

## **ОТЗЫВ официального оппонента**

на диссертацию на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Холмогорова Андрея Олеговича

на тему: «Перенос растворенного метана течениями в  
некоторых районах мирового океана»

по специальности 1.6.17 – «Океанология»

**Актуальность.** Диссертационная работа А.О. Холмогорова посвящена исследованию особенностей распределения метана в области струйных бароклинных течений, мезомасштабных вихрей и основных факторов, влияющих на их эволюцию. Актуальность работы обусловлена важностью изучения связи газогеохимии и физической океанологии, при помощи которой можно описать пути распространения растворенного метана в морской среде. 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 современной «климатической повестки». Кроме того, выполненное в рамках диссертационной работы 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.

**Общая характеристика работы.** Цель работы – определение особенностей распределения метана в области струйных бароклинных течений, мезомасштабных вихрей и основных влияющих факторов. Диссертационная работа А.О. Холмогорова четко структурирована, содержит

все необходимые разделы, отражающие суть проведенных исследований. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, включающих обзор литературы и собственные исследования, заключения, а также списка литературы. Работа изложена на 119 страницах, иллюстрирована 45 рисунками и содержит 2 таблицы. Список литературы включает 257 источников.

**Первая глава** «Изученность газогеохимических полей» представляет собой обширный обзор по истории исследований затронутых в диссертационной работе районов мирового океана. Приведены сведения по отдельным районам, годам исследования как российскими учеными, так и иностранными коллегами. Выводы, сделанные диссертантом в конце главы, формируют представление как о вертикальном распределении концентрации метана в водном столбе, так и о его пространственной приуроченности к различным геологическим структурам, разломам, выходам газа, к зонам с аномальными концентрациями метана в донных осадках. В конце главы автор делает заключение, что корреляция метана в придонном слое воды с его аномалиями в кернах донных отложений объясняет повышенные концентрации метана в поверхностном водном слое, на промежуточных глубинах и в придонном слое. Таким образом, активность газообмена на границе «дно-вода-атмосфера» обусловлена активным выходом  $\text{CH}_4$  из донных отложений и контролируется комплексом геологических и гидрологических факторов.

**Во второй главе** «Материалы и методы» представлены методики газогеохимических исследований, которые закреплены в Паспорте лаборатории газогеохимии ПС 1.051-21, утвержденном Свидетельством Росстандарта №58 от 21.12.2021. Подробно описан метод «HeadSpace» для оценки концентрации растворенного в воде метана. Приведены другие методы, использованные для решения поставленных задач, такие как STD –



зондирование, газогеохимический, геоструктурный и Лагранжев анализы. Подробно описаны районы работ и методика отбора проб. Содержание главы подтверждает комплексность применённых методов, компетентность и профессионализм автора.

**В третьей главе** «Перенос растворенного метана в Татарском проливе и центральной котловине Японского моря» представлены результаты исследования особенностей распределения метана как в Татарском проливе, так и на разрезе вдоль 134° в.д. от возвышенности Ямото до континентального склона Японской котловины. Подробно разобрана система течений, мезомасштабных вихрей и пути переноса растворенного в морской воде метана от источников, расположенных на западном шельфе острова Сахалин и в глубоководной зоне вблизи оси Татарского прогиба. Определены сезонные особенности данных процессов, выполнена оценка концентраций растворенного в водной толще метана, а также определены значения локальных максимумов и приуроченность их к глубине залегания сезонного пикноклина. В конце главы автор делает вывод, что для дальнейших исследований особенностей переноса метана под влиянием гидрометеорологических и тектонических условий необходимо исследовать район привьетнамского шельфа Южно-Китайского моря, расположенный в западной части тропической зоны Тихого океана.

**Четвертая глава** «Влияние тектонических и гидрометеорологических условий на генезис и миграцию метана в шельфовых водах восточного Вьетнама» посвящена изучению источников формирования газовых скоплений и путей их миграции в верхние слои земной коры, водную толщу и атмосферу. В главе представлена информация о тектонической структуре исследуемого района, его гидродинамическом режиме, а также результатах исследования распределения метана в бассейне рек Красной и Фу Хань. Автор приходит к выводу, что система тектонических разломов, сформировавших

осадочные бассейны рек, создает необходимые эндогенные условия для образования и миграции метана и его гомологов в донные осадки и морские воды. Совместный анализ современных и архивных данных позволил автору сделать вывод о существовании в бассейне реки Красной глубинных источников углеводородных газов с многолетней стабильной дегазацией метана и его гомологов, что, возможно, определило формирование здесь газового месторождения. Анализ роли тайфуна NAKRI в транспортировке метана в водную толщу бассейна Фу Хань показал, что часть метана доставляется сюда из других районов Южно-Китайского моря течениями от нефтегазовых скоплений и месторождений у побережья острова Калимантан и Палаван в бассейн Фу Хань. В конце главы автор делает вывод, что для дальнейшей оценки влияния течений на распределение полей метана необходимо исследовать районы проливов Брансфилд, Антарктики и моря Уэдделла как примеров рифтогенной зоны с повышенной сейсмической и вулканической активностью.

**Пятая глава** «Перенос метана течениями в проливе Брансфилд, Южный океан» посвящена анализу данных, полученных в рамках 87 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», в котором была выполнена съемка пролива Брансфилда. Автор отмечает, что низкие значения концентрации растворенного метана говорят о переменной активности эндогенных (гидротермальных) источников. Вероятно, обнаруженное повышение концентрации метана связано с перемещением водных масс из глубоководной части Антарктического пролива, где на дне существуют еще не закартированные участки газовой разгрузки. Для выявления источников локальных повышенных концентраций метана в водной толще, показанных на примере района действия 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.



**Шестая глава** «Происхождение локальных максимумов содержания метана под сезонным пикноклином в рингах Южно-Атлантического течения» представляет результаты комплексного анализа с привлечением данных газогеохимических и океанографических исследований, а также численного моделирования. Автор делает выводы о том, 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 Южно-Атлантическом течении, в меандрах которого образуется пара вихрей противоположного знака. Газохимический анализ подтвердил гипотезу о формировании области максимальных концентраций растворенного метана под нижней границей пикноклина в слое 50-200 м в зоне взаимодействия вихрей.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Результаты исследований опубликованы в 17 научных статьях (в том числе 14 из списка изданий, рекомендованных ВАК), 4 главы в монографии, 10 тезисов, 3 патента. Участие в серии прибрежных и морских экспедиций. Использование в исследованиях современного аналитического оборудования и уникальных методик обуславливает достоверность получаемых результатов.

**Научная новизна.** Одним из важных результатов исследовательской работы является впервые показанный перенос метана от его придонных источников течениями под нижней границей сезонного пикноклина. Впервые сопоставлены данные экспедиционных газогеохимических, гидрофизических, океанографических измерений, а также результаты математического моделирования. Показаны общие особенности распределения метана в области струйных бароклинных 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.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные в результате выполнения диссертационной работы материалы будут востребованы при дальнейшем изучении районов углеводородной разгрузки с учётом актуальности экологических, климатических и ресурсных исследований. 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).

Можно заключить, что сформулированная цель работы автором достигнута, а поставленные задачи выполнены целиком. **Представленные научные положения, выводы и рекомендации являются весьма обоснованными.** Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации.

В работе нет существенных методических недостатков. Текст диссертационной работы оформлен должным образом. Тем не менее можно сделать следующие замечания:

1. Метод определения равновесных концентраций газов «HeadSpace» в воде широко зарекомендовал себя своей простотой, в том числе и для оперативной работы на борту научно-исследовательских судов. Во второй главе автор сообщает, что в качестве свободной фазы используется гелий. Однако есть публикации, в которых указывается, что гелий является неудачным выбором в силу нелинейности кривой растворимости в диапазоне от 20-30 °С, что является обычной температурой при работе с пробами. Также



гелий нарушает условия парофазного равновесия. Поэтому для метода «HeadSpace» следует выбирать газы, лишенные указанных недостатков, такие как синтетический воздух или азот.

2. В качестве демонстрации вертикальной структуры поля концентрации растворенного в воде метана вдоль исследуемых разрезов автор приводит красочные рисунки, из которых следует, что минимальная концентрация метана фиксируется в придонном слое воды. По направлению к поверхности воды концентрация растет, достигая своего максимума под сезонным пикноклином. При этом в тексте сообщается, что наряду с пузырьковыми районами углеводородной разгрузки, источником метана является фактически вся поверхность дна. Возникает вопрос: почему в придонном слое воды концентрации метана минимальны? Так же автор в параграфе «2.2.2. Анализ газа» не приводит информацию об учете давления, возникающего в стеклянных бутылочках в процессе интенсивного встряхивания. Неучет этого давления, особенно для проб с больших глубин (300 и более м), способен существенно занижить показания измеренной концентрации растворенного метана (Мизандронцев и др. 2020).

3. Автор приводит данные о районах исследования, в том числе данные о зарегистрированных местах разгрузки метана из донных источников. Но, к сожалению, нигде не приводится информация о дебите газа для таких локальных источников. Так же автор в выводах пятой главы упоминает процессы синтеза и окисления метана. В статье Н.Г. Гранина с соавторами (2013) говорится, что бактериальное сообщество аэробных метанотрофов (бактерии родов *Methylomonas*, *Methylotrophus*) способно окислить большую часть растворенного в воде метана. Зная поток метана из локальных источников и скорость окисления метана для конкретного района исследования, можно пересмотреть пути и дистанцию распространения метана за счет течений.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку полученных результатов и не снижают значимости диссертационного исследования А.О. Холмогорова.

Диссертация отвечает требованиям диссертационного совета ТОИ ДВО РАН к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.17 - Океанология (по географическим наукам).

Таким образом, соискатель Холмогоров Андрей Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.17 - «Океанология».

Согласен на включение персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

**Официальный оппонент:**

Макаров Михаил Михайлович, старший научный сотрудник, и.о. зав. лабораторией междисциплинарных эколого-экономических исследований и технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Лимнологического института СО РАН

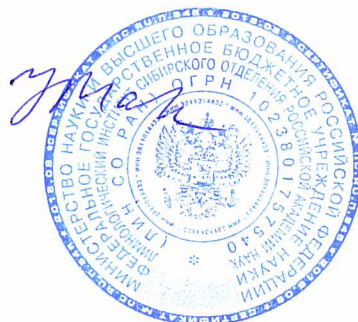
**Адрес места работы:** 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, д. 3

**Рабочий e-mail:** mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru

**Телефон:** 8(3952) 426504

кандидат географических наук,  
по специальности 25.00.28 - Океанология

Подпись *Макарова М.М.* заверено  
ученым секретарем *Макешиловой Н.В.*  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Лимнологический институт Сибирского отделения  
Российской академии наук (ЛИН СО РАН)  
« 13 » марта 20 24г.



М.М. Макаров