМ/л также наблюдается под сезонным пикноклином. В мезомасштабном антициклоническом вихре на 134° восточной долготы в глубокой части Центральной котловины также обнаружен локальный максимум метана в 5.2 нМ/л под сезонным пикноклином в слое около 50-150 м.

Локальный максимум метана на его вертикальном профиле в холодном Приморском течении, в теплом Восточно-Корейском течении и в мезомасштабном антициклоническом вихре на 134° восточной долготы в Японском море также расположен под сезонным пикноклином и распространен в северо-западной части Японского моря.

Для дальнейших исследований особенностей переноса метана под влиянием гидрометеорологических и тектонических условий был выбран район привьетнамского шельфа Южно-Китайского моря расположенный в западной части тропической зоны Тихого океана. Район исследований, с одной стороны, характеризуется также как и Японское море (Татарский пролив) наличием многочисленных нефте- и газоносных структур, но, с другой стороны, Южно-Китайское море находится в условиях Восточно-Азиатского муссона и отличается сложной гидродинамической структурой и гидрометеорологическими условиями, что позволяет более полно раскрыть вопрос миграции и формирования полей растворенного метана в водной толще.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ГЕНЕЗИС И МИГРАЦИЮ МЕТАНА В ШЕЛЬФОВЫХ ВОДАХ ВОСТОЧНОГО ВЬЕТНАМА

Южно-Китайское море (ЮКМ) является одним из крупнейших звеньев в цепи окраинных морей восточной Азии и представляет собой важную часть Восточно-Азиатского газогидратного пояса, протянувшегося от побережья Новой Зеландии до Берингова моря [68].

Наличие многочисленных нефте- и газоносных структур в регионе ЮКМ, включая вьетнамский шельф, позволяет рассматривать его в качестве природной лаборатории для изучения источников формирования газовых скоплений и путей их миграции в верхние слои земной коры, водную толщу и атмосферу. Результаты исследований, выполняемых в этом регионе, оказывают существенную помощь в решении общей проблемы генезиса и миграции природных газов, лучшем понимании причин и условий размещения известных газовых полей в окраинных морях восточной Азии и способствуют прогнозу новых нефтегазовых залежей.

До начала 90-х годов был выполнен большой объем газогеохимических исследований. Были обнаружены новые поля аномальных концентраций метана, что в сочетании с геофизическими исследованиями дало возможность оценить нефтегазоносные перспективы всего шельфа Вьетнама. Расположение района работ и основных станций газогеохимического пробоотбора в период 1981-1989 гг. показано на рисунке 16.

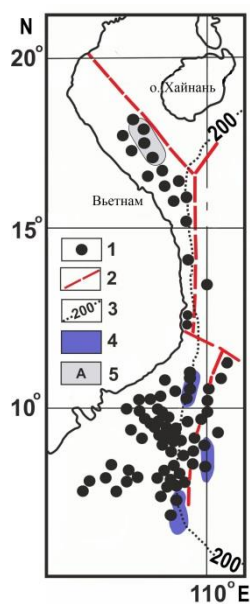


Рисунок 16 – Карта района газогеохимических исследований и станций отбора проб, выполненных в 1981-1989 годах. 1 – газогеохимические станции; 2 – разломы: зона разлома Красной реки, Западный разлом, зона сдвига Туй Хоа; 3 - изобата 200 м; 4 -

скрытые массивы ультраосновных пород, выявленные по геофизическим данным; 5 - аномальная концентрация метана в придонной воде [34; 49; 229]

С начала XXI века продолжено активное изучение акватории Вьетнама и в целом ЮКМ газогеохимическими методами [73; 232; 207; 159; 181; 218, 219, 220, 164 и др.].

Одна из последних экспедиций ТОИ ДВО РАН в ИЭЗ Вьетнама была выполнена в октябре-декабре 2019 г. (НИС «Академик М.А. Лаврентьев», рейс № 88). Исследования выполнялись совместно с вьетнамскими коллегами из Института морской геологии и геофизики Вьетнамской Академии наук и технологий (IMGG VAST) и другими организациями. Одним из главных направлений экспедиционных работ было продолжение и детализация газогеохимических исследований в этом районе. Объектами исследований стали три основных осадочных бассейна: бассейн р. Красной, впадина Фу Хань и бассейн Нам Кон Сон. В состав газогеохимических работ входила детализация имеющихся сведений о генерации и распределении источников эманации углеводородных и других природных газов в региональной тектонической структуре, условий и механизмов формирования полей метана и его гомологов в донных осадках и водной толще, а также выявление новых участков с аномальной концентрацией этих газов.

В результате выполненных работ получен большой объем новых разносторонних сведений, включающих геологические, газогеохимические и геофизические аспекты решаемой проблемы. Все это, в совокупности с анализом других исследований, изложено в монографии [16].

В данной главе предлагается обсудить еще один аспект, влияющий на миграцию и формирование полей растворенного метана в водной толще. Это гидродинамика морских вод и её перестройка под влиянием сезонных метеорологических условий, а также других синоптических процессов. Это особенно важно для региона ЮКМ, находящегося в условиях муссонного климата и подвергающегося воздействию тропических циклонов.

Помимо этого, необходимо осветить еще один фактор. Вьетнамские коллеги недавно сделали оценку возможной реактивации системы разломов в разных районах ЮКМ и опубликовали результат своих расчетов [230]. Поскольку тектоническая реактивация является одним из основных факторов, определяющих создание новой или обновление существующей дренажной системы для миграции глубинных газов наверх, указанная работа дает основу для прогнозной переоценки известных газовых скоплений и выявления новых участков, перспективных на углеводородные залежи. Это, на наш взгляд, нельзя оставлять без внимания. Объектами исследований выбраны бассейны р. Красной и впадины Фу Хань (рисунок 17).

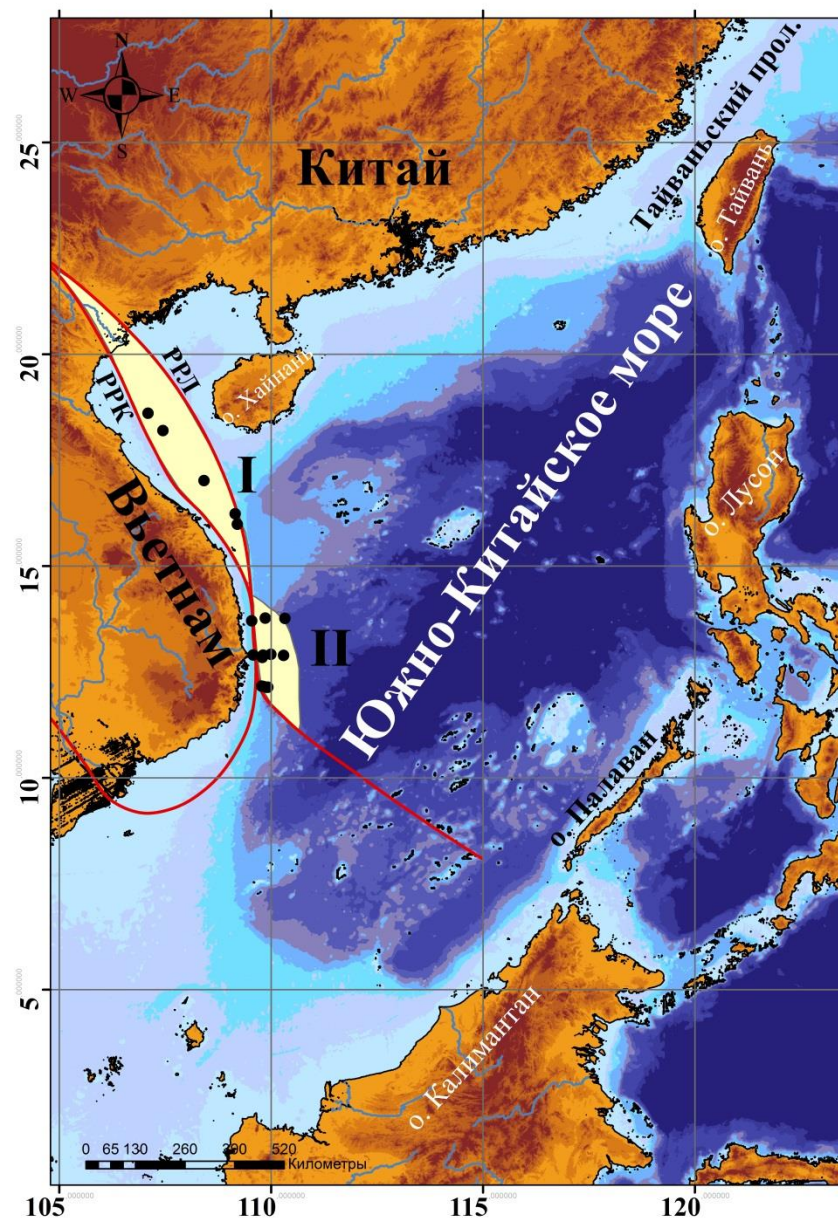


Рисунок 17– Карта расположения осадочных бассейнов р. Красной (I) и Фу Хань (II). Красными линиями обозначены разломы рек Ло и Красной по [183]: РРЛ – разлом реки Ло, РРК – разлом реки Красная. Станции отбора проб в рейсе LV88 обозначены черными точками.

4.1. Тектонические структуры района исследований

Осадочные бассейны реки Красной и впадины Фу Хань расположены в зонах глубинных разломов, заложенных или активизированных в период раскрытия Южно-Китайского моря. В настоящее время они выполняют роль пограничных шовных структур между крупными геоблоками Юго-Восточной Азии. На северо-западе это зона разлома реки Красной, представляющая собой систему сдвиговых структур длительного развития,

которая сейчас образует границу между Индосинийским блоком (областью палеозойско-индосинийской складчатости) на западе и Южно-Китайским блоком (докембрийской параплатформой Янцзы) на востоке [21].

Роль и значение зоны разлома реки Красной объясняются в одной из популярных моделей раскрытия Южно-Китайского моря [225]. В указанной работе Таппонье с соавторами предложил модель, в которой раскрытие Южно-Китайского моря является следствием столкновения Индийской и Евразийской литосферных плит примерно 55-50 млн. лет назад. В результате этого процесса Индокитайский блок был выдавлен на юго-восток с некоторым вращением по часовой стрелке. Указанное событие, по мнению этих авторов, стало ответственным за раскрытие ЮКМ, а указанные смещения произошли вдоль разлома реки Красной. Дальнейшие тектонические процессы создали здесь сложную систему сдвиговых разломов с образованием горсто-грабеновых структур и формированием осадочных бассейнов. Наиболее крупный из них, располагающийся в дельте реки Красной и продолжающийся под водами Тонкинского залива, стал одним из объектов наших исследований.

Второй объект, приуроченный к впадине Фу Хань, располагается в зоне другого глубинного разлома, который был зафиксирован и квалифицирован, как глубинный разлом по совокупности геофизической и газогеохимической съемки ТОИ ДВО РАН, с учетом результатов геологических работ Института вулканологии Дальневосточного научного центра АН СССР, выполненных в начале 80-х годов прошлого столетия. По результатам указанных работ этот разлом рассматривается, как активная тектономагматическая зона глубокого заложения, отделяющая вьетнамский шельф и плиту Сунда от котловины Южно-Китайского моря [34; 49; 19].

В последние годы вьетнамскими геофизиками из Института морской геологии и геофизики Вьетнамской Академии наук и технологий (IMGG VAST) этот разлом изучен более детально и получил название Западный разлом Восточного моря (WESF) [229; 230]. Далее мы будем называть его Западным разломом Южно-Китайского моря. На рисунке 16 схематически показано его положение.

Происхождение Западного разлома можно связать с другой моделью формирования ЮКМ, предполагающей кайнозойский рифтогенез. Согласно этой модели, рифтогенез начался в палеогене, распространяясь вдоль вьетнамского континентального шельфа с образованием рифтовых впадин. Формирование впадины Фу Хань можно связать с этим процессом. В настоящее время западный борт этой впадины образован одним из звеньев Западного разлома.

Существует еще одна гипотеза происхождения Западного разлома. Предполагается, что данная структура может быть звеном трансрегиональной тектонической системы, протягивающейся между меридианами 1000-1100 в.д. на север через весь Китай и Монголию в пределы Сибирской платформы. Присутствие этого линеамента наблюдается и южнее изучаемого района. Этот суперлинеament на огромной территории Азии разграничивает разновозрастные геологические сооружения Альпийско-Гималайского (северо-западного) и Тихоокеанского (северо-восточного) простирания. Этот геологический феномен рассматривался в ряде работ. Его существование хорошо иллюстрируется в публикации Таппонье с соавторами, где приводится генеральная схема тектонических структур Азии [226]. По данным китайских исследователей, на территории Китая указанный линеament в мезозое-кайнозое стал границей между различными геодинамическими режимами: сжатия на западе и растяжения на востоке [157]. Различные аспекты этой трансрегиональной структуры в разное время обсуждались также монгольскими [65] и российскими авторами [9; 10; 27; 15 и др.]. Западный разлом в изучаемом районе играет похожую роль, что и весь указанный линеament. Действительно, по обе стороны от этого разлома большинство тектонических структур ориентированы в разных направлениях. Восточнее преобладает северо-восточное направление. Примером является котловина Южно-Китайского моря. Западнее генеральное направление меняется на северо-западное. В этом направлении ориентирован п-ов Индокитай, система разломов реки Красной и др. В период столкновения Индийской и Евразийской литосферных плит сдвиговые дислокации Индокитая по разлому р. Красной на юге могли переместиться в «готовую» тектонически ослабленную зону современного Западного разлома и включиться в процесс раскрытия ЮКМ.

В целом, формирование рассматриваемых осадочных бассейнов в разных моделях, так или иначе, связывается с раскрытием Южно-Китайского моря, имеет одну причинную связь, но разные геодинамические и тектонические механизмы. В любом случае дегазация геологического пространства происходит через тектонически ослабленные зоны (разломы), и все источники и поля природных газов генетически и пространственно связаны с этим видом структур. Поэтому изучение системы тектонических разломов и их современной активности или в прогнозируемом будущем имеет первостепенное значение при поиске новых или перспективной оценке известных углеводородных месторождений.

С этой точки зрения важной представляется работа, выполненная недавно вьетнамскими коллегами из Института морской геологии и геофизики ВАНТ с участием сотрудников ТОИ ДВО РАН. Указанным коллективом была сделана оценка вероятности

реактивации системы разломов в разных районах Южно-Китайского моря и построена карта соответствующего прогноза [230]. Эта карта изображена на рисунке 18.

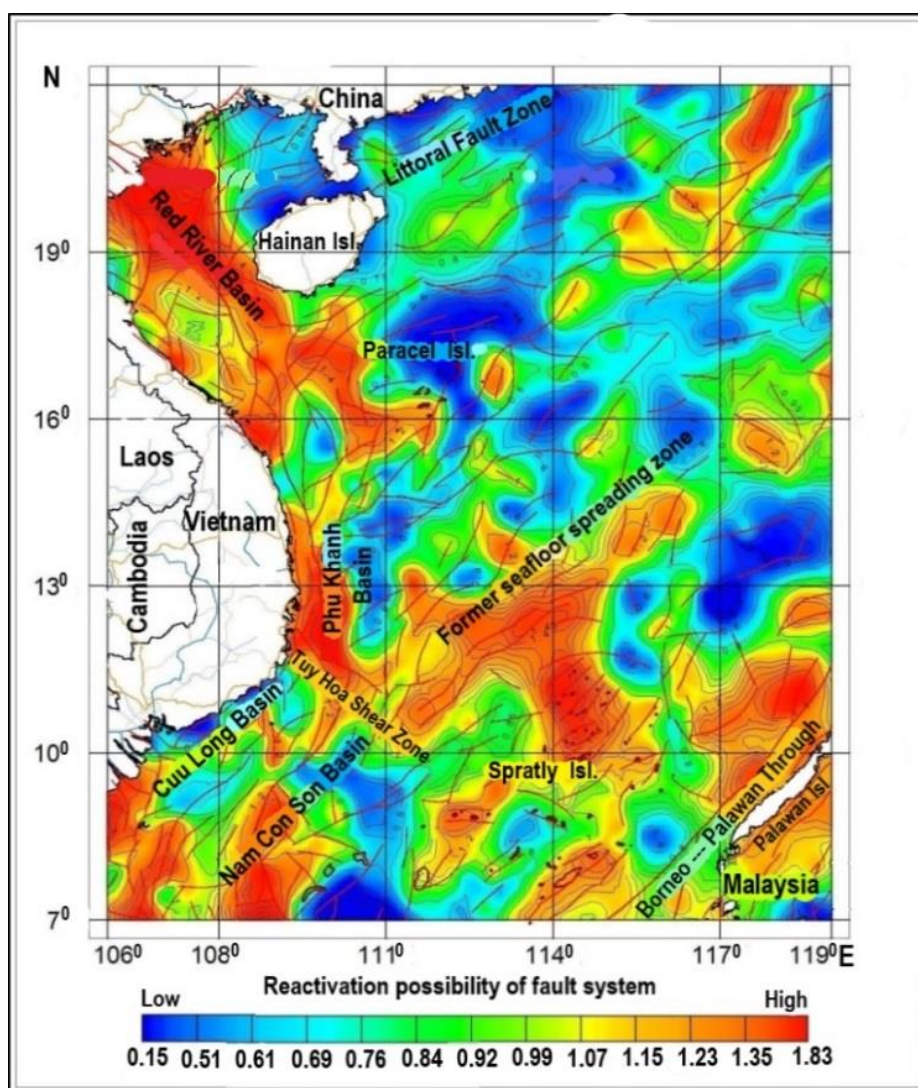


Рисунок 18– Прогнозная карта реактивации разломов в земной коре ЮКМ [230]

В соответствии с этой картой оба объекта исследований: бассейн реки Красной и бассейн Фу Хань находятся в тектоническом каркасе с максимальной вероятностью его реактивации. Бассейн р. Красной находится практически весь в зоне максимальной вероятности тектонической реактивации. Такой же прогноз относится преимущественно к южной части бассейна Фу Хань, где система меридионального Западного разлома пересекается со сдвиговой зоной Туи Хоа (см. рисунок 18).

Прогнозная тектоническая реактивация должна инициировать усиление газовой миграции из эндогенных источников в верхние слои земной коры. Это делает названные осадочные бассейны перспективными на формирование здесь новых газовых месторождений. Газогеохимические исследования с участием автора подтверждают особенный газогеохимический режим этих тектонических структур.

4.2. Гидродинамический режим Южно-Китайского моря в районе исследований

Природные газы, попадая из донных осадков в водную среду, разносятся её потоками в соответствии с общей гидродинамической структурой бассейна. Пространственно-временная изменчивость гидродинамических процессов, естественно, влечет за собой изменение общей структуры разноса газов. Такая взаимосвязь особенно характерна для мелководных шельфовых акваторий, где циркуляция всего водного слоя существенно зависит от региональных метеорологических процессов. Все это в целом затрудняет получение адекватной информации при выполнении газогеохимических исследований. Отсюда возникает необходимость знания и учета гидродинамического режима изучаемого района. Кроме этого, по мнению ряда исследователей, водные слои являются трассерами распространения углеводородных газов по всему тихоокеанскому бассейну [62; 164 и др.].

Регион Южно-Китайского моря находится в условиях Восточно-Азиатского муссона, для которого характерны сезонные изменения. Существуют летний (юго-западный) и зимний (северо-восточный) муссоны. Летом воздушные массы перемещаются с юго-запада на северо-восток, а зимой - в обратном направлении. Взаимодействие с поверхностными водами Южно-Китайского моря приводит к регулярной сезонной перестройке циркуляции вод.

Основной гидродинамической структурой западной части ЮКМ, включая район исследований, является Вьетнамское течение. Оно, как и другие гидродинамические структуры ЮКМ, подвержено сезонной пространственно-временной изменчивости. Зимой, под влиянием зимнего муссона, воды этого течения перемещаются с севера на юг и юго-запад, летом – в обратную сторону, согласно перемещению воздушных масс Восточно-Азиатского муссона. Поскольку обсуждаемые экспедиционные данные получены в осенне-зимний сезон (преимущественно ноябрь), далее мы рассматриваем гидродинамический режим ЮКМ только в условиях зимнего северо-восточного муссона. Для составления генеральной схемы течений для указанного периода нами использованы все доступные базы данных и основные опубликованные материалы по состоянию на 2018 г. Подробности изложены в работе [239; 14]. Полученная схема показана на рисунке 19.

В рассматриваемый период в северной и центральной частях моря под воздействием северо-восточного муссона воды Северо-Экваториального тихоокеанского течения поступают из Филиппинского моря в ЮКМ через пролив Лусон (Баши) и распространяются в западном направлении. Эти воды сливаются с потоком, поступающим из Восточно-Китайского моря через Тайваньский пролив. Объединенный мощный поток идет вдоль о-ва Хайнань к берегам Вьетнама. Западнее о-ва Хайнань часть водных масс,

огибая этот остров, движется на север в Тонкинский залив, образуя там циклоническое движение. Основной же поток южнее о-ва Хайнань переносится дальше на юго-запад, формируя прибрежное Вьетнамское течение (см. рисунок 19).

На юге Вьетнамское течение поворачивает на запад и юго-запад, также проходя вдоль побережья южного Вьетнама. На юго-западном окончании вьетнамского побережья происходит раздвоение потока. Одна из его частей направляется в Таиландский залив, создавая там циклонический круговорот. Другая часть следует дальше на юг и через южные проливы выходит из ЮКМ. В прибрежных мелководных районах Вьетнама часто формируются противотечения. Исключение составляют районы, прилегающие к берегам южного Вьетнама. Представленная схема течений демонстрирует возможные пути транспортировки природных газов от их источников, расположенных в бассейнах реки Красной и Фу Хань.

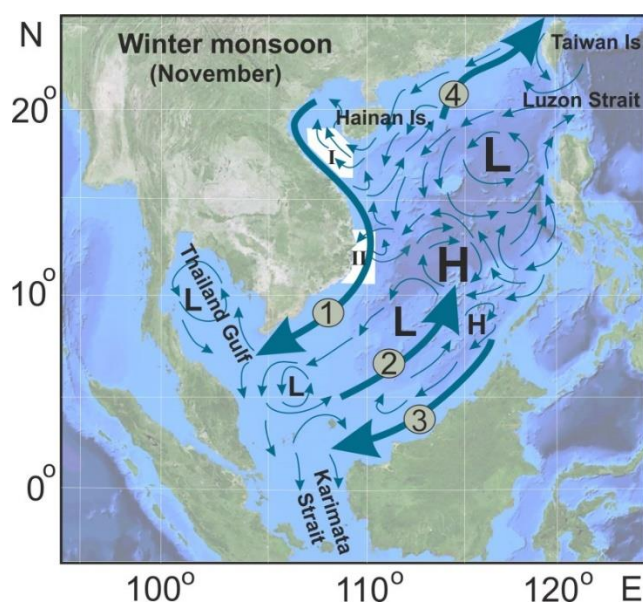


Рисунок 19 – Схема поверхностных течений в Южно-Китайском море в условиях зимних муссонов. 1 - Вьетнамское течение, 2 – Наньшаньское противотечение, 3 – Восточное течение, 4 – Южно-Китайское течение; Н – антициклон, L – циклон [14]. Район исследований обозначен белым цветом: I – бассейн реки Красная, II – бассейн Фу Хань.

Кроме муссонного фактора на гидродинамическую структуру прибрежного Вьетнамского течения, существенное влияние оказывают тропические циклоны (тайфуны), которые зарождаются либо в тропической зоне северо-западной части Тихого океана, либо над акваторией ЮКМ [239]. Тайфуны создают нестабильность гидродинамических процессов (бароклинность), усиливая конвективное перемешивание и завихренность вод. Это, в свою очередь, разрушает регулярные пути миграции

природных газов, формируемые сезонными муссонами, и создает дополнительные трудности в изучении их пространственно-временного распределения.

Установлено, что для данной акватории характерно прохождение в среднем 12 тайфунов в год. Их наибольшее количество приходится на июнь-декабрь, а максимальное - на сентябрь [155]. Как видно, рассматриваемые экспедиционные работы выполнялись в период повышенной повторяемости тропических циклонов. Прямым подтверждением этого явился тайфун NAKRI, который сформировался в южной части ЮКМ в период проведения описываемой экспедиции. Это явилось еще одним фактором, усложняющим структуру вод и общий гидродинамический режим в исследуемом районе.

4.3. Исследование распределения метана в придонном осадке и в воде в районе исследований

Бассейн реки Красной

В бассейне выполнено 7 станций, из них – 4 станции с опробованием осадков (№№ 50, 51, 55, 56) и 5 станций с CTD-зондированием (№№ 52, 53, 54, 55, 56) и опробованием воды. На станциях №№ 55,56 выполнено опробование осадков и CTD-зондирование. Результаты опробования в осадках показаны на рисунке 20 и результаты CTD-зондирования - на рисунке 21.

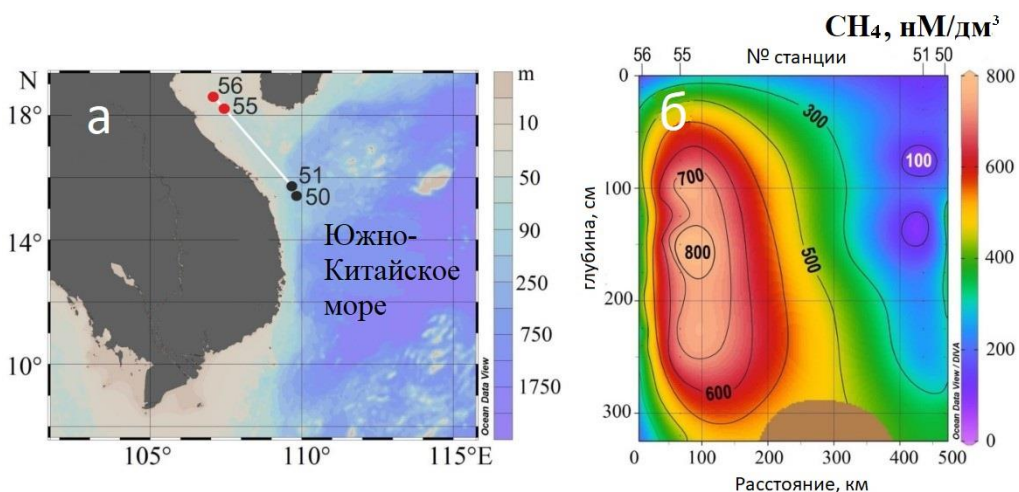


Рисунок 20 – Результаты опробования углеводородных газов в донных осадках в бассейне р. Красной (станции №№ 50-56). а-положение станций отбора проб, красным цветом обозначены станции, где взяты пробы осадков и воды; б-концентрации метана в осадках.

На станциях № 55 и № 56 опробованы осадки на глубину до 300 см. В осадках были выявлены аномальные концентрации метана (максимум 793 нМ/дм³) при фоновом содержании этого газа в данном осадочном бассейне 26 ppm (252нМ/л) [16]. Выявленная

аномалия прослеживается только в осадках, до горизонта 40 см. В водную толщу она не распространяется. Максимальная концентрация метана зафиксирована преимущественно на станции №55 в колонке осадков на расстоянии 150 см от забоя. На южных станциях 50 и 51 концентрация метана (диапазон значений 45-360 нМ/дм³) намного ниже, чем на северных станциях. Локальный максимум метана 360 нМ/дм³ на горизонте 300 см зафиксирован на станции 50. Наличие тяжелых углеводородов (этан, пропан) на рассмотренных станциях указывает на эндогенную природу источника, находящегося в районе этих станций. Отсутствие выхода газов в водную толщу свидетельствует о недостаточно интенсивной эмиссии метана и, как следствие, его аккумуляции только в слое осадков. Влияние гидродинамики здесь исключено. По выявленным признакам в недрах рассматриваемого участка возможны нефтегазовые скопления.

Рисунок 21 иллюстрирует концентрации метана, обнаруженные в пробах воды, отобранных при STD-зондировании.

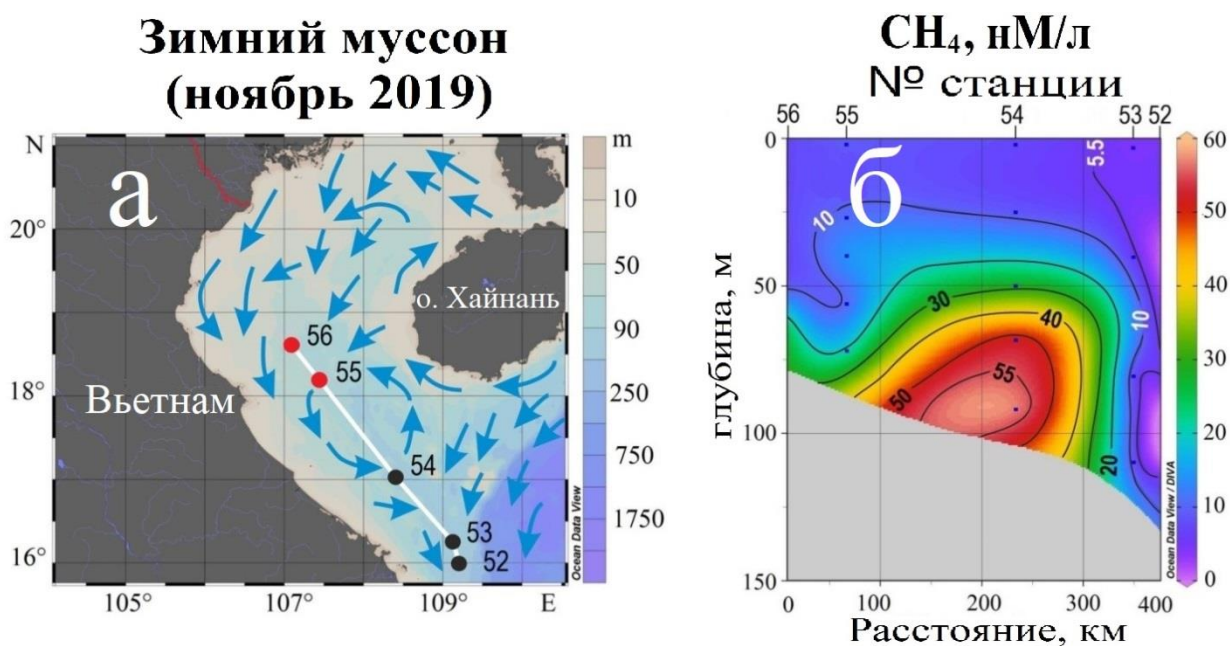


Рисунок 21 – Результаты опробования метана в воде бассейна р. Красной

а-положение станций отбора проб воды, красным цветом обозначены станции, где взяты пробы осадков и воды, синими стрелками обозначены направления течений морской воды в период экспедиционных наблюдений; б-концентрации метана в воде.

Как видно из рисунка 21, аномальная концентрация метана выявлена и в водной толще этого профиля. Однако её максимум смещен относительно газовой аномалии в осадках станций №№ 55,56 (рисунок 20а) и зафиксирован в центре профиля, на станции № 54 (рисунок 21а). Здесь выявлена повышенная концентрация растворенного в воде метана с абсолютным максимумом (58 нМ/л) в придонном слое на глубине 91 м (рисунок 21б).

Аномалия метана распространяется от дна до горизонта 50 м, где ее количественные значения падают до 28 нМ/л. Аномалия прослеживается вдоль профиля на расстоянии более 200 км.

На северо-западе, в районе станций № 55 и № 56 (рисунок 21а), где в осадках обнаружена аномальная концентрация углеводородных газов, в воде также выявлено повышенное содержание метана (рисунок 21б). На станции № 56 повышенное содержание метана (32.5 нМ/л) распространяется от дна до горизонта 64 м, где ее количественные значения снижаются до 25.4 нМ/л. В районе станции № 55 повышенное содержание метана распространяется от дна до горизонта 60 м, где ее количественные значения еще ниже 2.3 нМ/л. На юго-востоке профиля (станции №№ 52,53) аномалии метана не наблюдаются.

Таким образом, в воде бассейна реки Красной концентрации метана в целом невысокие, за исключением станции № 54. Подобная аномалия с максимальной концентрацией метана 228 нл/л в этом районе была обнаружена еще в 80-е гг. прошлого столетия [49; 34]. Это свидетельствует о многолетней стабильности дегазации данного участка и существовании здесь глубинного источника генерации углеводородов с формированием газовых, возможно, и нефтяных, скоплений в низах осадочной толщи. Судя по характеру распространения газовой аномалии, от источника в районе ст. № 54 (рисунок 21б) часть растворенного метана может переноситься водными течениями на северо-запад и частично на юг. Это хорошо иллюстрируется рисунок 21а, где показана схема течений. Выявлена интересная особенность, что придонная аномалия метана вертикально распространяется до нижней границы сезонного пикноклина (55м), которая является естественным препятствием выхода метана в поверхностные водные слои (рисунок 22).

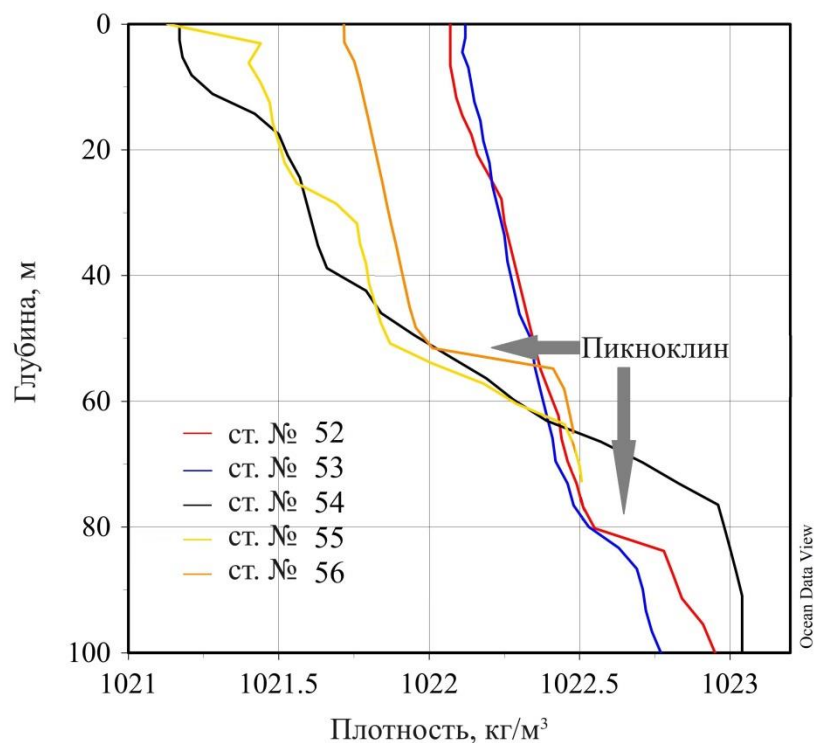


Рисунок 22 – Диаграмма вертикального распределения плотности в районе осадочного бассейна реки Красная по данным океанографических измерений в рейсе LV88

В совокупности с аномальными концентрациями углеводородных газов в осадках на станциях №№ 55,56 перспективы этого района расширяются. Система глубинных разломов реки Красной способствует этому. Глубинность источников дегазации подтверждается присутствием здесь высоких концентраций углекислого газа (0.40-0.50 мл/л) [16]. Более того, на основе результатов исследований последних лет [219] полученные изотопно-газогеохимические данные позволили подтвердить выводы о наличии газа и конденсата в недрах бассейна самой р. Красной.

В мае 2019 г. в описываемом районе открыто крупное газовое месторождение (Кен Вау [83]), которое располагается в районе описанной аномалии метана в придонной воде. Осенью 2019 г. в пределах указанного месторождения были выявлены также газогеохимические [220] и геомикробиологические [23] индикаторы. Мы надеемся, что результаты наших исследований помогут уточнить перспективы нефтегазоносности этого района при проведении дальнейших поисковых работ.

Бассейн Фу Хань

В этом бассейне экспедиция 2019 года также выполняла изучение газовой составляющей в донных осадках и морской воде. В нашей работе использованы

результативные 22 станции с пробами осадков и 11 станций с пробами воды. Меньшее количество определений газов в воде связано с ограниченными возможностями зондирующего комплекса (до 600 м) в условиях резкого увеличения глубин морского дна восточнее Западного разлома.

Отбор проб осадков выполнен на четырех профилях (рисунок 23а), STD-зондирование и отбор проб воды - на трех профилях. На станциях №№12-15 (профиль в) производился только отбор проб воды (рисунок 23а). На двух других профилях (профиль б, №№ станций 46 - 49 и профиль г, №№ станций 31-38) производился отбор проб осадков и воды. Из них только на двух станциях (№№ 38 и 49), расположенных на шельфе, пробы воды взяты от поверхности до дна. Это дало возможность определить существование метана в придонном слое воды и его возможную связь с метаном в осадках.

Расположение станций и результаты опробования углеводородных газов в донных осадках показаны на рисунке 23.

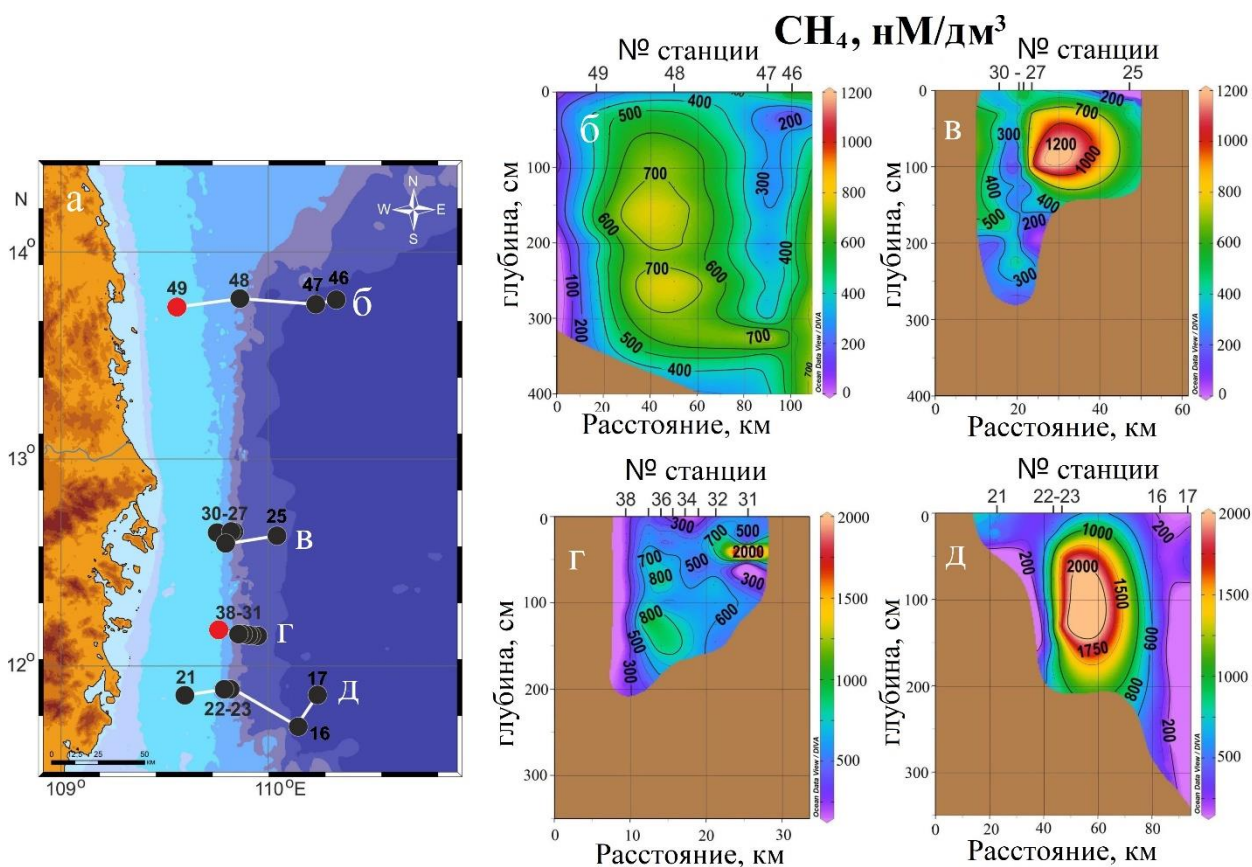


Рисунок 23 – Результаты опробования метана в донных осадках бассейна Фу Хань
 а - положение профилей и станций опробования, красным цветом обозначены станции, где взяты пробы осадков и воды; б, в, г, д – номера профилей и распределение метана в осадках

Из рисунка видно, что на разрезах-б, в, д фиксируются поля повышенных и аномальных концентраций метана. Исключение составляет разрез-г, в пределах которого распределение метана представляет собой мозаику локальных участков с весьма различной концентрацией этого газа. Один из таких участков с аномальной концентрацией метана (до 2000 нМ/дм³) располагается в районе станции № 31 в интервале глубин осадков ≈30-50 м. Максимальные концентрации метана на разрезах-б, в, г приурочены к краевой части шельфа или континентальному склону (станции №№ 23, 27, 48, см. рисунок 23а), который сформирован Западным разломом. Это свидетельствует о существовании здесь эндогенных источников газовых эманаций, приуроченных к указанному разлому.

Заметно некоторое увеличение максимальных концентраций метана с севера на юг. Так, на разрезе-б зафиксировано обширное поле повышенных концентраций метана от поверхности до 350 см вглубь осадков. В пределах этого поля на глубинах ≈170 и ≈260 см выделяются два максимума до 700-800 нМ/дм³. Южнее, на разрезе-с наблюдается меньшая по площади, но интенсивная аномалия, зафиксированная от поверхности до ≈115 см с максимумом концентрации метана до 1200 нМ/дм³. На крайнем южном разрезе-е выявлена еще более интенсивная аномалия, занимающая большую площадь разреза от поверхности до глубины 200 см. Максимальная концентрация метана здесь достигает 2000 нМ/дм³.

Причина указанного повышения газовой концентрации в осадках может быть объяснена увеличением эндогенной генерации природных газов, в частности метана, в этом направлении. С другой стороны, это явление может быть связано с повышением «пропускной» способности системы тектонических разломов, существующих в данном районе. Действительно, разрез-е располагается в непосредственной близости от пересечения Западного разлома со сдвиговой зоной Туи Хоа (см. рисунок 16). Как известно, пересечение тектонических разломов создает участки повышенной раздробленности и проницаемости геологической среды. Это, в свою очередь, создает благоприятные условия для усиления газо-флюидной миграции. Обсуждаемый разрез располагается вблизи такой тектонической обстановки, поэтому появление здесь максимальной газовой аномалии, включая глубинные газы гелий и водород [218] можно объяснить и этим фактором.

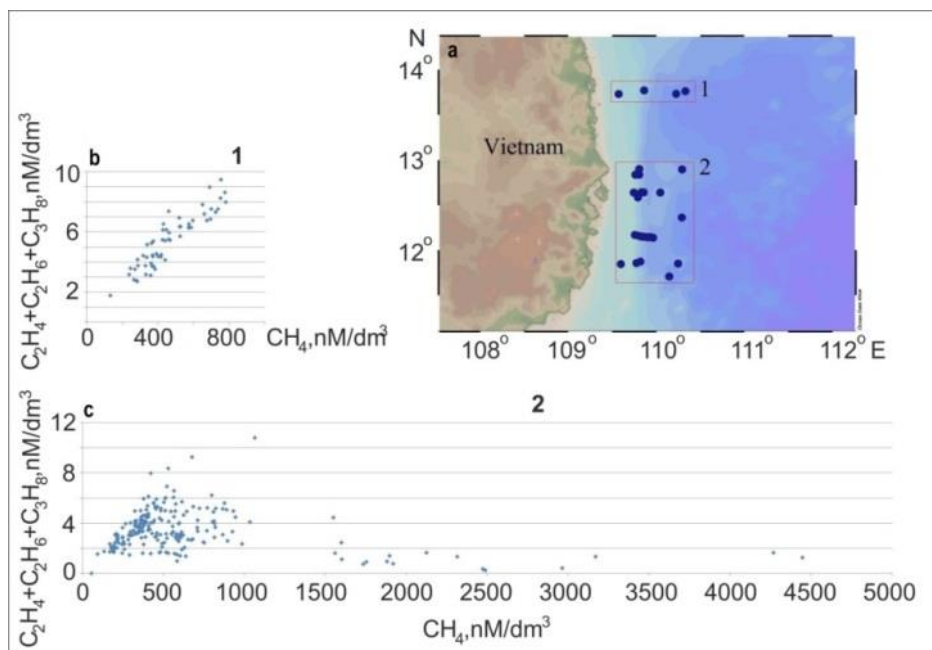


Рисунок 24 – Отношение метана к сумме его гомологов в осадках на севере и юге осадочного бассейна Фу Хань. а – положение районов: 1 – северный район; 2 – южный район; б – отношение метана к гомологам в северном районе; с – то же в южном районе.

При обработке экспедиционных данных также было выявлено различное отношение количества метана к пропану и этану в осадках на севере и юге бассейна Фу Хань (рисунок 24). Это может свидетельствовать о существовании здесь минимум двух глубинных источников эмиссии углеводородных газов [217].

Как видно из рисунка 21, повышенные концентрации и аномалии метана распространяются до поверхности донных осадков. Значит, выходы газов должны достигать водной толщи и, растворяясь в ней, мигрировать дальше в соответствии с гидродинамическими условиями морского бассейна.

Как сказано выше, только на двух станциях (№№ 38 и 49) STD-зондирование достигло дна (рисунок 25а). Здесь же сделано совместное опробование осадков и воды, которые дают возможность сопоставить результаты опробования газов в придонной воде и осадках. На рисунке 25 представлены результаты опробования метана в воде и осадках. На профилях-б и г выполнено опробование метана в воде и осадках, на профиле-в – только в воде.

Зимний муссон (ноябрь 2019)

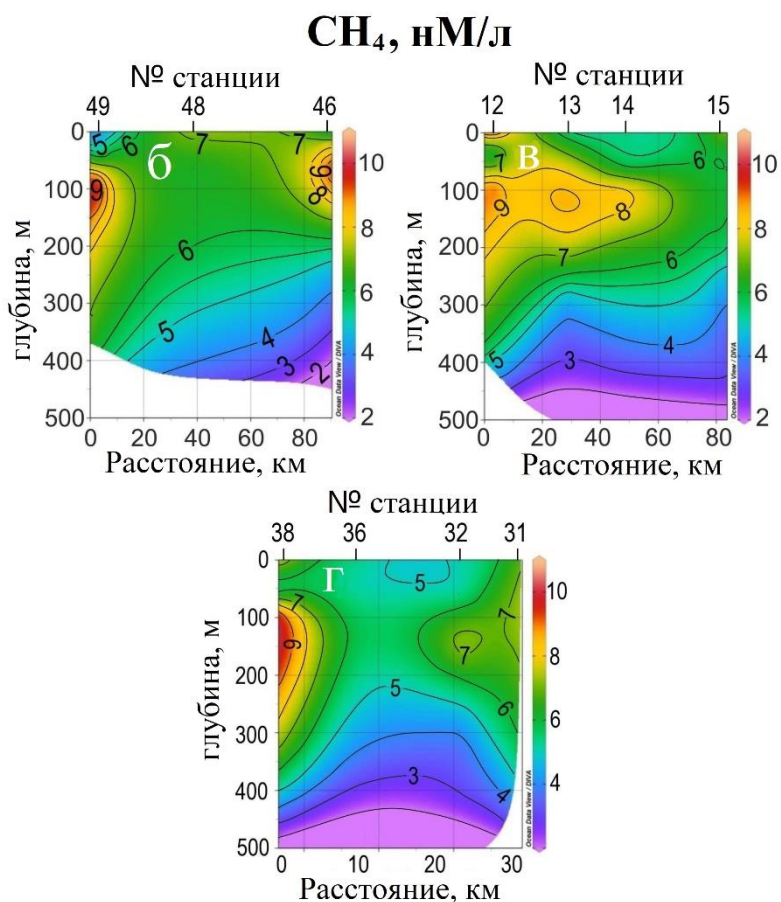
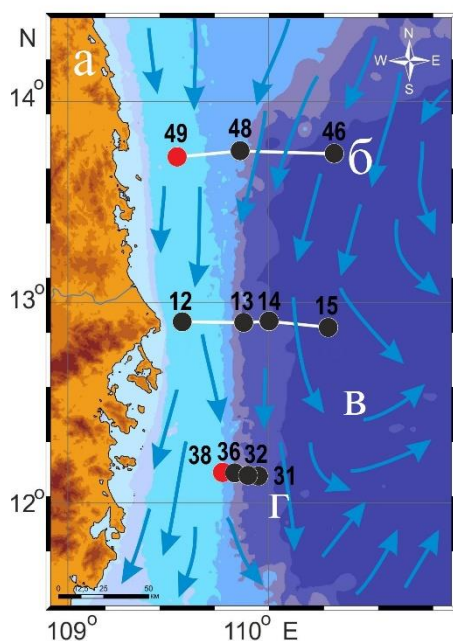


Рисунок 25 – Результаты опробования метана в воде бассейна Фу Хань. а - положение профилей и станций отбора проб; б, в, г – номера профилей и содержание метана в воде; красным цветом обозначены станции, где взяты пробы газов в осадках и придонном слое воды; синими стрелками обозначено направление течений морской воды в период экспедиционных наблюдений.

Анализ распределения метана в воде и сравнение с его содержанием в осадках показывает, что на всех профилях (б, в, г) повышенные концентрации метана располагаются в верхнем слое воды и не установлена прямая связь с его аномальными концентрациями в осадках.

Как показано выше, (см. рисунок 23) в донных осадках на станции № 48 (профиль-б) зафиксировано обширное поле повышенного содержания метана (≈ 750 нМ/дм³). В водном слое над этим участком подобной аномалии нет. Лишь на соседних станциях №№ 49 и 46 (Рисунок 25б), в поверхностном слое на глубинах 50-200 м и 20-110 м соответственно зафиксированы локальные аномалии с повышением концентрации метана до 9-10 нМ/л. Как видно, непосредственная связь с содержанием метана в осадках

отсутствует, поэтому трудно делать определенный вывод об источнике метана в водной толще на этом участке.

В осадках станции № 31 на профиле-г (см. рисунок 23) зафиксирован очень небольшой участок с аномальной концентрацией метана (2000 нМ/дм^3). В воде над этим участком какого-либо повышения концентрации метана не наблюдается. Некоторое повышение отмечается в районе станции № 38 (Рисунок 25г). Здесь в интервале глубин 70–300 м выявлен локальный участок с концентрацией метана до 9 нМ/л . На профиле-с в поверхностном слое воды, на глубинах от 70 до $\approx 200 \text{ м}$, зафиксировано поле повышенного содержания метана ($8 - 9 \text{ нМ/л}$), распространяющееся от шельфа (ст. №12) мористее в сторону больших глубин, до станции № 14 (рисунок 25в).

В осадке станций на разрезе-в (см. рисунок 23) установлены на небольшой площади повышенные значения концентрации метана 1200 нМ/дм^3 . Но расположение повышенных концентраций метана в поверхностном слое воды исключает прямую связь с каким-либо эндогенным источником.

Таким образом, в бассейне Фу Хань на всех станциях в донных осадках обнаружены повышенные или высокие концентрации метана. В водной толще также выявлены участки с повышенным содержанием этого газа, однако он концентрируется в поверхностном слое воды и не имеет видимой связи с газовыми аномалиями в осадках. Кроме того, важно отметить, что области повышенных концентраций метана распространяются в слое 200 (300) -50 (70) м под нижней границей сезонного пикноклина (рисунок 26), которая характерна и для других акваторий Мирового океана [165; 145; 146; 67]. Это означает, что метан принесен сюда морским течением либо из местных эндогенных источников, либо из других районов ЮКМ.

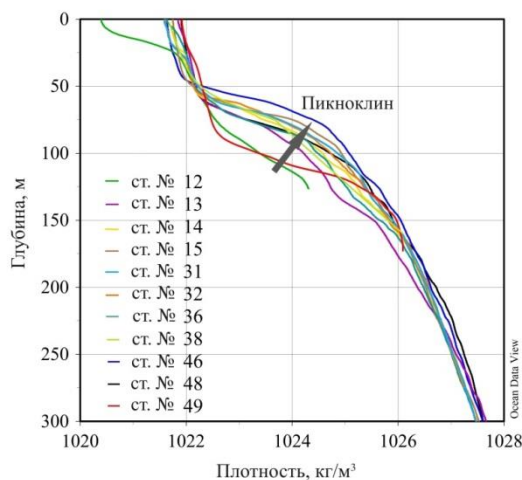


Рисунок 26– Диаграммы вертикального распределения плотности в районе осадочного бассейна Фу Хань по данным океанографических измерений в рейсе LV88

4.4. Перенос метана под сезонным пикноклином системой течений ЮКМ.

Влияние ТЦ NAKRI

Для оценки возможности переноса метана водными течениями в бассейн Фу Хань обратимся к региональной гидрометеорологической обстановке. На рисунке 19 показана генеральная схема течений в ЮКМ для зимнего сезона. Рисунок 25а иллюстрирует более детальную картину транспортировки водных масс в ноябре 2019 г., которая сформировалась под влиянием тропического циклона (ТЦ) NAKRI [16]. Его траектория представлена на рисунке 27. Необходимо отметить, что отбор проб воды в исследуемом бассейне выполнялся в период 14 – 19 ноября, т.е. непосредственно после прохождения тайфуна. Поэтому его влияние на перестройку структуры течений и перенос растворенных в воде газов надо учитывать.

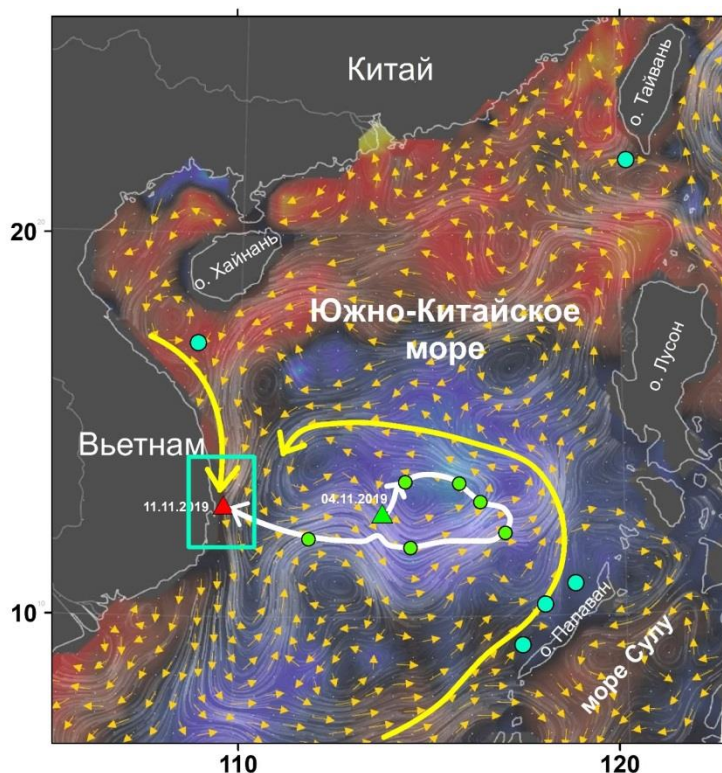


Рисунок 27– Траектория ТЦ «NAKRI», белая жирная линия - траектория движения [138] ТЦ; зеленый треугольник – место зарождения ТЦ; зеленые кружки - положение центра ТЦ для каждого дня 05-10.11.2019 г.; красный треугольник – выход ТЦ на берег (11.11.2019 г.); голубой цвет – исследуемая акватория; желтые маленькие стрелки - направление движения водных масс на 09.11.2019 г. по данным спутникового наблюдения [108]; желтые жирные стрелки – возможные траектории привноса метана в бассейн Фу Хань из других эндогенных источников ЮКМ; красный цвет – более теплая морская вода, синий цвет – более холодная морская вода.

ТЦ «NAKRI» развился из тропической депрессии, сформировавшейся 04.11.2019 г. в южной части Южно-Китайского моря. Смещаясь на восток, в районе с координатами 13.7° с.ш. - 115.8° в.д. она преобразовалась в тропический шторм, который из-за усилившегося ветра (44 м/с) 09.11.2019 г. достиг стадии сильного тропического шторма (тайфуна) с давлением в центре 980 ГПа. Этот тайфун 10-го ноября 2019 г. своей западной периферией воздействовал на прибрежные юго-восточные провинции Вьетнама [22]. Воды, переносимые течениями из центральной и восточной части ЮКМ, под воздействием ТЦ NAKRI на широте 12°N сливались с водами Вьетнамского течения.

Как видно из рисунка 27, тайфун NAKRI оказал существенное влияние на привнос метана в водную толщу бассейна Фу Хань. Анализ структуры движения водных масс, вызванных этим тайфуном, позволил построить возможную траекторию переноса растворенных газов от нефтегазовых скоплений и месторождений у побережья о-вов Калимантан и Палаван в бассейн Фу Хань [208]. Еще одним источником миграционного метана в бассейне Фу Хань может быть газовое месторождение Кен Бау в бассейне р. Красной. Направление потока водных масс из этого района на юг, в сторону бассейна Фу Хань, иллюстрируется рисунками 21, 25 и 27. Этим потоком могут переноситься растворенные газы.

Таким образом, обнаруженные в водной толще бассейна Фу Хань поля метана имеют смешанное происхождение. Часть из них имеет местное эндогенное происхождение, связанное с системой Западного разлома и сдвиговой зоны Туи Хоа, другие перенесены сюда из других районов ЮКМ. В последнем случае огромную роль сыграл тайфун NAKRI, перестроивший структуру течений и создавший благоприятные условия для переноса метана и других газов в бассейн Фу Хань.

Выводы по главе 4

Показано, что система тектонических разломов, сформировавших осадочные бассейны реки Красной и Фу Хань, создает необходимые эндогенные условия для образования и миграции метана и его гомологов в донные осадки и морские воды. По современным оценкам тектонический каркас обоих бассейнов имеет высокую вероятность реактивации. Это должно активизировать существующие эндогенные газовые источники и создать новые, что, возможно, уже происходит: на шельфе в пределах бассейна Фу Хань вьетнамскими учеными наблюдались газовые факелы. В результате увеличится миграция углеводородных газов в верхние слои земной коры. С этой позиции указанные бассейны являются перспективными на расширение имеющихся и открытие новых газовых месторождений.

В бассейне реки Красной, в пределах газового месторождения Кен Бау, подтверждена и уточнена аномально высокая концентрация метана, выявленная в 80-е годы прошлого столетия. Это свидетельствует о существовании здесь глубинных источников углеводородных газов с многолетней стабильной дегазацией метана и его гомологов, что, возможно, определило формирование здесь газового месторождения. Глубинность источников дегазации подтверждается присутствием здесь высоких концентраций углекислого газа в воде (0,40-0,50 мл/л).

Показано, что часть метана, находящегося в водах месторождения Кен Бау и может переноситься на юг прибрежным Вьетнамским течением, адаптированным к условиям зимнего северо-восточного муссона.

В бассейне Фу Хань на всех станциях в донных осадках обнаружены повышенные концентрации метана. Это свидетельствует о существовании здесь эндогенных источников этого газа. Они пространственно и, по всей вероятности, генетически связаны с тектонической системой Западного разлома и сдвиговой зоны Туи Хоа. Различное отношение количества метана к пропану и этану в осадках на севере и юге этого бассейна, а также изотопные отношения углерода метана, свидетельствуют о существовании здесь минимум двух глубинных источников эмиссии углеводородных газов.

Концентрации метана в осадках бассейна Фу Хань увеличиваются с севера на юг. Это можно объяснить увеличением глубинной генерации газов и повышением проницаемости в узле пересечения системы Западного разлома и сдвиговой зоны Туи Хоа, что должно способствовать усилению миграции газов.

Прямая связь высоких концентраций метана в донных осадках и повышенного содержания этого газа в водной толще бассейна Фу Хань не обнаружена. В связи с этим, происхождение метана в воде этого района может быть продуктом частично местных источников, частично доставленным сюда из других районов Южно-Китайского моря течениями.

Выявлен факт существования термохалинного барьера, препятствующего распространению растворенного метана в поверхностный водный слой.

Установлена большая роль тайфуна NAKRI в транспортировке метана в водную толщу бассейна Фу Хань. Под его влиянием были созданы благоприятные гидродинамические условия для переноса растворенных газов от нефтегазовых скоплений и месторождений у побережья о-вов Калимантан и Палаван в бассейн Фу Хань.

Для дальнейшей оценки влияние течений на распределение полей метана были выбраны районы проливов Брансфилд, Антарктика и моря Уэдделла как рифтогенная зона с повышенной сейсмической и вулканической активностью. Также данный район

исследований позволяет исследовать распределение метана в условиях Антарктического циркумполярного течения, большой глубины верхнего перемешанного слоя и интенсивной вертикальной циркуляции.

ГЛАВА 5. ПЕРЕНОС МЕТАНА ТЕЧЕНИЯМИ В ПРОЛИВЕ БРАНСФИЛД, ЮЖНЫЙ ОКЕАН

В настоящее время дискуссия о роли метана как наиболее чувствительном индикаторе эволюционных процессов изменения климата, остается одной из наиболее обсуждаемых тем в океанологических науках. Сведения о величине потока метана в атмосферу крайне противоречивы. Рассматриваются модели от незначительной эмиссии до взрывного выброса, влекущего глобальную катастрофу. Данные о динамике потока метана ограничены, и мало что известно о факторах, его контролирующих [210]. Вклады океанов в глобальную эмиссию метана в атмосферу остаются весьма неопределенными. Различными исследованиями признается, что открытые океаны представляют собой источник метана в атмосферу от 0.005% до 3% глобальной продукции метана [98], хотя лежащий в основе механизм генерации метана остается неясным. По некоторым оценкам поток метана с акватории Мирового океана в атмосферу составляет 6 млн. тонн CH_4 в год на площади океана ($3.6 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$) при среднем потоке метана в атмосферу 2.5 моль/($\text{км}^2 \times \text{сут}$) [243].

В результате изменений климата и химического состава атмосферы Мировой Океан также претерпевает глобальные изменения. Увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере приводит к ацидификации океана [104; 87]. Другим глобальным процессом является деоксигинация океана [111]. Недавние биогеохимические исследования показали, что все перечисленные выше процессы затрагивают карбонатную систему и гидрохимические характеристики вод Южного океана [161; 246; 89; 129]. В этом отношении Южный океан имеет свои особенности. Наиболее важная гидрологическая особенность – Антарктическое циркумполярное течение и большая глубина верхнего перемешанного слоя, превышающая 400 м [105; 130]. Благодаря интенсивной вертикальной циркуляции происходит вовлечение метана и углекислого газа в глубинные слои океана [89].

Придонные воды в глубоководных каналах Атлантики распространяются от своих источников на шельфе Антарктиды, перетекая из одной котловины в другую. Процесс такого перетока зачастую сосредотачивается в узких каналах, разломах и проходах, связывающих абиссали отдельных котловин. При этом за счет интенсивного взаимодействия с дном в каналах происходит существенная трансформация термохалинных свойств придонных вод. Эти обстоятельства делают экспедиционные исследования в Южном океане особенно важными с точки зрения изучения крупномасштабной меридиональной циркуляции Мирового океана и оценок его газогеохимического режима.

В данной главе представлены результаты детальных газогеохимических исследований метана в водной толще проливов Брансфилд, Антарктический, а также моря Уэдделла, что позволило оценить влияние течений на распределение полей метана в водной толще и наметить перспективы для дальнейших исследований.

5.1. Гидрологический режим и основные геологические особенности района работ

Пролив Брансфилд, расположенный между Южными Шетландскими островами и Антарктическим полуостровом, имеет асимметричное поперечное сечение и состоит (с севера на юг) из: узкой (менее 10 км) шельфовой зоны, глубоководного центрального бассейна шириной от 15-20 до 80 км и широкого шельфа Антарктического полуострова (платформы Брансфилд).

В проливе наблюдается распространение вод из морей Уэдделла и Беллинсгаузена, а также их перемешивания между собой и с водой шельфовых районов Южных Шетландских островов и Антарктического полуострова, здесь присутствуют два относительно стационарных фронта: фронт пролива Брансфилда и фронт близ шельфа Антарктического полуострова, течение Брансфилда образует узкую (до 20 км) струю теплых вод, распространяющуюся на северо-восток вдоль северной границы пролива [32, 116].

Западная часть пролива Брансфилд, с сильным прибрежным влиянием и обширными шельфовыми зонами, рассматривается как высокопродуктивные районы [141]. Вефер и др. [244] связали эти регионы с эпизодическими событиями с высокой производительностью и задокументировали очень высокие скорости седиментации в проливе Брансфилд.

Пролив Брансфилд представляет особенный интерес как рифтогенная зона с повышенной сейсмической и современной вулканической активностями, а также как район с недавно обнаруженными участками гидротермальной деятельности. Ранее, изучение профилей распределения метана в водной толще пролива Брансфилд проводилось в ограниченном объеме в западной его части, а основное внимание исследователей было направлено на анализ закономерностей распределения метана в море Уэдделла (ссылка).

5.2. Перенос метана системой течений пролива Брансфилд

В ходе рейса № 87 НИС "Академик Мстислав Келдыш", 7 декабря 2021 г.– 5 апреля 2022 г., (АМК87) в проливе Брансфилд выполнено 3 разреза, включающие 24 газогеохимические станции (200 проб). Анализ проб морской воды, отобранной с

батометров в диапазоне глубин 2 – 1767 м выявил концентрации метана 2,47 – 10,95 нМ/л. Максимальные концентрации метана (10,95 нМ/л) наблюдаются на склоне желоба пролива у Южных Шетландских островов на восточном и центральном разрезах на горизонтах 0-500м.

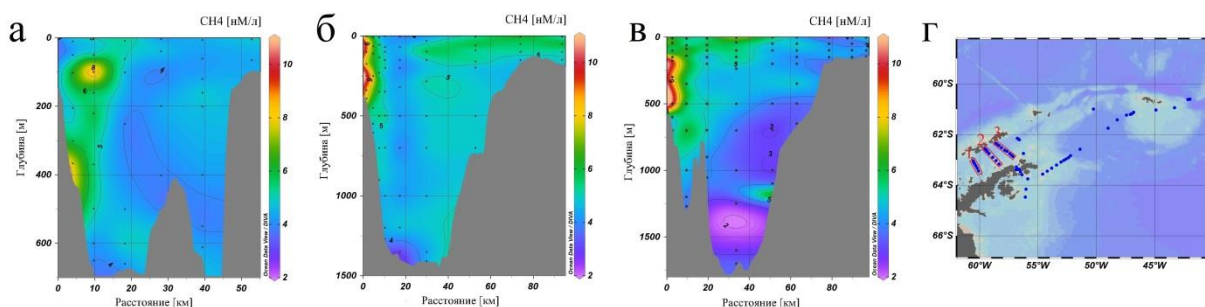


Рисунок 28 – Распределение концентрации метана на западном (а), центральном (б) и восточном (в) разрезах в проливе Брансфилд (г)

На все трех разрезах (рисунок 28) отчетливо различимо ядро поля повышенных концентраций метана с центром на глубине 400 м и имеющее горизонтальный масштаб около 10 км. Это может быть обусловлено переносом насыщенных метаном вод течением пролива Брансфилда, направленным на восток. Наличие данной струи, переносящей в себе повышенные концентрации метана подтверждается данными температуры и солёности. В работе [116] приведены данные измерений скоростей течений в этом районе: измеренные максимумы скоростей течений в ядре течения теплых вод моря Беллинсгаузена совпадают с полем повышенных концентраций метана, привносимых в пролив с запада.

В поверхностном и подповерхностном (до глубины 200 м) водном слоях на центральном и восточном разрезах (рисунки 28б, 28в) выделяется область повышенных концентраций (7,63 нМ/л), что также может быть связано с гидрологическим режимом – существование вихрей на центральной оси пролива (рисунок 29).

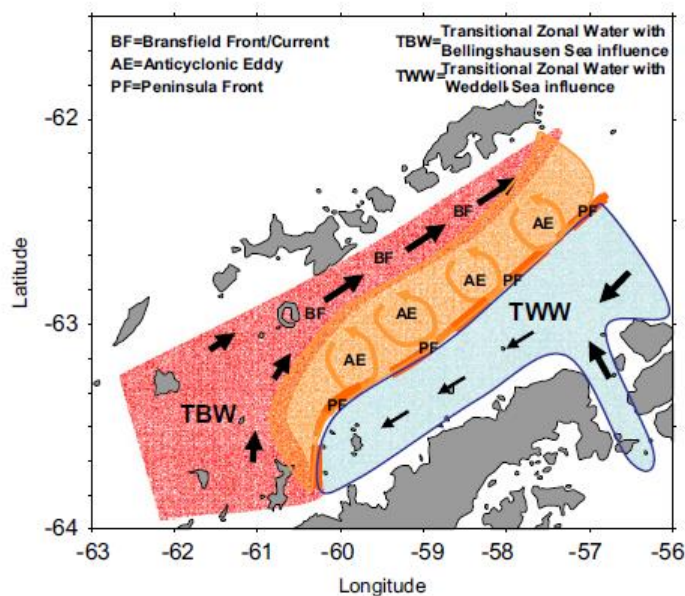


Рисунок 29– Схема основных составляющих системы течений пролива Брансфилд [121].

Минимальные концентрации метана (2,47 нМ/л) обнаружены на дне пролива – в водном слое глубиной более 1000м (рисунок 28), что может быть вызвано транзитом глубинной воды пролива Брансфилд (ГВБ), верхней границей ее распространения считаются значения потенциальной температуры $-1,0^{\circ}\text{C}$ и солености 34,5 епс [120].

Распределение концентраций метана в проливе Брансфилд в значительной степени контролируется гидрологическим режимом, схема транзита метана на разных горизонтах через пролив подтверждается современными гидрологическими исследованиями [32], а также исследованиями российских и зарубежных коллег в предыдущие периоды [122; 124; 198; 46], схема течений пролива в разрезе представлена на рисунке 30.

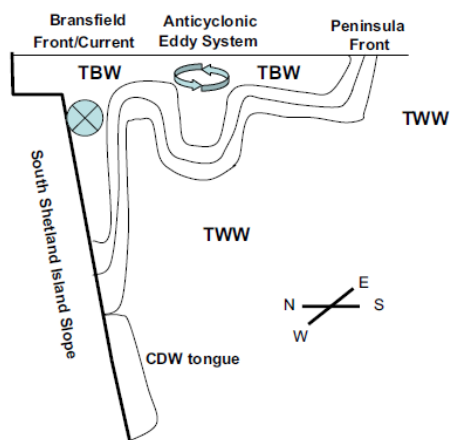


Рисунок 30 – Схема основных компонентов системы течений пролива Брансфилд [198].

Центральный разрез пролива (рисунок 28б) территориально повторил разрез, выполненный в ходе экспедиции НИС "Академик Мстислав Келдыш", рейс 79, 2020 г. Согласно результатам газогеохимических исследований 2020 г. на дне пролива обнаружена зона повышенных концентраций метана, локальный участок газовой разгрузки гидротермальной природы, связанный с системой разломов в координатах 62°40'3" ю.ш. 59°21'40" з.д. [187]. В работе описано, что метаносодержащий гидротермальный флюид вызывает увеличение содержания метана в воде от 10 до 43 нмоль/л в широком диапазоне глубин водной толщи. Придонный слой воды с повышенным содержанием метана распространяется на значительные расстояния от гидротермального выхода. Также на этом участке выявлено наибольшее количество термофильных метанотрофных бактерий, находящихся в придонном слое воды. Обнаружение термофильных и экстратермофильных микроорганизмов в придонном слое подтверждает эндогенный характер источника метана [190].

Однако, в рамках экспедиции рейса 87 НИС "Академик Мстислав Келдыш" (2021-2022 гг.) данная аномалия либо результаты ее активности обнаружены не были. Нестабильность эндогенных источников пролива, вероятно, имеет пульсационную природу и, возможно, также контролируется сейсмической обстановкой региона и нуждается в дальнейшем изучении.

Антарктический пролив

В проливе выполнено 7 гидрологических станций (52 пробы) на горизонтах 4-949 м, образующих 2 разреза: вдоль и поперек пролива. Поперечный разрез между Антарктическим полуостровом и островом Жуэнвиль характеризуется повышенными концентрациями метана на крайних станциях: восточной (7,28 – 11,4 нМ/л) и западной (5,78 – 7,93 нМ/л). Основная водная масса центральной части пролива содержит средние концентрации метана (4,11 – 6,55 нМ/л) неравномерно распределенные в водной толще (рисунок 31).

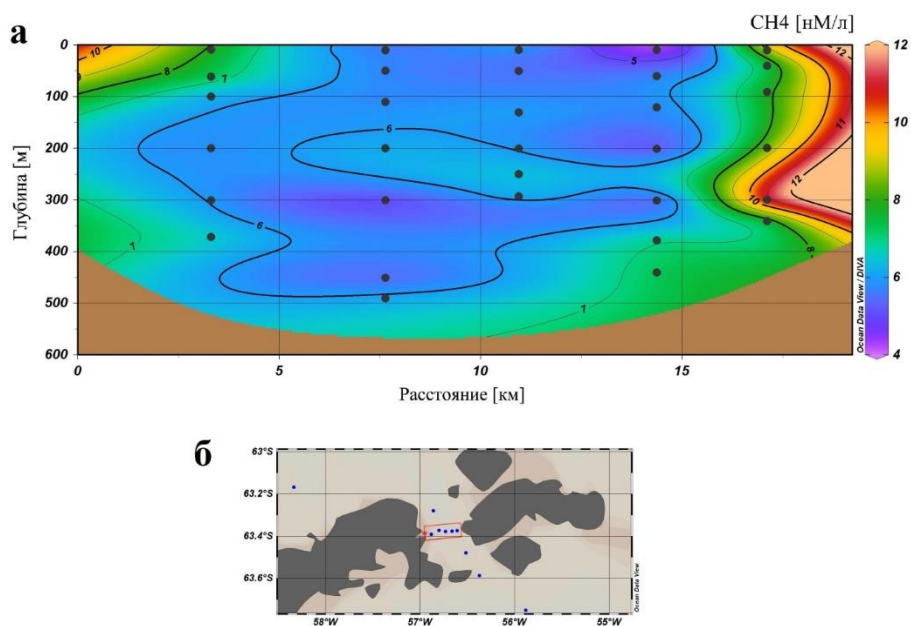


Рисунок 31 – Распределение концентрации метана (а) на поперечном разрезе (б) в Антарктическом проливе.

На продольном разрезе выявлена локальная придонная область повышенных концентраций метана (до 7,33 нМ/л) (рисунок 32), наличие которой, вероятно, обусловлено эндогенными процессами. Данный участок повышенных концентраций был также определен в ходе рейса 79 НИС "Академик Мстислав Келдыш", 2020 г. [187].

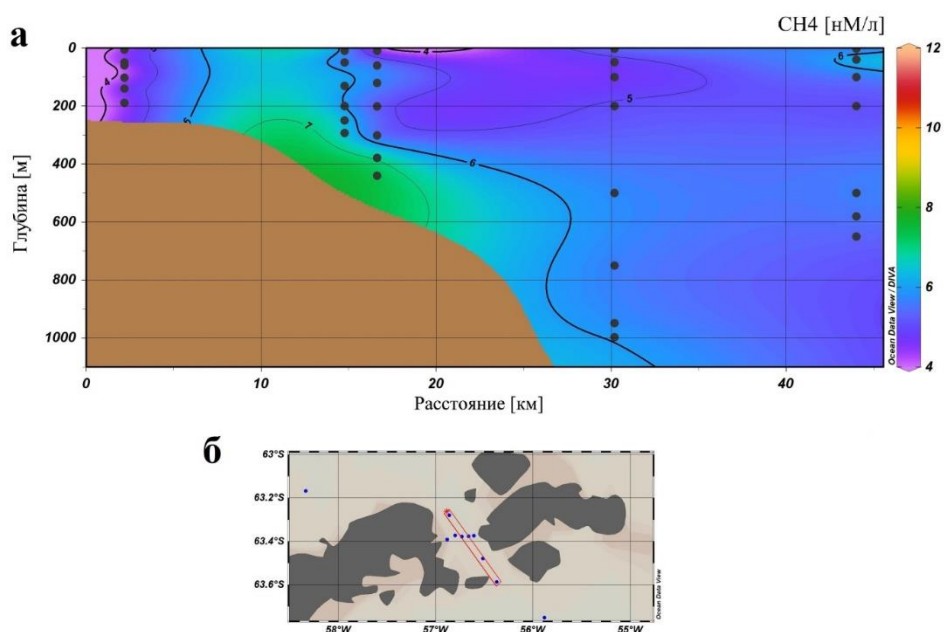


Рисунок 32 – Распределение концентрации метана (а) на продольном разрезе (б) в Антарктическом проливе.

Наиболее важным результатом исследований Антарктического пролива является обнаружение устойчивой стабильной зоны с повышенной концентрацией метана в придонном слое в глубокой части пролива. Вероятно, что повышение концентрации метана в придонном слое воды связано с перемещением водных масс из глубоководной части пролива Антарктик, где на дне существуют еще не закартированные участки газовой разгрузки.

Пролив Антарктик осуществляет перенос водных масс с не высокими концентрациями метана из моря Уэдделла в пролив Брансфилд [187], где эти воды распространяются на запад вдоль Антарктического полуострова (см. рисунки 29 и 30) и формируют транзитные поля метана.

Море Уэдделла

В море Уэдделла выполнен разрез (около 80 км) из 3 гидрологических CTD станций по направлению на юг от пролива Антарктик (рисунок 33), диапазон глубин составил 5 – 371 м, отобрано 19 проб.

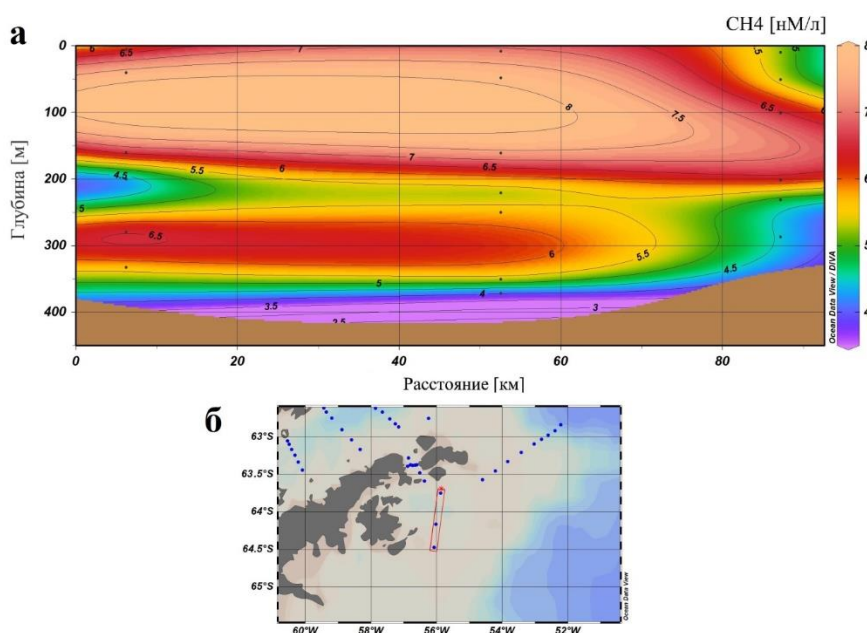


Рисунок 33 – Распределение концентрации метана (а) на разрезе (б) в море Уэдделла к югу от Антарктического пролива.

На разрезе можно выделить 3 слоя: два – с повышенными концентрациями (0 – 200 м и 250 – 350 м) и придонный слой пониженных концентраций.

Выполнен разрез 500 км через море Уэддела (63,6 ю.ш., 54,6 з.д. – 61,1 ю.ш., 46,8 з.д.), диапазон глубин составил 11 – 3270 м, включающий 16 гидрологических станций (135 проб). Как показали газогеохимические исследования, основная водная масса

характеризуется низкими концентрациями метана (1,56 – 3,45 нМ/л), наблюдаемыми в глубоководной части бассейна, причем западная его часть глубже изобаты 2000 м имеет несколько большие значения (до 3,95 нМ/л) по сравнению с восточной. Средние концентрации наблюдаются в поверхностном слое. На крайней восточной станции разреза зафиксированы повышенные концентрации метана (8,95 нМ/л в придонном слое 516 м и 6,5 нМ/л в слое 10-200м), однако, на горизонте 396 м концентрация метана составила 2,8 нМ/л, что может быть вызвано влиянием подводного течения, – подтверждается падением температуры (рисунок 34).

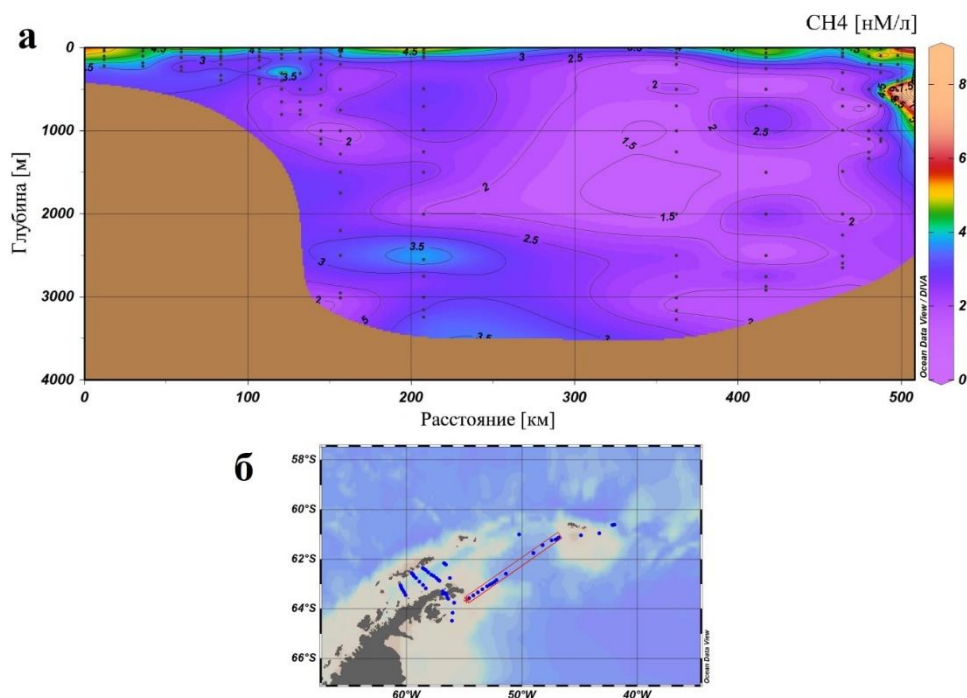


Рисунок 34 – Распределение концентрации метана (а) на разрезе (б) через море Уэдделла

Выводы по главе 5

В ходе работ в Южном океане в рамках рейса 87 НИС "Академик Мстислав Келдыш", 7 декабря 2021 г. – 5 апреля 2022 г. локальные аномалии концентраций метана и их источники обнаружены не были. Подавляющая часть водной массы характеризовалась низкими значениями концентрации метана, что говорит о непостоянстве активности эндогенных (гидротермальных) источников. В целом, район характеризуется невысокими значениями скоростей синтеза и окисления метана. На всех станциях бактериальная утилизация метана преобладала над его синтезом, что говорит о присутствии постоянного источника метана [190]. Вероятно, что повышение концентрации метана связано с перемещением водных масс из глубоководной части Антарктического пролива, где на дне существуют еще не закартированные участки газовой разгрузки.

Таким образом, сопоставление газогеохимических, гидрологических и микробиологических данных указывает на вероятно пульсационную природу гидротермальных источников метана на дне пролива Брансфилд.

По всей видимости, новый источник повышенных концентраций метана на дне пролива Брансфилд, обнаруженный в рейсе 79 НИС "Академик Мстислав Келдыш" носит локальный и непостоянный характер и связан с участком газовой разгрузки, вероятнее всего представляющим собой гидротермальный выход. Найденная метановая аномалия [187], связана с эндогенными процессами в рифтогенной сейсмоактивной зоне, а локализация источника обусловлена особенностями тектонического строения дна пролива Брансфилд и требует более детального дальнейшего изучения. В свете полученных данных можно сделать вывод, что в Атлантическом секторе Южного океана могут находиться районы быстрого и дальнего переноса аномальных полей метана в толще воды, возможно вплоть до поверхности.

Показано, что повышенные концентрации растворенного метана содержатся в области течения пролива Брансфилд и переносятся из моря Беллинсгаузена на запад. Также выявлен привнос растворенного метана из моря Уэдделла через Антарктический пролив в пролив Брансфилд.

Для выявления источников локальных повышенных значений метана в водной толще районов на примере Южно Атлантического течения автором были привлечены океанографические данные и методы Лагранжева анализа, что позволило доказательно судить о переносе метана под слоем пикноклина от его источников на дне.

ГЛАВА 6. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ МАКСИМУМОВ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА ПОД СЕЗОННЫМ ПИКНОКЛИНОМ В РИНГАХ ЮЖНОГО АТЛАНТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ

В данной главе представлено комплексное исследование на стыке ряда дисциплин (газогеохимия, океанография, численное моделирование), которое позволяет получить информацию о происхождении локальных максимумов метана под сезонным пикноклином в рингах Южного Атлантического течения. В совместном исследовании с лабораторией нелинейных динамических систем и лабораторией спутниковой океанологии и лазерного зондирования ТОИ ДВО РАН использовалось поле скоростей AVISO [74], построенное по сетке с шагом $0,25^\circ$, и реанализ CMEMS на основе модели NEMO [174]. Численное моделирование – к.ф.м.-н. М.В. Будянский, визуализация – к.ф.-м.н. П.А. Салюк. Цель представляемой в данной главе работы состоит в выявлении источников повышенных значений метана, обнаруженных автором диссертационного исследования под сезонным пикноклином в рингах Южного Атлантического течения, с привлечением океанографических и Лагранжева методов анализа. Проверяемая гипотеза состоит в том, что источником являются шельфовые районы Южной Америки, в которых происходит выход метана со дна, который накапливается под пикноклином и разносится системой течений юго-западной части Атлантического океана.

6.1. Источники метана в юго-западной части Атлантического океана

Существует множество исследований распределения растворенного метана в Южном океане [88; 255] и Южной Атлантике [102; 112], а также во многих других районах Мирового океана [64; 84; 100; 101; 144; 148; 150; 162; 168; 182; 206; 212]. Аналогичные измерения проводились и в Российских морских экспедициях в Южном океане [145; 187; 190; 194] и Южной Атлантике [165]. Газогеохимическими методами в значительной степени описаны придонные источники метана в Западной Атлантике [80; 81; 95; 114; 158].

Одними из значимых источников метана в водной толще являются выходы нефти и газа [58; 134; 135; 175]. На шельфе Южной Америки первые месторождения нефти были выявлены в 1968 г. на атлантическом шельфе (Гурисема, Бразилия). В настоящее время на бразильском шельфе сформирован новый региональный центр нефтедобычи, связанный с освоением углеводородного потенциала глубоководных месторождений (Марлин, Альбакора и др.) в основном за счет применения инновационных глубоководных геотехнологий. В Латинской Америке в настоящее время известно более 30

нефтегазоносных бассейнов: промышленной нефтегазоносностью характеризуются более 20 бассейнов (рисунок 36) [224; 58].

Кроме того, в районе Фолклендских-Мальвинских островов, в результате распада Гондваны и отделения от нее Южно-Американского и Африканского континентов, образована целая цепочка рифтовых бассейнов. Мальвинский бассейн расположен на самой южной континентальной окраине Аргентины. Несмотря на отсутствие промышленных месторождений, присутствие термогенного газа в кернах и нефтяных пятнах на морском дне указывает на существование активной нефтяной системы в этом бассейне [75; 78; 173; 171].

В бассейне Мальвинских островов известны многочисленные активные и предполагаются возможные источники углеводородов: структуры типа покмарк и «газовый сип», которые являются показателями долговременного выделения как жидких, так и газообразных углеводородов в бассейне [75].

В работе [75] авторы представили распределение зон по наиболее вероятным источникам метана в районе Мальвинского бассейна, включая признаки термогенного газа, полученные в результате изотопного анализа газа и флюида из скважин.

Выше на север на шельфе Бразилии находятся еще два важнейших нефтегазоносных бассейна – Сантос (Бразилия) и Пелотас (Бразилия, Уругвай). В глубоководных отложениях на континентальном склоне бассейна Сантос в Южной Атлантике были обнаружены признаки аутигенной минерализации – пирит и гипс. Сопутствующее присутствие этих минералов указывает на протекание биогеохимических реакций в морской среде, которые могут быть связаны выходами метана [102]. Также в этом районе обнаружены многочисленные структуры типа покмарк, указывающие на активность выделения метана из осадков. Ассоциация аутигенного пирита и гипса была обнаружена в глубоководных бассейнах. Сопутствующее присутствие этих минералов указывает на протекание биогеохимических реакций в морской среде, которые могут быть связаны с восходящей эмиссией метана.

На континентальном склоне бассейна Пелотас на юге Бразилии расположен крупномасштабный объект веерообразной структуры, конус выноса Рио-Гранде. С целью поиска залежей гидратов природного газа в районе этого конуса в период с мая 2011 г. по июль 2013 года были проведены четыре океанографических рейса, в результате которых были обнаружены два скопления покмарков, активные разломы и газовые гидраты в приповерхностных отложениях. Газ, выделенный из образцов газогидрата, представляет собой преимущественно метан (>99.78 %) с незначительными количествами этана. Химический и изотопный состав газа убедительно указывает на биогенное происхождение

проанализированных образцов. Эти новые находки считаются достаточно вескими доказательствами для того, чтобы рассматривать конус Рио-Гранде как новую провинцию газогидратов [171]. Подобные проявления газовыделений из донных источников встречаются и в других областях [195].

В работе [158] дана информация о концентрациях метана и сульфатов в районе бассейна Пелотас, а также показаны профили щелочности в поровых водах, что дало возможность предполагать наличие геохимических зона глубоководных отложений, содержащих гидраты метана в районе нефтегазоносного бассейн Пелотас. Для данного бассейна зафиксировано множество восходящих потоков метана в осадке, которые пространственно связаны со структурами типа чимней и покмарками.

Применение комплексного подхода к рассмотрению вопроса переноса метана на стыке газогеохимии и океанологии [145; 165; 146] показало определяющую роль течений при переносе растворенного метана от его источников, по данным экспедиционных исследований и в сравнении с результатами математического моделирования происхождения различных водных масс.

Полученные результаты распределения метана в водной толще и на границе-вода атмосфера позволят по-новому оценить роль течений в глобальном переносе метана. Этот процесс должен учитываться при построении климатических моделей, а также при построении моделей газопереноса на границе «океан-атмосфера».

6.2. Океанографические особенности района исследований

Исследование системы течений в рассматриваемом районе было проведено в 2022 году во время рейса 87 НИС «Академик Мстислав Келдыш» и подробно представлено в работе [165].

Южно-Атлантическое течение (ЮАТ) - южное пограничное течение субтропического круговорота в южной части Атлантического океана. Два интенсивных течения в Южной Атлантике - теплое Бразильское течение и холодное Мальвинское течение, образуют область слияния примерно при 38-40° ю.ш. [125; 126; 180]. Между этими двумя течениями существует интенсивный океанический фронт, на котором образуются ринги противоположного знака с промежуточными водными массами между ними. Мальвинское течение связано с Субантарктическим фронтом, а Бразильское течение образует Бразильский фронт. В районе слияния эти фронты сходятся в единый—Бразильско-Мальвинский фронт [79]. Слияние Мальвинского и Бразильского течений образует мощный фронт, который порождает множество рингов и водоворотов. После столкновения Мальвинское течение поворачивает обратно на юг в качестве Обратного

Мальвинского течения [125]. Обратное Мальвинское течение и продолжение Бразильского течения приводят к образованию рингов, вихрей и струй [117]. В целом, район океанографического разреза является частью сложной системы течений в юго-западной части Атлантического океана (рисунок 35), и разрез может пересекать как субтропические воды, переносимые Бразильским течением, так и субантарктические воды, переносимые Мальвинским течением. Схема течений в районе исследований показана на рисунке 35, в работе [185] приведены результаты in-situ измерений, дистанционного зондирования и численного моделирования, а работе [118] приведены результаты измерения векторов скорости течений.

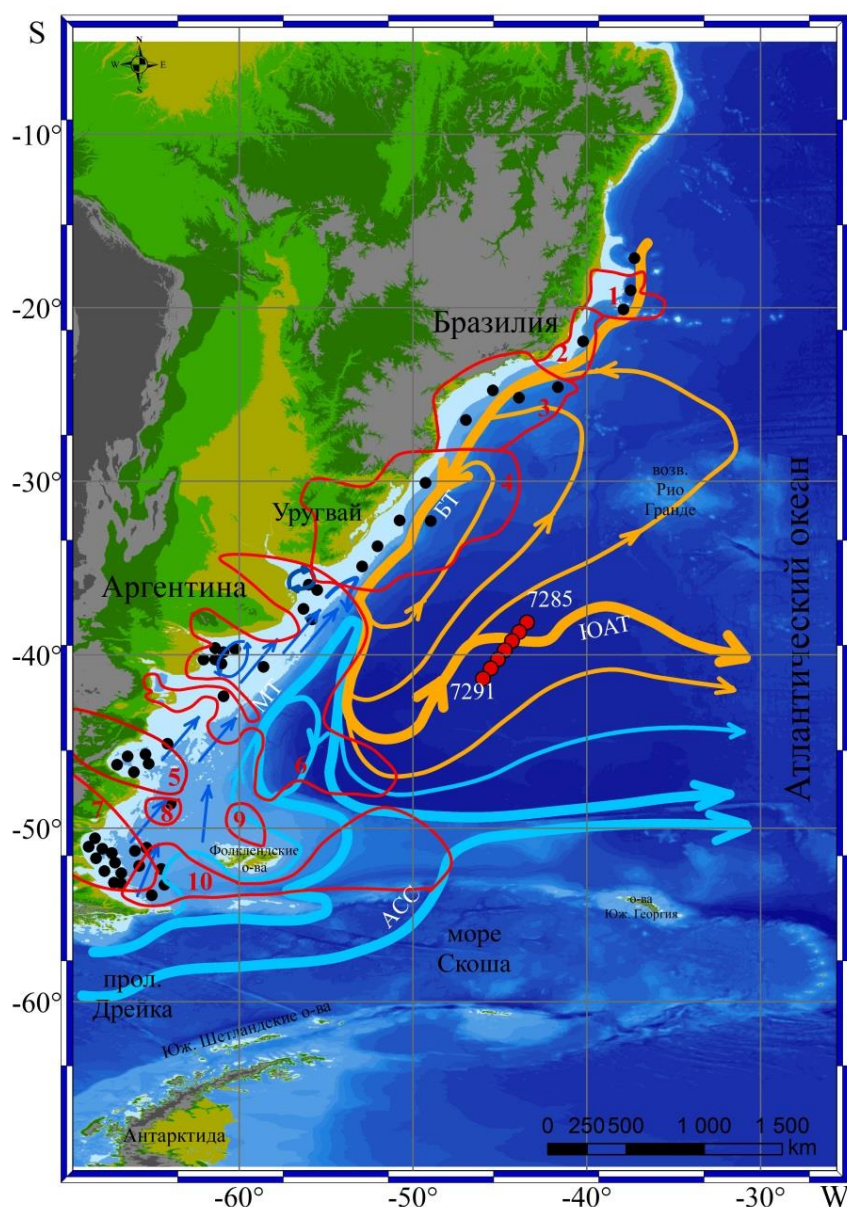


Рисунок 35–Район исследования. Синими и желтыми стрелками схематично показаны направления течений: БТ – Бразильское течение, МТ – Мальвинское течение, ЮАТ – Южно-Атлантическое течение, АЦТ – Антарктическое циркумполярное течение.

Крансыми линиями обозначены границы нефтегазоносных бассейнов (1 – Эспирато-Сантос, 2 - Кампос, 3 - Сантос, 4 - Пелотас, 5 – Сан-Джорджия, 6 – Дель-Саладо, Гольфо-Сан-Хорхе, Кларомеко, Колорадо-Марино, полуостров Вальдес, Роусон, Аргентина, 7 - Аустрал-Марина, 8 - Сан-Хулиан, 9 - Северные Мальвинские острова, 10 – Мальвинские острова и Восточные Мальвинские острова) [236, 58]. Схема течений- на основе работ [25; 237; 238; 247; 184; 185; 99; 118; 182]. Черными точками обозначены места добычи нефти и газа [236; 85; 178; 214], красные точки - это станции отбора проб рейса АМК87 (7285-7291).

6.3. Перенос метана под пикноклином течениями: сопоставление результатов газогеохимических, океанологических измерений и численного моделирования.

На основе данных представленных на рисунке 35 и с учетом особенностей Лагранжева анализа выбраны координаты отрезков прямых линий (таб. 2, рисунок 36), заданных в девяти Латино-Американских бассейнах западной части Южной Атлантики, а также в Антарктическом Циркумполярном и Мальвинском течениях. Эти отрезки задавались для проведения численных экспериментов Лагранжева анализа для определения потенциальных источников метана, от которых растворенный метан мог распространяться под сезонным пикноклином к конкретным океанографическим станциям разреза через меандры Южного Атлантического течения.

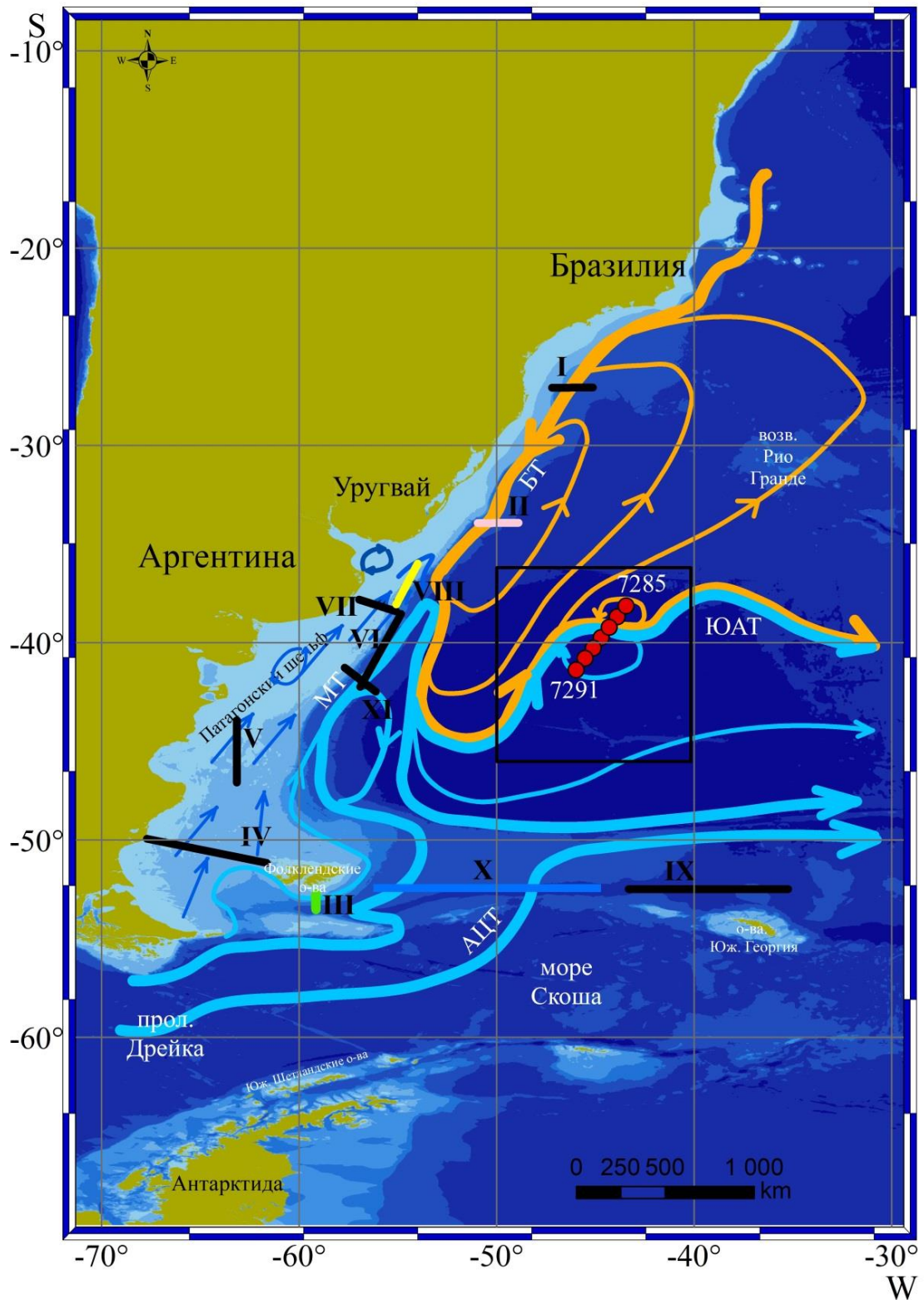


Рисунок 36–Район исследования. Черный прямоугольник ограничивает зону отбора проб, красные точки - станции отбора проб АМК87 (7285-7291). Синими и оранжевыми стрелками схематично показаны направления течений (такие же, как на рисунке35), вихри в зоне отбора проб взяты из [165]. Римскими цифрами обозначены отрезки, приведенные в таблице 2.

Таблица 2– Отрезки прямых линий, ограничивающих потенциальные источники метана и/или пути его дальнейшего возможного переноса

Номер отрезка и цвет*	Описание	Координаты начала отрезка	Координаты окончания отрезка
I, черный	Бассейн Сантос поперек Бразильского течения	27S,47.5W	27S,45W
II, розовый	Бассейн Пелотас поперек Бразильского течения	34S,51.5W	34S,49.5W
III, зеленый	К востоку от Мальвинского бассейна поперек прибрежную ветвь Мальвинского течения	52.3S,59.5W	53.3S,59.5W
IV, черный	К северу от Мальвинского бассейна	50S,68W	51.5S,60.5W
V, черный	Бассейн Гольфо-Сан-Хорхе	44.0S,63.4W	46.8S,63.4W
V,I черный	К востоку от бассейна Колорадо-Марино	38.5S,55.3W	42.3S,57.3W
VII черный	К северу от бассейна Колорадо-Марино	38.5S,55.4W	37.8S,57.3W
VIII, желтый	Бассейн Дель Саладо	36.3S,54.5W	38.2S,55.6W
IX, черный	Бассейн Святого Георгия	52.5S, 44W-30W	
X, синий	Поперек ответвления Антарктического циркумполярного течения (АСС), которое станет морским ответвлением Мальвинского течения	52.5S, 57W-45W	42.5S,56.7W
XI, черный	Поперек Мальвинского течения (прибрежное и морское ответвления)	41.3S,58W->	42.5S,56.7W

Выполненные судовые станции можно классифицировать следующим образом: станции 7285, 7286, 7287 выполнены в антициклоническом вихре внутри северного меандра; станции 7289, 7290, 7291 внутри циклонического вихря внутри южного меандра; станция 7288 – между двумя рассматриваемыми вихрями. Отдельно стоит обратить внимание на то, что ЮАТ состоит из двух струй, а станция 7288 находится между локальными максимумами абсолютной скорости течения [165], т.е. между двумя этими струями.

Концентрации метана в приповерхностном слое моря на глубине 5 м

На рисунке 37 показана карта распределения поверхностных измерений метана на горизонте 5 м, совмещенная с картой происхождения вод, в полях скоростей течений AVISO. Желтый цвет соответствует субантарктическим водам переносимых ЮАТ и МТ, синий цвет соответствует субтропическим водам, переносимых БТ и ЮАТ, розовый цвет – воды, привнесенные от берегов Южной Америки. Зеленые треугольники соответствуют центрам антициклонических вихрей. Красные треугольники – центры циклонических вихрей. Среднее значение концентрации метана на глубине 5 м в районе рассматриваемой вихревой пары составило 6,5 нМ/л, что выше средних значений по Атлантическому океану 5,7 нМ/л, - согласно исследованиям, в рейсе АМК87.

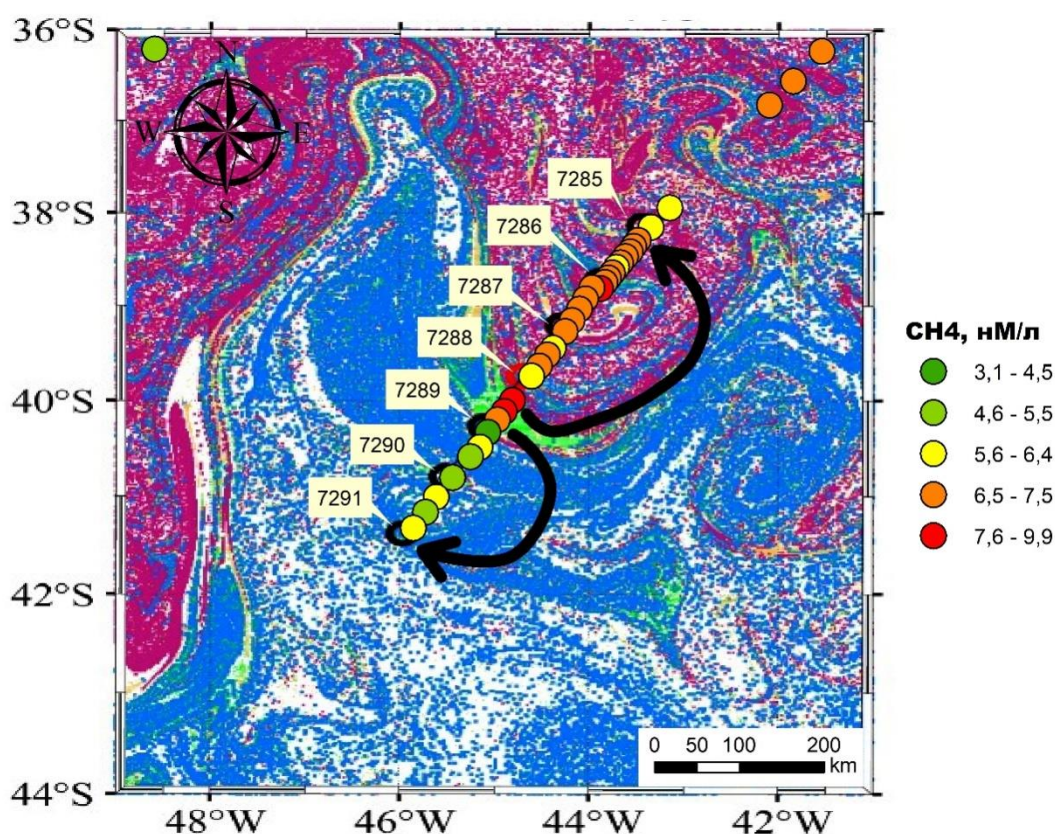


Рисунок 37–Привнос вод различного происхождения на основе Лагранжева анализа (Будянский М.В.) согласно заданным в Таблице 2 отрезкам в район отбора проб и распределение растворенного метана (цветные круги) на горизонте 5 м, траектории переноса метана в рингах вихрей показаны белыми стрелками.

Сопоставление полученных газогеохимических результатов с картой происхождения различных водных масс (рисунок 37) четко показывает, что повышенные концентрации метана в слое 5 м (6,5-7,6 нМ/л) содержатся в водах северного происхождения, тогда как южные холодные воды характеризуются меньшими значениями концентрации метана –

4,4-6,4 нМ/л. При этом в области слияния северных и южных вод наблюдается абсолютный максимум метана 7,6 нМ/л.

Концентрация метана в слое 0-500 м

Исследование картины распределения концентрации метана на океанографическом разрезе в диапазоне глубин 0-500 м представлено на рисунке 38. В антициклоническом вихре максимальные концентрации метана 4,67нМ/л обнаружены на горизонте 15м на станции 7285, в циклоническом вихре максимальные концентрации метана 6,78нМ/л обнаружены на горизонте 70м на станции 7291. Абсолютный максимум метана 12,91 нМ/л выявлен на границе между вихрями на горизонте 110м в районе станций 7288-7289. В центрах вихрей показатель концентрации метана (4 нМ/л) ниже среднего значения по Атлантическому океану. Видно, что указанные выше абсолютный и локальный максимумы метана находятся в струе циклонического вихря (рисунок 38а). Кроме того, повышенные концентрации метана на горизонте 5м также переносятся этой струей от станций 7288-7289 к 7291 (рисунки 37б и 38а).

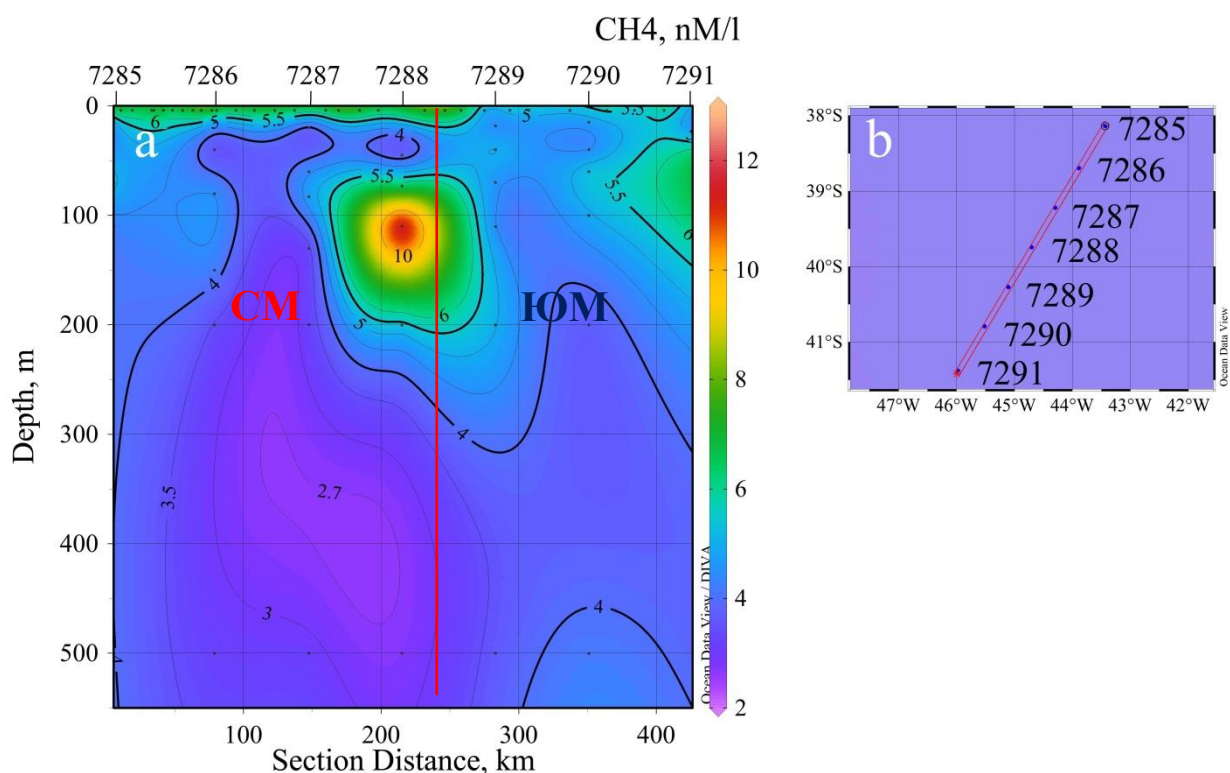


Рисунок 38—Распределение метана (а) на океанографическом разрезе (б). Красная линия схематично разделяет Южный меандр (ЮМ) и Северный меандр (СМ) в соответствии с наблюдениями плотности во время рейса АМК87.

На рисунках 36 и 38 видно, что более насыщенные метаном воды принесены в точку слияния южным, холодным течением. При этом метан в основном концентрируется под

нижней границей пикноклина, при этом область максимальных концентраций с горизонтальным масштабом около 100 км находится между вихревой парой в слое 50-200м. Эта область максимальных концентраций метана находится в области максимума скоростей течений согласно измерениям векторов скорости течений, на данном разрезе [171].

Распределение точек, прошедших отрезки до района океанографического разреза.

Рассмотрены распределения точек в районе проведения океанографического разреза, прошедших через заданные отрезки из таблицы 2. Распределения получены с помощью Лагранжева анализа.

На рисунке 39 приведены карты для отдельных отрезков на 12.01.2022 г. Это дата середины проведения океанографического разреза, и дата, когда была обнаружена максимальная концентрация метана на станции 7288. На рисунке 40 точки, пришедшие от различных отрезков, наложены на одну карту, которые построены за период 10-14.01.2022г., чтобы проанализировать динамическую изменчивость результатов. На обоих рисунках представлены результаты как для использования данных AVISO, так и данных CMEMS на горизонте 50 м.

На рисунках 39 и 40 представлены результаты только для тех отрезков, от которых пришло достаточное количество точек в район измерений, либо картина распределения точек была уникальной. Для отображения выбраны отрезки II, III, VIII, X. Исключены из дальнейшего рассмотрения отрезки I, IV, V, VI, VII, IX, XI по следующим причинам:

Для отрезка I получено очень похожее распределение на отрезок I, поскольку они оба пересекают основную струю Бразильского течения в достаточной близости друг от друга, поэтому в дальнейшем рассматривается только отрезок II, как более общий случай.

Точки, прошедшие через IV, V и IX отрезок в своем большинстве не дошли до района рассмотрения. В случае IV и V отрезков это связано как с не очень выраженными течениями в прибрежной части Патагонского шельфа, так и с тем фактом, что данные AVISO и CMEMS могут быть недостаточно корректными в прибрежной зоне. В случае отрезка IX по всей видимости не происходило переноса точек в район измерений, и все точки от отрезка IX уходили в более восточном направлении.

Распределение для отрезка VII похоже на распределение для отрезка VIII, но не такое четкое. Это связано с близким расположением отрезка VII к береговой линии, где хуже работают как данные AVISO, так и NEMO.

Анализ отрезка XI привел к очень похожему результату, полученному для отрезка 6. Оба отрезка пересекают МТ в зоне слияния береговой и морской ветви течений. В свою

очередь сумма результатов для III отрезка (береговая ветвь МТ) и X отрезка (морская ветвь МТ) совпадает с результатами для VI и XI отрезков, поэтому для более избирательного анализа оставлены результаты для III и X отрезков.

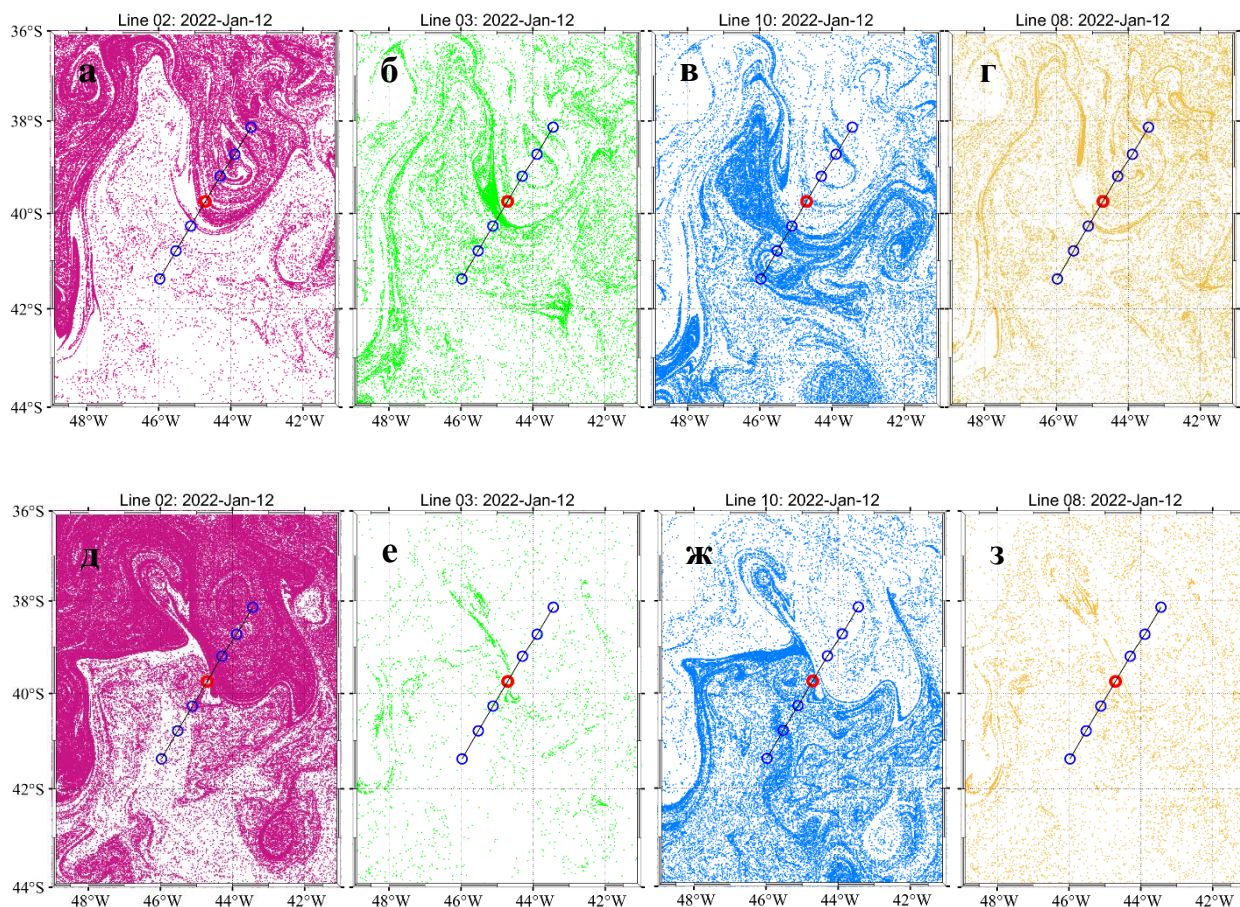


Рисунок 39—Пространственное распределение Лагранжевых точек в районе измерения океанографического разреза, пересекающих отрезок II (а,д), 3 (б,е), X (в,ж), VIII (г,з) и достигших рассматриваемого района 12 января 2022 г. Верхний ряд рисунков (а,б,в,г) – Лагранжев анализ по данным AVISO. Нижний ряд рисунков (д,е,ж,з) – Лагранжев анализ по данным реанализа SMEMS (модель NEMO) для глубины 50 м. Круги – местоположения судовых станций, красный круг – станция с максимально измеренной концентрацией метана на глубине около 100м.

На рисунке 39 (а,е) видно, что как по данным AVISO, так и по SMEMS точки пришедшие из Бразильского течения в основном концентрируются на первых трех судовых станциях (7285-7287) и частично на четвертой станции (7288). В этой же зоне измерены повышенные концентрации метана в слое 5 м (рисунки 37 и 38). При этом в более глубоких слоях концентрации метана низки: менее 5 нМ/л для всех точек, кроме

одной, на станции 7286 на глубине около 100м, где концентрация метана равна 7 Нм/л. Станция 7286 находится в центре антициклонического вихря.

На рисунке 39 (б,е) видно, что точки, пришедшие с береговой ветвью МТ, группируются около центральной станции 7288. При этом по данным спутниковой альтиметрии AVISO максимальная плотность зеленых точек соответствует максимальной концентрации метана в слое 5 м. А по данным СМЕМС для глубины 50м максимальная плотность точек точно соответствует положению станции 7288, где были обнаружены максимальные концентрации метана.

На рисунке 39(в,ж) представлен результат распространения точек с морской ветвью МТ, по которой эти точки в основном группируются около станций 7289-7291, где были пониженные значения концентраций метана в слое 5м. А в более глубоких слоях высокое значение концентрации метана (8 нМ/л) было только на станции 7291.

На рисунке 39(г,з) видно, что часть плотно расположенных точек, перемещающихся от отрезка VIII, приближается к центральной точке разреза на станции 7288, но на момент 12 января 2022г. не достигает его. Это более четко видно по данным AVISO, чем по данным СМЕМС.

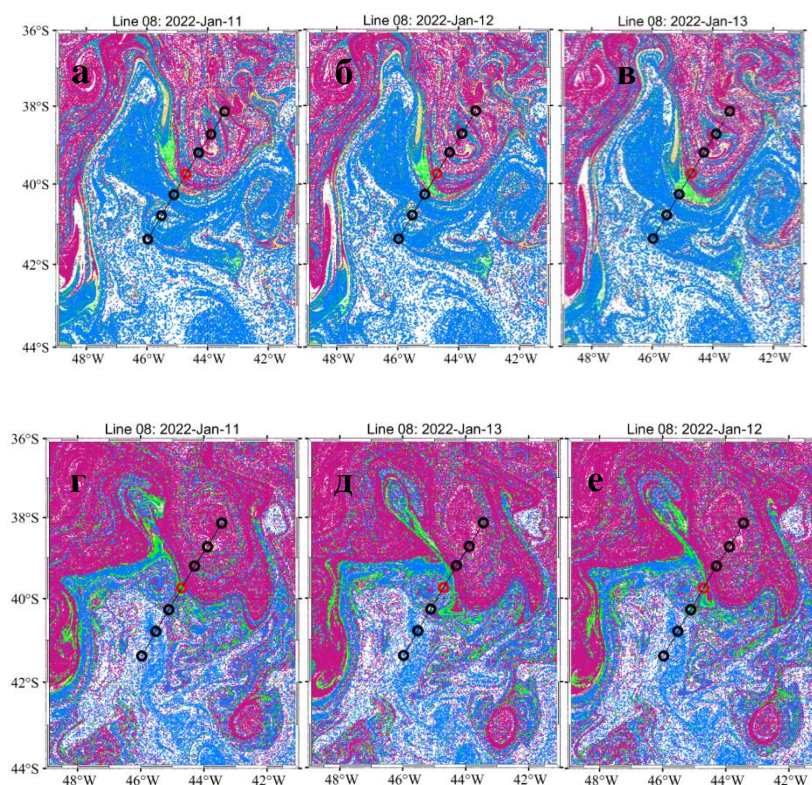


Рисунок 40–Пространственное распределение Лагранжевых точек, пересекших отрезки II,III,VIII,X и достигших рассматриваемого разреза 11.01.2022 г., 12.01.2022 г. и 13.01.2022 г. Круги – местоположения судовых станций, красный круг – станция с максимально измеренной концентрацией метана на глубине около 100м. Верхний ряд

рисунков (а,б,в) – Лагранжев анализ по данным AVISO. Нижний ряд рисунков (г,д,е) – Лагранжев анализ по данным реанализа CMEMS (модель NEMO) для глубины 50 м.

При рассмотрении перемещения лагранжевых точек с 11 по 13 января 2022 г., представленных на рисунке 40, видно, что основная масса зеленых точек (от прибрежной ветви МТ) пересекает центральную станцию 7288 с максимальной концентрацией метана. Точки красного цвета (от БТ) в основном пересекают станции 7285-7287. Точки синего цвета (морская ветвь МТ) пересекают станции 7289-7291. Распространение желтых точек (от прибрежной части Патагонского шельфа) четко видно только на данных AVISO, и траектория их перемещения пролегает через центральную станцию 7288, к которой они подходят примерно 14 января 2022 г.

Карта происхождения водных масс (рисунок 37) показывает, что южные воды (7289-7291) принесены в район рассматриваемых вихрей с шельфа Аргентины и Мальвинского бассейна. Тогда как северные воды (7285-7287) принесены с шельфа Бразилии. В первом случае – это районы нефтегазоносных бассейнов Эспириту-Сантос, Кампос, Сантос, Пелотас, Сан-Джорджо, Дель Саладо, Гольфо-Сан-Хорхе, Кларомеко, Колорадо-Марино, полуостров Вальдес, Роусон, Аргентина, Аустрал-Марина, Сан-Хулиан, Северные Мальвинские острова, Мальвинские острова и Восточные Мальвинские острова (рисунок 36), где возможны выходы углеводородных газов, в том числе и метана.

Так, например, в работе [80] авторы определили несколько активных, молодых и возможных источников углеводородов в Мальвинском бассейне. Возможные активные выходы газа включают газо-флюидпроводящие каналы, покмарки и BSR аномалии. В 2001 году были описаны [150] залежи газовых гидратов в районе континентального склона Аргентины. Исследования двух сейсмических профилей показывают присутствие метана на аргентинской континентальной окраине, к востоку от полуострова Вальдес и вдоль юго-востока Мальвинского плато. Газовые гидраты были обнаружены на глубинах более 430 м (более 40 атмосфер) с предполагаемым геотермальным градиентом $27\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Разрушение газовых гидратов может привести к эмиссии метана в водную толщу [8].

Повышенные концентрации метана от 46 до $4517\text{ нл}/\text{л}^{-1}$ обнаружены вдоль шельфа Аргентины [64] в 79-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (март 2020 г.). В работе [75] описаны индикаторы эмиссии газа в бассейне Колорадо. Была проанализирована их связь со структурными элементами. Предполагается, что термогенный газ в настоящее время генерируется на склоне бассейна из зрелых пород-источников раннего пострифтового периода в пределах раннего мела (Аптианский) и мигрирует вертикально,

через стратиграфическую колонку, питающую покмарки. Также не исключается дополнительная боковая миграция вверх по стратиграфическим слоям.

Наряду с источниками метана термогенного происхождения существуют прибрежные экосистемы апвеллинга, которые являются районами высокой продуктивности и сильного газообразования, где большинство газов, таких как N_2O и CH_4 , образуются в подземных водах в результате анаэробного метаболизма [115].

В исследовании [112] говорится, что высокие концентрации CH_4 наблюдаются в узкой эвтрофной зоне, подверженной прибрежному апвеллингу. Эти условия явно отличаются от тех, которые наблюдаются в расширенном олиготрофном субтропическом круговороте. Кроме того, CH_4 также имеет тенденцию накапливаться в мезотрофной зоне, где океанографические условия, такие как стратификация, мезомасштабные вихри и эффект островной массы, могут вызвать присутствие микробной биомассы, которая может генерировать CH_4 .

Исследуемые океанографические разрезы (рисунки 36 и 37) расположены в районе глубоководной Аргентинской котловины в зоне влияния Южного Атлантического течения. Повышенные концентрации метана (до 12 нМ/л) были обнаружены только в слое 50-200 м. Связь аномальных концентраций с нижележащими водными слоями не установлена (рисунок 37). Это указывает на привнос метана в район исследований течениями. В работах [145; 146] показано, что растворенный метан переносится течениями от своего источника на значительные расстояния, концентрируясь под нижней границей сезонного пикноклина.

Проведенное моделирование позволило установить вероятные источники от которых метан был привнесен в район исследований. Яркие отличия концентраций метана как на поверхности (рисунок 36), так и на океанографическом разрезе (рисунок 37) объясняются привнесением метана водами различного происхождения.

Рассмотрим вероятные источники метана и пути его переноса по результатам Лагранжева анализа, проведенного в соавторстве с к.ф.-м.н. М.Е. Будянским.

Отрезок II

Отрезок II располагается в нефтегазоносном бассейне Пелотас и пересекает основной поток ВС, через который дополнительно могут распространяться воды из бассейнов Эспирато Сантос, Кампос, Сантос, расположенные на шельфе Бразилии. Результаты, представленные на рисунке 40, указывают, на то, что источником повышенных концентраций метана в северном меандре являются нефтегазоносные бассейны на шельфе Бразилии. Миграция метана, вероятно, осуществляется Бразильским течением, что подтверждается данными Лагранжевого анализа.

На рисунке 41 показаны возможные пути обратного переноса частиц от станции 7285 до отрезка II. По данным AVISO видно, что перенос происходит как Бразильским течением, так и частью Южно-Атлантического круговорота и системой малых круговоротов, возникаемых между ними. Разброс следов точек, представленных на рисунке 41 и не четкость выделяемых генеральных траекторий связана с эффектами динамического хаоса.

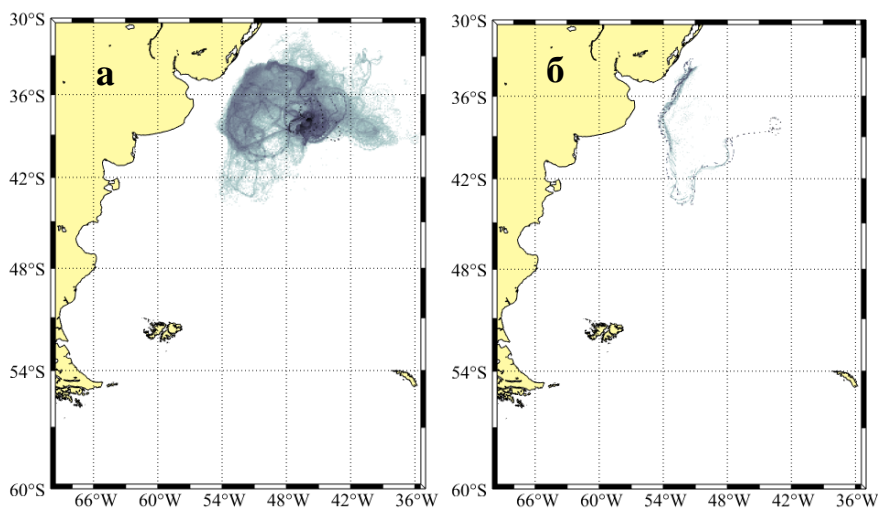


Рисунок 41 – Дазиметрическая карта – плотность траекторий обратного распространения точек от станции 7285 до отрезка II. (а) – по данным AVISO, (б) – по данным CMEMS

Отрезок III

Отрезок III соответствует Мальвинскому нефтегазоносному бассейну, расположенному южнее Фолклендских островов. Его пересекает береговая ветвь Мальвинского течения (ISMC), которая объединяется с OSMC в районе 42S; 58W. На рисунке 40 (б,е) видно компактную структуру частиц клиновидной формы на данных AVISO и в форме капли на данных CMEMS (выделенные зеленым цветом), пересекающую исследуемый разрез в районе станций 7288-7289. Здесь же и наблюдается абсолютный максимум метана 12 нМ/л на горизонте 110 м, а также локальный максимум 7.6 нМ/л – в слое 5 метров.

На рисунке 42 показаны обратные траектории движения частиц от станции 7288 с максимальной концентрацией метана до отрезка III. На рисунке 42а – результат, построенный по данным AVISO, а на рисунке 42б – по данным CMEMS. Видно, что частицы преодолели расстояние ~3200 км от Фолклендских островов (отрезок III) до исследуемого разреза в виде компактной структуры.

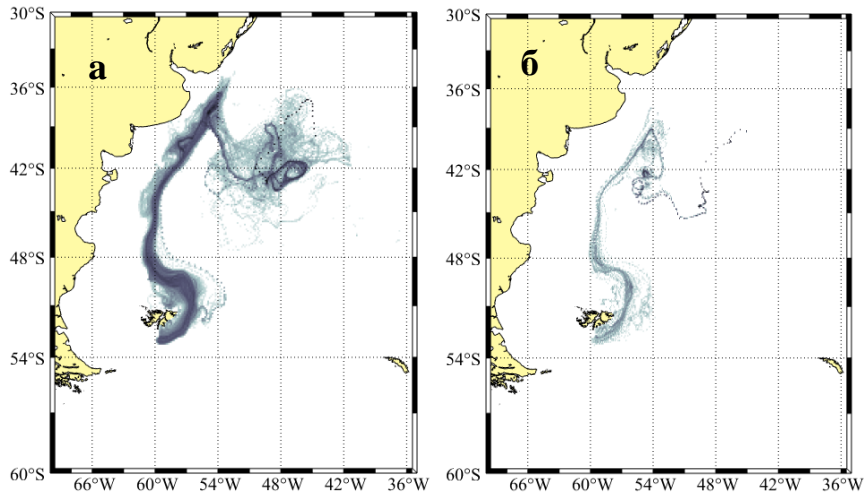


Рисунок 42 – Дазиметрическая карта – плотность следов обратного распространения точек от станции 7288 до отрезка III.(а) – по данным AVISO, (б) – по данным CMEMS

На рисунке 42 представленные траектории более выраженные, чем на рисунке 39, но тем не менее все равно есть следы точек, хаотично распространенные по сторонам. Однако в случае, если проводить Лагранжев анализ распространения точек до отрезка 3 не от судовой станции 7288, а непосредственно от компактной клиновидной структуры зеленых точек, представленной на рисунке 40 (б,е), то получим ярко выраженную траекторию перемещения точек практически без отклонений на альтернативные пути распространения, которая представлена на рисунке 43.

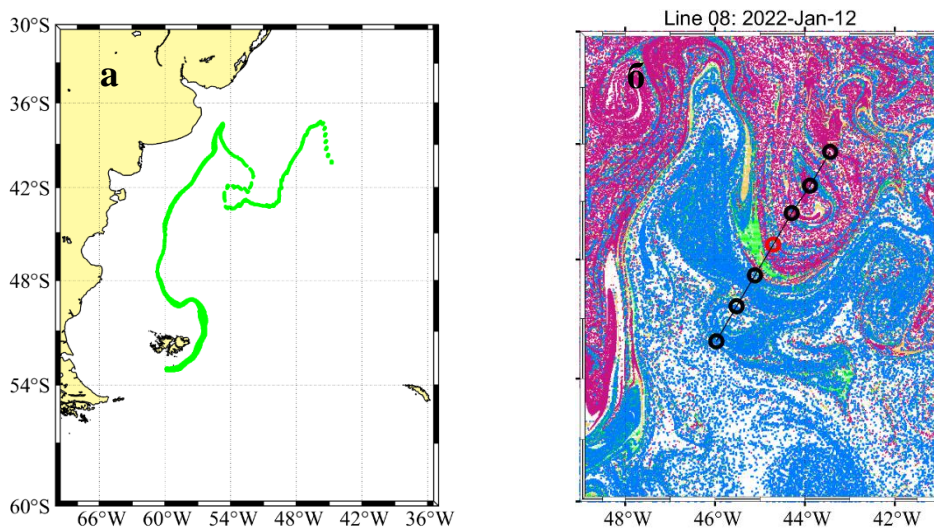


Рисунок 43 – (а) Траектория обратного распространения точек от прямоугольника в компактной клиновидной структуре (зеленый цвет) до отрезка III, прямоугольник выделен белым цветом; (б) компактная структура частиц из рисунка 40 б.

Отрезки VII и VIII.

Отрезки VII и VIII соответствуют нефтегазоносным бассейнам Дель Саладо, Гольфо-Сан-Хорхе, Кларомеко, Колорадо-Марино, полуостров Вальдес, Роусон, Аргентина, расположенным в северном Патагонском шельфе. Отрезок VIII находится к западу от зоны слияния Бразильского и мальвинского течений, отрезок VII находится ближе к береговой черте севера Аргентины. Результаты анализа на рисунке 40 (в,е) показывают, что недалеко от станции 7288 с максимальными концентрациями метана также наблюдается компактная структура, которую можно считать потенциальной «капсулой метана».

На рисунке 44 показана обратная траектория распространения лагранжевых частиц от станции 7288 до отрезка VII. Видно, что эти траектории пересекают, как отрезок VIII, так и находятся в зоне распространения вод из залива Ла-Плата. Таким образом, северную часть Патагонского шельфа также можно рассматривать, как потенциальный источник метана, который был зарегистрирован на судовом разрезе.

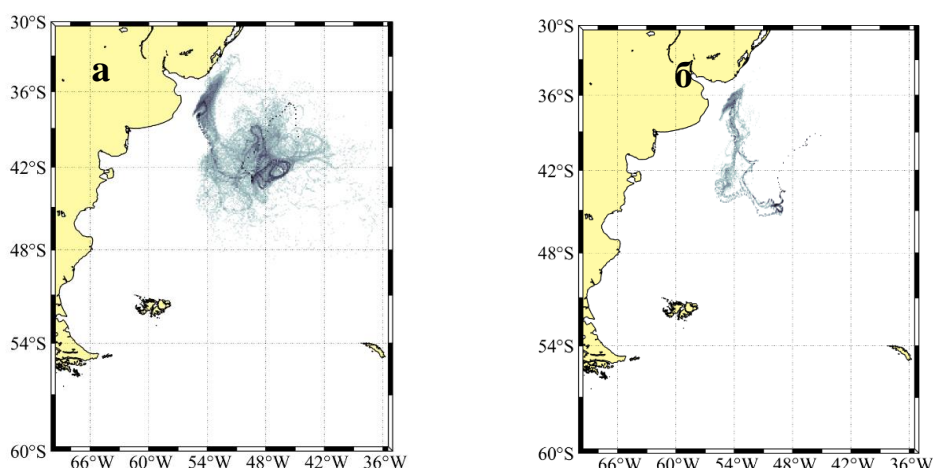


Рисунок 44 – Дазиметрическая карта – плотность следов обратного распространения точек от станции 7288 до отрезков VII и VIII. (а) – по данным AVISO, (б) – по данным CMEMS

По аналогии с результатами для II и III отрезков, на рисунке 45 помимо ярко-выраженных траекторий наблюдаются хаотически распространенные следы частиц. Для того, чтобы проследить распространение компактной структуры построен рисунок 45, где обратные траектории построены от компактной каплевидной структуры (желтый цвет), до отрезка VIII. Видно, что здесь, как и на рисунке 44, получается ярко-выраженная траектория перемещения всех частиц без хаотического отклонения отдельных частиц на альтернативные направления.

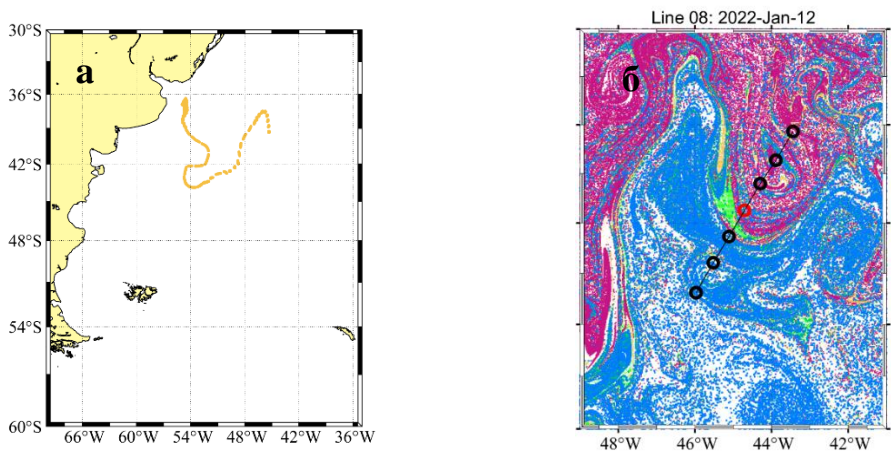


Рисунок 45 – (а) Траектория обратного распространения точек от прямоугольника в компактной каплевидной структуре (желтый цвет) до отрезка VIII, прямоугольник выделен белым цветом. (б) компактная структура частиц из рисунка 40 б.

Анализ динамики распространения частиц от всех отрезков в районе разреза (рисунок 41) показывает, что компактные структуры частиц, принесенных от отрезков III и VIII пересекают океанографический разрез в районе локального максимума метана на горизонте 5 метров и абсолютного максимума на горизонте 110 м. Полученные выводы подтверждают механизм переноса метана в струе течений от его источников в виде компактной структуры – «капсулы метана».

Вывод по главе 6

Проведены комплексные исследования концентрации растворенного в морской воде метана в южном секторе западной Атлантики. Сопоставление результатов газогеохимических, океанографических и результатов моделирования показало, что растворенный в морской воде метан от придонных источников на Патагонском шельфе и Мальвинского бассейна, а также на шельфе Бразилии переносится течениями в район слияния Мальвинского и Бразильского течений, откуда дальше распространяется в Южном Атлантическом течении, в меандрах которого образуется пара вихрей противоположного знака. Показано, что переносимый в рингах Южного Атлантического течения метан образует область максимальных концентраций под нижней границей пикноклина в слое 50-200 м в зоне взаимодействия вихрей. Инвертированный во времени Лагранжев анализ происхождения различных водных масс показал, что повышенные концентрации метана в поверхностном слое антициклонического вихря принесены с шельфа Бразилии, а абсолютный максимум метана под пикноклином в центре Южного Атлантического течения связан с переносом компактной лагранжевой структуры с Патагонского шельфа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены основные особенности распределения метана в Татарском проливе. Татарский пролив характеризуется сложной системой течений и мезомасштабными вихрями противоположных знаков, формирующимися над проливом. Установлено, что в мае–июне, растворенный в морской воде метан поступает из его источников, расположенных на западном шельфе острова Сахалин и в глубоководной зоне вблизи оси Татарского пролива. В начале теплого сезона растворенный метан переносится на север Западно-Сахалинским течением над Восточным шельфом Татарского пролива в слое под сезонным пикноклином.

Определены основные особенности распределения метана на меридиональном разрезе вдоль 134° в.д. от поднятия Ямато до континентального склона Японской котловины. Локальный максимум метана на его вертикальном профиле в холодном Приморском течении, Восточно-Корейском теплом течении и в мезомасштабном антициклоническом вихре на 134° восточной долготы в Японском бассейне расположен под нижней границей сезонного пикноклина и распространен в слое 50-150м в северо-западной части Японского моря.

В районе осадочного бассейна реки Красной (залив Тонкин), в пределах газового месторождения Кен Бау, подтверждена и уточнена аномально высокая концентрация метана, выявленная в 80-е годы прошлого столетия. Показано, что часть метана, находящегося в водах в районе газового месторождения Кен Бау может переноситься на юг прибрежным Вьетнамским течением, адаптированным к условиям зимнего северо-восточного муссона.

Показано, что система тектонических разломов, сформировавших осадочные бассейны Фу Хань и реки Красной, создает необходимые эндогенные условия для образования и миграции метана в донные осадки и морские воды. Количественные характеристики метана в осадках бассейна Фу Хань увеличиваются с севера на юг. Это можно объяснить увеличением глубинной генерации газов и повышением проницаемости в узле пересечения системы Западного разлома и сдвиговой зоны Туи Хоа. Прямая связь высоких концентраций метана в донных осадках и повышенного содержания этого газа в водной толще бассейна Фу Хань не обнаружена. В связи с этим, метан в воде этого района может быть продуктом частично местных источников, а частично доставленным сюда из других районов Южно-Китайского моря течениями.

Установлена большая роль тайфуна NAKRI в транспортировке метана в водную толщу бассейна Фу Хань. Под его влиянием были созданы благоприятные

гидродинамические условия для переноса растворенных газов от нефтегазовых скоплений и месторождений у побережья о-вов Калимантан и Палаван в бассейн Фу Хань.

На многих примерах описано как термохалинный барьер частично препятствуют распространению растворенного метана в поверхностный водный слой. Этот и другие приведенные в диссертации факторы указывают на необходимость их учета при выполнении исследования распространения климатически активных веществ.

Детально изучено распределение газогеохимических полей метана в проливе Брансфилд. Выявлена связь распределения метана в воде с системой течений пролива. Установлены повышенные значения концентраций метана, привносимого в пролив Брансфилд теплым течением из моря Беллинсгаузена. Низкие концентрации метана также характерны для холодных вод моря Уэдделла, которые осуществляют транзит водных масс в Атлантический океан.

Проведены комплексные исследования концентрации растворенного метана в южном секторе западной Атлантики. Сопоставление результатов газогеохимических, океанографических исследований и результатов моделирования показало, что растворенный в морской воде метан от придонных источников на шельфе Аргентины и Мальвинского бассейна, а также на шельфе Бразилии переносится течениями в район слияния Мальвинского и Бразильского течений, где образуется пара вихрей противоположного знака. Показано, что переносимый в рингах Мальвинского и Бразильского течений метан образует область максимальных концентраций под нижней границей пикноклина в слое 50-200м в зоне слияния вихрей.

Таким образом, на примере разных районов Мирового океана выявлена и описана общность базовых механизмов переноса растворенного метана. В этой связи особенно важным является использование методической основы на стыке разных дисциплин, которая позволяет интерпретировать источники и аномальные поля метана в различных пространственных и временных масштабах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аблаев А.Г. Угленосность побережий и шельфа западного сектора Япономорского региона / А.Г. Аблаев., С.М. Тащи, Н.Г. Мельников // Геология и полезные ископаемые шельфов России / гл. ред. д.г.-м.н. М.Н. Алексеев. - М.: ГЕОС, 2002. – С. 256–260.
2. Астахов А.С. Динамика процессов дефлюидизации Центрально-Сахалинского глубинного разлома при сейсмической активизации (по результатам мониторинга Южно-Сахалинского грязевого вулкана в июле-августе 2001 г.) / А.С. Астахов, К.Ф. Сергеев, О.А. Мельников, А.В. Присяжнюк, Р.Б. Шакиров и др. // Геохимия. – 2001. – № 4. – С. 422—433.
3. Барташевич О.В. Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений / О.В. Барташевич [и др.]. – М.: Недра, 1980. – 300 с.
4. Безверхний В.Л. Геологическое строение докайнозойского фундамента Япономорского шельфа у берегов Приморья / В.Л. Безверхний, Е.П. Леликов, Е.П. Терехов, В.П.Филатьев // Геологические исследования в окраинных морях северо-западной части Тихого океана. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. – С. 63-76.
5. Безверхний В.Л. О некоторых вопросах сейсмотектоники юго-западной части зоны перехода от Сихотэ-Алиня к Японскому морю / В.Л. Безверхний, Н.Г. Сушков // Геофизика дна Японского моря. – Владивосток, 1980. – С. 26—38.
6. Берсенев И.И. Как образовалось Японское море? / И.И. Берсенев // Природа. – 1972. – № 2. – С. 52—59.
7. Берсенев И.И. Геологическое строение материкового склона в восточной части залива Петра Великого (Японское море) / И.И. Берсенев, Ю.С. Липкин, Ю.Д. Марков // Проблемы геологии шельфа. – М.: Наука, 1975. – С. 122-127.
8. Буров Б.А. Оценка потока метана из донных осадков в водный слой при деградации гидратов метана, вызванной потеплением вод в Татарском проливе / Б.А. Буров, В.А. Лучин, А.И. Обжиров, А.А. Карнаухов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2018. – № 2. – С. 3–14.
9. Буш В.А. Система трансконтинентальных разломов Евразии / В.А. Буш // Геотектоника. – 1983. – № 3. – С. 15-31.
10. Буш В.А. Система активных линеаментов Евразии по данным расшифровки спутниковых снимков / В.А. Буш, В.Г. Трифионов, С.С. Шульц // Тектоника Азии: Докл. 27-й МГК. – М.: Наука, 1984. – Том 5. – С. 42-53.
11. Васильев Б.И. Геология и нефтегазоносность окраинных морей северо-запада Тихого океана / Б.И. Васильев, К.И. Сигова, А.И. Обжиров, И.В. Югов. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 303 с.

12. Васильев Б.И. Геология и нефтегазоносность окраинных морей северо-запада Тихого Океана / Б.И. Васильев [и др.]. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 309 с.
13. Васильковский Н.П. Геолого-геофизические исследования в 42-м рейсе НИС «Витязь» в Японском море / Н.П. Васильковский, И.М. Белоусов, В.М. Ковылин // Океанология. – 1969. – Т. IX. – Вып. 2. – С. 361-365.
14. Власова Г.А. История океанографических исследований в Южно-Китайском море / Г.А. Власова // Вопросы истории естествознания и техники. – 2020. – Т. 41. – № 3. – С. 484–503.
15. Власова Г.А. Гидрометеорологическая характеристика Южно-Китайского моря / Г.А. Власова, Л.Д. Мау, Н.Т. Зунг // Российско-вьетнамские океанологические исследования в Южно-Китайском море / гл. ред. к.г.н. В.Б. Лобанов – Владивосток, 2020. – С. 53–71.
16. Геолого-геофизические и океанографические исследования западной части Южно-Китайского моря и прилегающего континента / гл. ред. Р.Б. Шакиров. – М.: ГЕОС, 2021. – 414 с.
17. Гинсбург Г.Д. Подводные газогидраты / Г.Д. Гинсбург, В.А. Соловьев. – Ленинград: ВНИИОкеангеология, 1994. – 86 с.
18. Гнибиденко Г.С. Тектоника дна окраинных морей Дальнего Востока / Г.С. Гнибиденко. – М.: Наука, 1979. – 161 с.
19. Горшков А.П. Исследование подводных вулканов в 10-м рейсе RV "Вулканолог" / А.П. Горшков // Вулканология и сейсмология. – 1981. – № 6. – С. 39-45.
20. Гресов А.И. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока России и перспективы ее промышленного освоения. Углеметановые бассейны Приморья, Сахалина и Хабаровского края / А.И. Гресов, А.И. Обжиров, Р.Б. Шакиров. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – Т.1. – 247 с.
21. Долгинов Е.А. Рифтовые и эпирифтовые структуры северо-западного Вьетнама и их вероятные аналоги / Е.А. Долгинов, Ю.В. Башкин, Т.П. Белоусов, Д.Т. Као, В.З. Ле // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2010. – № 5. – С. 3-8.
22. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ [Электронный ресурс]. – URL: <http://ferhri.org/> (дата обращения 15.11.2021).
23. Еськова А.И. Особенности распределения индикаторных групп микроорганизмов в донных отложениях Южно-Китайского моря / А.И. Еськова, А.Л. Пономарева, А.А. Легкодимов, В.Ю. Калгин, Р.Б. Шакиров, А.И. Обжиров // Вестник Иркутского государственного университета. Серия "Науки о земле". – 2020. – № 33. – С. 33-43.
24. Зубова М.А. Гидраты природных газов в недрах Мирового океана / М.А. Зубова. – М.: ВИЭМС, 1988. – 61 с.

25. Зырянов В.Н. Циркуляция вод Фолклендско-Патагонского района и ее сезонная изменчивость / В.Н. Зырянов, Д.Н. Северов // *Океанология*. – 1979. – Т. 29. – Вып. 5. – С. 782–790.
26. Иванов М.В. Глобальный метановый цикл в океане / М.В. Иванов, А.Ю. Леин, В.Ф. Гальченко // *Геохимия*. – 1992. – № 7. – С. 1035–1045.
27. Иогансон Л.И. Зона 105° в.д. – новый тип геодинамических границ? / Л.И. Иогансон // Альманах "Пространство и время" [Электронный ресурс]. - 2012. – Том 1. – № 1. – Режим доступа: <http://j-spacetime.com/actual%20content/t1v1/1106.php>
28. Исаев В.П. Парагенетические особенности структуры геохимических и геофизических полей в ореоле рассеяния залежей углеводородов/ В.П. Исаев, В.И. Королев, Н.П. Пастухов // *Моделирование геохимического поля*. – М.: ВНИИ Геоинформсистем, 1986. – С. 110–117.
29. Карп Б.Я. Новые данные о строении земной коры в юго-западной части Японского моря / Б.Я. Карп, Е.А. Моурадова, Ю.В. Шевалдин, В.П. Филатьев // *Вопросы геологии и геофизики окраинных морей северо-западной части Тихого океана*. – Владивосток, 1974. – С. 145–154.
30. Ковылин В.М. Строение земной коры в области Японского моря / В.М. Ковылин. – М.: Наука, 1979. – 207 с.
31. Красный М.Л. Региональные особенности аномального магнитного поля / М.Л. Красный // *Труды СахКНИИ ДВНЦ АН СССР*. – Новоалександровск, 1969. – Вып. 20. – С. 227–234.
32. Кречик В.А. Особенности циркуляции вод в центральной части пролива Брансфилда в январе 2020 г. / В.А. Кречик., Д.И. Фрей, Е.Г. Морозов // *Доклады академии наук. Науки о земле*. – 2021. – Т. 496. – № 1. – С. 101-105.
33. Крылов Н.А. Нефтегазоносные бассейны континентальных окраин / Н.А. Крылов, Ю.К. Бурлин, Л.И. Лебедев; отв. ред. И.С. Грамберг; Ин-т геологии и разраб. горючих ископаемых. – М.: Наука, 1988. – 245 с.
34. Кулинич Р.Г. О структуре и современной активности зоны сочленения шельфа Сунда и котловины Южно-Китайского моря / Р.Г. Кулинич, А.И. Обжиров // *Тихоокеанская геология*. – 1985. – № 3. – С. 102–106.
35. Кулинич Р.Г. Роль сквозных тектонических линеаментов в строении и эволюции Филиппинской плиты / Р.Г. Кулинич // *Геодинам. исслед.* № 11. *Тектоника восточноазиатских окраинных морей*. – М., 1988. – С. 95–101.
36. Кулинич Р.Г. О корреляции метановых эманаций со структурой фундамента северо-восточного шельфа и склона о. Сахалин и сейсмической активностью региона / Р.Г.

- Кулинич, Е.А. Бессонова, А.И. Обжиров // Дальневосточные моря России. – М.: Наука, 2007. – Кн. 3. – С. 277–285.
37. Леин А.Ю. Биогеохимический цикл метана в океане / А.Ю. Леин, М.В. Иванов; отв. ред. А.П. Лисицын. – М.: Наука, 2009. – 576 с.
38. Леин А.Ю. Курильщичи поля Рейнбоу – район масштабного абиогенного синтеза метана / А.Ю. Леин, А.М. Сагалевич // Природа. – 2000. – № 8. – С. 44–53.
39. Лисицын А.П. Гидротермальные образования рифтовых зон океана / А.П. Лисицын, Ю.А. Богданов, Е.Г. Гурвич. – М.: Наука, 1990. – 256 с.
40. Лихт Ф.Р. Продолжение япономорского линеамента в геоморфологическом пространстве ТПП / Ф.Р. Лихт // Проблемы морфотектоники западно-тихоокеанский переходной зоны. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – С. 144–146.
41. Ломтев В.Л. К строению и газоносности западного борта Татарского Трога (Японское море) / В.Л. Ломтев, К.Ю. Торгашов, М.Г. Гуринов // Пятые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. – 2009. – С. 295–300.
42. Малахова В.В. Моделирование переноса растворенного метана океаническими течениями : дис. ... канд физ.-мат. наук : 05.13.18 / Малахова Валентина Владимировна ; ИВМиМГ СО РАН ; науч. рук. А.В. Щербаков. – Новосибирск, 2006. – 190 с.
43. Мишуков В.Ф. Исследование параметров экосистемы Амурского залива Японского моря с помощью факторного анализа / В.Ф. Мишуков, Г.И. Мишукова, Г.Н. Моисеевский, В.В. Ярош // Океанографические аспекты охраны морей и океанов от химических загрязнений. – М.: Гидрометеиздат, 1990. – С. 118–120.
44. Мишукова Г.И. Потоки метана на границе вода-атмосфера и газогеохимические аномалии в донных отложениях северо-западной части Японского моря / Г.И. Мишукова, А.В. Яцук, Р.Б. Шакиров, Н.С. Сырбу, М.Г. Валитов, А.Л. Пономарева, О.В. Мишукова // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 12. – С. 1686–1704.
45. Мониторинг метана в Охотском море / ред. А.И. Обжиров, А.Н. Салюк, О.Ф. Верещагина. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 250 с.
46. Морозов Е.Г. Течения в проливе Брансфилд / Е.Г. Морозов // Доклады академии наук. Науки о Земле. – 2007. – Т. 415. – № 6. – С. 823–825.
47. Нечаюк А.Е. Структуры и нефтегазоносность бассейнов Татарского пролива / А.Е. Нечаюк, А.И. Обжиров // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2010. – № 2 (16). – С. 27–34.
48. Николаева Н.А. Характерные особенности проявлений газово-флюидных эманаций на северо-восточном склоне о-ва Сахалин (Охотское море) / Н.А. Николаева, А.Н. Деркачев, А.И. Обжиров // Тихоокеан. геология. – 2009. – Т. 28. – № 3. – С. 38–52.

49. Обжиров А.И. Аномалия природных газов в придонной воде Южно-Китайского моря / А.И. Обжиров, В.И. Ильичев, Р.Г. Кулинич // Доклады Академии Наук СССР. – 1985. – Т. 281. – № 5. – С. 1206–1209.
50. Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов / А.И. Обжиров. – М.: Наука, 1993. – 139 с.
51. Обжиров А.И. Газогеохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря / А.И. Обжиров [и др.]. – Владивосток: Дальнаука, 1999. – 184 с.
52. Обжиров А.И. Газогеохимический метод поиска нефти и газа и перспективы нефтегазоносности Приморья / А.И. Обжиров, Р.Б. Шакиров, В.В. Дружинин, А.А. Агеев // Генезис нефти и газа. – М.: ГЕОС, 2003. – С. 228–230.
53. Петухов А.В. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых и охраны окружающей среды / А.В. Петухов, Л.И. Митрофанова, С.М. Кравченко. – М.: ВСНТО, 1985. – 86 с
54. Равдоникас О.В. Вопросы геохимии природных газов Северного Сахалина / О.В. Равдоникас // Изв. Сах. отд-ния ВГО. – 1974. – Вып. 3. – С. 9–66.
55. Родников А.Г. Островные дуги западной части Тихого океана / А.Г. Родников. – М.: Наука, 1979. – 152 с.
56. Российско-вьетнамские океанологические исследования в Южно-Китайском море / гл. ред. к.г.н. В.Б. Лобанов – Владивосток, 2020. – 333 с.
57. Сизова Ю.В. Циркуляция вод Японского моря / Ю.В. Сизова // Основные особенности геологии и гидрологии Японского моря. – М.: Академия наук СССР, 1961. – С. 146–154.
58. Силантьев Ю.Б. Углеводородные системы осадочных бассейнов Латинской Америки / Ю.Б. Силантьев, Т.О. Халошина. // Вести газовой науки. Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих регионов России. – 2016. – № 1 (25). – С. 119-124.
59. Соколов В.А. Геохимия природных газов / В.А. Соколов. – М.: Недра, 1971. – С. 293-320.
60. Стадник Е.В. Геохимические исследования сейсмозрывных скважин при поисках нефти и газа в Восточной Сибири / Е.В. Стадник, В.П. Исаев, В.И. Королев, Н.П. Пастухов // Геология нефти и газа. – 1985. – № 1. – С. 19-23.
61. Старобинец И.С. Основы теории геохимических полей углеводородных скоплений / И.С. Старобинец, А.В. Петухов. – М.: Недра, 1993. – 332 с.
62. Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря / О.В. Веселов [и др.]. – М.: Наука, 2006. – 130 с.
63. Телегин Ю.А. Газогеохимические исследования в Охотском море / Ю.А. Телегин // Вестник ДВО РАН. – 2011. – № 6. – С. 60-63.

64. Телегин Ю.А. Концентрации метана в поверхностном слое воды на шельфе Аргентины (предварительные результаты) / Ю.А. Телегин, С.А. Букреев, М.В. Морозова, П.В. Чукмасов, Д.О. Скоробогатов // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность. – 2021. – С. 699.
65. Тудев Ц. Основные черты тектонического строения Монголии по геофизическим данным / Ц. Тудев, Д. Чагнаадорж, Г. Баяр // Геология и геофизика. – 1981. – № 4. – С. 81-85.
66. Холмогоров А.О. Исследование изменчивости концентраций метана в поверхностном слое вод Японского моря в контексте сейсмических событий (по результатам экспедиционных исследований 2017-2018 гг.) / А.О. Холмогоров, Н.С. Сырбу, Р.Б. Шакиров // Геодинамика и тектонофизика. Современная геодинамика. – 2022. – Т. 13. – № 3. – DOI 10.5800/GT-2022-13-3-0642.
67. Холмогоров А.О. Распределение метана в водной толще района Тропической подводной горы (Атлантический океан). / А.О. Холмогоров, Н.С. Сырбу, Р.Б. Шакиров, Л.Б. Невеш // Вестник ДВО РАН. – 2023. – № 2. – С. 64 – 74.
68. Шакиров Р.Б. Газогеохимические поля окраинных морей восточной Азии / Р.Б. Шакиров. – М.: ГЕОС, 2018. – 341 с.
69. Шакиров Р.Б. Особенности потоков метана в западной и восточной Арктике: обзор. Часть I. / Р.Б. Шакиров, С. Мау, Г.И. Мишукова, А.И. Обжиров, М.В. Шакирова, О.В. Мишукова // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4. – № 1. – С. 004-025.
70. Юрасов Г.И. Термохалинные параметры, фронты, водные массы и структура воды в глубоководных районах Японского моря / Г.И. Юрасов // Известия ТИНРО. – 2009. – Т. 156. – С. 265-281.
71. Akihiro Hiruta. Geochemical constraints for the formation and dissociation of gas hydrate in an area of high methane flux, eastern margin of the Japan Sea / Akihiro Hiruta, Glen T. Snyder, Hitoshi Tomaru, Ryo Matsumoto // Earth and Planetary Science Letters. – 2009. – Vol. 279, Issues 3–4. – P. 326-339.
72. Akihiro Hiruta. Methane flux, seafloor gas hydrates, chloride anomalies and sulfate reduction: Joetsu regions, eastern margin of Japan Sea / Akihiro Hiruta, Ryo Matsumoto, Yasushi Ishida, Hitoshi Tomaru, Hideaki Machiyama, Glen Snyder, Chiharu Aoyama, Mineo Hiromatsu // Journal of the Sedimentological Society of Japan. – 2007. – Vol. 64. – P. 89-93.
73. Akulichev V.A. Anomalies of Natural Gases in the Gulf of Tonkin (South China Sea) / V.A. Akulichev, R.B. Shakirov, A.I. Obzhirov, V.P. Phung, N.N. Trung, D.Q. Hung, E.V. Maltseva, N.S. Syrбу, N.S. Polonik, L.D. Anh // Doklady Earth Sciences. Russian Academy of Sciences. – 2015. – Vol. 461 (1). – P. 203–207.

74. Altimetry. – URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/> (05.09.2022)
75. Anka Z. Distribution and origin of natural gas leakage in the Colorado Basin, offshore Argentina Margin, South America: seismic interpretation and 3D basin modelling / Z. Anka, M.J. Loegering, R. di Primio, D. Marchal, J.F. Rodríguez, E. Vallejo // *Geologica Acta*. – 2014. – Vol. 12(4). – P. 269-285.
76. Bange H.W. Methane in the Baltic and the North Seas and reassessment of marine emissions of methane / H.W. Bange, U.H. Bartell, S. Rapsomanikis, O. Andrae // *Global Biogeochem Cycles*. – 1994. – Vol. 8. – P. 465-480.
77. Baraza J. Potential geologic hazards on the eastern Gulf of Cadiz slope (SW Spain) / J. Baraz, G. Ercilla, C.H. Nelson // *Marine Geology*. – 1999. – Vol. 155. – P. 191–215.
78. Baristead N. Distribution of hydrocarbon leakage indicators in the Malvinas Basin, Offshore Argentine Continental Margin / N. Baristead, Z Anka, R. di Primio, J.F Rodriguez., D. Marchal, F. Dominguez, E. Vallejo // *Marine Geology*. – 2012. – Vol. 332–334. – P. 56-74.
79. Barré N. Spatial and temporal scales of the Brazil–Malvinas Current confluence documented by simultaneous MODIS Aqua 1.1-km resolution SST and color images / N. Barré, C. Provost, M. Saraceno // *Advances in Space Research* – 2006. – Vol. 37(4). – P. 770–786.
80. Bartlett K.B. Methane in the tropical South Atlantic: Sources and distribution during the late dry season / K.B. Bartlett, G.W. Sachse, J.E. Collins Jr, R.C. Harriss // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 1996. – Vol. 101. – P. 24139-24150.
81. Bates T.S. A reevaluation of the open ocean source of methane to the atmosphere / T.S. Bates, K.C. Kelly, J.E. Johnson, R.H. Gammon // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 1996. – Vol. 101. – P. 6953-6961.
82. Berner U. Light hydrocarbons in sediments of the Nankai accretionary prism (Leg 131, Site 808) / U. Berner, E. Faber // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. – 1993. – Vol. 131. – P. 185–195.
83. Block 114 – bright spot in offshore exploration. – URL: <https://vietnamnet.vn/en/block-114-bright-spot-in-offshore-exploration-662384.html> (25.11.2022)
84. Booth, J.S.; Rowe, M.M.; Fischer, K.M. Offshore gas hydrate sample database with an overview and preliminary analysis, Open-File Report 96-272, U.S. Geological Survey, 1996, <http://pubs.usgs.gov/of/1996/of96-272/>
85. Brazil Oil Fields - Giant Oil and Gas Fields. – URL: <https://www.ccarto.com/oil/braziloil/#4/-19.27/-44.65> (18.10.2022)
86. Bui O.T.N. Influence of warm-core eddy on dissolved methane distributions in the southwestern Canada basin during late summer/early fall 2015 / O.T.N. Bui, S. Kameyama, Yu.

- Kawaguchi, S. Nishino, U. Tsunogai, H. Yoshikawa-Inoue // *Polar Science*. – 2019. – Vol. 22. – P. 100481.
87. Cai W. Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication / W. Cai, X. Hu, W. Huang, et al. // *Nature Geoscience*. – 2011. – Vol. 4. – P. 766–770.
88. Callender W.R. Why did ancient chemosynthetic seep and vent assemblages occur in shallower water than they today? / W.R. Callender, E.N. Powell // *International Journal of Earth Sciences*. – 1999. – Vol. 88, Iss. 3. – P. 377–391.
89. Carter B.R. Two decades of Pacific anthropogenic carbon storage and ocean acidification along Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program sections P16 and P02 / B.R. Carter, R.A. Feely, S. Mecking, J.N. Cross, A.M. Macdonald, S.A. Siedlecki, L.D. Talley, C.L. Sabine, F.J. Millero, J.H. Swift, A.G. Dickson, [K.B. Rodgers](#) // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2017. – Vol. 31, Iss. 2. – P. 306–327.
90. Chappellaz J.A. The atmospheric CH₄ increase since the last glacial maximum: (1). Source estimates / J.A. Chappellaz, I.Y. Fung, A.M. Thompson // *Tellus*. – 1993. – Vol. 45B. – P. 228–241.
91. Chen G.D. Diwa (geodepression) region: a new-type post-platform mobile region. / G.D. Chen // Editorial Committee of Geotectonic Problems of China *Geotectonic Problems of China*. – Beijing: Science Press, 1965. – P. 1–52.
92. Chow J. Characteristics of the bottom simulating reflectors near mud diapirs: offshore South China Sea / J. Chow, J.S. Lee // *Geo Marine Letter*. – 2000. – Vol. 20. – P. 3–9.
93. Chuang P.C. Estimation of methane flux offshore SW Taiwan and the influence of tectonics on gas hydrate accumulation / P.C. Chuang, F.T. Yang, H.F. Lee, T.F. Lan, W.L. Hong, S. Lin, C.H. Sun, J.C. Chen, Y. Wang, S.H. Chung // *Geofluids*. – 2010. – № 10. – P. 497–510.
94. Cicerone R.J. Biogeochemical aspects of atmospheric methane / R.J. Cicerone, R. Oremland // *Global Biogeochem.Cycles*. – 1988. – Vol. 2. – P. 299–327.
95. Claypool G.E. Methane and other Hydrocarbon Gases in Marine Sediment / G.E. Claypool, K.A. Kvenvolden // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 1983. – Vol. 11. – P. 299–327.
96. *Climate Change 1994* / Ed.by J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce etc. – Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 1996. – 86 p.
97. Combes V. The Patagonian shelf circulation: Drivers and variability / V. Combes, R.P. Matano // *Progress in Oceanography*. – 2018. – Vol. 167. – P. 24–43.
98. Conrad R. Methane and hydrogen in seawater (Atlantic Ocean) / R. Conrad, W. Seiler // *Deep-Sea Res. Part A*. – 1988. – Vol. 35. – P. 1903–1917.

99. Dagvadorj D. The source of greenhouse gas emissions in Mongolia / D. Dagvadorj, M. Munkhtsetseg // *Ambio*. – 1996. – Vol. 25, № 4. – P. 297-299.
100. Damm E. Methane cycling in Arctic shelf water and its relationship with phytoplankton biomass and DMSP / E. Damm, R.P. Kiene, J. Schwarz, E. Falck, G. Dieckmann // *Marine Chemistry*. – 2008. – Vol. 109. – P. 45-59.
101. Damm E. Pathways of methane in seawater: Plume spreading in an Arctic shelf environment (SW-Spitsbergen) / E. Damm, A. Mackensen, G. Budéus, E. Faber, C. Hanfland // *Contin. Shelf Res.* – 2005. – Vol. 25. – P. 1453-1472.
102. Dantas R. Evidence for methane seepage in South Atlantic from the occurrence of authigenic gypsum and framboidal pyrite in deep-sea sediments / R. Dantas, M. Hassan, F. Cruz, L. Jovane // *Marine and Petroleum Geology*. – 2022. – Vol. 142. – P. 105727.
103. Davie M.K. Methane solubility in marine hydrate environments / M.K. Davie, O.Y. Zatsepina, B.A. Buffett // *Marine Geology*. – 2004. – Vol. 203. – P. 177-184.
104. Doney S.C. Ocean Acidification: the Other CO₂. / S.C. Doney, V.J. Fabry, R.A. Feely, J.A. Kleypas // *Problem Annual Review of Marine Science*. – 2009. – Vol. 1 (1). – P. 169-192.
105. Dong S. Southern Ocean mixed-layer depth from Argo float profiles / S. Dong, J. Sprintall, S.T. Gille, L. Talley // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – P. C06013.
106. Drouin K. Variability and Trends of the South Atlantic Subtropical Gyre / K. Drouin, M. Lozier, W. Johns // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2020. – Vol. 126. – P. e2020JC016405.
107. Duan I. Газовые гидраты в Южно-Китайском море / I. Duan, O.A. Shnip // *Теоретические основы и технологии поисков и разведки нефти и газа*. – 2012. – № 4. – С. 41-43.
108. Earth: a global map of wind, weather, and ocean conditions. – URL: <https://earth.nullschool.net/> (13.05.2022).
109. Ehhalt D.H. The atmospheric cycle of methane / D.H. Ehhalt // *Tellus*. – 1974. – Vol. 26. – P. 58-70.
110. Etiope G. Gas seepage from Tokamachi mud volcanoes, onshore Niigata Basin (Japan): Origin, post-genetic alterations and CH₄–CO₂ fluxes / G. Etiope, R. Nakada, K. Tanaka, K. Tanaka., N. Yoshida // *Applied Geochemistry*. – 2011. – Vol. 3, Iss. 26. – P. 348–359.
111. Falkowski P.G. The biological and geological contingencies for the rise of oxygen on Earth / P.G. Falkowski // *Photosynth Res.* – 2011. – Vol. 107. – P. 7–10.
112. Farías L. Distribution of dissolved methane and nitrous oxide in Chilean coastal systems of the Magellanic Sub-Antarctic region (50°–55° S) / L. Farías, E. Bello, G. Arancibia, J. Fernandez // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2018. – Vol. 215. – P. 229-240.

113. Field M.E. Seafloor gas seeps triggered by a northern California earthquake / M.E. Field, A.E. Jennings // *Mar. Geol.* – 1987. – Vol. 77, № 1. – P. 39–51.
114. Floodgate G.D. The origin of shallow gas / G.D. Floodgate, A.G. Judd // *Contin. Shelf Res.* – 1992. – Vol. 12. – P. 1154-1156.
115. Florez-Leiva L. Methane production induced by dimethylsulfide in surface water of an upwelling ecosystem / L. Florez-Leiva, E. Damm, L. Farías // *Progress in Oceanography.* – 2013. – Vol. 112-113. – P. 38–48.
116. Frey D. Austral summer circulation in the Bransfield Strait based on SADCPC measurements and satellite altimetry / D. Frey, V. Krechik, A. Gordey, S. Gladyshev, D. Churin, I. Drozd, A. Osadchiev, S. Kashin, E. Morozov, D. Smirnova // *Front. Mar. Sci.* – 2023. – Vol. 10. – P. 1111541.
117. Frey D.I. Dynamic structure of eddies of the Brazil-Malvinas Confluence zone revealed by direct measurements and satellite altimetry / Frey D.I., Kubryakov A.A. // (2023). *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 2023. – Vol. 128. – Art.no. e2023JC019957.
118. Frey D. Direct Measurements of the Malvinas Current Velocity Structure / D. Frey, A. Piola, V. Krechik, K. Silvestrova // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 2021. – Vol. 126. – P. e2020JC016727.
119. Garcia C.A. Chlorophyll variability and eddies in the Brazil–Malvinas Confluence region / C.A. Garcia, Y. Sarma, M.M. Mata, V.M. Garcia // *Deep Sea Res. Part II.* – 2004. – Vol. 51. – P. 159–172.
120. Garcia M. Water Masses and Distribution of Physico-chemical Properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral Summer 1995/96 / M. Garcia, C. Castro, A. Rios et al. // *Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography.* – 2002. – Vol. 49, Iss. 4–5. – P. 585–602.
121. Gardner J.M. Acoustic imagery evidence for methane hydrates in the Ulleung Basin / J.M. Gardner, A.N. Shor, W.Y. Jung // *Marine geophysical researches.* – 1998. – Vol. 20. – P. 495–503.
122. Garzón-Cardona J.E. Sources and distribution of dissolved organic matter and inorganic nitrogen in waters of the southern Patagonian shelf and northern Drake Passage (51–56°S, 64–69°W) / J.E. Garzón-Cardona, A.M. Martínez, B.P. Koch, B. Krock, E.D. Palma, X. Kong, R.J. Lara // *Journal of Marine Systems.* – 2023. – Vol. 241. – P. 103893.
123. Gas hydrate system of the Eastern Sakhalin slope: Geophys. Approach: Scientific report of the Sakhalin slope gas hydrate project 2007 / Eds. B.V. Baranov, Y.K. Jin, H. Shoji, A. Obzhirov, K.A. Dozorova, A. Salomatin, V. Gladyshev. – Incheon: Korea Polar Res. Inst. (KOPRI), 2008. – 116 p.

124. Gordon A. Deep and Bottom Water of the Bransfield Strait Eastern and Central Basins / A. Gordon, M. Mensch, Z. Dong et al. // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2000. – Vol. 105(C5). – P. 11337–11346.
125. Gordon A.L. Brazil-Malvinas Confluence–1984 / A.L. Gordon // *Deep Sea Res. Part A*. – 1989. – Vol. 36, Iss. 3. – P. 359–384.
126. Gordon A.L. Geostrophic circulation of the Brazil-Falkland confluence / A.L. Gordon, C.L. Greengrove // *Deep-Sea Res. Part A*. – 1986. – Vol. 33, Iss. 5. – P. 573–585.
127. Grabowska J. Solubility of Methane in Water: Some Useful Results for Hydrate Nucleation / J. Grabowska, S. Blazquez, E. Sanz, I. Zerón, J. Algaba, J. Míguez, F. Blas, C. Vega // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2022. – Vol. 126, Iss. 42. – P. 8553–8570.
128. Han X.Q. Origin and Nature of Cold Seep in Northeastern Dongsha Area, South China Sea: Evidence from Chimney-Like Seep Carbonates / X.Q. Han, K.H. Yang, Y.Y. Huang // *Chin. Sci. Bull.* – 2013. – Vol. 58. – P. 3689–3697.
129. Hancock A.M. Ocean acidification changes the structure of an Antarctic coastal protistan community / A.M. Hancock, A.T. Davidson, J. McKinlay, A. McMinn, K.G. Schulz, R.L. van den Enden // *Biogeosciences*. – 2018. – Vol. 15. – P. 2393–2410.
130. Holte J. A new algorithm for finding mixed layer depths with applications to Argo data and subantarctic mode water formation / J. Holte, L. Talley // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – 2009. – Vol. 26. – P. 1920–1939.
131. Hongmin D. An estimation of methane emissions from agricultural activities in China / D. Hongmin, L. Erda, L. Yue, R. Minjie, Y. Qichang // *Ambio*. – 1996. – Vol. 25, № 4. – P. 292–296.
132. Hotta H. Sediment distribution in the continental borderland of Japanese Islands / H. Hotta // *Island arc and marginal sea*. Tokai Univ. Press. – 1971. – P. 146–153.
133. Hovland M. The global production of methane from shallow submarine sources / M. Hovland, A.G. Judd // *Contin. Shelf Res.* – 1992. – Vol. 12. – P. 1231–1238.
134. Hovland M. The global flux of methane from shallow submarine sediments / M. Hovland, A.G. Judd, R.A.J. Burke // *Chemosphere*. – 1993. – Vol. 26. – P. 559–578.
135. Hovland M. Fault – associated seabed mounds (carbonate knolls?) off western Ireland and north-west Australia / M. Hovland, P.F. Croker, M. Martin // *Marine and Petroleum Geology*. – 1994. – Vol. 11, № 2. – P. 232–246.
136. Ingle J.C, Karig D.E., Войта A.H. Part 2: Site Reports. Sites 299-302 // *Initial Reports of the DSDP. Leg 31*. Wash. 1975. P.351-468.
137. Isezaki N. Geomagnetic anomaly pattern of the Japan Sea / N. Isezaki, S. Uyeda // *Mar. Geophys. Res.* – 1973. – Vol. 2, Iss. 1. – P. 51–59.

138. Japan Meteorological Agency. – URL: <https://www.jma.go.jp/> (18.09.2021)
139. Jeong I.S. Vertical profile of bacterial community in the sediment of Ulleung Basin: implication of the presence of methane-driven community / I.S. Jeong, J.-C. Cho, J.-J. Bahk, et al. // *Microorganisms in Industry and Environment*. – 2010. – P. 219–226.
140. Jolivet L. Mouvements décroissants, structuration et limite de plaques dans l'île d'Hokkaido (Japan septentrional) / L. Jolivet, J. Cadet // *Ann. Soc. Geol. Nord*. – 1983. – Vol. 103. – P. 345–103.
141. Josso P. Improving confidence in ferromanganese crust age models: A composite geochemical approach / P. Josso, I. Parkinson, M. Horstwood, P. Lusty, S. Chenery, B. Murton // *Chemical Geology*. – 2019. – Vol. 513. – P. 108–119.
142. Judd A. Seabed fluid flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment / A. Judd, M. Hovland. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. – 475 p.
143. Kang D.H. The occurrence patterns of gas hydrates in the Ulleung Basin, East Sea / D.H. Kang, D.G. Yoo, J.J. Bahk et al. // *J. Geol. Soc. Korea*. – 2009. – Vol. 45, № 2. – P. 143–155 (in Korean with English abstract).
144. Karl D.M. Production and transport of methane in oceanic organic matter / D.M. Karl, B.D. Tilbrook // *Nature*. – 1994. – Vol. 368. – P. 732–734.
145. Kholmogorov A. 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 / A. Kholmogorov, N. Syrбу, R. Shakirov // *Water*. – 2022. – Vol. 14. – P. 3311.
146. Kholmogorov A. Dissolved Methane Transport in the Tatar Strait and the Deepest Basin of the Japan (East) Sea from Its Possible Sources / A. Kholmogorov, V. Ponomarev, N. Syrбу, S. Shkorba // *Water*. – 2023. – Vol. 15. – P. 821.
147. Kim Y-W. NO₂ and CH₄ in soil and snowpack in Hokkaido: their implications to the global budgets / Y-W. Kim, N. Tanaka, S. Tsunogai // *International symposium on atmospheric chemistry and future global environment, 11-13 November 1997 (Extended abstracts)*. – Nagoya, Japan, 1997. – P. 175–178.
148. Komissarov A.A. Low-Frequency Sound Propagation in an Underwater Waveguide with a Giant Gassy Pockmark / A.A. Komissarov, D.V. Makarov, A.O. Kholmogorov, R.B. Shakirov // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2023. – Vol. 11. – P. 211.
149. Kostadinoff J. Methane hydrate on the Argentine continental margin / J. Kostadinoff // *Revista de la Asociacion Geologica Argentina*. – 2001. – Vol. 56(3). – P. 392–395

150. Kudo K. Source analysis of dissolved methane in Chukchi Sea and Bering Strait during summer–autumn of 2012 and 2013 / K. Kudo, S. Toyoda, K. Yamada, N. Yoshida, D. Sasano, N. Kosugi, A. Murata, H. Uchida, S. Nishino // *Mar. Chem.* – 2022. – Vol. 243. – P. 104119.
151. Kulm L.D. Oregon subduction zone: Venting, fauna and carbonates / L.D. Kulm, E. Suess, J.C. Moore et al. // *Science.* – 1986. – Vol. 231. – P. 561–566.
152. Kvenvolden K.A. Methane hydrate – a major reservoir of carbon in the shallow geosphere / K.A. Kvenvolden // *Chem. Geol.* – 1988. – Vol. 71. – P. 41–51.
153. Lammers S. Variations of atmospheric methane supply from the Sea of Okhotsk induced by the seasonal ice cover / S. Lammers, E. Suess, M.N. Mansurov, V.V. Anikiev // *Global Biogeochem. Cycle.* – 1995. – Vol. 9, № 3. – P. 351-358.
154. Lapham L. Dissolved methane concentrations in the water column and surface sediments of Hanna Shoal and Barrow Canyon, Northern Chukchi Sea / L. Lapham, K. Marshall, C. Magen, V. Lyubchich, L.W. Cooper, J.M. Grebmeier // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography.* – 2017. – Vol. 144. – P. 92–103.
155. Le M.D. Distribution features of the typhoons in the South China Sea / M.D. Le, G.A. Vlasova, T.T.D. Nguyen // *Russian Journal of Earth Sciences.* – 2021. – Vol. 21. – P. ES1001.
156. Lee S.H. Distribution and origin of shallow gas in deep-sea sediments of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan) / S.H. Lee, S.K. Chough // *Geo marine Letters.* – 2003. – Vol. 22. – P. 204–209.
157. Liu H. Geodynamic Scenario and Structural Styles of Mesozoic and Cenozoic Basins in China / H. Liu // *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* – 1986. – Vol. 70, № 4. – P. 377-395.
158. Luiz R. The influence of methane fluxes on the sulfate/methane interface in sediments from the Rio Grande Cone Gas Hydrate Province, southern Brazil / R. Luiz, K. João, L. Rogerio, A. Adolpho, S. Gesiane, M. Dennis, H. Roberto, V. Adriano, F. Fernando, M. Sadoon // *Brazilian Journal of Geology.* – 2017. – Vol. 47(3). – P. 369-381.
159. Luong L.D. Features in REE and methane anomalies distribution in the East China Sea water column: a comparison with the South China Sea / L.D. Luong, R.B. Shakirov, N. Hoang et al. // *Water Resources.* – 2019. – Vol. 46(5). – P. 807–816.
160. Mahiques M.M. An extensive pockmark field on the upper Atlantic margin of Southeast Brazil: spatial analysis and its relationship with salt diapirism / M.M. Mahiques, U. Schattner, M. Lazar, P.Y.G. Sumida, L.A. Pereira de Souza // *Heliyon.* – 2017. – Vol. 3(2). – P. e00257.
161. Majkut J.D. An observing system simulation for Southern Ocean carbon dioxide uptake / J.D. Majkut, B.R. Carter, T.L. Frölicher, C.O. Dufour, K.B. Rodgers, J.L. Sarmiento // [Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.](#) – 2019. – Vol. 372. – P. 1-17.

162. Malakhova T.V. Features of Methane Distribution in the Euphotic Layer of the Northern Black Sea in Summer, 2018 (Based on the Data of the 102nd Cruise of R/V "Professor Vodyanitsky") / T.V. Malakhova, I.M. Mansurova, L.V. Malakhova, N.V. Minina, A.D. Zagovenkova // *Phys. Oceanogr.* – 2020. – Vol. 27(2). – P. 171-185.
163. Martin S. Ice and ocean processes in the Tatarskiy Strait, Japan Sea, as revealed by ERS-1 SAR / S. Martin, M. Wakatsuchi, N. Ono // *Int. J. Remote Sens.* – 1995. – Vol. 16, Iss. 17. – P. 3227–3243.
164. Mau S. Methane seeps and independent methane plumes in the South China Sea offshore Taiwan. / S. Mau, T.-H. Tu, M. Becker Mariu, C.dos S. Ferreira, J.-N. Chen, L.-H. Lin, P.-L. Wang, S. Lin, G. Bohrmann // *Front. Mar. Sci.* – 2020. – Vol. 7. – P. 543.
165. Morozov E.G. Multidisciplinary Observations across an Eddy Dipole in the Interaction Zone between Subtropical and Subantarctic Waters in the Southwest Atlantic. / E.G Morozov, D.I. Frey, V.A. Krechik, A.A. Latushkin, P.A. Salyuk, A.M. Seliverstova, S.A. Mosharov, A.M. Orlov, S.A. Murzina; A.V. Mishin; et al. // *Water.* – 2022. – Vol. 14. – Art.no. 2701.
166. Max M.D. Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments / M.D. Max. – Kluwer Academic Publishers: Alphen aan den Rijn, The Netherlands, 2000. – 414 p.
167. Max M.D. Sea-floor methane blow-out and global firestorm at the K–T boundary / M.D. Max, W.P. Dillon, C. Nishimura, B.G. Hurdle // *Geo-Mar. Lett.* – 1999. – Vol. 18. – P. 285–291.
168. Mazurenko L.L. Worldwide distribution of deep-water fluid venting and potential occurrences of gas hydrate accumulations / L.L. Mazurenko, V.A. Soloviev // *Geo-Marine Letters.* – 2003. – Vol. 23. – P. 162–176.
169. Mikhailova E.N. Quasi-isopycnic layer model for large-scale ocean circulation / E.N. Mikhailova, N.B. Shapiro // *Phys. Oceanogr.* – 1993. – Vol. 4. – P. 251-261.
170. Milkov A. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates / A. Milkov // *Mar. Geol.* – 2000. – Vol. 167. – P. 29–42.
171. Miller D. Natural gas hydrates in the Rio Grande Cone (Brazil): A new province in the western South Atlantic / D. Miller, M. Ketzer, A. Viana, R. Kowsmann, F. Freire, S. Oreiro, A. Augustin, R. Lourega, L. Rodrigues, R. Heemann, A. Preissler, C. Machado, G. Sbrissa // *Marine and Petroleum Geology.* – 2015. – Vol. 67. – P. 187–196.
172. Mishukova G.I. Methane Fluxes at the Water–Atmosphere Interface and Gas-Geochemical Anomalies in the Bottom Sediments in the Northwestern Part of the Sea of Japan / G.I. Mishukova, A.V. Yatsuk, R.B. Shakirov, N.S. Syrbu, M.G. Valitov, A.L. Ponomareva, O.V. Mishukova // *Russian Geology and Geophysics.* – 2021. – Vol. 62, № 12. – P. 1385–1400.

173. Miyakawa K. The origin of muddy sand sediments associated with mud volcanism in the Horonobe area of northern Hokkaido, Japan / K. Miyakawa, T. Tokiwa, H. Murakami // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2013. – Vol. 14, № 12. – P. 4980–4988.
174. NEMO Community ocean model for multifarious space and time scales. <https://www.nemo-ocean.eu> (дата обращения 20.04.2023).
175. Nievas El Makte M.L. Petroleum Hydrocarbons in Atlantic Coastal Patagonia. Chapter 15 / M.L. Nievas El Makte, R. Polifroni, M.A. Sepúlveda, A. Fazio // *Anthropogenic Pollution of Aquatic Ecosystems* / Eds. D.P. Häder, E.W. Helbling, V.E. Villafañe. – Springer: Cham, Switzerland, 2021. – P. 325-352.
176. Obzhirov A. Relations between methane venting, geological structure and seismo-tectonics in the Okhotsk Sea / A. Obzhirov, R. Shakirov, A. Salyuk, E. Suess, N. Biebow, A. Salomatin // *Geo-Marine Letters*. – 2004. – Vol. 24 (3). – P. 135-139.
177. Obzhirov A.I. Gasgeochemical manifestation of gas hydrates in the sea of Okhotsk / A.I. Obzhirov // *Alaska Geology*. – 1992. – Vol. 21. – P. 1–7.
178. Oil & Gas 360 - Oil and Gas News, Analysis and Insights... — URL: <https://www.oilandgas360.com/brazil-raises-309-million-selling-pre-salt-oil-2018/> (дата обращения 20.04.2023).
179. Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2012, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 59 / Ed. Y.K. Jin, H. Shoji, A. Obzhirov, B. Baranov. – Incheon: Korea Polar Research Institute, 2013. – 163 p.
180. Orúe-Echevarría, D. A view of the Brazil-Malvinas confluence / Orúe-Echevarría D. Pelegrí J.L.; Alonso-González I.J.; Benítez-Barrios, Emelianov V.M., García-Olivares A.; Rubinat M.G., De La Fuente, Herrero P., Isern-Fontanet C.; et al. // *Deep-Sea Res.* – 2015. – I2021. – 172. – 103533.
181. Pengfei Di. The Distribution of Dissolved Methane and Its Air-Sea Flux in the Plume of a Seep Field, Lingtuo Promontory, South China Sea / Di Pengfei, Dong Feng, Duofu Chen // *Geofluids*. – 2019. – Vol. 2019. – Article ID 3240697 (12 p.).
182. Perez-Coronel E. Multiple sources of aerobic methane production in aquatic ecosystems include bacterial photosynthesis / E. Perez-Coronel, J.M. Beman // *Nature Communications*. – 2022. – Vol. 13, № 6454. – 14 p.
183. Phung Van Phach. Tectonic evolution of the southern part of central Vietnam and the adjacent area / Phung Van Phach, Le Duc Anh. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2018. – Vol. 9 I. 3. – P. 801–825.

184. Piola A.R. Malvinas-slope water intrusions on the northern Patagonia continental shelf / A.R. Piola, N. Mart'inez Avellaneda, R.A. Guerrero, F.P. Jardon, E.D. Palma, S.I. Romero // *Ocean Sci.* – 2010. – Vol. 6. – P. 345–359.
185. Piola A. The South Atlantic Western Boundary Currents Brazil/Falkland (Malvinas) Currents // A. Piola, R.P. Matano // *Encyclopedia of Ocean Sciences* / Editors: J.M. Steele, S.A. Thorpe, K.K. Turekian. – Publisher: Academic Press, 2001. – 340 p.
186. Pohlman J.W. Arctic methane seep is a net greenhouse gas sink / J.W. Pohlman, J. Greinert, C. Ruppel, A. Silyakova, L. Vielstädte, M. Casso, J. Mienert, S. Bünz // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* – 2017. – Vol. 114 (21). – P. 5355-5360.
187. Polonik, N.S. Methane Distribution in Antarctic Sound (Southern Ocean) / N.S. Polonik, A.L. Ponomareva, R.B. Shakirov, A.I. Obzhurov // *Oceanology.* – 2021. – Vol. 61, № 4. – P. 469-471.
188. Ponomarev V.I. Circulation patterns of the Japan Sea / V.I. Ponomarev, O.O. Trusenkova // *La mer.* – 2000. – Vol. 38. – P. 189 – 198.
189. Ponomarev V.I. Simulation of mesoscale circulation in the Tatar Strait of the Japan Sea / V.I. Ponomarev, P.A. Fayman, S.V. Prants, M.V. Budyansky, M.Yu. Uleysky // *Ocean Modelling.* – 2018. – Vol. 126. – P. 43-55.
190. Ponomareva A.L. Detection of Thermophilic Methanotrophic Microbial Communities in the Water Column of the Bransfield Strait (Antarctica) / A.L. Ponomareva, N.S. Polonik, A.V. Kim, R.B. Shakirov // *Advances in Polar Ecology Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean.* – 2021. – Vol. 6. – P. 209-215.
191. Ponomareva A.L. Groups of Geomicrobiological Indicators Are Spread across Gas-Hydrate and Non-Gas-Hydrate Areas in the Northern Part of the Sea of Japan / A.L. Ponomareva, A.I. Eskova, R.B. Shakirov, N.S. Syrbu, A.A. Legkodimov, R.A. Grigorov // *Biology.* – 2022. – Vol. 11. – P. 1802.
192. Prants S.V. Lagrangian analysis of the vertical structure of eddies simulated in the Japan Basin of the Japan/East Sea / S.V. Prants, V.I. Ponomarev, M.V. Budyansky, M.Yu. Uleysky, P.A. Fayman // *Ocean Modelling.* – 2015. – Vol. 86. – P. 128–140.
193. Reeburgh W.S. Oceanic methane biogeochemistry / W.S. Reeburgh // *Chem. Rev.* – 2007. – Vol. 107. – P. 486–513.
194. Römer M. First Evidence of Widespread Active Methane Seepage in the Southern Ocean, off the Sub-Antarctic Island of South Georgia / M. Römer, M. Torres, S. Kasten, A.G.C. Graham, S. Mau et al. // *Earth. Planet. Sci. Lett.* – 2014. – Vol. 403. – P. 166-177.

195. Ryu B.-J. Scientific results of the Second Gas Hydrate Drilling Expedition in the Ulleung Basin (UBGH2) / B.-J. Ryu, T.S. Collett, M. Riedel, G.-Y. Kim, J.-H. Chun, J.-J. Bahk, J.-Y. Lee, J.-H. Kim, D.-G. Yoo // *Marine and Petroleum Geology*. – 2013. – Vol. 47. – P. 1–20.
196. Saeki T. Changes in global emission estimated from a two-dimensional atmospheric transport model / T. Saeki, T. Nakazawa // *International symposium on atmospheric chemistry and future global environment*, 11-13 November 1997. Extended abstracts. Nagoya Japan. – 1997. – P. 237-240.
197. Sakurai M. Submarine geological structures and history of the Mogami Trough / M. Sakurai, T. Sato // *J. Geol. Soc. Japan*. – 1971. – Vol. 77. – P. 489-496 (in Japanese with English abstract).
198. Sangrà P. The Bransfield Current System / P. Sangrà, C. Gordo, M. Hernández-Arencibia et al. // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. – 2011. – Vol. 58, Iss. 4. – P. 390–402.
199. Sato T. Sea bottom survey in westward of the Northeast Japan / T. Sato // *Chigaku Zasshi*. – 1971. – Vol. 80. – P. 285-301 (in Japanese with English abstract).
200. Schmincke H.U.; Graf G. DECOS / OMEX II, Cruise № 43 (25 November 1998 -14 January 1999) (PDF). 2000, METEOR-Berichte.
201. Scranton M.I. Occurrence of methane in the near-surface waters of western subtropical North Atlantic / M.I. Scranton, P.G. Brewer // *Deep-Sea Res.* – 1977. – Vol. 24. – P. 127-138.
202. Semiletov I.P. On carbon transport and fate in the East Siberian Arctic land-shelf-atmosphere system / I.P. Semiletov, N.E. Shakhova, V.I. Sergienko, I.I. Pipko, O.V. Dudarev // *Environ. Res. Lett.* – 2012. – Vol. 7 (1). – P. 015201
203. Shakhova N. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, A. Salyuk, V. Joussupov, D. Kosmach, O. Gustafsson // *Science*. – 2010. – Vol. 327. – P. 1246-1250.
204. Senjyu T. The Japan Sea Intermediate Water; Its Characteristics and Circulation / T. Senjyu // *Journal of Oceanography*. – 1999. – Vol. 55. – P. 111-122.
205. Shakhova N. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: implications for the marine methane cycle / N. Shakhova, I. Semiletov, G. Panteleev // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – Vol. 32, Iss. 9. – P. L09601.
206. Shakirov R.B. Gas-geochemical features of Gulf sediments Tonkin (South China Sea) / R.B. Shakirov, A.V. Sorochinskaya, N.S. Syrbu et al. // *Bulletin of the FEB RAS*. – 2017. – № 4. – P. 38-49.

207. Shakirov R.B. Methane flux into the atmosphere in the Bien Dong (East Sea of Vietnam) / R.B. Shakirov, N.H. Lan, A.V. Yatsuk et al. // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2018. – Vol. 18 (3). – P. 250–255.
208. Shakirov R.B. Methane Flux into the Atmosphere in the South China Sea / R.B. Shakirov, A.V. Yatsuk, G.I. Mishukova, A.I. Obzhairov, I.G. Yugai, D.H. Cuong, N.H. Lan, A.A. Legkodimov, M.V. Shakirova // *Doklady Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 486, Part 1. – P. 533–536.
209. Shakirov R.B. Methane anomalies, its flux on the sea–atmosphere interface and their relations to the geological structure of the South-Tatar sedimentary basin (Tatar Strait, the Sea of Japan) / R.B. Shakirov, M.G. Valitov, A.I. Obzhairov, V.F. Mishukov, A.V. Yatsuk, N.S. Syrбу, O.V. Mishukova // *Mar. Geophys. Res.* – 2019. – Vol. 40. – P. 581–600.
210. Shakirov R.B. The features of methane fluxes in the western and eastern Arctic: A review. Part I / R.B. Shakirov, S. Mau, G.I. Mishukova, A.I. Obzhairov, M.V. Shakirova, O.V. Mishukova // *Geosystems of Transition Zones*. – 2020. – Vol. 4, № 1. – P. 004-025.
211. Shapiro N. Formation of a circulation in the quasiisopycnic model of the Black Sea taking into account the stochastic nature of the wind stress / N. Shapiro // *Phys. Oceanogr.* – 2000. – Vol. 10. – P. 513-531.
212. Snyder G.T. Ocean Dynamics and Methane Plume Activity in Tatar Strait, Far Eastern Federal District, Russia as Revealed by Seawater Chemistry, Hydroacoustics, and Noble Gas Isotopes / G.T. Snyder, A. Yatsuk, N. Takahata, R. Shakirov, H. Tomaru, K. Tanaka, A. Obzhairov, A. Salomatin, S. Aoki, E. Khazanova, et al. // *Front. Earth Sci.* – 2021. – Vol. 10. – P. 825679.
213. Sommerfeld R.A. CO₂, CH₄ and N₂O flux through a Wyoming snowpack and implications for global budgets / R.A. Sommerfeld, A.R. Mosier, R.C. Musselman // *Nature*. – 1993. – Vol. 361. – P. 140-142.
214. Southfront. – URL: <https://maps.southfront.org/brazil-oil-and-gas-infrastructure-map-update/> (24.10.2022)
215. Suess E. Marine cold seeps and their manifestations: geological control, biogeochemical criteria and environmental conditions / E. Suess // *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch)*. – 2014. – Vol. 103. – P. 1889.
216. Syrбу N. Cold Seeps and Heat Flow: Gas Hydrate Provinces Offshore Sakhalin Island. // N. Syrбу, A. Kholmogorov, E. Maltseva, A. Venikova. / *Water*. – 2024. – Vol. – 16. – Art.no. 213.
217. Syrбу N.S. Gasgeochemical features in the western part of the East Vietnam Sea (Bien Dong Sea) / N.S. Syrбу, Nguyen Hoang, R.B. Shakirov, A.O. Kholmogorov, A.L. Venikova, Le

- Duc Anh, A.A. Legkodimov // Vietnam Journal of Marine Science and Technology. – 2022. – Vol. 22(3). – P. 231–256.
218. Syrbu N.S. Geological features for the formation of gas-geochemical fields, including helium and hydrogen, in the water and sediments at the Vietnamese part of the South-China Sea. Georesursy / N.S. Syrbu, D.H. Kyong, T.S. Yakimov, A.O. Kholmogorov, Yu.A. Telegin, U. Tsunogai // Georesources. – 2021. – Vol. 23, № 3. – P. 132–142.
219. Syrbu N.S. Formation of abnormal gasgeochemical fields of methane, helium and hydrogen in Northern Vietnam, its coastal and adjacent water areas. / Syrbu N.S., Shakirov R.B., Le Duc Anh, Kholmogorov A.O., Iakimov T.S, Kalgin V.Yu. // Lithology and Mineral Resources. – 2020. – Vol. 55 (6). – P. 512–527.
220. Syrbu N.S. Formation of abnormal gasgeochemical fields of methane, helium and hydrogen in Northern Vietnam, its coastal and adjacent water areas / N.S. Syrbu, R.B. Shakirov, Le Duc Anh et al. // Lithology and Mineral Resources. – 2020. – Vol. 55 (6). – P. 512–527.
221. Takematsu M. Observations of eddies in the Japan basin interior / M. Takematsu, A.G. Ostrovski, Z. Nagano // Oceanogr. – 1999. – Vol. 55. – P. 237–246.
222. Talley L.D. Hydrographic observations in the Japan/East sea in winter, 2000, with some results from summer, 1999 / L.D. Talley, V.B. Lobanov, P.Ya. Tishchenko, V.I. Ponomarev, A.F. Sherbinin, V.A. Luchin // Oceanography of the Japan Sea Proceedings of CREAMS-2000 International Symposium. – Vladivostok: Dalnauka, 2001. – P. 25-32.
223. Tamaki K. et al. Possible active back-arc spreading of the Bonin Arc // Abstract of Symposium on «Geotectonics of Sagami Trough-Suruga Trough Junction Area» (First French-Japanese Symposium on Japanese Subduction Program). Jun. 04-05. 1981. Tokyo.
224. Tankard J. Petroleum Basin of South America / J. Tankard // AAPG Memoir 62. – 2003. – P. 216.
225. Tapponnier P. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine / P. Tapponnier, G. Pelzer, A.Y. Le Dain, R. Armijo, P. Cobbold // Geology. – 1982. – Vol. 10. – P. 611-616.
226. Tapponnier P. On the mechanics of the collision between India and Asia / P. Tapponnier, G. Pelzer, R. Armijo // Collision tectonics / ed. by M.P. Coward, A. Ries. (Geological Society Special Publication). – 1986. – № 19. – P. 115-157.
227. Tishchenko P. Calculation of the stability and solubility of methane hydrate in seawater / P. Tishchenko, C. Hensen, K. Wallmann, C.S. Wong // Chemical Geology. – 2005. – Vol. 219. – P. 37– 52.
228. Tomoda Y. Maps of free air and Bouguer gravity anomalies in and around Japan / Y. Tomoda // Tokyo Univ. Press., 1973.

229. Tran T.D. Cenozoic basement structure of the South China Sea and adjacent areas by modeling and interpreting gravity data / T.D. Tran, C.Q. Bui, H.P. Nguyen // *Rus. J. Pac. Geol.* – 2013. – Vol. 32, № 4. – P. 3–13.
230. Tran T.D. A Study on the Possibility of the Reactivation of the Fault System in the Western Part of the South China Sea as a Source of Geological Hazards / T.D. Tran, R.G. Kulinich, Q.M. Nguyen, V.S. Nguyen, T.D. Tran, T.T. Nguyen, B.D. Nguyen, T.L. Tran, K.D. Nguyen, X.T. Dang, D.C. Dao, T.S. Nguyen // *Rus. J. Pac. Geol.* – 2021. – Vol. 15, № 6. – P. 555–569.
231. Trehu A.M. Temporal and spatial evolution of a gas hydrate-bearing accretionary ridge on the Oregon continental margin / A.M. Trehu, M.E. Torres, G.F. Moore et al. // *Geology.* – 1999. – Vol. 27, № 10. – P. 939–942.
232. Tseng H.-C. Methane in the South China Sea and the Western Philippine Sea / H.-C. Tseng, C.-T.A. Chen, A.V. Borges, T.A. DelValls, Yu.C. Chang // *Continental Shelf Research.* – 2017. – Vol. 135. – P. 23–34.
233. Uda M. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1993 / M. Uda // *Ipm. Exp. Sta.* – 1993. – Vol. 5. – P. 57–190 (in Japanese with English abstract).
234. Uyeda S. Terrestrial heat flow in Japan / S. Uyeda, K. Horai // *J. Geophys. Res.* – 1964. – Vol. 69, № 10. – P. 2121–2141.
235. Vereshchagina O.F. Methane in water columns and sediments of the northwestern Sea of Japan / O.F. Vereshchagina, E.V. Korovitskaya, G.I. Mishukova // *Deep Sea Res. Pt II: Topical Studies in Oceanography.* – 2013. – Vol. 86/87. – P.25–33.
236. Visor SIG - Secretaría de Energía. — URL: <https://sig.energia.gob.ar/> (дата обращения 04.04.2023).
237. Vivier F. Volume transport of the Malvinas Current: Can the flow be monitored by TOPEX/POSEIDON? / F. Vivier, C. Provost // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 1999. – Vol. 104(C9). – P. 21105–21122.
238. Vivier F. Direct velocity measurements in the Malvinas Current / F. Vivier, C. Provost *Journal of Geophysical Research.* – 1999. – Vol. 104(C9). – P. 21083–21103.
239. Vlasova G.A. Influence of tropical cyclones of the South China Sea on variability of the Vietnamese Coastal Current Structure / G.A. Vlasova, B.X. Nguyen, D.M. Le, S.S. Marchenko // *Oceanology.* – 2022. – Vol. 62, № 1. – P. 13–21.
240. Vogt P.R. The Norwegian Barents Svalbard (NBS) continental margin: Introducing a natural laboratory of mass wasting, hydrates, and ascent of sediment, pore water and methane / P.R. Vogt, J. Gardner, K. Crane // *Geo-Marine Letters.* – 1999. – Vol. 19. – P. 2–21.

241. Wakita H. Origin of methane-rich natural gas in Japan: formation of gas fields due to large scale submarine volcanism / H. Wakita, Y. Sano, A. Urabe, Y. Nakamura // *Applied Geochemistry*. – 1990. – Vol. 5. – P. 263–268.
242. Wang P. Geology of the China Seas (Developments in marine geology. Serie 6) / P. Wang, Q. Li, C.-F. Li. – Amsterdam: Elsevier, 2014. – 667 p.
243. Watanabe S. Methane in the Western North Pacific / S. Watanabe, N. Higashitani, N. Tsurushima, S. Tsunogai // *J. of Oceanography (Japan)*. – 1995. – Vol. 51, № 1. – P.39-60.
244. Wefer G. Seasonal particle flux in the Bransfield Strait, Antarctica / G. Wefer, G. Fischer, D. Futterer, R. Gersonde // *Deep-Sea Research Part A*. – 1988. – Vol. 35, Iss. 6. – P. 891–898.
245. Wiesenburg D.A. Equilibrium solubility of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water / D.A. Wiesenburg, N.L. Guinasso // *Journal of Chemical & Engineering Data*. – 1979. – Vol. 24, Iss. 4. – P. 356–360.
246. Williams N.L. Quantifying anthropogenic carbon inventory changes in the Pacific sector of the Southern Ocean / N.L. Williams, R.A. Feely, C.L. Sabine, A.G. Dickson, J.H. Swift, L.D. Talley, J.L. Russell // *Mar. Chem.* – 2015. – Vol. 174. – P. 147-160.
247. Willson H.R. Classification of mesoscale features in the Brazil-Falkland Current confluence zone / H.R. Willson, N.W. Rees // *Progress in Oceanography*. – 2000. – Vol. 45(3–4). – P. 415–426.
248. Wu N. Gas Hydrate System of Shenhu Area, Northern South China Sea: Geochemical Results / N. Wu, H. Zhang, Sh. Yang, G. Zhang, J. Liang, J. Lu, X. Su, P. Schultheiss, M. Holland, Y. Zhu // *Journal of geological research*. – 2011. – Vol. 2011. – Article ID 370298 (10 p.).
249. Wu N. Introduction of preliminary report of Leg 184 in the South China Sea / N. Wu, Q. Cai // *Marine Geology*. – 1999. – Vol. 4. – P. 9-52.
250. Yamamoto S. Solubility of methane in distilled water and sea water / S. Yamamoto, J.B. Alcauskas, T.E. Crozier // *Journal of Chemical & Engineering Data*. – 1976. – Vol. 21, № 1. – P. 78–80.
251. Yao B. The gas hydrate in the South China Sea / B. Yao // *Journal of Tropical Oceanography*. – 2001. – Vol. 20 (2). – P. 20-28.
252. Yasui M. Studies of the thermal state of the earth. The 16-th paper: Terrestrial heat flow in Japan Sea / M. Yasui, T. Watanabe // *Bul. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.* –1965. – Vol. 43, PT. 3. – P. 549-563.
253. Ye W. Enhanced transport of dissolved methane from the Chukchi Sea to the central Arctic. / W. Ye, Y. Li, J. Wen, J. Zhang, N. Shakhova, J. Liu et al. // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2023. – Vol. 37. – P. e2022GB007368.

254. Yoon J.-H. Review on the seasonal variation of the surface circulation in the Japan/East Sea. / J.-H. Yoon, Yo.-J. Kim // *Journal of Marine Systems*. – 2009. – Vol. 78. – P. 226–236.
255. Yoshida O. Dissolved methane distribution in the South Pacific and the Southern Ocean in austral summer / O. Yoshida, H. Y. Inoue, S. Watanabe, K. Suzuki, S. Noriki // *J. Geoph. Res. Ocean*. – 2011. – Vol. 116. – P. C07008.
256. Yun J.W. Subsurface gas offshore of northern California and its link to submarine geomorphology / J.W. Yun, D.L. Orange, M.E. Field // *Marine geology*. – 1997. – Vol. 154. – P. 357–367.
257. Zhang X. Distribution and Discharge of Dissolved Methane in the Middle Okinawa Trough, East China Sea / X. Zhang, Z. Sun, L. Wang, X. Zhang, B. Zhai, C. Xu, W. Geng, H. Cao, X. Yin, N. Wu // *Front. Earth Sci*. – 2020. – Vol. 8. – P. 333.