

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН ИМГиГ ДВО РАН
д.ф.м.н. Богомолов Л.М.

«29» марта 2024 г.



ОТЗЫВ

Ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук на диссертационную работу
Холмогорова Андрея Олеговича
«ПЕРЕНОС РАСТВОРЕННОГО МЕТАНА ТЕЧЕНИЯМИ В НЕКОТОРЫХ РАЙОНАХ МИРОВОГО ОКЕАНА», представленную на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.17 – Океанология.

Актуальность исследований, выполненных соискателем, определяется возрастающим вниманием мирового сообщества к изучению нефтегазоносного потенциала океана, в котором заметную роль играют газогеохимические исследования содержания природных и попутных газов в его водах. Диссертационная работа посвящена пространственному распределению метана в морских водах по данным многочисленных экспедиционных исследований, а также оценке возможной роли его распространения от источника под воздействием адвективных факторов. Места выхода метана из подводных разломов традиционно приковывают к себе интерес, так как они часто используются для локализации этих разломов, или как индикаторы месторождений углеводородного сырья. При этом смещение вод с повышенной концентрацией этого газа могут затруднять определение таких залежей. Кроме того, большое научное и прикладное значение имеет процесс поступления метана из морской воды в атмосферу, при этом роль сезонного пикноклина, который может

существенно замедлить поступление газа к поверхности моря, исследована к настоящему времени недостаточно. Именно оценка роли термохалинного барьера, способствующего удержанию газа в морской воде и, соответственно, горизонтальным перемещением под влиянием течений, является центральной идеей диссертации, и она рассматривается применительно к различным районам Мирового океана. Указанные обстоятельства определяют высокую степень актуальности предпринятого А.О. Холмогоровым исследования.

Диссертация общим объемом 119 страниц состоит из введения, 6 глав и заключения, она содержит 45 иллюстраций и 2 таблицы. Список цитированной литературы насчитывает 257 источника.

Во **Введении** раскрываются объекты исследования (их в работе несколько и расположены в весьма удаленных друг от друга районах Мирового океана) и его предмет, основная проблематика работы, обосновывается ее актуальность, поставлены цель и задачи исследования, дана характеристика научной новизны и прикладного значения диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, также представлена апробация результатов исследования. Сразу следует отметить, что автор исследования активно публиковал полученные им результаты в журналах высокого уровня и представлял их на различных конференциях. Большое число статей в ведущих отечественных и зарубежных журналах (таких, как «Water» – важное достоинство рассматриваемой диссертационной работы и характеризует соискателя как известного, весьма квалифицированного специалиста.

Глава 1. представляет собой весьма качественный обзор исследований районов повышенной концентрации метана в морской воде в Японском и Восточно-Китайском морях. В ней не содержится собственных результатов автора диссертации, поэтому останавливаться на ее анализе нет смысла.

В Главе 2 представлены материалы, послужившие информационной основой работы, и методы исследования. Следует подчеркнуть, что автором собран значительный фактический материал в большом количестве морских экспедиций, в которых он принял личное участие. Это важное достоинство рецензируемой диссертации, и характеризует ее автора как специалиста, имеющего большой практический опыт как отбора проб в полевых условиях, так и их анализа. Объем и качество материалов наблюдений, на которых основана работа, производит сильное впечатление. Помимо собственно гидрохимических исследований, в работе использовались данные судовых океанологических зондирований, а в некоторых экспедициях для определения температуры и солености по ходу судна использовалась проточная система с термосолинографом. Автор также использовал результаты лагранжева моделирования движения вод, выполненного его коллегами при подготовке совместных публикаций.

Глава 3 является наиболее объемной и содержательной частью диссертационной работы. Она посвящена особенностям пространственного распределения растворенного метана в Татарском проливе и в центральной части Японского моря, вдоль 134 меридиана вблизи банки Ямато. Основное внимание уделено району, в котором источником метана являются разломы, ориентированные вдоль западного берега о. Сахалин. Здесь было выполнено несколько морских экспедиций ТОИ ДВО РАН и собран внушительный экспериментальный материал, включавший океанологические и гидрохимические исследования на двух зонально ориентированных разрезах. Автором убедительно показано, что наибольшие концентрации газа отмечены в районе его выхода на участке разлома между параллелями 47 и 48° с.ш., и они уменьшались в северном и западном направлениях. Гипотеза о вероятной адвекции метана течениями согласуется с направлением двух ветвей Цусимского течения, одна из которых распространяется в северную часть пролива, а вторая разворачивается в циклоническом направлении, вначале на запад, а затем на юг. Также очень интересны и наглядны примеры

анализа зон с высокой концентрацией газа на шельфе Сахалина, лежащих ниже сезонного пикноклина (по результатам экспедиции в мае).

В этой главе приведены также результаты лагранжева моделирования движения водных масс в Татарском проливе. Показано движение теплой и холодной водных масс в начале сентября, что относится к теплому периоду года. Это новый подход, хотя с точки зрения рассматриваемой диссертации стоило бы задать положение маркеров на период съемки и посмотреть, как они распространятся, скажем за декаду или за месяц. Это гораздо в большей степени соответствовало бы теме диссертации.

Следующий очень интересный результат анализа влияния течений относится к центральной части Японского моря, где был выполнен меридиональный разрез между берегом материка и банкой Ямато. В теплом Восточно-Корейском течении вблизи ее западного склона выявлена локальная максимальная концентрация метана в 8.2 нМ/л, она также наблюдается под сезонным пикноклином. Это подтверждает центральную идею диссертационной работы, связанную с ролью слоя скачка плотности морской воды в формировании зон высокой концентрации газа на определенной глубине, что препятствует его выходу в атмосферу и способствует его распространению в прилегающие к источнику районы под действием течений.

В **Главе 4** рассматриваются особенности пространственного и вертикального распределения метана в области, прилегающей к побережью Вьетнама, где также был выполнен большой объем экспедиционных гидрохимических исследований. Весьма интересные результаты были получены в районе устья реки Красная, где концентрация метана определялась на трех станциях, образующих вдольбереговой разрез. Высокие концентрации газа были выявлены на одной из них, находившейся посередине разреза (станция 54), и несколько меньшие на его краях. Также, как и в Японском море, в прибрежной акватории Восточно-Китайского доказана важная роль термохалинного барьера, препятствующего подъему

растворенного метана в поверхностный слой воды и далее в атмосферу. Распространение воды с высокой концентрацией растворенного газа в сторону от его источника согласуется с высказанной автором идеей о существенной роли адвективных факторов в этих процессах.

К аналогичным выводам приводит также анализ материалов измерений, выполненных в расположенном южнее бассейне реки Фу Хань, где в пробах донных осадков повсеместно были обнаружены повышенные концентрации метана, возрастающие с севера на юг. При этом не было выявлено прямого соответствия высоких концентраций метана в донных осадках и повышенного содержания этого газа в водной толще, таким образом происхождение метана в воде этого района может быть продуктом частично местных источников, частично доставленным сюда течениями из других районов, где находятся активные донные источники метана и его гомологов.

Интересные результаты получены соискателем и при анализе системы течений, формирующихся при зарождении тайфуна «NAKRI» над Южно-Китайским морем. Тропические циклоны оказывают масштабное воздействие на поверхностный слой океана, усиливая циркуляцию и перемешивание вод, поэтому их влияние на вариации пространственного распределения растворенного метана значительно. Эти эффекты мало изучены, и полученные соискателем результаты являются новыми и важными. При данном конкретном положении центра барического образования связанный с ним ветер усиливал поток Вьетнамского течения, ориентированного на юг, что способствовало переносу растворенного метана.

В главе 5 анализируют результаты исследования переноса растворенного метана в проливе Брансфилд, разделяющего Южные Шетландские острова и Антарктический полуостров, и в который распространяются воды из морей Уэдделла и Беллинсгаузена. Пролив особенно интересен как рифтогенная зона, характеризующаяся современной

вулканической активностью, повышенной сейсмичностью и обнаруженными участками гидротермального проявления. В результате оценено влияние течений на распространение полей метана в водной толще пролива и рассмотрены перспективы дальнейших исследований в этом районе.

В проливе происходит перемешивание вод из смежных морей с водой шельфовых участков Южных Шетландских островов и Антарктического полуострова. Вдоль северной границы пролива протекает течение Брансфилд с водой, относительно более теплой в сравнении с температурой вод у Антарктического полуострова, поступающих из моря Уэдделла. В проливе высокая скорость седиментации.

Изучение распространения метана, гидрографические исследования проводились в рейсе 87 НИС «Академик Мстислав Келдыш» на 3-х разрезах в западной части пролива, а более детальное изучение распространения метана осуществлено в северной части моря Уэдделла. В целом на всех объектах концентрации растворенного метана в пробах были невысоки. Локальные аномалии концентрации CH_4 и их вероятные источники не обнаружены, что позволило сделать вывод о непостоянном функционировании эндогенных источников газа.

В антарктических водах идет активное перемешивание по вертикали вод, что не способствует формированию пикноклина. В силу высокой скорости вод, в толще возрастает турбулентность, не происходит резких изменений плотности и не формируется пикноклин. Распределение течений в антарктических водах характеризуется другими механизмами переноса растворенного метана относительно вод низких широт. Сделан вывод, что в Атлантическом секторе Южного океана находятся районы дальних и быстрых переносов полей метана на глубинах вплоть до поверхности вод.

В главе 6 на примере Южно-Атлантических течений для выявления формирования локальных участков повышенных значений метана в водной толще юго-западной части Атлантики диссертантом привлечены океанографические, газогеохимические данные и проведено моделирование

согласно Лагранжева анализа динамики океана. Было проведено исследование природы возникновения локальных максимумов концентрации метана под сезонным пикноклином в районах Южного Атлантического течения. Это осуществлено на основе анализа полей скорости вод в районе исследования с применением модели NEMO.

Дано описание распределения растворенного метана от территориальных вод Бразилии до Фолклендских (Мальвинских) островов. Одним из наиболее значимых источников поступления CH_4 в толщу атлантических вод являются выходы углеводородов с атлантического шельфа Южной Америки. Также активные поступления углеводородов происходят со дна рифтогенных бассейнов в районе Фолклендских островов. Проанализировав информацию о течениях в этом районе, автор сделал вывод об их определяющей роли в переносе растворенного метана в зону их противодействия. Охарактеризован результат взаимодействия теплого Бразильского и холодного Мальвинского течений, образующих интенсивный океанический фронт с формированием рингов противоположного знака, водоворотов, струй, то есть образовалась сложная система течений.

Автор проанализировал материалы исследований течений, полученных в рейсе 87 НИС «Академик Мстислав Келдыш». В результате представлен механизм переноса растворенного метана течениями под пикноклином, основанный на сопоставлении экспериментальных данных и схем численного моделирования с применением Лагранжева анализа динамики океана, основанного на вычислении траектории виртуальных частиц жидкости согласно модели общей циркуляции океана. Уравнение движения в Лагранжевой механике основано на принципе наименьшего действия (принцип Гамильтона). В итоге представлены результаты определения положения потенциальных источников метана на разрезах одиннадцати прямолинейных профилей в районе исследований. Показано, как растворенный метан мог распространяться под сезонным пикноклином к конкретным океанографическим станциям через меандры Южного

Атлантического течения. Метан образует область максимальных концентраций под нижней границей пикноклина в слое 50–200 м в зоне взаимодействия вихрей, что связано с переносом компактной Лагранжевой структуры с Патагонского шельфа.

В **Заключении** приведены основные результаты выполненного диссертационного исследования. Кроме того, в каждой главе содержится небольшое заключение, что очень полезно, это позволяет лучше оценить полученные в ней результаты.

Научная новизна исследования заключается в комплексном анализе материалов экспедиционных исследований на стыке газогеохимии и физической океанографии, позволившее впервые показать роль термохалинного барьера, препятствующего проникновению растворенного метана в поверхностный слой моря, что способствует его переносу от природных источников течениями под нижней границей сезонного термоклина. 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.

Достоверность полученных результатов подтверждается большим объемом материала, собранного автором в многочисленных морских экспедициях ТОИ ДВО РАН, соблюдением принятых методик при его обработке, использованием современных, апробированных методов анализа полученных данных.

Текст диссертации написан легко, работа читается с интересом, в ней содержится небольшое число шероховатостей – опечаток, неудачных фраз, различного рода неточностей. Здесь явно проявляется различный уровень знаний автора в гидрохимических и физических аспектах океанологии, по второй части гораздо большей претензий. Как уже отмечалось выше, работа

основана на очень большом объеме данных гидрохимических и океанологических исследований, выполненных в рейсах ТОИ ДВО РАН, в большинстве которых А.О. Холмогоров принимал личное участие. Все это позволяет характеризовать его как сложившегося, компетентного специалиста.

Диссертационная работа не свободна от ряда недостатков, часть из которых являются существенными. По ней можно сформулировать следующие **замечания**, определяемые как основные и менее значимые:

Основные замечания:

1. Наиболее существенным замечанием является очень слабая увязка между собой исследований, выполненных в различных районах. На наш взгляд, в целях и задачах необходимо было сформулировать поиск общих закономерностей распространения растворенного метана, а также определение неких специфических особенностей в разных районах, и отразить это в основных результатах работы.

2. основные выводы работы не содержат географической привязки, что является существенным недостатком для диссертации, представляемой на географические науки.

3. В основных выводах подчеркивается роль пикноклина, препятствующего движению растворенного метана к поверхности моря и далее в атмосферу. В то же время в работе приводится пример, когда высокие концентрации были получены на горизонте 4 м в Татарском проливе в октябре 2017 г. Эта ситуация, не укладывающаяся в данный постулат, и она не анализируется должным образом. Автору следовало рассмотреть особенности распространения растворенного метана в условиях разрушения сезонного термоклина, материал для этого имелся. И как-то отразить в выводах, что они относятся к теплomu сезону, и не учитывают зимнюю конвекцию.

4. Защищаемые положения возникают как бы ниоткуда, не связаны с текстом диссертации, что снижает их доказательность. Следовало бы как-то к ним подвести (.. из этих результатов вытекает...).

5. Часть публикаций, указанных в автореферате как выполненные по теме диссертации, к ней непосредственно не относятся (например, статьи в журналах №№ 7, 10, 11, 16). Их не следовало включать в этот список.

Менее значимые вопросы:

6. Автор недостаточно изучил схему течений Татарского пролива. Он называет северную ветвь Цусимского течения Западно-Сахалинским течением, что неверно. Это узкое струйное холодное течение, ориентированное на юг и движущееся вдоль юго-западного берега Сахалина от Чехово-Ильинского мелководья до полуострова Крильон.

7. Большие претензии к результатам моделирования течений в Татарском проливе (рисунок 7). Модель не показала важной струи Цусимского течения, разворачивающегося циклонически в районе параллели 48° с.ш. Именно эта ветвь, вероятно, обеспечивает транспорт метана от материкового склона Сахалина в сторону берега Приморья (что видно на рисунке 6), вряд ли повышенные концентрации газа связаны с влиянием Приморского течения. На рисунке, кстати, Западно-Сахалинское течение отсутствует.

8. Распределение теплых и холодных вод в Татарском проливе по результатам моделирования (рисунок 7) также противоречит существующим представлениям о движении водных масс вдоль западного берега Сахалина. Теплая вода сосредоточена у берега, а не в центральной части пролива, и непонятно откуда взялась холодная вода в районе Александровска, в теплый период года она там не наблюдается.

9. На океанологических разрезах следовало рассчитать вертикальные распределения геострофических течений, такую возможность предоставляет, например, программный пакет OceanDataView. Все рассуждения о влиянии течений на перенос растворенного газа сразу бы приобрели гораздо более

серьезные основания при сравнении распределений скорости и концентрации метана.

10. В районе р. Красная (шельф Вьетнам) на станции 54, на которой основные концентрации метана, пикноклин не выражен. Что же задерживает газ на глубине? Идея о том, что течения разносят метан в обе стороны от этой станции, выглядит неубедительно.

11. Течение вдоль берега Вьетнама, индуцированное тропическим циклоном, выглядит убедительно только в южной части. В северной, где берег прикрыт островом Хайнань, транспорт метана сомнителен, а именно там находятся его источники. Этот момент недостаточно рассмотрен в работе.

12. В главе 5 приведены результаты исследования концентрации растворенного метана на разрезах в проливе Антарктик и море Уэддела. Полученные результаты весьма интересны, в особенности два разноглубинных максимума в проливе, но они никак не обсуждаются в работе. В целом глава 5 не вносит существенного смыслового вклада в диссертацию, вероятно, ее можно было сократить без заметного ущерба.

13. В главе 5 не приводятся убедительных доказательств существования пикноклина в водах пролива Брансфилд. Следовало более детально рассмотреть этот вопрос.

14. Практическое значение работы сформулировано очень вяло, в реальности оно существенно более серьезное.

15. При характеристике личного вклада приводится много работ, в которых автор принимал участие, но не все они имеют отношение к теме диссертации. Их упоминание неуместно, также как и упоминание здесь имени автора в третьем лице.

16. Большинство иллюстраций очень мелкие и читаются с большим трудом, что затрудняет восприятие диссертации и автореферата.

Заключение

Выявленные недостатки снижают впечатление от диссертационной работы, но не изменяет ее в целом высокой оценки как законченного научного исследования, в котором получен ряд важных научных результатов, имеющих к тому же существенное прикладное значение. В изучаемых акваториях автором получены пространственные распределения растворенного метана, показывающие его перемещение от источника в направлениях движения вод под действием существующих в них течений, что подтверждает одно из основных положений диссертации. Показано также, что во многих случаях зоны высокой концентрации находятся ниже сезонного пикноклина, что указывает на важную роль термохалинного барьера, не пропускающего метан в поверхностный слой моря и далее в атмосферу, что также является весомым научным результатом.

Диссертационная работа выполнена на достаточно высоком уровне, научная новизна и значимость основных ее результатов не вызывает сомнений. Эти результаты широко и полно опубликованы, в том числе в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Также необходимо отметить, что соискатель весьма активно представлял результаты своих исследований на симпозиумах и конференциях, в том числе весьма достойного уровня.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.17 – Океанология (по географическим наукам), а также критериям, определенным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, с изменениями.

Таким образом, соискатель Андрей Олегович Холмогоров заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.17 – Океанология.

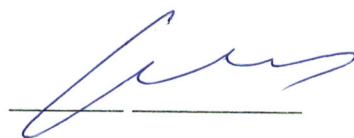
Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета ИМГиГ ДВО РАН 27 марта 2024 г. года (протокол № 2).

Отзыв составили:

Шевченко Георгий Владимирович, доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории цунами ИМГиГ ДВО РАН

Я, Шевченко Георгий Владимирович, даю согласие на включение моих
персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного
совета и их дальнейшую обработку.

«27» марта _____ 2024 г.



Подпись

Веселов Олег Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности.

Я, Веселов Олег Васильевич, даю согласие на включение моих персональных
данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их
дальнейшую обработку.

«27» марта _____ 2024 г.



Подпись

Собственноручные подписи Шевченко Г.В. и Веселова О.В. удостоверяю:

Старший специалист отдела кадров
и делопроизводства



Хилецкая С.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской
академии наук.

Фактический адрес: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки 1Б,

Тел.: +7 (4242) 791-517

Сайт: www.imgg.ru