

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА

На правах рукописи



ШАХОВА Наталья Евгеньевна

Метан в морях Восточной Арктики

Специальность 25.00.28 -- Океанология

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

15 АПР 2010

Москва – 2010

Работа выполнена в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

Евгений Александрович Романкевич,
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН;

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

Николай Никитич Романовский,
Московский Государственный Университет, имени М.В. Ломоносова

доктор физико-математических наук,

Александр Самуилович Глизбург,
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

Ведущая организация:

Институт Мерзлотоведения имени академика П.И. Мельникова СО РАН

Защита диссертации состоится «22» апреля 2010 г. в 14 часов на заседании Диссертационного Совета Д 002.239.03 при Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН по адресу: 117997, г. Москва, Нахимовский пр. 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Отзывы на диссертацию и автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «16» марта 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.239.03,
кандидат биологических наук.
Т.А.Хусид



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Метан (CH_4) является вторым по значимости парниковым газом, концентрации которого в атмосфере Земли продолжают расти: за последние 150 лет эмиссия возросла более чем в 2.5 раза (Stern & Kaufmann, 2003). Все возрастающий интерес к изучению этого компонента атмосферы объясняется тем, что радиационная активность метана значительно выше, а темпы прироста средне-планетарных концентраций в атмосфере примерно в 2-4 раза выше, чем у двуокиси углерода (CO_2) – важнейшего парникового газа (IPCC, 2001; 2007). Более того, последняя оценка вклада CH_4 в современный потенциал глобального потепления, рассчитанная для ближайших 100 лет с включением ранее не учитываемых обратных связей в климатической системе, показала что ранние оценки недоучитывали климатическую роль CH_4 примерно на 20-40% (Shindell et al., 2009). Это означает, что суммарный радиационный форсинг от 1 кг CH_4 , превышает аналогичную величину для CO_2 примерно в 30-35 раз, а не в 25 раз как было принято считать.

Максимально высокие концентрации (на 8-10% выше фоновых) регистрируются в атмосфере Арктического региона (т.н. Арктический максимум CH_4). До недавнего времени предполагалось, что в формировании Арктического максимума CH_4 участвуют исключительно наземные северные экосистемы, в то время как вклад Арктических морских экосистем не рассматривался. В области исследования газообразных компонентов морского цикла углерода, и в частности, цикла CH_4 , сложилась парадоксальная ситуация: с одной стороны, ни у кого не вызывает сомнения тот факт, что Северный Ледовитый океан (СЛО), как часть Арктической экосистемы, чувствителен к глобальным изменениям климата (ACIA, 2004); а, с другой стороны, вклад СЛО в морской цикл углерода, включая его газообразные компоненты (CO_2 и CH_4), международным научным сообществом практически игнорируются (Feely et al., 2001; Sabine and Hood, 2003; Takahashi et al., 2002). Более того, в работе Feely et al. (2001) СЛО даже не упоминается как часть Мирового океана.

Согласно палео-климатическим данным, в результате роста температуры, сопровождающего смену климатических эпох, эмиссия CH_4 и, соответственно, атмосферные концентрации, увеличиваются от 0.3-0.4 ppm (холодные эпохи) до 0.6-0.7 ppm (теплые эпохи). Тем не менее, рост эмиссии CH_4 за последние два столетия привел к беспрецедентному увеличению атмосферных концентраций CH_4 в

атмосфере Арктического региона до 1.85 ppm. Существует мнение, что данный прирост, который составляет ежегодно 0,3-1,2%, ассоциирован с антропогенной деятельностью. Тем не менее, обращает на себя внимание тот факт, что: 1) Арктический максимум CH_4 существует исключительно в теплые климатические эпохи; 2) в эти эпохи он поддерживается круглогодично; 3) атмосферный максимум CH_4 регистрируется не над умеренными широтами (между 20° с.ш. и 60° с.ш., где сжигается >90% ископаемого топлива), а над Арктикой/Субарктикой, где антропогенная активность минимальна (между 60° с.ш. и 70° с.ш. сжигается <5% ископаемого топлива); 4) существование Арктического максимума не может быть объяснено циркуляцией воздушных масс (Steele et al., 1987); 5) эмиссия CH_4 из наземных Арктических экосистем также недостаточно велика для круглогодичного поддержания Арктического атмосферного максимума CH_4 (Shakhova and Semiletov, 2009).

Это означает, что в межледниковые периоды в северных широтах существует дополнительный мощный природный источник CH_4 , роль которого до настоящего времени не оценивалась. Таким источником могут служить донные залежи CH_4 , вовлечение которых в современный биогеохимический цикл определяется геологическим фактором - состоянием реликтовых многолетних мерзлых толщ (далее по тексту - подводная мерзлота), которая претерпевает более значительное изменение термического режима, по сравнению с наземной мерзлотой, в геологическом масштабе времени (>5-10 тыс. лет). Кроме этого, в Арктическом регионе наблюдается потепление климата, которое проявляется в росте среднегодовых температур воздуха и воды, сокращении площади морского и пресного льда, уменьшении толщины снега и таянии ледников, изменении температурного режима мерзлоты (ACIA, 2004). В этой связи, изучение шельфа морей Восточной Арктики (МВА), который представляет собой самый обширный ($2.1 \times 10^6 \text{ км}^2$) и мелководный шельф (средняя глубина <50 м) Мирового океана, где предположительно находится более 80% существующей подводной мерзлоты, и под которой законсервирован огромный резервуар углеводородов, как возможного источника CH_4 в атмосферу Арктического региона является чрезвычайно актуальной задачей.

В основу данной работы положено использование междисциплинарного подхода, который заключается в комплексном использовании океанографических, геохимических, гидро-акустических, геофизических, изотопных и математических методов для изучения процессов и факторов, оказывающих влияние на

распределение растворенного CH_4 в водном столбе и формирование современной пространственно-временной изменчивости потоков CH_4 в структуре годового баланса. В работе приводятся результаты анализа новых данных, основанных на фактическом материале, касающемся наименее изученного вопроса о вкладе шельфа МВА в современную эмиссию CH_4 в атмосферу Арктического региона, а именно: 1) карто-схемы межгодовой изменчивости распределения растворенного CH_4 в придонных и поверхностных водах МВА; 2) количественные оценки диффузионных, пузырьковых и суммарных потоков в системе «дно-водная поверхность-приводный слой атмосферы»; 3) количественные оценки отдельных компонентов в структуре суммарной годовой эмиссии CH_4 из акватории МВА в атмосферу Арктического региона; 4) результаты моделирования современного состояния подводной мерзлоты, полученные в результате включения в ранее предложенный алгоритм (Романовский и др., 1998; 2001; 2004; 2005; Гаврилов, 2008) таких ранее не учитываемых факторов, как влияние процессов термокаста, сложной структуры донных отложений, минерализации донных отложений и содержания незамерзшей воды. При изучении пространственно-временной изменчивости потоков CH_4 обеспечивалось использование унифицированных методов и временных графиков, позволяющих выполнять исследования в режиме мониторинга. Достоверность результатов моделирования была протестирована данными натурных наблюдений. Контроль качества полученных данных обеспечивался соблюдением международного протокола отбора проб, инструментального анализа, статистической обработки и графического представления данных.

Цель настоящей работы состояла в выявлении вклада МВА в современную эмиссию CH_4 в атмосферу Арктического региона на основе изучения и количественной оценки отдельных компонентов годовой эмиссии, а также ведущих факторов, определяющих их формирование и пространственно-временную изменчивость.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Выявление сезонной и межгодовой изменчивости в распределении растворенного CH_4 в шельфовых водах МВА;
2. Выявление территориальной дифференциации в распределении растворенного CH_4 в шельфовых водах МВА и факторов, ее определяющих;

3. Выявление вклада различных механизмов транспорта (диффузионный и пузырьковый транспорт) в формирование запаса растворенного CH_4 и потоков газообразного CH_4 в атмосферу;
4. Выявление особенностей вертикального распределения растворенного CH_4 в границах водного столба и факторов, их определяющих;
5. Анализ возможных источников CH_4 в водную толщу МВА;
6. Количественная оценка диффузионных потоков CH_4 в системе «водная поверхность-приводный слой атмосферы» и оценка их пространственно-временной изменчивости;
7. Разработка методических подходов к оценке пузырькового компонента потоков CH_4 и выявление их пространственно-временной изменчивости;
8. Разработка концептуальной модели потоков и расчет годового бюджета эмиссии CH_4 в системе «водная поверхность-приводный слой атмосферы»;
9. Выявление факторов геологического контроля, оказывающих первостепенное влияние на интенсивность потоков метана в МВА;
10. Моделирование современного состояния подводной мерзлоты на основе улучшенного алгоритма, основанного на представлениях о гляцио-эвстатических колебаниях уровня океана.

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность результатов определялась современным уровнем аналитического оборудования и методов анализа. Наряду с традиционными методами, одним из которых, например, является метод газовой хроматографии, использованный в настоящем исследовании для измерения растворенного CH_4 и атмосферных концентраций CH_4 в приводном слое атмосферы, был использован новейший метод прямых измерений, основанный на использовании высокоточного скоростного CH_4 -анализатора (HAFMA, DLT-100, USA), а также метод измерения турбулентных потоков (eddy-correlation technique) CH_4 с использованием специального комплекса приборов в дополнение к HAFMA: сонник-анемометры (Y81000, Campbell Scientific Inc., and Windmaster PRO, PP Systems), портативные метеостанции (Li-Cor 1401 и Furuno BP-100), газовый анализатор с открытой ячейкой Li-Cor 7500 (для измерения паров воды и двуокиси углерода), 6-компонентные датчики движения судна (Crossbow) (см. подробнее в разделе Глава 2). Для оценки пузырькового транспорта CH_4 в водном столбе были одновременно использованы современные гидро-акустические и геофизические методы: сейсмика высокого разрешения (GeoPulse Sub-bottom Profiler, GeoAcoustics Limited, England), однолучевой бортовой эхолот (Atlas Deso 10, Германия),

многолучевой эхолот (Imagenex-Delta T, США) и локатор бокового обзора (производства России). Комплекс этих измерений позволил получить репрезентативные оценки газообмена CH_4 в системе «дно-водная толща-водная поверхность-приводный слой атмосферы», разработать методику количественной оценки пузырькового компонента эмиссии CH_4 и включить этот компонент в концептуальную модель ежегодной эмиссии. Полученные выводы основаны на результатах статистической и графической обработки данных, выполненной с использованием современных пакетов прикладных аналитических программ, используемых в мировой научной практике (Statistika 7.0; Grapher 5; Surfer 8.0; ODV, Matlab 7.1 и др.).

Научная новизна результатов. Впервые в МВА выполнены многолетние, в том числе всесезонные, широкомасштабные площадные съемки, в результате которых достигнуто покрытие более 50% МВА (>1000 океанографических станций) и получен большой массив высоко-кондиционных и репрезентативных данных, характеризующих содержание концентраций CH_4 в водной толще и приводном слое атмосферы. На основании полученных данных составлены карто-схемы распределения CH_4 в шельфовых водах МВА, карто-схемы потоков метана в системе водная поверхность - приводный слой атмосферы. Впервые показано, что МВА являются источником метана в атмосферу Арктического региона. На основе количественной оценки основных компонентов годовой эмиссии (сезонный, территориальный и транспортный компоненты) рассчитана суммарная годовая эмиссия CH_4 и показано, что вклад МВА в современную эмиссию CH_4 является значительным – он соизмерим с ежегодным суммарным вкладом всех шельфовых морей Мирового океана.

Установлено, что основным источником CH_4 в водную толщу являются донные отложения, в то время как роль современной продукции CH_4 в осадках, водном столбе и роль латерального переноса из наземных источников незначительна. Показано, что подводная мерзлота является ведущим фактором геологического контроля эмиссии метана в МВА и что термический режим подводной мерзлоты определяется сложным комплексом факторов. Из числа ранее неучтенных факторов были учтены следующие: степень минерализации осадка, доля незамерзшей воды в его структуре, сложное строение осадочной толщи и влияние процессов термокарста. Тестирование результатов математического моделирования, выполненных на примере пролива Дмитрия Лаптева данными натурных наблюдений (данные бурения, результаты измерения растворенного CH_4 и

атмосферных концентраций в приводном слое), показало, что формирование путей восходящей миграции газов (сквозных таликов) в данном районе хорошо согласуется с результатами моделирования.

Научная новизна подтверждена публикациями в ведущих реферируемых российских и зарубежных научных изданиях, представлением докладов на международных, всероссийских и региональных конференциях, а также положительной экспертной оценкой на конкурсах РАН (общакадемическая программа №17), ДВО РАН, Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ), Национального Научного Фонда США (NSF), Национального Агентства по Атмосфере и Океану США (NOAA), Национального Полярного Секретариата (Швеция), Международного Арктического Научного Центра Университета Аляска, Фэрбэнкс (IARC UAF) и других научных организаций в России и за рубежом.

Практическое значение работы. Выявленная новая положительная обратная связь «потепление-деградация подводной мерзлоты и арктических мелководных газгидратов- эмиссия CH_4 в атмосферу-потепление» в климатической системе была включена в отчет Всемирного Фонда Дикой Природы (WWF) и представлена для обсуждения на Конгрессе Всемирного Метеорологического Общества в сентябре 2009 г в Женеве и на Саммите ООН в Копенгагене в декабре 2009 г. Полученные результаты позволят усовершенствовать современные математические модели, восстанавливающие динамику подводной мерзлоты в прошлом и прогнозирующие современное состояние подводной мерзлоты. Данные, полученные в ходе настоящего исследования могут быть положены в основу разработки и усовершенствования климатических моделей за счет включения в них положительной обратной связи в системе «дестабилизация подводной мерзлоты/газгидратов-эмиссия CH_4 в атмосферу – потепление». Разработанные автором методические подходы и оригинальные авторские методы могут стать основой для разработки стратегии дальнейших исследований в Арктических морях с целью изучения их роли в глобальном цикле метана и вклада в современные климатические процессы.

Личный вклад автора. Все данные, использованные в настоящей работе, получены в ходе выполнения проектов, в которых автор являлась руководителем целого проекта или его соответствующего раздела в период 2003-2008 гг. (проекты ДВО РАН, РФФИ, NOAA, NSF, IARC UAF). Вклад автора включал: 1) разработку научной стратегии и методологии, обоснование целей, задач и инструментального обеспечения настоящего исследования; 2) анализ и обработку оригинальных и литературных данных, 3) обоснование и разработку оригинальных количественных методов оценки ежегодной

эмиссии CH_4 , структуры годового баланса потоков метана и его отдельных компонентов; 4) обоснование параметров для улучшения алгоритма математической модели современного состояния подводной мерзлоты, реализованного в настоящей работе; 5) статистический анализ и графическое представление данных; 6) написание статей, настоящей диссертации и представление основных результатов на научных конференциях регионального, общероссийского и международного уровня.

Публикации и апробация работы. Результаты, обсуждаемые в диссертационной работе, легли в основу 21 научных статей, 16 из которых опубликованы в журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора наук (в 11 статьях – в качестве первого автора), а также представлены в материалах более 30 российских и международных конференций, основные из которых: ежегодные конференции (2004-2009) American Geophysical Union, AGU (San Francisco, CA) и General Assembly of the European Geophysical Union (Vienna, Austria); International conference: Bridges of science between North America and the Russian Far East, 14-16 September 2004, Vladivostok, Russia; 2004 Ocean Sciences Meeting, AGU, Honolulu, Hawaii, April 2004; 11th Seoul International Conference on Polar Sciences, Jeju, Korea, 8-9 September 2004; The 15th Global Warming International Conference, San Francisco, USA, April 20-22, 2004; 2005 International Research Conference, Paris, June 5-10; the summer meeting of the American Society of Limnology and Oceanography (ASLO), Santiago de Compostella, Italy, June 19-24; Gas transfer at water surface. the 37th International Liege Colloquium on Ocean Dynamics, Liege, Belgium, May, 2-6, 2005; the 5th Arctic Coastal Dynamics International Workshop. October 13-16, 2004, Montreal, Canada; UAF-JAMSTEC Conference in Fairbanks/Alaska, GCCI-2007, April 2007.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 317 наименований, в том числе 147 иностранных источников. Она содержит 169 страниц текста, 65 рисунков и 8 приложений. Общий объем диссертации составляет 213 страниц.

Благодарности. Автор выражает благодарность академикам В.И. Сергиенко, Г.С. Голицыну, В.А. Акуличеву, П.Я. Бакланову за постоянную поддержку; проф. Г. П. Пантелееву, О. Густаффсону, А. Лейферу, д.г.н. И. П. Семилетову, к.м.н. Д. А. Никольскому, к.ф.-м.н. А.Н. Салюку, к.ф.-и.н. В.И. Юсупову за совместное решение научно-методических задач; к.б.н. Н.А. Бельчевой, к.г.-м.н. О.В. Дудареву, Д.А. Космачу, А. Н. Чаркину и другим сотрудникам лаборатории геохимии полярных

регионов ТОИ ДВО РАН за многолетнее сотрудничество в проведении экспедиционных исследований и участие в обработке полученных материалов; Е.Б. Моисеевской за помощь в оформлении данной работы.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Шельфовые воды МВА являются источником CH_4 в атмосферу Арктического региона; по результатам многолетних исследований (2003-2007 гг.) ~80% придонных и ~50% поверхностных проб морской воды, отобранных в районе работ, перенасыщены растворенным метаном.
2. Основным источником CH_4 в водную толщу МВА являются донные отложения CH_4 (биогенные и термогенные источники), сформированные в доголоценовые эпохи; вклады современной продукции CH_4 в осадках, латерального переноса реками и продукции в водном столбе не являются значимыми;
3. Эмиссия CH_4 в атмосферу определяется вкладами территориального, сезонного и транспортного компонентов. Мощность ежегодной современной эмиссии CH_4 из акватории МВА составляет $\sim 8 \times 10^{12}$ г- CH_4 , что соизмеримо с ежегодной суммарной эмиссией CH_4 из всех окраинных морей Мирового океана, которая, по разным оценкам, составляет от 5×10^{12} г- CH_4 до 20×10^{12} г- CH_4 (IPCC, 2001; Bange et al., 1994; Reeburgh, 2007).
4. В МВА выделяются две пространственно-временных моды эмиссии: равномерная, обусловленная диффузионным переносом CH_4 и неравномерная (резкие, иногда массивные выбросы), обусловленная пузырьковым транспортом CH_4 . Максимальная расчетная мощность диффузионных потоков достигала 50 мг- $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{сут}$; максимальная зарегистрированная мощность пузырьковых потоков изменялась от 44 г- $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{сут}$ (расчет снизу) до 1.8×10^5 г- $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{сут}$ (расчет сверху).
5. Ведущим фактором, ответственным за формирование пространственно-временной изменчивости и мощности потоков CH_4 является геологический фактор, а именно - состояние подводной мерзлоты, которое определяется наличием или отсутствием таликов в ее структуре. Сквозные талики формируются под влиянием комплекса факторов, в числе которых степень минерализации осадка, доля незамерзшей воды в его структуре, сложное строение осадочной толщи и влияние процессов термокарста имеют важное значение.

Фактический материал. В основу работы положены данные 8 экспедиций (6 летних рейсов, 1 зимней экспедиции и 1 вертолетной экспедиции), выполненных в период с 2003 по 2008 гг.; всего проанализировано >5000 проб растворенного CH_4 , отобранных на >1000 океанографических станций; выполнены многосуточные

непрерывные, а также дискретные измерения концентраций CH_4 в приземном слое атмосферы (судовые измерения) и в более высоких слоях атмосферы (вертолетные измерения) до высоты 1800 метров. Также включены некоторые результаты, полученные в экспедиции 2009 г. Район исследования включал море Лаптевых, Восточно-Сибирское море и российскую часть Чукотского моря от береговой линии до шельфового склона, общей площадью $2.1 \times 10^6 \text{ км}^2$. Более детальная информация по фактическому материалу приведена ниже в кратком описании *Главы 2* и разделе *Личный вклад автора*. Настоящая работа выполнялась в рамках национальных проектов, финансируемых РФФИ, по Программе фундаментальных исследований РАН и Президиума РАН (№ 13, 17, направление 7), Президиума ДВО РАН (2003-2005 гг.), а также в рамках российско-американского сотрудничества по совместным проектам с IARC UAF (2003-2008 гг.), по грантам NOAA и NSF (2003-2008 гг.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и основные задачи исследования, раскрыта научная новизна, практическая значимость полученных результатов, их достоверность и обоснованность, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 дано краткое описание факторов, определяющих роль МВА в современном цикле CH_4 и глобальной климатической системе и кратко приведена история изучения этого вопроса российскими учеными. Сформулированы основные достижения и проблемы, касающиеся развития современных научных представлений о динамике пост-трансгрессионных трансформаций и современного состоянии криолитозоны Арктического шельфа. Глава состоит из четырех разделов. В *разделе 1.1* выполнен анализ литературных данных, характеризующих CH_4 как компонент глобального цикла углерода и эффективный парниковый газ, показана его климатообразующая роль в различные климатические эпохи. Все возрастающий интерес к изучению этого компонента атмосферы объясняется тем, что радиационная активность CH_4 значительно выше, а темпы увеличения атмосферных концентраций примерно в 2-4 раза выше, чем у CO_2 – парникового газа номер один в современной климатологии (IPCC, 2001; 2007). Подчеркнуто, что в холодные климатические эпохи концентрации CH_4 в атмосфере Земли составляли 0.3-0.4 ppm, в то время как в теплые климатические эпохи они устойчиво фиксировались на уровне 0.6-0.7 ppm (Заварзин и Кларк, 1987; Steele et al., 1987). В нарушение этой закономерности, которая прослеживалась по крайней мере в течение последних четырех климатических циклов (~400 тыс. лет), в последние 200 лет концентрации CH_4 в атмосфере Земли значительно возросли и достигли 1.7 ppm

в средних широтах и 1.85 ppm в атмосфере Арктического региона. Это произошло в результате почти трехкратного увеличения эмиссии метана в атмосферу (Рис.1).

Более того, последняя оценка вклада CH_4 в потенциал глобального потепления, рассчитанная для ближайших 100 лет с включением ранее неучитываемых обратных связей в климатической системе, показала что ранние оценки недоучитывали климатическую роль CH_4 примерно на 20-40% (Shindell et al., 2009). Это значит, что суммарный радиационный форсинг от 1 кг CH_4 , превышает аналогичную величину для CO_2 примерно в 35 раз, а не в 25 раз как было принято считать до недавнего времени.

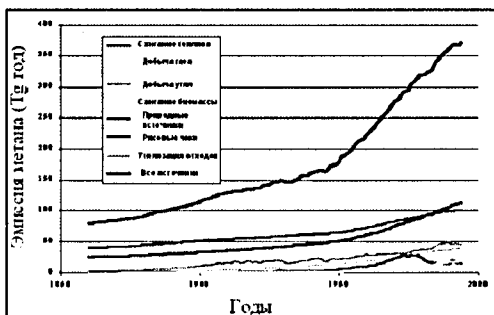


Рис.1. Глобальный рост эмиссии CH_4 за период 1850-2000 гг. (Stern & Kaufmann, 2003).

В разделе 1.2 показана особая роль северных экосистем в современном цикле CH_4 , который является неотъемлемой частью глобального цикла углерода. Известно, что в почвах северных экосистем сосредоточено более 30% всего органического углерода планеты, при этом подавляющая его часть законсервирована в мерзлоте. В осадочных бассейнах Северного Ледовитого океана (СЛО) также сосредоточен огромный пул органического углерода, преимущественно в форме углеводов, названный «гигантским Арктическим суперпулом» (Грамберг и др. 1983).

Существует мнение, что прирост концентраций CH_4 в атмосфере, который ежегодно составляет 0,3-1,2%, ассоциирован с антропогенной деятельностью. Тем не менее, обращает на себя внимание тот факт, что: 1) Арктический максимум CH_4 существует исключительно в теплые климатические эпохи; 2) Арктический максимум CH_4 поддерживается круглогодично; 3) Арктический максимум CH_4 в атмосфере существует не над умеренными широтами (в полосе 20°-60° с.ш., где сжигается свыше 90% ископаемого топлива), а над Арктикой/Субарктикой (Заварзин и Кларк, 1987; IPCC, 2001; Steele et al., 1987), где антропогенная активность относительно невелика (менее 5% добываемого ископаемого топлива сжигается между 60° и 70° с.ш.) и он не может быть объяснен циркуляцией воздушных масс. Это означает, что в межледниковые периоды в северных широтах существует мощный природный источник CH_4 и этим источником не могут быть

наземные экосистемы, поскольку единственным предполагаемым круглогодичным источником CH_4 на суше являются термокарстовые озера, площадь которых чрезвычайно мала, к тому же в зимние месяцы пресный лед является непреодолимой преградой для газообмена. В то же время, межклиматическое потепление оказывает мощное влияние на состояние подводной мерзлоты, которая претерпевает более значительные изменения термического режима, по сравнению с наземной мерзлотой.

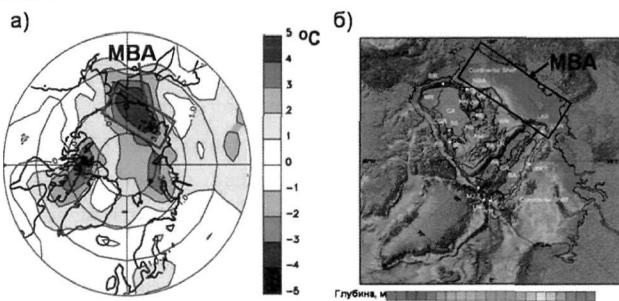


Рис. 2. Увеличение сезонных температур воздуха в 2000-2005 гг. по сравнению с сезонными температурами, зарегистрированными в 20-м веке (а, по данным NOAA); б) данные батиметрии СЛО – глубины <50 м показаны оттенками красного цвета.

Кроме того, в Арктическом регионе наблюдается потепление климата, которое проявляется в росте сезонных температур воздуха и воды (Рис. 2а); сокращении морского и пресного льда; уменьшении толщины снега; таянию ледников; изменении температурного режима мерзлоты (АСИА, 2004). В этой связи, изучение MBA как возможного источника CH_4 в атмосферу Арктического региона является чрезвычайно актуальным.

В разделе 1.3 MBA рассмотрены как важная часть углеводородного пула СЛО. Благодаря исследованиям российских ученых (Григорьев, 1963; Соловьев, 1981; Грамберг, 1983; Лисицын 1993; Богданов и Хаин, 1995; Драчев, 1995; Имаев, 1998; Павлидис, 2000; Лаверов и Грамберг, 2001; Дмитриевский, 2005) установлено, что шельф MBA характеризуется уникальными литологическими и седиментологическими условиями, определяющими характерные особенности цикла углерода и создающими благоприятные условия для продукции и накопления CH_4 в донных отложениях (Романкевич, 1984; Романкевич и Ветров, 2001; Vetrov & Romankevich, 2004). Коротко освещены вопросы геологии и рифтогенеза MBA,

особенности формирования донных отложений и формирование условий метаногенеза, газо- и гидратообразования и формирования резервуаров метана. Освещены вопросы современного осадкообразования и формирования условий для бактериального метаногенеза. Показано, что в условиях пассивной континентальной окраины в осадочных бассейнах МВА создаются исключительно благоприятные условия для продукции метана на всех стадиях трансформации органического вещества (ОВ) - в диагенезе, катагенезе и на стадии метаморфизма.

С другой стороны, являясь исключительно мелководным (Рис. 2б), шельф МВА в холодные климатические эпохи обнажается и становится частью наземных северных экосистем. В результате глубокого промерзания на шельфе-суше формируется мерзлота, которая ограничивает продукцию CH_4 областями сезонно-талого (активного) слоя. При последующей смене холодных климатических периодов на теплые, происходит потепление температуры поверхности Земли в среднем на 6-7°C (Houghton, 1997), в то время как в Арктических регионах потепление может достигать 20°C (например, в Гренландии, Cuffey et al., 1995). Потепление сопровождается интенсивным развитием процессов термокарста. Сезонная продукция CH_4 сменяется круглогодичной, которая происходит в подошренных таликах после достижения озером глубины ≥ 2 м. Дальнейшее потепление приводит к таянию ледников и росту уровня океана. В результате происходит обратное затопление обнаженного шельфа МВА. При этом, термический режим погруженной мерзлоты, которая становится подводной, изменяется гораздо более существенно, по сравнению с наземной мерзлотой, поскольку среднегодовая температура морской воды теплее температуры поверхности Земли в холодные эпохи более чем на 15°C. Тем не менее, в течение сотен и тысяч лет подводная мерзлота не только препятствуют восходящему движению CH_4 из донных отложений, но и ограничивают современную продукцию CH_4 областями преимущественного накопления осадков (т.н. депо-центры), а также областями формирования таликов в структуре мерзлоты (Романовский и др. 2000; 2001; 2005; Касымская, 2005; Гаврилов, 2008).

В Разделе 1.4 изложена история изучения арктического криолитогенеза и современные взгляды ведущих ученых по вопросу о возможном распространении подводной мерзлоты в МВА. Проанализирована палеогеографическая история шельфа МВА, связанная с гляцио-эвстатическими колебаниями уровня океана при смене климатических циклов. Показано, что в холодные климатические эпохи, когда уровень океана падает на 100-120 м, обширный ($2.1 \times 10^6 \text{ км}^2$) и мелководный шельф

МВА (средняя глубина <50 м) обнажается и становится частью сибирской приморской низменности. В результате глубокого промерзания здесь формируется мерзлота и создаются благоприятные условия для формирования зоны стабильности Арктических газгидратов, которые, в отличие от океанических газгидратов характеризуются: высокой концентрацией в пространстве, большей мощностью залегания пластов, высоким процентом насыщения газгидратами порового пространства осадка (20-80% в отличие от 1-2% в океанических газгидратах), более высокой чувствительностью к изменениям температурного режима (для дестабилизации газгидрата, образованного при температуре $<0^{\circ}\text{C}$ требуется в 3 раза меньше энергии, чем для газгидрата, образованного при температуре $>0^{\circ}\text{C}$, Makogon, 2007). Кроме того, зона стабильности Арктических газгидратов определяется стабильностью мерзлоты.

При смене субэкральной обстановки на субмаринную происходит закономерное изменение термического режима подводной мерзлоты и сокращение зоны стабильности газгидратов. При нарушении целостности мерзлоты свободный газ из разрушенных газгидратов может поступать в водную толщу и далее в атмосферу. Показано, что на шельфе МВА находится основная часть мелководных Арктических газгидратов, поскольку $>80\%$ предполагаемой подводной мерзлоты прогнозируется именно на шельфе МВА (Рис. 3).

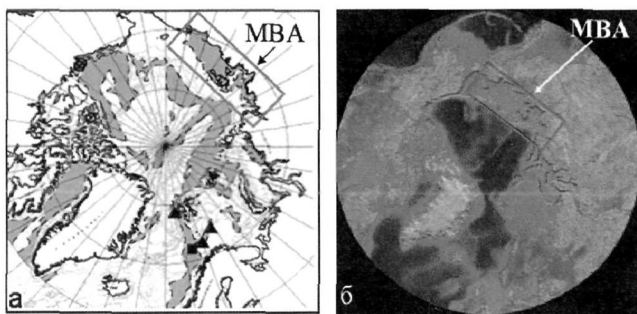


Рис. 3. Предполагаемые области распространения мелководных Арктических газгидратов (а, Соловьев, 1999) и подводной мерзлоты (б, АСИА, 2004).

В Главе 2 дано детальное описание района работ, методов, использованных в настоящем исследовании, а также приведены основные характеристики приборов и оборудования. В Разделе 2.1 описан метод измерения CH_4 в водном столбе и расчета концентраций растворенного CH_4 . Парофазный статический газохроматографический анализ был выполнен с использованием газового хроматографа (ГХ) MicroTech-8160 оборудованного пламенно-ионизационным

детектором, ПИД (Таб. 1). В качестве газа-носителя использовался гелий. Калибровка прибора осуществлялась с использованием стандартных газовых смесей с содержанием метана 1.98 ppm, 99.6 ppm и 997.8 ppm (Air Liquide, USA). Концентрации растворенного CH_4 рассчитывались в соответствии с методикой, описанной в работе Wiesenburg и Guinasso (1979), основанной на использовании коэффициентов растворимости CH_4 (коэффициент Бунзена). В Разделе 2.2 описаны методы измерения метана в приводном слое атмосферы. Измерения выполнялись двумя методами: с использованием ГХ MicroTech-8160 (2003-2005 гг.) и с *in-situ* использованием высоточного быстрого метанового анализатора (2005-2007) HAFMA (DLT-100, www.lgrinc.com). Время ответа составляло <0.05 секунды, ошибка измерений <1% при измерениях в диапазоне от 10×10^{-3} ppm до 25 ppm на частоте 10-12 Гц (Таб. 1). Измерения в приводном слое атмосферы выполнялись в двух режимах: на борту судна (*Ауга, ТБ-12*) и во время вертолетной съемки (*МИ-8*) в 2006 г.

В Разделе 2.3 описаны методы измерения микро-метеорологических параметров, которые использовались для расчета турбулентных потоков CH_4 , а также приборы, использованные для этих измерений. Пакет состоял из следующих приборов (Таб 1): HAFMA, с помощью которого производились измерения концентраций CH_4 в атмосфере; 2 соник-анемометра/термометра, с помощью которых производились трехмерные измерения векторов скорости ветра и измерения температуры (Y81000, и Windmaster PRO); портативные метеостанции (Li-Cor 1401 и Furuno BP-100), с помощью которой производились измерения влажности воздуха и оперативная информация о скорости и направлении ветра; инфракрасный газовый спектрометр Li-Cor-7500 был использован для записи температуры воздуха, концентраций CO_2 и паров воды; пульсационные непрерывные измерения концентраций CO_2 выполнялись с помощью газового анализатора Li-Cor-820; измерения 6 компонентов движения судна выполнялись с помощью датчика движения Crossbow.

В Разделе 2.4 описаны методы расчета потоков CH_4 . Диффузионные потоки рассчитаны по методике Wanninkhof (1992) в модификации, применимой для кратковременных рядов скорости ветра, измеренного в реальном времени (actual wind). Учет основных параметров газообмена осуществлялся путем расчета числа Шмидта, основанном на экспериментальных параметризациях. Расчет турбулентных потоков выполнен по методике Baldocchi (2003). В Разделе 2.5 описаны гидро-акустические и геофизические методы, использованные в настоящей работе. Сейсмопрофилограф высокого разрешения был использован на частоте 3.5 КГц при

движении судна со скоростью 4-8 узлов. Для определения местоположения судна использовалась навигационная система GPS (Global Positioning System, Model 120 XL). Совместное использование судового эхолота (Atlas Deso 10) и лоатора бокового обзора позволило зарегистрировать мощные скопления газонесущих пузырьков в водной толще. Основные характеристики приборов приведены в Таб.1.

Таблица 1.

Название прибора	Год вып.	Страна произво-дитель	Измеряемые параметры	Основные хар-ки	Точность измерений
Seabird SBE-19+	2003	США	Температура соленость мутность	(-5°C):(35°C) 0-9 S/m 0.1-5000 мг/л	0.005°C 0.005 S/m 0.1 мг/л
MicroTech-8160	2002	США	CH ₄ , C ₂ +	ПИЛ	~1%
NAFMA (DLT-100)	2005	США	CH ₄	10-20 Гц, 50ppb-25ppmv	10 ppb, воспроиз- водимость ~1%
Y81000	2002	США	3 вектора скорости ветра, акустическая температура	10-25 Гц, 0-35м/сек, (-30°C):(50°C)	<2.0%, 0.02°C
Windmaster PRO	2007	Англия	3 вектора скорости ветра, акустическая температура	10-32 Гц, 0-65м/сек, (-30°C):(50°C)	<1.5%, 0.01°C
Furuno BP-100 Li-Cor 1401	2007 2001	США США	направление и скорость ветра, температура, влажность, давление	0-360° 0-30 м/сек (-40°C):(60°C) 0-100% 650-800 торр	1%
Li-Cor-7500	2002	США	CO ₂ , пары воды, температура	0-3000 нМ/М 0-42 г/м ³ (-30°C):(50°C)	0.16 ppm 0.067 ppt 0.01°C
Li-Cor-820	2003	США	CO ₂	0-20000 ppm	<1 ppm
Crossbow	2007	США	датчик движения	>100 Гц 400° сек	<0.2°
GeoPulse Sub-bottom Profiler	2007	Англия	Сейсмопрофилирование высокого разрешения	3.5 кГц	разрешение 10-30 см
Atlas Deso 10	1973	Германия	обнаружение акустических неоднородностей	30 кГц (аналоговый) 11 кГц (цифровой)	
Лоатор бокового обзора	2004	Россия	обнаружение акустических неоднородностей (вода, дно)	85 кГц, дальность обнару- жения 750 м	
Многолучевой Эхолот Imagenex-Delta T	2008	США	детектирование и количественная оценка пузырько- вого переноса	260 кГц, 120 лучей радиус обнаружения равен удвоенной глубине	

В Разделе 2.6 дано описание основных методов и приборов, использованных для измерения гидрологических параметров (температура воды, соленость), которые были использованы для расчетов концентраций растворенного CH₄ в водном столбе. Измерения выполнялись *in situ* с использованием гидрологического зонда Seabird-19+. Раздел 2.7 посвящен описанию изотопных методов. Изотопный состав углерода

метана ($\delta^{13}\text{C}$, δH , ^{14}C) использовался для разделения возможных источников CH_4 в водной толще МВА. В Разделе 2.8 описаны критерии и методы статистической обработки и графического представления данных.

В Главе 3 представлен анализ пространственно-временной и сезонной изменчивости концентраций растворенного CH_4 в водной толще МВА, факторов, ее определяющих, а также дана характеристика источников CH_4 в МВА. В Разделе 3.1 показано, что в период открытой воды концентрации растворенного CH_4 в водном столбе превышают равновесные концентрации относительно атмосферы, которые изменялись в диапазоне от 3.5 до 4.0 nM (Шахова и др., 2005). В качестве средней концентрации атмосферного CH_4 в расчетах принято средне-широтное значение (latitude specific monthly mean, LSM) равное 1.85 ppm (<http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/insitu.html>). На основании полученных данных показано (2003-2007 гг.), что как придонные так и поверхностные пробы воды были значительно перенасыщены CH_4 , более 50% изученной акватории являлось источником CH_4 в атмосферу региона (Рис. 4).

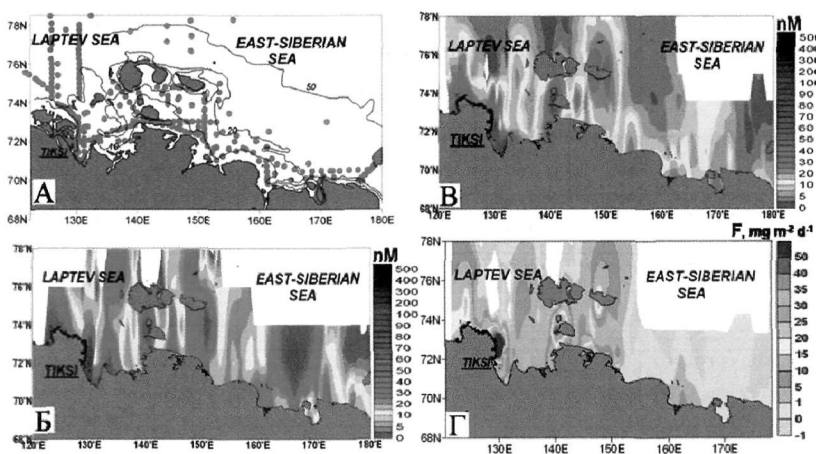


Рис. 4. Положение океанографических станций в районе исследования (а); распределение концентраций растворенного CH_4 в придонном слое воды (б); распределение концентраций растворенного CH_4 в поверхностном слое воды (в); диффузионные потоки CH_4 (г).

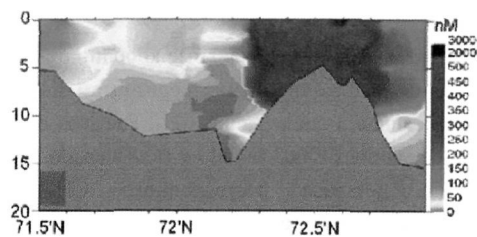
Пространственное распределение концентраций отличалось выраженной мозаичностью и наличием резких пространственных градиентов (Шахова и др. 2007а; 2008). Выделялись локализованные области, в которых перенасыщение воды

растворенным CH_4 достигало 900-18000%. Такие области составляли около 10% изученной акватории и были выделены как области плюмов.

В работах российских ученых (Lein et al., 2007; Savvichev et al., 2007) было показано, что в отдельных районах МВА (Чукотское море) скорости процессов окисления CH_4 в осадках низкие даже летом, когда температуры придонной воды самые высокие, и изменяются в пределах от 0.03 $\text{nM CH}_4/\text{сут}$ до 0.1 $\text{nM CH}_4/\text{сут}$. Эта величина хорошо согласуется со скоростям окисления, ранее зарегистрированными в Карском море (Namsaraev et al. 1995). Если принять допущение о том, что эти скорости окисления можно распространить на все осадки МВА, то за 265 дней эта величина может достигать от 8 nM CH_4 до 26.5 nM CH_4 . Это означает, что концентрации растворенного CH_4 , измеренные в зимнее время подо льдом, должны быть существенно ниже, чем летние. Тем не менее, сравнение результатов летних и зимних измерений, выполненных в северо-западной части губы Буор-Хая (море Лаптевых) показало превышение зимних концентраций над летними до 10^3 раз (до 5 μM). Характерно, что вертикальное распределение CH_4 в водном столбе в летнее и зимнее время совпадали - максимум находился в поверхностном слое воды, что свидетельствует о доминирующей роли пузырькового транспорта при наличии мощного донного источника (Шахова и др., 2009 а, б).

В Разделе 3.2 рассмотрены особенности вертикального распределения CH_4 в водном столбе. Выделено три типа распределения CH_4 в водном столбе, характерные как для летнего, так и для зимнего периода: первый тип - распределение с наличием придонного максимума растворенного CH_4 ; второй тип - распределение с наличием поверхностного максимума, и третий тип - распределение с отсутствием градиента концентрации в пределах водного столба (Рис.5). Показано, что перенос CH_4 в водном столбе осуществляется двумя способами - диффузионным и в форме пузырьков.

Рис. 5. Вертикальный разрез, совмещающий профили второго и третьего типов (апрель 2007 г).



первый тип распределения растворенного CH_4 в водном столбе, в пользу пузырькового переноса - второй и третий типы (Shakhova et al., 2010). Пузырьковый перенос подтвержден акустической

регистрацией больших скоплений пузырей в водной толще и геофизической их регистрацией в осадках (Рис.6). Кроме того, пузыри были визуально зафиксированы в составе морского льда зимой (Рис. 7).

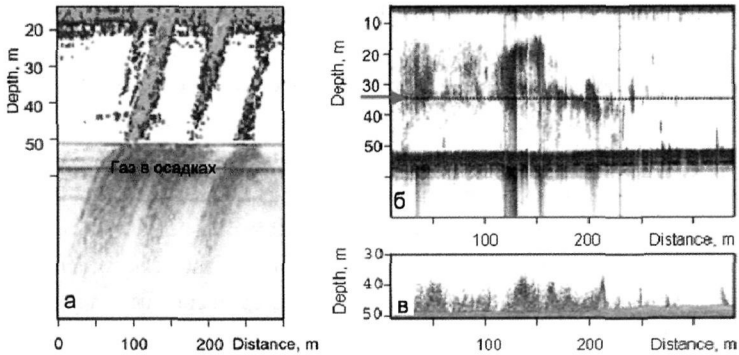


Рис. 6. Результаты обработки сейсмических и гидро-акустических данных: а) пузыри св составе осадков и в толще воды; б) скопления пузырей в водной толще по данным судового эхолота; в) пузыри, выходящие из дна по данным лоатора бокового обзора.

Для оценки межгодовой изменчивости был разработан и реализован количественный метод интегральной оценки запаса растворенного CH_4 в водном столбе и потенциальной эмиссии CH_4 , представленный в Разделе 3.3. Сущность метода заключалась в следующем. На основе имеющихся данных, полученных на различных горизонтах, выполнялась горизонтальная и вертикальная линейная интерполяция данных для получения суммарного значения для области сравнения. Расчет осуществлялся по формуле:

$$A = \int_S \int_0^{H(s)} A(s, z) dz ds$$

где $s=s(x,y)$, z - соответственно горизонтальные и вертикальные координаты, S - площадь исследуемого района, $H(s)$ -глубины, соответствующие горизонтам отбора проб, and $A(s,z)$ - пространственное распределение концентраций CH_4 . Расчеты были выполнены для летнего сезона на основе данных 2003 и 2004 гг. Показно, что межгодовая изменчивость интегрального запаса растворенного CH_4 и, соответственно, потенциальная эмиссия, может достигать >5 раз, в то время как средние концентрации растворенного CH_4 в поверхностных водах изменялись только на 30% (Shakhova et al., 2005). Это свидетельствует о том, что количественные оценки

диффузионных потоков, основанные на принятых параметризациях, не могут дать реальной картины существующих потоков CH_4 в системе «дно-водная толща-приводный слой атмосферы».

Анализ сезонных различий в величинах концентраций растворенного CH_4 и объемах интегрального запаса CH_4 был выполнен для района Буор-Хая на основе летних данных 2005 г и зимних данных 2007 г. Показано, что концентрации растворенного метана в летнее время в этом районе изменялись в придонном слое пределах от 2.1 до 651 нМ, а в поверхностном слое от 2.9 до 298 нМ. В зимнее время самые высокие концентрации растворенного метана, измеренные подо льдом в поверхностном слое воды достигали 5000 нМ, а в придонном слое – 2500 нМ (Шахова и др., 2008). Таким образом, сезонная изменчивость максимальных концентраций достигала 8-10 раз. При этом, в составе морского льда были зарегистрированы пузыри, диаметром до 30 см (Рис.6). Расчет интегральных запасов метана в водном столбе изучаемого района (принятой площадью 10^3 км^2) показал, что в летнее время он составил $7.6 \times 10^7 \text{ г CH}_4$, в то время как в зимнее время достиг $60.1 \times 10^7 \text{ г CH}_4$.

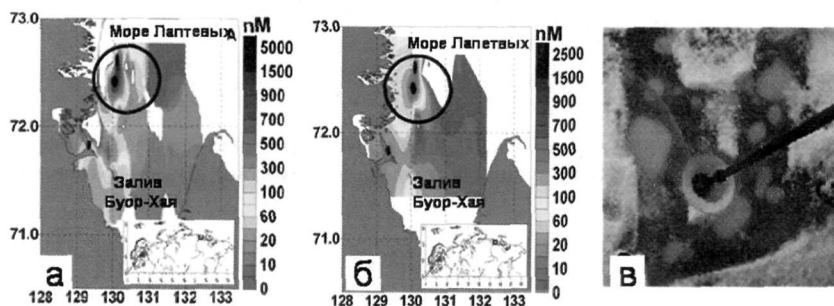


Рис. 7. Распределение концентраций растворенного CH_4 в водном столбе в районе Буор-Хая, измеренные подо льдом в апреле 2007: а) поверхностный слой воды; б) придонный слой воды; в) пузыри, включенные в состав льда.

В Разделе 3.4 обсуждаются возможные источники CH_4 в водную толщу в МВА. Великие Сибирские реки интегрируют растворенный CH_4 , поступающий из наземных источников, расположенных в водосборах рек и выносят остаточные количества на шельф МВА. В частности, это проявляется в увеличении концентраций растворенного CH_4 в устьевых районах рек (Шахова и др., 2007; Shakhova and Semiletov, 2007). Для выявления значимости стока рек в балансе прибрежной зоны МВА были рассчитаны интегральные величины запаса растворенного метана,

солености, и общего минерального углерода в водном столбе, которые показали, что повышенные концентрации растворенного CH_4 коррелируют с параметрами, характеризующими морскую воду (Shakhova and Semiletov, 2007; Semiletov et al., 2007), в то время как речные воды не играют значимой роли в динамике растворенного CH_4 на акватории МВА. Для уточнения роли латерального переноса метана речным стоком в сентябре 2006 г была выполнена специализированная экспедиция, задачей которой было проследить, как изменяются концентрации растворенного CH_4 вниз по течению реки Лены до выхода речных вод на шельф. В результате исследования было показано, что концентрации растворенного CH_4 при выходе речных вод на шельф снижаются до незначимых (Рис.8).

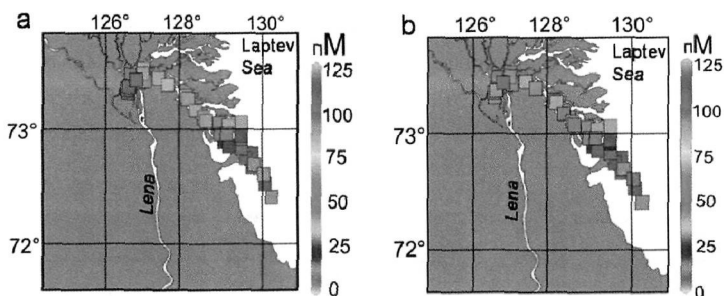


Рис. 8. Динамика растворенного CH_4 вниз по течению реки Лены в Быковской протоке (сентябрь 2006): а) придонные концентрации; б) поверхностные концентрации.

Показано также, что особенности пространственного и вертикального распределения растворенного метана, а также сезонная динамика не могут быть объяснены современной продукцией CH_4 в донных осадках. Территориальное распределение растворенного CH_4 в придонном слое воды в изучаемом районе не коррелирует с распределением концентраций органического углерода (C_{org}) в донных осадках. Например, в проливе Дмитрия Лаптева, где концентрация C_{org} минимальна и составляет $<0.5\%$, устойчиво (по данным 2004 и 2005 гг.) регистрируется устойчивая аномалия растворенного CH_4 (до 154 nM), равномерно распределенного в водном столбе. В то же время, установлена корреляция аномалий растворенного метана с положением рифтовых зон.

Как было показано в исследованиях российских ученых (Романкевич, 1984; Романкевич и Ветров, 2001; Vetrov and Romankevich, 2004), высокая несбалансированность цикла углерода в морях Российской Арктики является одной

из наиболее ярких особенностей полярного литогенеза и состава захороняющегося органического вещества (ОВ). Согласно оценкам приведенным в работе Романкевича и Ветрова (2001), размеры анаэробных диагенетических потерь ОВ составляет ~5-7%, часть которого может поступать в воду-атмосферу в форме CH_4 . Это означает, что при условии диагенетической трансформации 7% от всего количества ежегодно осажженного ОВ, которое оценивается в размере 9×10^{12} г-С (9 Тг-С) для всех арктических морей России (АМР), в МВА, составляющие ~50% площади АМР, в результате диагенеза может попасть не более чем 0.3×10^{12} г- CH_4 . Здесь важно отметить, что от 70 до 100% ОВ поверхностных осадков Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых являются наземными по происхождению (Ветров и др., 2008; Semiletov et al., 2005; Stein et al., 1999), поэтому только ~1% ОВ может выступать субстратом для метаногенеза на ранних стадиях диагенеза (водно-экстрагируемый органический углерод или water-extractable organic carbon или WEOC, Wagner et al., 2005). Из сказанного следует, что $<0.003 \times 10^{12}$ г- CH_4 может быть результатом современной продукции в осадках МВА.

Окисление CH_4 в водном столбе ведет к значительному понижению концентраций растворенного CH_4 , вплоть до концентраций ниже равновесных с атмосферой, что и происходит на основной части акватории Мирового океана (Ivanov et al., 1993; Reeburgh, 2007). Этот процесс работает в глубоком океане как биологический барьер, препятствующий выходу CH_4 из разрушающихся океанических газовых гидратов и других геологических источников в водную толщу и, далее, в атмосферу (Лейн, 2004; 2009; Naudts et al., 2006). В работах Лейн (2004; 2009) и Лейн с соавторами (2004; 2007), посвященной детальному исследованию биогеохимических процессов в Чукотском море, показано, что на некоторых станциях скорости метанобразования в поверхностных осадках были ниже, чем скорости окисления метана. По мнению авторов, это свидетельствует о наличии *внешнего* источника CH_4 , не связанного в современной продукцией в осадках. В пользу этого предположения свидетельствуют также работы Арэ (2001), Лаверова и Грамберга (2000), в которых было показано, что из толщи осадков на шельфе АМР неоднократно наблюдались мощные прорывы газовых струй, которые поднимались в воздух на несколько десятков метров. В более ранних работах описан случай, когда при проведении взрывных работ для навигационных целей в проливе Дмитрия Лаптева, воздух над льдом горел синим пламенем, что предположительно свидетельствует о выбросе природного газа из донных залежей (Зубов, 1938).

Далее показано, что продукция CH_4 в водном столбе на шельфе моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря маловероятна по целому ряду причин. Во-первых, в изученных районах этих морей водная толща является аэробной средой (насыщение $\text{O}_2 \geq 40\%$), поэтому продукция CH_4 может иметь место исключительно в анаэробных микрозонах взвеси (пеллеты) на нижней границе пикноклина, которые обнаружены в морях с высокой/умеренной первичной продукцией. Во-вторых, в изученном районе первичная продукция резко ограничена недостатком света (светопроницаемость в некоторых районах составит не более 40 см) и в среднем на 1-2 порядка ниже, чем в типичных морских экосистемах. В-третьих, глубина пикноклина в морях, где зарегистрирован феномен продукции CH_4 в водном столбе, обычно составляет 100-150 м. Это позволяет достаточно для поддержания метаногенеза количеству органического вещества аккумулироваться в анаэробных микрозонах (пеллеты). В МВА глубина пикноклина изменяется от 2-3 м до 20 м, а на значительной площади Восточно-Сибирского моря стратификация вообще отсутствует.

Это означает, что в условиях МВА создание подходящих условий и накопление достаточного количества субстрата для продукции CH_4 в водном столбе маловероятно. Исключение может составлять Чукотское море, которое в настоящем исследовании было изучено в наименьшей степени. Аэробная продукция метана в водном столбе МВА в данной работе не обсуждается, т.к. вопрос о возможности такой продукции до сих пор остается дискуссионным (E. Damm, 2009, личное сообщение). В любом случае, максимальные концентрации растворенного CH_4 , которые могут ассоциироваться с продукцией CH_4 в водном столбе не могут превышать 9 nM (Ward et al., 1993; Sasakawa et al., 2006). Из этого следует, что этот источник пренебрежимо мал в условиях МВА, где концентрации растворенного CH_4 летом достигают 970 nM, и зимой 20000 nM (Shakhova et al., 2010; Semiletov, 1999).

Для идентификации возможных источников CH_4 был выполнен изотопный анализ углерода ($\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$) и водорода ($\delta\text{D}-\text{CH}_4$) метана. Кроме того, был выполнен изотопный анализ благородных газов ($^3\text{He}/^4\text{He}$) с целью подтверждения гипотезы о проницаемости подводной мерзлоты для мантийных газов. Данные показали, что изотопная формула CH_4 в изученном районе наилучшим образом характеризует смесь различных источников, в числе которых могут быть как биогенные, так и термогенные (Рис. 9). Диапазон изменчивости $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ составил $(-68.3\text{‰}):(-50.9\text{‰})$, в то время как для $\delta\text{D}-\text{CH}_4$ он составил $(-196.1\text{‰}):(-47.5\text{‰})$.

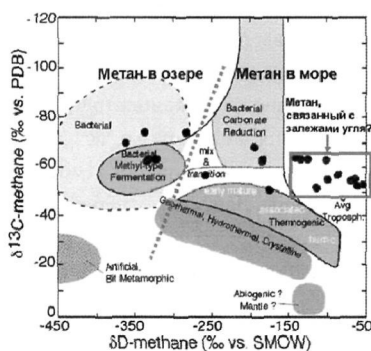


Рис. 9. Диаграмма, характеризующая взаимосвязь $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ и $\delta\text{D}-\text{CH}_4$ в изотопной формуле метана в MBA (по Whiticar, 1999).

Характерная особенность распределения изотопных характеристик в водном столбе состояла в отсутствии тенденции к утяжелению изотопной формулы CH_4 при его движении к поверхности воды. Напротив, самые легкие значения как для $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ так и для $\delta\text{D}-\text{CH}_4$ регистрировались в поверхностном слое воды, при этом концентрации растворенного CH_4 в поверхностном слое воды на этих станциях были максимальными (до 5 μM), а во льду регистрировались массивные включения пузырей (Рис. 7). Самым тяжелым значениям $\delta^{13}\text{C}$ соответствовали самые тяжелые значения $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ и более низкие, хотя и высокие, концентрации растворенного CH_4 (≤ 970 nM).

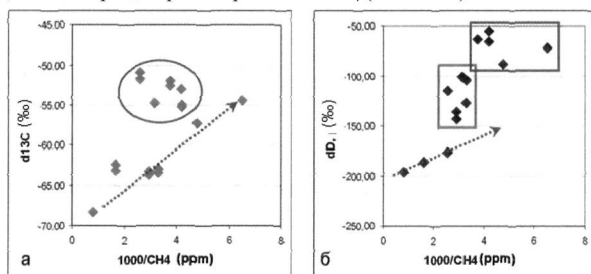


Рис. 10. Изотопная формула растворенного CH_4 , проанализированная с использованием методики «keeling plots» (соотношение изотопных данных и $1000/\text{концентрация метана в газовой фазе}$): а) данные по $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$; б) данные по $\delta\text{D}-\text{CH}_4$.

В результате анализа изотопных данных, выполненных по методике “Keeling plot”, было также показано, что разнообразие полученных данных не может быть достоверно объяснено процессами окисления растворенного CH_4 . В случаях, когда окисление является ведущим процессом, определяющим динамику изотопных характеристик, все разнообразие значений укладывается в линейный тренд. В действительности, полученные значения в линейный тренд не укладывались, а выделялись в отдельные группы (Рис. 10). Следовательно, разнообразие изотопных характеристик растворенного CH_4 определяется вкладом различных источников.

В Главе 4 представлен методический подход и даны количественные оценки эмиссии CH_4 в МВА. В Разделе 4.1 проанализированы данные о содержании CH_4 в приземном слое атмосферы по данным летней экспедиции 2005 г и вертолетной съемки 2006 г. На основе данных 2005 г показано, что концентрации CH_4 в приземном слое атмосферы по маршруту движения судна резко возросли при выходе из Карского моря в море Лаптевых. Средняя концентрация атмосферного CH_4 в Карском море составила 2.1 ± 0.02 ppm, в море Лаптевых среднее значение возросло до 2.97 ± 0.15 ppm, а в Восточно-Сибирском море составило 2.66 ± 0.09 ppm. Резкие всплески концентраций достигали в море Лаптевых 8.2 ppm, а в Восточно-Сибирском море - 6.4 ppm (Рис. 11).

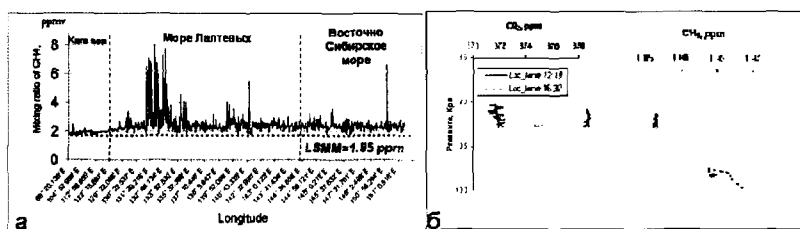


Рис. 11. Динамика концентраций CH_4 в приземном слое атмосферы: а) при движении судна по маршруту Северного морского пути (2005 г); б) во время вертолетной съемки до высоты 1800 м от поверхности моря (2006 г).

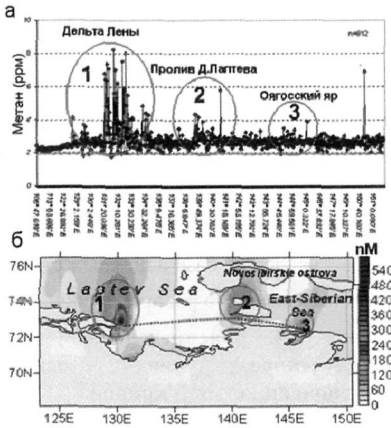
Данные, полученные в результате вертолетной съемки, свидетельствуют об увеличении атмосферных концентраций CH_4 до высоты 1800 м; увеличение достигало 5-10% от величины средней концентрации для данных широт (1.85 ppm). На основе летних измерений 2005 г было также показано, что области повышенных концентраций атмосферного CH_4 коррелируют с областями плюмов растворенного CH_4 (Рис.12).

В Разделе 4.2 дана характеристика существующего до настоящего времени подхода к оценке потоков CH_4 в системе «водная поверхность-атмосфера» в Мировом океане, который основан на однокомпонентных моделях, включающих количественную оценку диффузионного транспорта CH_4 , в результате которого создается градиент на разделе поверхностей и поток, пропорциональный скорости ветра, направляется из более насыщенной среды в сторону менее насыщенной. Все известные до настоящего времени расчеты основаны на экспериментально установленных параметризациях, которые были получены в лабораторных условиях и протестированы в глубоководных районах Мирового океана

(Wanninkhof, 1992), где существуют условия газообмена, принципиально отличающиеся от МВА. В результате проведенного в настоящей работе исследования, был сделан вывод о недостаточности однокомпонентного подхода в расчетах потоков CH_4 , поскольку такая модель не может адекватно описать все

характерные особенности распределения CH_4 в водной толще, выявленные в МВА.

Рис. 12. Концентрации CH_4 в приводном слое атмосферы (а) вдоль разреза, показанного на рис. (б) в виде пунктирной линии красного цвета; на панели (б) представлены концентрации CH_4 в поверхностном слое воды (сентябрь 2005 г.).



Предложенная концептуальная модель потоков CH_4 в системе водная поверхность/атмосфера в МВА включает 3 основных структурных блока, описывающих наиболее

характерным особенности пространственно-временного распределения растворенного CH_4 (Рис. 13): сезонный блок, транспортный блок и территориальный блок.

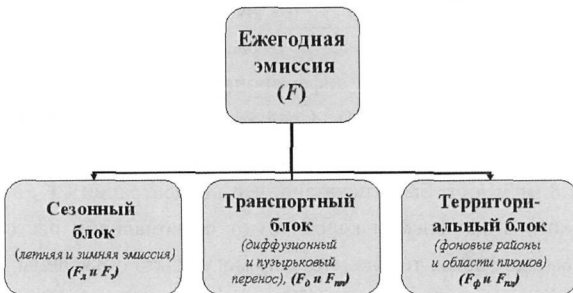


Рис. 13. Концептуальная модель ежегодной эмиссии CH_4 в МВА

В результате комбинации параметров из разных блоков были получены 6 компонентов, количественная оценка которых легла в основу расчета ежегодной эмиссии CH_4 в атмосферу региона.

В Разделе 4.3 показано, что для количественной характеристики территориального компонента была выполнена статистическая обработка данных, в ходе которой были обоснованы статистические параметры для выделения областей плюмов. Было показано, что ~90% полученных данных по растворенному CH_4 удовлетворительно описывается экспоненциальной кривой, в то время как ~10% случаев рост значений опережает экспоненту. После разделения данных на две коллекции (Рис.14), каждая из них хорошо описывалась кривой лог-нормального распределения, наиболее типичного для биогеохимических данных. Первая коллекция, включающая 90% данных легла в основу расчета потоков для фоновых районов (F_ϕ), вторая коллекция, составляющая 10% данных, характеризующихся максимальными значениями концентраций растворенного CH_4 , послужила основой для расчета потоков из областей плюмов ($F_{\text{пл}}$). Расчет средних концентраций растворенного CH_4 в каждой коллекции осуществлялся на базе основных статистик лог-нормального распределения.

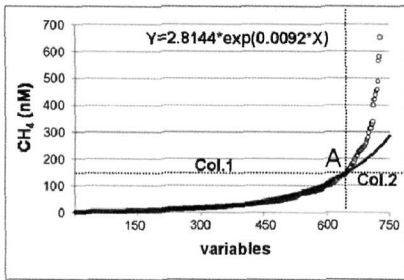


Рис. 14. Распределение данных, полученное на основании экспоненциальной кривой.

Раздел 4.4 посвящен количественной характеристике транспортного блока заключала в себе выделение вклада диффузионного (F_ϕ) и пузырькового (F_m) транспорта растворенного CH_4 в водном столбе.

Пространственное распределение диффузионных потоков представлено на Рис.3, г (описание метода в Разделе 2.4). Среднее значение диффузионного потока в фоновых районах составило 3.67 мг/м²/сут, для районов плюмов среднее значение составило 11.8 мг/м²/сут. Было показано, что концентрации CH_4 в приводном слое атмосферы, хотя в основном и коррелируют с аномалиями растворенного CH_4 в поверхностном слое воды, тем не менее не могут быть объяснены существующими потоками, рассчитанными на основе диффузионного переноса. Кроме того, динамика атмосферных концентраций, включающая резкие повторные всплески (до 8.2 ppm) и снижения концентраций (в течение нескольких секунд) также не характерна для районов, где преобладает диффузионный транспорт метана в водном столбе. Напротив, такая динамика характерна для районов Мирового океана, где преобладает или играет существенную роль пузырьковый перенос. Таким образом,

суммарный поток интегрирует вклад диффузионных потоков и пузырькового переноса. Для выделения вклада пузырькового переноса, были выполнены расчеты суммарных потоков метана в атмосферу на основе прямых (*in situ*) измерений атмосферных концентраций CH_4 и турбулентных потоков атмосферного воздуха (eddy covariance method). Разница между расчетными суммарными потоками и расчетными диффузионными потоками была отнесена за счет пузырькового переноса. Дополнительно для отдельных районов была рассчитана минимальная мощность донного источника, необходимая для формирования зарегистрированных концентраций CH_4 в приводном слое атмосферы (Шахова и др., 2009 в; Юсупов и др., 2010). Тестирование расчетных данных было выполнено в полевых условиях путем прямых измерений пузырькового потока с помощью погружаемого сонара в сентябре 2009 г (см. Раздел 4.5).

В Разделе 4.5 описан подход к количественной оценке сезонного блока эмиссии. В основу предложенного подхода положены данные летних (2005 г) и зимних (2007 г) измерений в заливе Буор-Хая и в районе к востоку от дельты реки Лены. Максимальные летние концентрации CH_4 в этом районе достигали 298 nM и 651 nM соответственно в придонном и поверхностном слое воды. В зимнее время подо льдом максимальные концентрации составили в придонном слое – 2.5 μM , а в поверхностном – 5.0 μM . Увеличение максимальных зимних концентраций по сравнению с максимальными летними составило 8-10 раз (Шахова и др., 2009 а,б; Шахова и др., 2008). В зимнее время эмиссия метана ограничена присутствием льда, и метан, накопленный подо льдом, представляет собой сумму диффузионного и пузырькового потока, уменьшенную на величину аэробного окисления CH_4 в водном столбе. Так как продолжительность безледного и ледового периода составляет соответственно 100 и 265 дней, нереализованный поток метана, основанный на диффузионном транспорте, должен составлять величину в 2.65 раз превышающую летний диффузионный поток. Остальная часть превышения может быть отнесена за счет нереализованного пузырькового потока, ограниченного льдом.

Таким образом было рассчитано, что диффузионный летний поток из фоновых областей составляет 0.69×10^{12} г- CH_4 , а из областей плюмов 0.24×10^{12} г- CH_4 , составляя в сумме 0.93×10^{12} г- CH_4 . Расчитанный турбулентный поток из фоновых областей составил в период открытой воды 1.56×10^{12} г- CH_4 , таким образом разница между турбулентным потоком и диффузионным летним потоком, отнесенная за счет пузырьковых потоков, составила 0.87×10^{12} г- CH_4 . Пузырьковый поток в

областях плюмов, равный 0.39×10^{12} г-СН₄ рассчитан как разница между турбулентным потоком (0.63×10^{12} г-СН₄) и диффузионным потоком (0.24×10^{12} г-СН₄). Таким образом, суммарный летний поток составил 2.19×10^{12} г-СН₄. При расчете потенциальной зимней эмиссии было принято, что в зимнее время соотношение вклада диффузионного и пузырькового транспорта остается таким же, как и в летнее время. Нереализованный зимний диффузионный поток, составляющий 2.42×10^{12} г-СН₄ складывался из потока из фоновых областей равного 1.8×10^{12} г-СН₄ и потока из областей плюмов равного 0.62×10^{12} г-СН₄. Пузырьковый поток добавил бы в фоновых областях дополнительно 2.2×10^{12} г-СН₄, а в областях плюмов 1.17×10^{12} г-СН₄. Суммарная зимняя эмиссия составила 5.79×10^{12} г-СН₄. Таким образом, потенциальная ежегодная эмиссия, суммирующая диффузионные и пузырьковые потоки, составляет 7.98×10^{12} г-СН₄.

Количественная оценка пузырьковой эмиссии СН₄ была выполнена на основе данных, полученных с помощью многолучевого акустического сонара, размещенного на погружаемой платформе (лэндере) (Leifer et al., 2009). Особенностью использованной методики является то, что сонар работает в двух режимах (3.5 и 200 кГц), а также в вертикальной моде измерений, что, во-первых, позволяет получить трехмерную картину восходящего движения акустических пузырьков и, во-вторых, позволяет отличить движение пузырьков от движения живых морских объектов (Рис. 15).

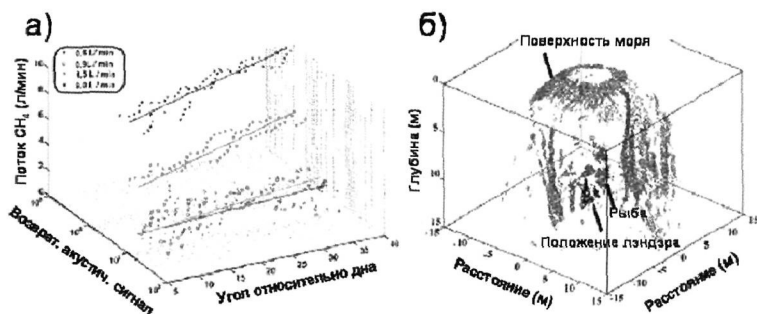


Рис. 15. Данные, полученные многолучевым акустическим сонаром: а) вид калибровочной кривой; б) трехмерное изображение движения пузырьков из дна до поверхности воды (сентябрь 2009 г.)

Достоинством метода является также и то, что калибровка прибора может осуществляться как в лабораторных условиях, так и в режиме реальных полевых

исследований. В ходе выполненных измерений в радиусе действия сонара (площадь $\sim 700 \text{ м}^2$, глубина погружения 15 м) были обнаружены 4 холодных сипа, поток CH_4 из которых достигал поверхности моря. Минимальный поток CH_4 , рассчитанный на основе выполненных измерений, составил $44 \text{ г-CH}_4 \text{ м}^2 \text{ сут.}$

В Разделе 4.6 обсуждается возможная роль антропогенного фактора в усилении эмиссии CH_4 в МВА. Показано, что при анализе динамики атмосферных концентраций, регистрируемых в режиме постоянных измерений (NAFMA DLT-100), превышения концентраций на изученном участке пути достигали 0.2 ppm (10%) и были статистически достоверными ($P \leq 0.95$). При этом было выделено три типа кривых всплеска: тип 1 – незначительные (1-3%), равномерные во времени и симметричные в пространстве повышения концентраций атмосферного метана; тип 2 – симметричная кривая всплеска, отражающая плавное повышение концентраций до достижения максимального уровня (8-10%) и последующее такое же плавное снижение концентраций до исходного уровня, регистрируемая продолжительность всплеска составляет 20-30 минут (Рис. 16а); тип 3 – ассиметричная кривая всплеска, характеризующаяся резким, в течение 1-2 секунд, повышением концентраций до максимального уровня (8-10%), многократным повторением подобных повышений и последующим относительно плавным (несколько секунд) снижением концентраций до исходного уровня (Рис. 16б; Шахова и др., 2009в).

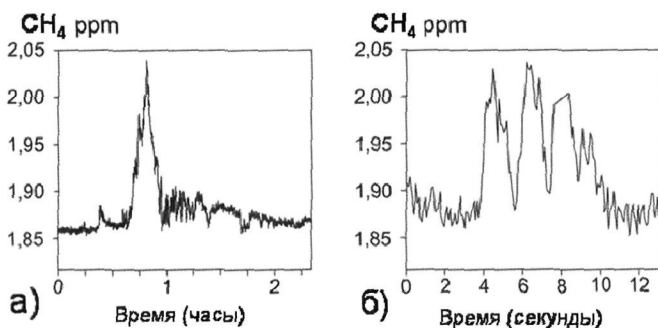


Рис. 16. Пример кривых 2-го и 3-го типов, описывающих всплески атмосферных концентраций CH_4 : а) плавный рост и симметричное плавное снижение, время всплеска до 30 минут; б) кратковременные резкие всплески.

Характерным отличием всплесков 2-го типа было то, что они были получены в основном при равномерном движении судна на глубинах, превышающих 20 м. Симметричный характер кривых позволил предположить, что судно входило в

области повышенных атмосферных концентраций CH_4 , а затем выходило из них. Продолжительность движения судна в таких областях (до $\frac{1}{2}$ часа) свидетельствует о том, что размеры пересекаемых облаков аномальных концентраций достигали нескольких километров в диаметре – при скорости движения судна 10 морских узлов (16 км в час) диаметр облака мог достигать 8 км. Поскольку в ходе предыдущих исследований в данном районе были зарегистрированы не только экстремально высокие концентрации CH_4 в водной толще как в летний так и в зимний период, но также были обнаружены скопления пузырей большого диаметра, включенные в состав морского льда, было высказано предположение о формировании в этом районе мощных полей пузырьковой эмиссии, обеспеченной потоками метана из донных залежей, предположительно связанной с разрушением мелководных газогидратов.

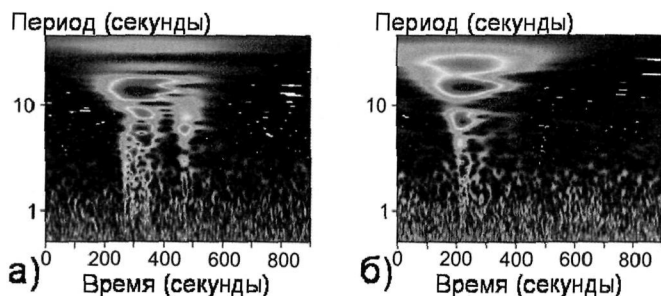


Рис. 17. Результаты вейвлет-анализа (преобразование типа «Морле»), выполненные для всплесков 3-го типа.

Анализ кривых 3-го типа показал, что появление серии коротких всплесков, следует по времени за моментом запуска двигателя и резкого набора судном скорости непосредственно после дрейфа на мелководье (глубины ≤ 15 м) с последующим движением по ветру. Сопоставление данного обстоятельства и формы кривой всплеска позволило выдвинуть гипотезу о том, что причиной возникновения всплеска атмосферного CH_4 могло явиться само судно. Для анализа всплесков 3-го типа было применено вейвлет-преобразование данных с использованием вейвлета «Морле». Установлено существование ярко-выраженной периодичности: области более высоких величин энергии колебаний (более темные оттенки красного на Рис. 17) были сосредоточены в определенных интервалах периодов (частот), которые по времени соответствовали повторяющимся коротким

всплескам концентраций атмосферного CH_4 . Мощность таких единичных источников, рассчитанных на основе простой боксовой модели, может достигать от 0.7 г- CH_4 /сек до 2.1 г- CH_4 /сек, что соизмеримо с мощностью эмиссии CH_4 из грязевых вулканов и геологических источников, в том числе из разрушающихся газогидратов. Таким образом, результаты анализа подтверждают гипотезу о том, что на мелководных участках ВСШ антропогенный фактор может являться одним из значимых факторов, усиливающих залповую эмиссию CH_4 в атмосферу.

В Главе 5 показано, что состояние подводной мерзлоты является ведущим фактором геологического контроля современной эмиссии CH_4 в МВА. В *разделе 5.1* освещается история изучения подводной мерзлоты в МВА и формирования подходов к моделированию современного состояния подводной мерзлоты. Показано, что вопрос о состоянии подводной мерзлоты в МВА до настоящего времени является предметом научных дискуссий, поскольку результаты моделирования подводной мерзлоты противоречивы, а данные натурных наблюдений ограничены. Существует три точки зрения по вопросу о современном распространении подводной мерзлоты в МВА. Баранов (1958), Григорьев (1962), Арэ (1976) допускали возможность распространения подводной мерзлоты до изобаты 100 м, в то же время, предполагая возможное развитие таликов в зонах влияния теплых атлантических, тихоокеанских вод и речного стока крупных сибирских рек.

Развивая их взгляды, Романовский (1993) выделяет два основных типа криолитозоны: криолитозону внутренней части шельфа (прибрежно-шельфовую) и криолитозону внешней части шельфа (океаническая криолитозона). В результате моделирования современного состояния подводной мерзлоты, Романовский (2005) приходит к выводу о стабильности прибрежно-шельфовой криолитозоны до изобаты 30-70 м. В то же время, он рассматривает возможность формирования сквозных таликов в рифтовых зонах. Другой крайней точки зрения придерживается Говоруха (1968). Он считает, что распространение подводной мерзлоты на Российском арктическом шельфе ограничено и встречается она лишь в узкой прибрежной полосе. От приведенных точек зрения отличаются взгляды Данилова и Жигарева (1977). По мнению этих авторов, распространение подводной мерзлоты на восточноарктическом шельфе ограничено; в море Лаптевых она распространена до 35 км от береговой черты, в Восточно-Сибирском море и Чукотском морях – от десятков до первых сотен метров. Для открытого шельфа моря Лаптевых характерно распространение островной (современной и реликтовой) подводной мерзлоты, а в

Восточно-Сибирском и Чукотском морях она практически отсутствуют. Мнение этих авторов разделяли Неизвестнов (1981) и Соловьев (1981, 1983).

Несмотря на различия во взглядах, все авторы сходятся во мнении о том, что сплошная мерзлота наиболее вероятно существует в прибрежной полосе и в районах, прилегающих к островам, поскольку эти районы подвергались наиболее длительному промерзанию при обнажении шельфа в ходе регрессии океана. В то же время, результаты натурных наблюдений показали, что даже эта точка зрения требует дополнительного осмысления, поскольку противоречит результатам бурения. Например, при бурении в проливе Дмитрия Лаптева, где наиболее предположительно, мерзлота должна быть сплошной, в одном из кернов, наиболее приближенном к береговой черте о. Большой Ляховский, мерзлая зона бурением не была вскрыта до глубины 53-63 м от уровня моря. При бурении до глубины 86 м в проливе Санникова по трансектам от острова Малый Ляховский до Земли Бунге и вблизи юго-восточной оконечности Земли Бунге ни в одной из 10 скважин мерзлота не была вскрыта. В проливе Геденшторма мерзлые породы были вскрыты всеми шестью скважинами, однако толщина слоев, находящихся в мерзлом состоянии сильно варьировала – от 7 м до 88.8 м.

Моделируя подводную мерзлоту, российские геологи традиционно используют модель, основанную на представлениях об изменении положения береговой линии. Это изменение определяется тремя основными факторами: гляцио-эвстатическими колебаниями уровня Мирового океана (глобальный фактор), тектоническими движениями дна и побережий, а также термоабразией берегов (локально-региональные факторы, Соловьев и др. 1987). Развитие криолитозоны Арктического шельфа в позднем кайнозое определялось в основном неоднократной сменой субэзальной и субаквальной обстановок. Заключительный этап развития криолитозоны Арктического шельфа начался со времени последней трансгрессии 18-19 тыс. лет назад. Он характеризуется постепенной сменой субэзальной обстановки на субмаринную и деградацией (частичной или полной) подводной мерзлоты. При изменении термобарических условий подводная мерзлота проходит в три этапа: на первом этапе, длительностью от сотен до нескольких тысяч лет, подводная мерзлота претерпевает трансформации, направленные на выравнивание температуры в ее пределах с новыми граничными условиями, которыми являются температуры фазовых переходов морской воды различной солености. На втором этапе мерзлая толща начинает деградировать снизу – за счет отепляющего влияния глубинного теплового потока и сверху – за счет растворяющего влияния морской

воды. На третьем этапе происходит замещение мерзлых толщ немерзлой криолитозоной (Соловьев и др. 1987).

В разделе 5.2 описан алгоритм модели, разработанный российскими учеными, основанный на представлениях о гляцио-эвстатических колебаниях уровня Мирового океана. Колебание уровня океана оказывает влияние на формирование термобарической, в частности, мерзлотной обстановки на шельфе. Палеогеографический сценарий для последних 400 тыс. лет был восстановлен на основе реконструкции климата по палеоклиматическим данным, полученным из ледяных кернов. Кривая палео-температур отражает смену климатических циклов и колебания уровня океана в ходе трансгрессий/регрессий. В алгоритме, предложенном Романовским и др. (1998; 2000; 2001; 2004; 2005), который является наиболее полным, были использованы кривые гляциоэвстатических колебаний для временных отрезков от 400 тыс. лет до 120 тыс лет, от 120 тыс. лет до 20 тыс. лет, и от 20 тыс. лет до настоящего времени.

Важнейшими факторами при моделировании современного состояния подводной мерзлоты являются геотермические условия Арктического шельфа и температура придонного слоя воды, на основании которых определяют глубину проникновения годовых колебаний температуры, коэффициенты температуропроводности и теплопроводности. На шельфе МВА геотермические исследования проводились в районе Новосибирских островов и на шельфе Восточно-Сибирского моря. В результате этих исследований плотность глубинного теплового потока была установлена в пределах от 64 мВт/м² до 124 мВт/м². Тем не менее, при моделировании традиционно используются более консервативные величины предполагаемого потока в пределах от 40 до 75 мВт/м². Среднегодовые температуры придонного слоя воды основывалась на данных натурных наблюдений и принималась в пределах от -0.5°C до -2.0°C. При этом предполагалось, что минерализация поровой воды подводной мерзлоты соответствует минерализации пресного осадка и что таяние подводной мерзлоты под влиянием слабо-отрицательных температур морской воды невозможно. Дальнейшее улучшение алгоритма привело к включению температуры фазового перехода в системе мерзлые породы/талые породы равной -2°C (Романовский и др., 2005), а также к учету в алгоритме модели неравномерности протекания трансгрессии в зависимости от неотектонического строения шельфа, особенностей формирования и разрушения ледового комплекса, формирования озерного термокаста, а также термоабразии берегов (Гаврилов и др., 2006).

В разделе 5.3 анализируются работы, направленные на дальнейшее развитие принципов, заложенных российскими учеными, а также на улучшение понимания динамики и современного состояния подводной мерзлоты. Так, в работах Taylor и др. (1996), было показано, что минерализация мерзлого грунта играет определяющее значение в развитии процессов термокарста. В работах Хименкова и Брушкова (2006) было показано, что степень минерализации поровой воды осадка не только определяет температуру фазового перехода мерзлого грунта в талое состояние, но также определяет объемную долю незамерзшей воды в составе мерзлого грунта. В дальнейших работах было показано, что при промерзании зернистых засоленных грунтов (соленость ≥ 2 г/л) незамерзшая вода накапливается в центре порового пространства, формируя каналы в структуре замерзшего грунта (Arenson and Sego, 2006). Вместе с пузырьками воздуха, включенными в состав мерзлых пород, система каналов незамерзшей воды создает своеобразную транспортную сеть, обеспечивающую движение жидкостей и углеводородов внутри мерзлоты. Данный феномен был описан в работе (McCarthy et al., 2004), где авторам удалось заснять на камеру движение углеводородов внутри мерзлого грунта (песчаник и гравий) на Барроу (Аляска, США).

Амплитуды годовых колебаний температур в арктических регионах максимальны, поэтому мерзлые грунты подвергаются разрушающему влиянию соответствующих сжатий и расширений (thermal contraction), что приводит к локальным разрывам сплошности мерзлых пород и формированию обширной сети трещин и расщелин (Cramer and Franke, 2005). Этот механизм объясняет формирование клиновидных форм льдообразования, широко распространенных на арктическом побережье (Романовский, 1974; Фартышев, 1993; Григорьев и Куницкий, 2000). С точки зрения цикла CH_4 , возможность существования разветвленной сети трещин в структуре мерзлых пород означает наличие благоприятных условий для формирования путей миграции газов и газосодержащих геофлюидов (Biggar et al., 1998).

Поскольку мелководный шельф МВА выполняет роль эстуария Великих Сибирских рек, среднегодовые температуры воды в мелководных районах шельфа значительно отличаются от температур в глубоководной части морей, достигая на достаточно обширных территориях слабо-положительных значений. Мощное дополнительное отепляющее воздействие на мерзлоту могут также оказывать водные горизонты дренажной системы мерзлоты. Контакт с относительно теплыми водами над-, внутри- и подмерзлотных горизонтов и их проникновение в

мерзлотные горизонты является фактором, ускоряющим процесс деградации мерзлоты. Было показано, что интенсивная деградация подводной мерзлоты происходит и в районах, находящихся вне отепляющего влияния рек. Достоверным подтверждением вышесказанного являются результаты бурения, выполненные к западу от дельты реки Лены в районе, удаленном от влияния рифтовых зон. В одном из кернов, полученном на расстоянии 12 км от м. Мамонтов Клык, температура мерзлоты начиная с глубины 10 м была зарегистрирована в пределах от -1.0°C до -1.4°C , что соответствует температурам фазовых переходов минерализованных осадков в немерзлое состояние; в результате до глубины более 70 м были обнаружены талые осадки (Rachold et al., 2007). Кроме того, было показано, что крышка подводной мерзлоты имеет тенденцию к заглублению с ростом глубины водного столба, что также подтверждает ранее высказанное мнение об эффективном тепловом воздействии морской воды (Григорьев, 2008).

Отдельное внимание было уделено изучению дестабилизирующего влияния на подводную мерзлоту разрушающихся мелководных шельфовых газгидратов. Согласно термобарическим условиям, формирование зоны стабильности шельфовых газгидратов с необходимостью происходит при образовании многолетне-мерзлых пород во время осушения шельфа МВА. Этому способствует благоприятная обстановка гидратоносности, которая обуславливается многокилометровой мощностью осадочного чехла, относительной стабильностью осадочных бассейнов, высокой долей органического углерода в осадках, а также может быть связана с восходящей миграцией газа по разломам и обогащением придонных отложений диагенетическим газом (Соловьев и др., 1987). После затопления континентальной окраины в период трансгрессии, газгидраты перемещаются в нестационарную термобарическую обстановку, поскольку происходит резкое изменение температурных условий (увеличение температуры на $7-12^{\circ}\text{C}$), что является более значимым фактором по сравнению с ростом давления за счет повышения высоты водного столба. В результате, стабильность газгидратов нарушается и верхняя граница зоны стабильности газгидратов постепенно смещается вниз (Романовский и др., 2005).

Газ из разрушенных газгидратов накапливается между нижней границей мерзлоты и верхней границей зоны стабильности газгидратов (Delisle, 2000). Таким образом формируется газовый фронт, который представляет собой мощное скопление газа, находящегося под давлением, что позволяет ему двигаться как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении (Рис. 18). В результате

тектонического движения плит, сейсмичности, а также под давлением восходящего газового фронта могут происходить разрывы сплошности мерзлоты и формирование каналов утечки газа. Вслед за утечкой газа и последующим изменением давления происходит осадка мерзлого грунта, что регистрируется как эндогенная сейсмичность, которая, в свою очередь, способствует дальнейшей дестабилизации подводной мерзлоты и выходу дополнительных количеств газа (Osterkamp & Harrison, 1985).

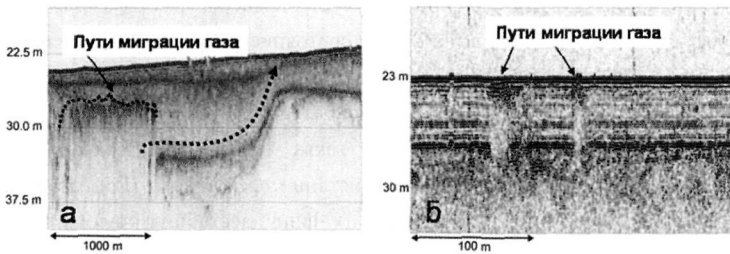


Рис. 18. Результаты интерпретации сейсмических данных, подтверждающие формирование путей миграции газовых фронтов в донных отложениях МВА: а) латеральное движение газа; б) вертикальное движение газа (Shakhova et al., 2010).

В разделе 5.4 обсуждается алгоритм моделирования современного состояния подводной мерзлоты, улучшенный путем объединения идей российских и зарубежных ученых. Первостепенное внимание было уделено влиянию локально-региональных факторов (термокарст, сложное строение осадочных толщ, определяющее степень минерализации осадочных толщ и долю незамерзшей воды, присутствие/отсутствие ледового комплекса в составе осадочных толщ). Предполагается, что в период, предшествующий затоплению и сопровождающий затопление на приморской равнине шло активное развитие процессов термокарста, сопровождавшийся формированием множества термокарстовых озер. Процесс затопления протекал в разное время с разной скоростью; наименьшие скорости сопровождали затопление прибрежных районов МВА. В работах Burn (2002) показано, что среднегодовые температуры таликов термокарстовых озер на момент их затопления могли варьировать в пределах от $+0.5^{\circ}\text{C}$ до $+4^{\circ}\text{C}$. В ходе затопления одновременно с охлаждением осадочных толщ происходила их минерализация (Osterkamp, 1999). В результате в таликах затопленных озер могли создаваться условия для их дальнейшего развития после затопления.

Засоленные мерзлые породы считаются наиболее сложной из всех известных систем криолитозоны. По многим свойствам они занимают положение между мерзлыми и немерзлыми породами. Определяющее влияние на механические свойства грунтов оказывает незамерзшая вода, содержание которой определяется засоленностью, типом и температурой грунтов. Температура начала заморозания грунта при прочих равных условиях определяется засоленностью. Установлено например, что при засолении суглинистого грунта до 1.0% в диапазоне температур от -2.8°C до -6.5°C содержание незамерзшей воды увеличивается на 22.3%, в результате чего температура начала заморозания грунта снижается до -3.0°C (Брушков и Хименков, 2006).

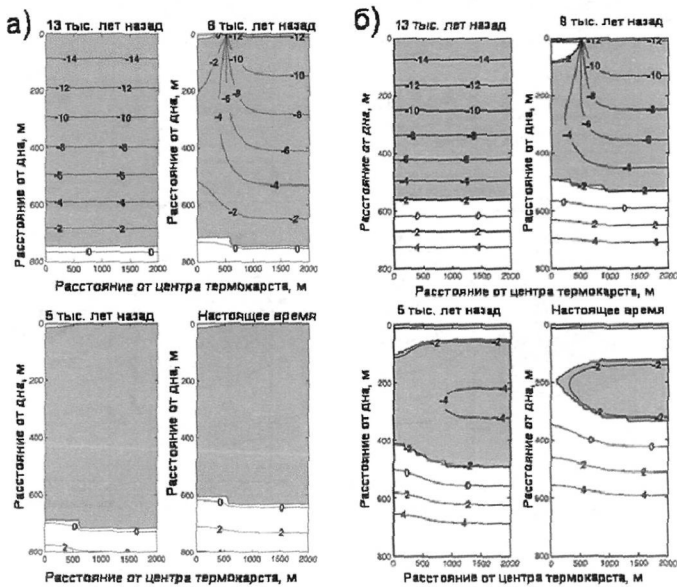


Рис. 19. Результаты моделирования случаев А (а) и Б (б): А – донные отложения не минерализованы, геотермальный топик 50 мВт/м^2 ; Б – донные отложения минерализованы, геотермальный поток тот же (Шахова и др., 20096).

Основные параметры модели, дополняющие существующий алгоритм модели, описанный в Романовский и др. (2005) включали: минерализацию осадка (35‰ для поровой воды морских осадков и 3‰ для поровой воды пресных осадков), долю

незамерзшей воды в составе осадков в соответствии с кривой незамерзшей воды, представляющей собой функцию температуры для осадков разной минерализации; сложное строение осадочной толщи, включающей слои едомного комплекса на глубинах 0-15 м для случаев А и Б, и на глубинах 0-15 м, 50-65 м и 100-115 м для случаев В и Г. В ходе моделирования современного состояния подводной мерзлоты в проливе Дмитрия Лаптева были рассмотрены 4 возможных случая. Случай А воспроизводил граничные условия алгоритма модели, изложенные в работе (Романовский и др., 2005).

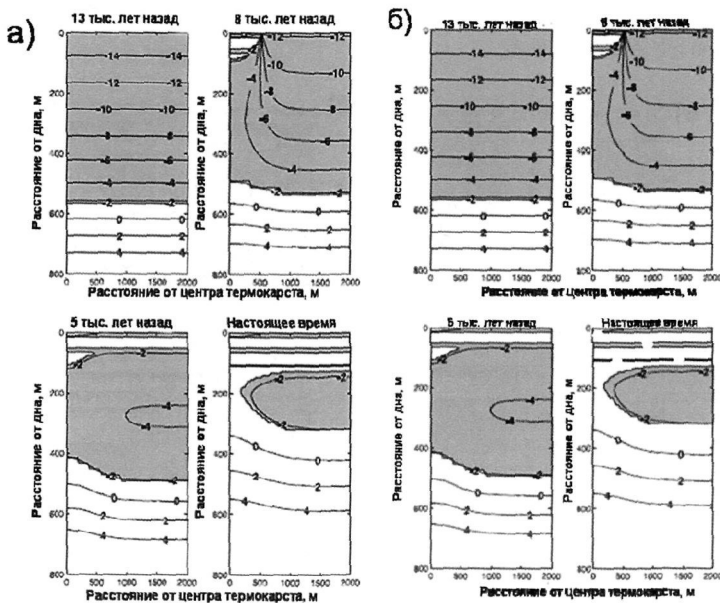


Рис. 20. Результаты моделирования случаев В (а) и Г (б): В – высоко-минерализованные донные отложения включают прослойки низко-минерализованных отложений, геотермальный поток 50 мВт/м^2 ; Г – то же, но геотермальный поток 60 мВт/м^2 (из Шахова и др, 2009б).

В ходе моделирования были воспроизведены результаты, полученные авторами данной работы, согласно которым в проливе Дмитрия Лаптева существует сплошная мерзлота толщиной в несколько сотен метров ($\leq 600 \text{ м}$, Рис.19а). Случай Б воспроизводил граничные условия случая А за исключением одного: минерализация донных отложений, за исключением верхних 15 м, были принята равной

минерализации морских донных отложений (Рис. 19б). Случай В (Рис. 20а) воспроизводит условия случая Б, за исключением минерализации верхних слоев донных отложений от 0 до 15 м, от 50 до 65 м и от 100 до 115 м, которые принимались состоящими из низко-минерализованных (пресные) осадков. Случай Г (Рис. 20б) воспроизводит условия случая В, однако тепловой поток был принят равным 60 мВт/м^2 . Для тестирования результатов моделирования были использованы данные бурения в проливе Дмитрия Лаптева (Рис. 21), двухлетние данные измерения концентраций растворенного CH_4 в проливе Дмитрия Лаптева, а также данные измерений концентраций CH_4 в приводном слое атмосферы (Рис. 12). Показано, что наличие в кернах осадочных слоев различной температуры, равно как и одновременное присутствие мерзлых пород и охлажденных пород, свидетельствует о сложной структуре осадочных толщ.

Устойчивое обнаружение аномально высоких концентраций растворенного CH_4 в водном столбе в проливе Дмитрия Лаптева, в частности на тех станциях, которые были выполнены в наибольшей близости к юго-восточному побережью о-ва Большой Ляховский (именно там, где был обнаружен керн, полностью состоящий из немерзлых охлажденных пород), свидетельствует о возможности формирования сквозного талика в соответствии с данными моделирования (случай Г, рис. 20б), допускающей утечку CH_4 из донных залежей.

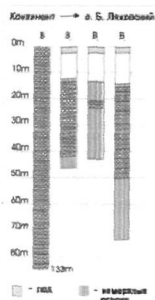


Рис. 21. Данные бурения в проливе Дмитрия Лаптева (по Соловьев и др. 1987).

Равномерное распределение растворенного CH_4 в водном столбе (глубина менее 9 м) без явно выраженного максимума и градиента концентраций, свидетельствует о преобладании пузырькового переноса CH_4 в границах водного столба (Shakhova et al., 2010). Регистрация высоких концентраций CH_4 в приводном слое атмосферы (до 6 ppm) является подтверждением залповых выбросов CH_4 в атмосферу (Шахова и др., 2009 а,б). Таким образом было показано, что данные натурных наблюдений хорошо согласуются с результатами моделирования, полученными с использованием улучшенного алгоритма моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы описано новое явление – широкомасштабная эмиссия метана из акватории МВА в атмосферу Арктического региона. На основе результатов многолетних комплексных исследований даны основные качественные характеристики этого явления, а также предложена методология оценки ежегодной эмиссии метана и оригинальные методы количественной оценки ее отдельных компонентов в МВА. Выполненные расчеты показали, что эмиссия метана из МВА соизмерима с эмиссией из остальных шельфовых морей Мирового океана, а значит, играет важную роль в современном цикле метана. Показано, что пространственное распределение метана отличается крайней мозаичностью и не коррелирует с распределением органического углерода в современных осадках, что свидетельствует о вовлечении в современный биогеохимический цикл метана из донных залежей, который поступает в водную толщу через постоянно существующие и/или временно формирующиеся пути миграции. Одним из таких возможных путей миграции могут быть сквозные талики, сформированные в результате деградации подводной мерзлоты под влиянием комплекса различных факторов, в числе которых впервые были учтены такие как минерализация осадков, содержание незамерзшей воды в структуре морзлого грунта, сложное строение осадочных толщ, включающих слои высоко- и низко-минерализованных осадков, а также влияние процессов термокарста, предшествующих затоплению шельфа МВА. Тестирование полученных результатов моделирования данными натурных наблюдений показало правомерность выбранного подхода. В условиях глобального изменения климата, который в Арктическом регионе проявляется как потепление, следует ожидать дальнейшего роста эмиссии метана из МВА. Поскольку шельф МВА чрезвычайно мелководен, значительная часть метана выбрасывается в атмосферу, что существенно увеличивает концентрации метана в приземном слое атмосферы, оказывая влияние на фоновые концентрации метана в атмосфере и, следовательно, на формирование Арктического максимума метана в атмосфере.

ВЫВОДЫ

1) МВА являются источником метана в атмосферу Арктического региона и важной составной частью морского цикла метана, поскольку ежегодная эмиссия метана в атмосферу Арктического региона из МВА соизмерима с суммарной ежегодной эмиссией метана из акватории всех морей Мирового океана.

2) Метан поступает в придонную воду из донных отложений не только в виде растворенного газа (диффузионный транспорт), но также и в форме пузырьков, о чем свидетельствует характер вертикального распределения концентраций в водном столбе, наличие областей экстремально-высоких концентраций; превышение зимних концентраций над летними, превышение поверхностных концентраций над придонными, а также гидро-акустические и геофизические данные, с помощью которых были зарегистрированы мощные выбросы пузырьков из дна в водную толщу.

3) Мощность современной эмиссии метана в МВА, а также ее будущий прирост, в основном зависит от степени вовлечения в современный биогеохимический цикл метана и органического углерода, накопленного в донных отложениях в предыдущие климатические эпохи. Вклады современной продукции в осадках, в водном столбе и латерального переноса из наземных источников не являются значимыми. Количественные характеристики современных потоков метана в МВА и их пространственно-временная изменчивость зависят от наличия газо-проводящих путей в структуре осадочной толщи.

4) Подводная мерзлота является ведущим фактором геологического контроля потоков метана в водную толщу и определяет пространственно-временную изменчивость потоков метана в атмосферу. В результате дестабилизации подводной мерзлоты в донных отложениях МВА формируются газо-проводящие пути, по которым метан поступает в водную толщу. Основным механизмом формирования таких путей является развитие восходящих, нисходящих и комбинированных таликов.

5) Результаты моделирования подводной мерзлоты, выполненные с учетом ранее неучтенных факторов, таких как засоленность осадков и, связанное с этим, наличие в структуре мерзлых осадков незамерзшей воды; развитие процессов термокарста, предшествующее затоплению, в частности, развитие под-озерных таликов; а также сложной структуры донных отложений, включающих слои слабо-минерализованных и сильно-минерализованных осадков, и их тестирование данными натурных наблюдений показали, что развитие таликов допускается не только в зонах прямого влияния рифтовых зон, но также в районах, находящихся вне их прямого влияния.

В данной работе не ставилась цель выполнения исследований, направленных на

решение более частных, хотя и не менее важных научных задач, касающихся биогеохимических и микробиологических аспектов цикла метана, изучение которых позволит ответить на целый ряд вопросов, которые остались за рамками настоящего исследования. Дальнейшие исследования будут направлены на количественную оценку метанового потенциала МВА, которая включает суммарную оценку количества метана, находящегося в донных залежах в виде ранее синтезированного газа (в форме свободного газа и в форме газгидратов), а также количества C_{org} находящегося в подводной мерзлоте в замороженном виде и обеспечивающего необходимый субстрат для метаногенеза при таянии подводной мерзлоты. Для решения этих задач необходимо изучить микробные сообщества, сохраняющие свою жизнеспособность в подводной мерзлоте, современных осадках и в водном столбе, их способность к метаногенезу и метан-окислению при различных условиях, а также процессы и факторы, оказывающие влияние на скорость вовлечения метанового потенциала в современный биогеохимический цикл.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные статьи (опубликованные или принятые к печати) в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК

1. Шахова, Н.Е., Семилетов, И.П., Салюк, А.Н., Бельчева, Н.А., Космач, Д.А. Аномалии метана в приводном слое атмосферы на шельфе Восточно-Сибирской Арктики // Доклады Академии наук / Рос. акад. наук. 2007а. Т. 414, № 6. С. 819-823.
2. Шахова, Н.Е., Юсупов, В.А., Салюк, А.Н., Космач, Д.А., Семилетов, И.П. Антропогенный фактор и эмиссия метана на Восточно-Сибирском шельфе // Доклады Академии наук / Рос. акад. наук. 2009в. Т. 429, № 3. С. 398-401.
3. Шахова, Н.Е. Семилетов, И.П., Бельчева, Н.А. Великие сибирские реки как источники метана на Арктическом шельфе // Доклады Академии наук / Рос. акад. наук. 2007б. Т. 414, № 5. С. 683-685.
4. Шахова, Н.Е., Сергиенко, В.И., Семилетов, И.П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестник РАН. 2009а. Т. 79, № 6. С. 507-518.
5. Шахова, Н.Е., Сергиенко, В.И., Семилетов, И.П., Салюк, А.Н., Бельчева, Н.Н., Космач, Д.А. О роли Восточно-Сибирского арктического шельфа в современном цикле метана и глобальных климатических процессах // Вестник ДВО РАН. 2008а. № 4. С. 3-15.
6. Шахова, Н.Е., Никольский, Д.Ю., Семилетов, И.П. О современном состоянии подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными натурных измерений // Доклады Академии наук / Рос. акад. наук. 2009б. Т. 429, № 6. С. 541-544.

7. Шахова, Н.Е., Алексеев, В.А., Семилетов, И.П. Прогноз эмиссии метана на Восточно-Сибирском шельфе // Доклады Академии наук / Рос. акад. наук. 2010. Т.430, № 1.
8. Шахова, Н.Е., Семилетов, И.П., Бельчева, Н.А. Растворенный метан в шельфовых водах Арктических морей // Доклады Академии наук / Рос. акад. наук. 2005а. Т. 402, № 4. С. 529-533.
9. Юсупов, В.А., Салюк, А.Н., Карнаух, В.Н., Семилетов, И.П., Шахова Н.Е. Обнаружение областей пузырьковой разгрузки метана на шельфе моря Лаптевых в Восточной Арктике // Доклады Академии наук / Рос. акад. наук. 2010. Т. 430, № 1.
10. Belzile, C., Roesler, C. S., Christensen, J. P., Shakhova, N., Semiletov, I. Fluorescence measured using the WETStar DOM fluorometer as a proxy for dissolved matter absorption // Estuarine Coastal and Shelf Science. 2006. Vol. 67. P. 441-449.
11. Cooke, M.P., van Dongen, B., Talbot, H., Shakhova, N., Guo, L., Gustafsson, O. Bacteriophanepolyol biomarker composition of organic matter exported to the Arctic Ocean by seven of the major Arctic rivers // Organic Geochemistry. 2009. Vol. 35. P. 734-741.
12. Semiletov, I., Pipko, I.I., Repina, I.A., Shakhova, N. Carbonate dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean Pacific sector of the Arctic // J. of Marine Systems. 2007. Vol. 66. P. 204-226.
13. Shakhova, N., Semiletov, I., Panteleev, G. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle // Geophys. Res. Letters. 2005. Vol. 32. L09601. doi.:10.1029/2005GL022751.
14. Shakhova, N., Semiletov, I. Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf // J. of Marine System. 2007. Vol. 66. P. 227-243.
15. Semiletov, I., Shakhova, N., Romanovsky, V., Pipko, I. Methane Climate Forcing and Methane Observation in the Siberian Arctic Land-Shelf System // World Resource Review. 2004. Vol. 16, № 4. P. 503-541.
16. Shakhova, N., Semiletov, I., Leifer, I., Rekant, P., Salyuk, A., Kosmach, D. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf // J. Geophys. Res. 2009. JC005602R (в печати).

Статьи и главы, опубликованные в рецензируемых центральных и иностранных изданиях

17. Шахова, Н.Е., Семилетов, И.П., Салюк, А.Н., Бельчева, Н.Н., Космач, Д.А. Аномалии метана на шельфе арктических морей России // Дальневосточные моря России. Кн. 2. Исследования морских экосистем и биоресурсов / отв.ред. В.П. Челомин. М.: Наука, 2007в. С. 353-365.
18. Семилетов, И.П., Дударев, О.В., Пипко, И.И., Салюк, А.Н., Шахова, Н.Е. Морские исследования в Арктике на рубеже третьего тысячелетия // Дальневосточные моря России. Кн. 2. Исследования морских экосистем и биоресурсов / отв.ред. В.П. Челомин. М.: Наука, 2007. С. 309-324.

19. Шахова, Н.Е., Сергиенко, В.И., Семилетов, И.П., Салюк, А.Н., Бельчева, Н.Н., Космач, Д.А. Состояние вопроса о роли Восточно-Сибирского шельфа в современном цикле метана // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы / ред. Н.П. Лаверов и др. Т. 6. М.: ИФХ и БПП РАН, 2008б. С. 164-176.
20. Шахова, Н.Е., Семилетов, И.П. Характерные особенности цикла углерода на мелководном шельфе Восточного сектора Российской Арктики // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы / ред. Н.П. Лаверов и др. Т. 4. М.: ИФХ и БПП РАН. 2008в. С. 167-181.
21. Shakhova, N., Semiletov, I. Methane hydrates feedbacks // Arctic Climate Feedbacks: Global Implications. WWF International Arctic Programme. Oslo, 2009. P. 81-92.

Избранные тезисы докладов

1. Kosmach, D., Shakhova, N., Semiletov, I., Dudarev, O. Methane release and surface sediment environment in the East Siberian Arctic shelf // Eos Trans. AGU. 88(52). Fall Meet. Suppl. 2007. Abstract B53A-0917.
2. Salyuk, A., Semiletov, I., Nesterov, V., Shakhova, N. Helicopter survey of methane and carbon dioxide sources on the Laptev Sea shelf near the Lena River Delta. EGU General Assembly 2009 // Geophys. Res. Abstr. 2009. Vol. 11. EGU2009-8184. (устный доклад).
3. Semiletov, I., Dudarev, O., Shakhova, N., Pipko, I. Carbon cycling in the Arctic Atmosphere-Land-Shelf System // Proceeding of the summer meeting of the American Society of Limnology and Oceanography (ASLO). June 19-24. 2005. Santiago de Compostella, 2005. P. 201.
4. Semiletov, I., Makshtas, A., Shakhova, N. Carbon Dioxide and Methane sensors: prospective for the greenhouse gases detection in the Arctic Ocean using the ice-tethered platform // Arctic Observing Based on Ice-Tethered Platforms. Woods Hole Oceanographic Institution. 28-30 June 2004. Woods Hole, 2004. P. 15-17.
5. Semiletov, I., Shakhova, N., Dudarev, O., Pipko, I., Pugach, S., Charkin, A., Kosmach, D. Carbon fluxes in the Arctic atmosphere-land-shelf system with emphasis on the Lena River-Laptev and East-Siberian seas // Eos Trans. AGU, 89(53). Fall Meet. Suppl. 2008. Abstract GC52A-05 INVITED (устный доклад по приглашению).
6. Semiletov, I., Shakhova, N., Panteleev, G., Dudarev, O. Detection of Environmental Changes in the Arctic Seas: Carbon and Water Masses // Eos Trans. AGU, 86(52). Fall Meet. Suppl. 2005. Abstract OS51B-0558.
7. Semiletov, I., Gustaffson, O., Dudarev, O., Björk, G., Andersson, P., Salyuk, A., Anderson, L., Shakhova, N. International Siberian Shelf Study 2008 (ISSS-08): The major IPY ship-based program along the entire Eurasian-Arctic continental shelf with combined biogeochemical and geophysical observations // Eos Trans. AGU. 89(53). Fall Meet. Suppl. 2008. Abstract 23F-03.

8. Semiletov, I., Shakhova, N., Pipko, I., Romanovsky, V. Methane Climate Forcing and Methane Observations in the Siberian Arctic Land-Shelf system // The 15th Global Warming International Conference. April 20-22. 2004. San Francisco. USA. San Francisco, 2004. P. 44.
9. Semiletov, I., Dudarev, O., Charkin, A., Shakhova, N., Kosmach, D. Terrestrial organic carbon in the Arctic East Siberian land-shelf system. EGU General Assembly 2007 // Geophys. Res. Abstr. 2007. Vol. 9. EGU A-01043.
10. Semiletov, I., Shakhova, N., Dudarev, O., White, D., Belzile, C., Pipko, I., Charkin, A. Transport and fate of the terrestrial particulate material and dissolved organic carbon derived from permafrost in the East-Siberian Sea and adjacent part of the Laptev Sea // Conference in Fairbanks. GCCI-2007. P.153-156.
11. Sergienko, V., Semiletov, I., Shakhova, N., Dudarev, O., Kosmach, D., Charkin, A., Spivak, E. The First IPY Russia-US expedition in the Siberian Arctic seas: March-April 2007 // Eos Trans. AGU, 88(52). Fall Meet. Suppl. 2007. Abstract U31C-0500.
12. Shakhova, N., Semiletov, I., Belcheva, N. The air-water CH₄ gradient in the Siberian Arctic seas. Gas transfer at water surface // Proceeding of the 37th International Liege Colloquium on Ocean Dynamics. May 2-6. Belgium. Liege, 2005. P. 197.
13. Shakhova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Kosmach, D. Anomalies of methane in the atmosphere over the East Siberian shelf: Is there any sign of methane leakage from shallow shelf hydrates? EGU General Assembly 2008 // Geophys. Res. Abstr. 2008. Vol. 10. EGU2008-A-01526.
14. Shakhova, N., Semiletov, I., Belcheva, N. Dissolved methane in the East-Siberian and Laptev seas // International Research Conference. Paris. June 5-10. Paris, 2005. P. 112-113.
15. Shakhova, N., Semiletov, I. Dissolved Methane Anomalies Over the East-Siberian Arctic Shelf: Signs of Gas Hydrate Decay // Eos Trans. AGU, 86(52). Fall Meet. Suppl. 2005. Abstract OS51B-0560.
16. Shakhova, N., Semiletov, I., Pipko, I. Distribution of dissolved methane in the East-Siberian and Laptev seas: the Siberian Arctic // Ocean Sciences Meeting. April 2004. AGU. Hawaii, 2004. P. 217-218.
17. Shakhova, N., Semiletov, I.P., Sergienko, V., Romanovsky, V. Dissolved methane in the East-Siberian and Laptev seas: the coastal zone // Report of 5th Arctic Coastal Dynamics International Workshop. October 13-16. 2004. Montreal. Canada, 2004. P. 100-103.
18. Shakhova, N., Sapart, C., Semiletov, I., Kosmach, D., Roeckmann, T. First isotopic data on methane from the East Siberian Arctic Shelf. EGU General Assembly 2009 // Geophys. Res. Abstr. 2009. Vol. 11. EGU2009-3333-INVITED. (устный доклад по приглашению).
19. Shakhova, N., Semiletov, I. Geochemical and geophysical evidence of methane venting on the East Siberian shallow shelf: connection with climate change // Conference in Fairbanks. GCCI-2007. P. 157-160.
20. Shakhova, N., Semiletov, I. The great Arctic Siberian Rivers as methane sources: linking marine and terrestrial measurements. EGU General Assembly 2007 // Geophys. Res. Abstr. 2007. Vol. 9. EGU A-01044.

21. Shakhova, N., Semiletov, I., Romanovsky, V. Methane climate forcing and methane observations in the Siberian and Alaskan Arctic land-shelf system // Patterns and Processes on Polar Oceans and Life: Signals and responses from Molecules to System. 11th Seoul International Conference on Polar Sciences. Jeju. 8-9 September 2004. Korea, 2004. P. 9.
22. Shakhova, N., Semiletov, I., Romanovsky, V. Methane Climate Forcing and Methane Release in the Siberian Fresh-Water Systems and Marine Ecosystems // Eos Trans. AGU. 85(47). Fall Meet. Suppl. 2004. Abstract B13C-0246.
23. Shakhova, N., Semiletov, I., Romanovsky, V. Methane release in the Siberian and Alaskan fresh-water and marine system // Bridges of science between North America and the Russian Far East: Int. conf. 14-16 September 2004. Vladivostok. Russia. Vladivostok, 2004. P. 35-36.
24. Shakhova, N., Semiletov, I. Methane release from the East Siberian arctic shallow shelf: new data // Eos Trans. AGU. 88(52). Fall Meet. Suppl. 2007. Abstract B53A-0918.
25. Shakhova N., Semiletov, I., Salyuk, A., Kosmach, D., Belcheva, N. Methane release on the Arctic East Siberian shelf, EGU General Assembly 2007 // Geophys. Res. Abstr. 2007. Vol. 9. EGU A-01071.
26. Shakhova, N., Nicolsky, D., Semiletov, I. Modeling permafrost observations in the East Siberian Arctic Shelf: Case study - Dmitry Laptev Strait. EGU General Assembly 2009 // Geophys. Res. Abstr. 2009. Vol. 11. EGU2009 3335.
27. Shakhova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Kosmach, D., Belcheva, N. Why the East Siberian Arctic Shelf should be considered as a new focal point for methane studies. EGU General Assembly 2008 // Geophys. Res. Abstr. 2008. Vol. 10. EGU2008-A-00125.
28. Shakhova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Belcheva, N. Why should the East Siberian Shelf be considered a new focal point for methane studies in terms of Global Climate Change // Eos Trans. AGU. 89(53). Fall Meet. Suppl. 2008. Abstract U23D-0081 INVITED (устный доклад по приглашению).



Наталья Евгеньевна ШАХОВА

МЕТАН В МОРЯХ
ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Подписано к печати 02.02.2010 г.
Формат 60х84/16. Печать офсетная. Усл. п. л. 2,94. Уч. -изд. л. 2,08.
Тираж 120 экз. Заказ 32

Отпечатано в типографии ФГУП Издательство «Дальнаука» ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7