

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ТИХООКЕАНСКИЙ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. В.И. ИЛЬИЧЕВА  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ТОИ ДВО РАН)

УДК 550.42; 551.35; 551.46

№ гос. рег. 01201363048

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Директор ТОИ ДВО РАН

  
23 » января 2017 г.



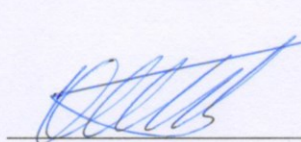
ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

**РОЛЬ ДЕГРАДАЦИИ МЕРЗЛОТЫ В ФОРМИРОВАНИИ ПЛАНЕТАРНОГО  
АТМОСФЕРНОГО МАКСИМУМА МЕТАНА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В  
АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ**

(итоговый)

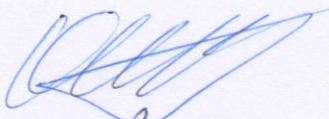

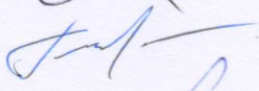
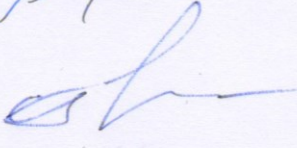
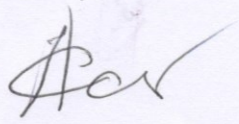
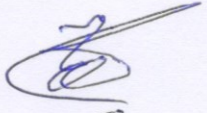
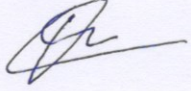

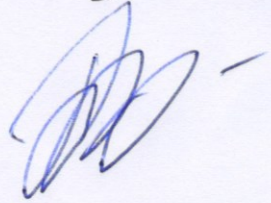
Руководитель НИР:  
чл.-корр. РАН,  
д-р геогр. наук



И.П. Семилетов

Владивосток 2017 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зав. лаб. арктических исследований д-р геогр. наук		И.П. Семилетов (введение, раздел 1, 3, заключение)
Вед. науч. сотр. д-р. геол.-минер. наук .		О.В. Дударев (раздел 1, 4)
Ст. науч. сотр. канд. геогр. наук		И.И. Пипко (раздел 1, 3)
Ст. науч. сотр. канд. геогр. наук		С.П. Пугач (раздел 1, 3)
Вед. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук		А.Н. Салюк (раздел 1, 2)
Ст. науч. сотр. канд. геол.-минер. наук		А.Н. Чаркин (раздел 4)
Науч. сотр.		Д.А. Космач (раздел 2)
Ст. инженер		Э.А. Спивак (раздел 3)
Инженер		К.П. Щербакова (раздел 2)

## РЕФЕРАТ

Отчет 91 с., 36 рисунков, 6 таблиц, 129 источников.

АРКТИЧЕСКИЙ ШЕЛЬФ, МЕРЗЛОТА, ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ, ДВУОКИСЬ УГЛЕРОДА, КАРБОНАТНАЯ СИСТЕМА, ЭМИССИЯ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ, ИСТОЧНИКИ МЕТАНА, ТРАНСПОРТ МЕТАНА, ГЛОБАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ, ГИДРОХИМИЯ

Арктика играет критическую роль в климатической системе планеты и является наиболее чувствительной ее частью, особенно когда речь идет о потеплении, связанном с эмиссией парниковых газов (IPCC 2007; 2014). Современные и будущие изменения, которые климат вызывает в Арктических морских экосистемах и биогеохимических циклах этих систем, оказывают и будут в дальнейшем оказывать серьезное влияние на состояние окружающей среды и экономику Российской Федерации (РФ), включая определяющее воздействие на топливно-энергетическую, рыбную и транспортную промышленность, освоение природных ресурсов и жизнь коренных народностей Севера.

До настоящего времени, в поле зрения ученых находились исключительно процессы взаимосвязи между климатом, криосферой и углеродом суши. В то же время, процессы, связанные с переносом органического вещества (ОВ), мобилизованного из наземной мерзлоты, и процессы мобилизации ОВ из подводной мерзлоты и донных резервуаров природных углеводородов и газгидратов Арктического шельфа не получили должного внимания. Цель работы – изучение отклика углеродного цикла в Арктике на текущие и прогнозируемые климатические изменения и исследование роли деградации мерзлоты в формировании планетарного максимума метана и углекислого газа.

Новизна и достоверность результатов определяется современным уровнем используемого аналитического оборудования и методов анализа. В процессе работ выполнялись комплексные экспедиционные исследования арктического шельфа, включающие изучение термохалинного, гидрохимического и газогеохимического режима вод, современного осадкообразования с позиций обмена веществом и взаимодействия различных экзогенных процессов в системах «суша-шельф», «река-море» и «вода-донные осадки», а также гидроакустическое зондирование водной толщи и сейсмопрофилирование донных отложений. За отчетный период организованы и выполнены две международные морские экспедиции на шельфе морей Восточной Арктики, проведены зимние буровые работы с припайного льда, а также 25-суточная экспедиция по р. Оби.

Коллектив, выполняющий заявленную научную работу, является единственной научной группой, проводящей систематические комплексные всепогодные исследования вод Восточно-Сибирского арктического шельфа на протяжении более двух десятилетий. Основная часть известных научных работ по заявленной проблеме опубликована авторским коллективом, в списке журналов находятся такие известные издания как “Nature Geoscience”, “Biogeosciences”, “The



Cryosphere”, “Organic Geochemistry”, “Journal of Geophysical Research“, “Marine Chemistry“, «Океанология», «Доклады Академии наук» и многие другие. Материалы работ представлены в устных докладах на многих крупнейших международных и отечественных конференциях и симпозиумах, включая AGU, EGU, «Открытая Арктика и др.

Одним из наиболее ярких результатов отчетного периода является подтверждение аномалий растворенного метана в районах Восточно-Сибирского шельфа, которые исследуются нами в режиме мониторинга. На основе более 12 тысяч измерений концентраций растворенного метана, полученных в поверхностных водах окраинных морей Евразии, показано, что все исследованные акватории являются источниками  $\text{CH}_4$  в атмосферу. Пространственное распределение концентраций поверхностного растворенного  $\text{CH}_4$  в российских арктических морях, и особенно в морях Восточной Арктики (МВА), отличается мозаичностью и наличием выраженных пространственных градиентов. В МВА выделяются локализованные области, в которых перенасыщение поверхностной воды растворенным метаном относительно атмосферы достигает 5000%, при максимальных значениях за период наших наблюдений до 20000%.

Проведено исследование карбонатной системы вод на внутреннем, среднем и внешнем шельфе восточной части моря Лаптевых. Показано, что основным фактором, контролирующим карбонатную химию шельфовых вод в теплый сезон, является значительный терригенный сток (речной сток и продукты эрозии берегового ледового комплекса). Поверхностные воды внутреннего и среднего шельфа восточной части моря Лаптевых в осенний сезон являются поставщиком углекислого газа в атмосферу, а внешнего - стоком для атмосферного  $\text{CO}_2$ . Установлено, что в настоящее время воды внутреннего шельфа восточной части моря Лаптевых во всей водной толще уже являются коррозионными по отношению к карбонату кальция. Поверхностные и придонные воды среднего шельфа также недосыщены по отношению к арагониту. Показано, что основными факторами, определяющими обнаруженное недосыщение, является существенный объем пресных вод, поступающих с речным стоком и в результате таяния льда, а также большое количество лабильного аллохтонного органического вещества, вовлекаемого на шельфе в современный биогеохимический цикл. Проведенные исследования показали, что шельфовые воды восточной части моря Лаптевых являются одной из самых коррозионных по отношению к карбонату кальция зон Мирового океана.

В ходе исследования было обнаружено экстремальное недосыщение вод арагонитом и чрезвычайно высокая кислотность вод, уже превышающие уровни, ожидаемые для этого региона в 2100 г. Данные по изотопному составу растворенного неорганического углерода и моделирование методом Монте-Карло с использованием величин солёности и  $\delta^{18}\text{O}$  показали, что постоянное подкисление вод определяется деградацией терригенного органического вещества и стоком вод арктических рек с повышенным содержанием  $\text{CO}_2$ , а не поглощением атмосферного  $\text{CO}_2$ . Мы

предполагаем, что воды Восточно-Сибирского арктического шельфа могут стать более кислыми, если таяние мерзлоты приведет к интенсификации поступления терригенного органического углерода и если сток пресных вод будет продолжать расти, что может увеличить эффективность выделения  $\text{CO}_2$  из шельфовых вод в атмосферу.

Проведен анализ оптических характеристик одного из наиболее характерных компонентов речного стока – оптически активной окрашенной фракции растворенного органического вещества (ОРОВ), интенсивно поглощающей солнечную радиацию в коротковолновой части спектра. На основе экспериментальных данных впервые показана возможность использования оптических характеристик не только для количественных оценок, но и для определения состава растворенного органического вещества в водах Восточно-Сибирского арктического шельфа.

Восточно-арктический шельф – идеальная природная платформа для изучения процессов осадконакопления и рельефообразования в области развития охлажденных ниже  $0^\circ\text{C}$  позднечетвертичных (многолетнемерзлых) и новообразованных отложений, в совокупности определяющих облик современного шельфа и понятие «криолитоморфогенеза». Ввиду недостаточной изученности некоторые его аспекты до сих пор остаются дискуссионными, требуют неоднозначного подхода к решению. Абсолютно ясно, что познание особенностей криолитоморфогенеза - ключ к пониманию нередко феноменальных природных процессов. В основу работы положены результаты натурных исследований на модельных полигонах различных пространственных масштабов. В рамках проблемы деградации криолитозоны системы «суша-шельф» изучались особенности формирования межгодовой и короткопериодной изменчивости распределения взвеси в шельфовых морях Восточной Арктики. Показано, что межгодовая изменчивость структуры пространственного распределения взвеси обусловлена результирующим эффектом интенсивности береговой эрозии, объема речного стока, ледовых условий и поля ветра на фоне конкретной синоптической обстановки. Рассмотрены возможности практического использования электромагнитного зондирования для картирования кровли реликтовых мерзлых толщ на арктическом шельфе. Впервые получены данные о реальном современном состоянии реликтовых форм субаэрального рельефа, крайне важные для понимания характерных особенностей деградации субаквальной мерзлоты.

Выполненные исследования позволяют сделать о том, что при дальнейшем потеплении климата, увеличении материкового стока, разрушении наземной и подводной мерзлоты атмосферная эмиссия парниковых газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) усилится. Для полного понимания этого вопроса и создания адекватной модели климата требуются дальнейшие исследования в системе суша-шельф в Арктике, что позволит сохранить и укрепить лидирующие позиции российских ученых в изучении Восточно-Сибирского арктического шельфа.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение.....	7
1	Материалы и методы исследований.....	9
2	Метан в поверхностных водах окраинных морей северной Евразии.....	12
2.1	Список использованных источников к разделу 2.....	18
3	Динамика растворенного неорганического и органического углерода на Восточно-Сибирском шельфе.....	20
3.1	Характерные особенности динамики карбонатных параметров вод восточной части моря Лаптевых .....	20
3.2	Оценка потоков CO <sub>2</sub> между океаном и атмосферой в восточной части моря Лаптевых в безледный период .....	37
3.3	Подкисление вод Восточно-Сибирского арктического шельфа вследствие поступления пресных вод и наземного углерода.....	43
3.4	Оптические характеристики окрашенного растворенного органического вещества на Восточно-Сибирском шельфе.....	50
3.5	Список использованных источников к разделу 3.....	54
4	Процессы современного криоморфолитогенеза и состояние подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском арктическом шельфе.....	62
4.1	Потоки взвешенного материала.....	62
4.2	Картирование кровли подводной мерзлоты .....	67
4.3	Современное состояние криогенных реликтов субаэрального рельефа позднечетвертичного времени.....	71
4.3.1	Полигонально-валиковый рельеф.....	71
4.3.2	Подводные банки и мелководья.....	74
4.3.3	Выводы и практическое приложение результатов.....	82
4.4	Список использованных источников к разделу 4.....	84
	Заключение.....	86

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее актуальных проблем современной науки является вопрос о закономерностях миграции основных парниковых газов – двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) и метана ( $\text{CH}_4$ ). Как известно, эти компоненты являются наиболее подвижным звеном в круговороте углерода, являясь продуктами аэробной ( $\text{CO}_2$ ) или анаэробной деструкции ( $\text{CH}_4$ ) органического углерода морского или наземного генезиса. К настоящему времени, сложилось мнение о том, что основным источником основных парниковых газов,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , является антропогенная деятельность (IPCC, 2001, 2007, 2014). Однако, этому выводу противоречат результаты атмосферного мониторинга, которые показывают, что наиболее высокие концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  наблюдаются над Арктикой, где антропогенная активность практически отсутствует. На наш взгляд, наиболее вероятным объяснением этого противоречия является наличие мощного регионального источника основных парниковых газов в Арктике – таким источником является атмосферная эмиссия  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  вследствие деградации наземной и подводной мерзлоты шельфа Северного Ледовитого океана (СЛО) (Семилетов, 1999; Семилетов и др., 1996аб; Semiletov, 1999; Semiletov et al., 1996, 2004; Shakhova and Semiletov, 2009; Shakhova et al., 2010аб, 2014; Zimov et al., 1993, 1997), где органическое вещество (ОВ) накоплено в количестве, намного превышающем атмосферный пул основных парниковых газов (Романкевич, 1977; Semiletov, 1999; Shakhova, Semiletov, 2007, 2009; Tarnocai et al., 2009; Shakhova et al., 2010a).

Арктический шельф является важнейшим звеном “климатической кухни”: здесь под влиянием стока Великих Сибирских рек формируется слой распресненных вод, затрудняющий выход к поверхности относительно теплых соленых вод Северо-Атлантического происхождения, что препятствует расплавлению ледового покрова Арктического бассейна. Характерной особенностью СЛО является то, что это единственный океан, который окружен континентальной и морской субаквальной мерзлотой - крупнейшим резервуаром органического углерода на нашей планете. Под действием глобального потепления мерзлота оттаивает, и огромное количество древнего биологически активного углерода вовлекается в современный биогеохимический цикл. Показано, что вовлечение даже малой доли этого углерода в современный круговорот может привести к катастрофическим последствиям в атмосферном балансе основных парниковых газов, двуокиси углерода и метана. Поэтому, несмотря на сравнительно небольшой размер, арктическая область оказывает сильное влияние на состоянии климата Земли.

В настоящее время для исследования глобальных изменений на региональном уровне необходимо концентрировать усилия на системном подходе к изучению их причин и механизмов в важнейших энергоактивных районах Арктики. К ним относятся моря Восточной Арктики, включающие Чукотское море, Восточно-Сибирское море и восточную часть моря Лаптевых, т.е.

районы, находящиеся под прямым влиянием тихоокеанских вод, массивного потока терригенного (в том числе, и реликтового) органического вещества и региональных атмосферных процессов. Этот регион привлекает большой международный интерес и внимание, являясь одной из самых больших и перспективных социально-экономических областей на Земле. В настоящее время на восточно-арктическом шельфе наблюдается интенсификация геолого-разведочных изысканий на стратегические сырьевые ресурсы, а перспективы трансформации стратегической трассы Северного морского пути в практически круглогодичную международную магистраль обретают выраженную необходимость. Таким образом, результаты постоянных натуральных наблюдений на восточно-арктическом шельфе как направление исследований имеют практическую ценность, как например, для проведения геоинженерных изысканий по трассе Северного Морского пути, планирования разведки и добычи углеводородных ресурсов в Восточно-Арктических морях.

Цель работы – изучение отклика углеродного цикла в Арктике на текущие и прогнозируемые климатические изменения и исследование роли деградации мерзлоты в формировании планетарного максимума метана и углекислого газа. Особое внимание было уделено наиболее мелководному и наименее изученному среди арктических морей Восточно-Сибирскому морю, а также юго-восточной части моря Лаптевых.

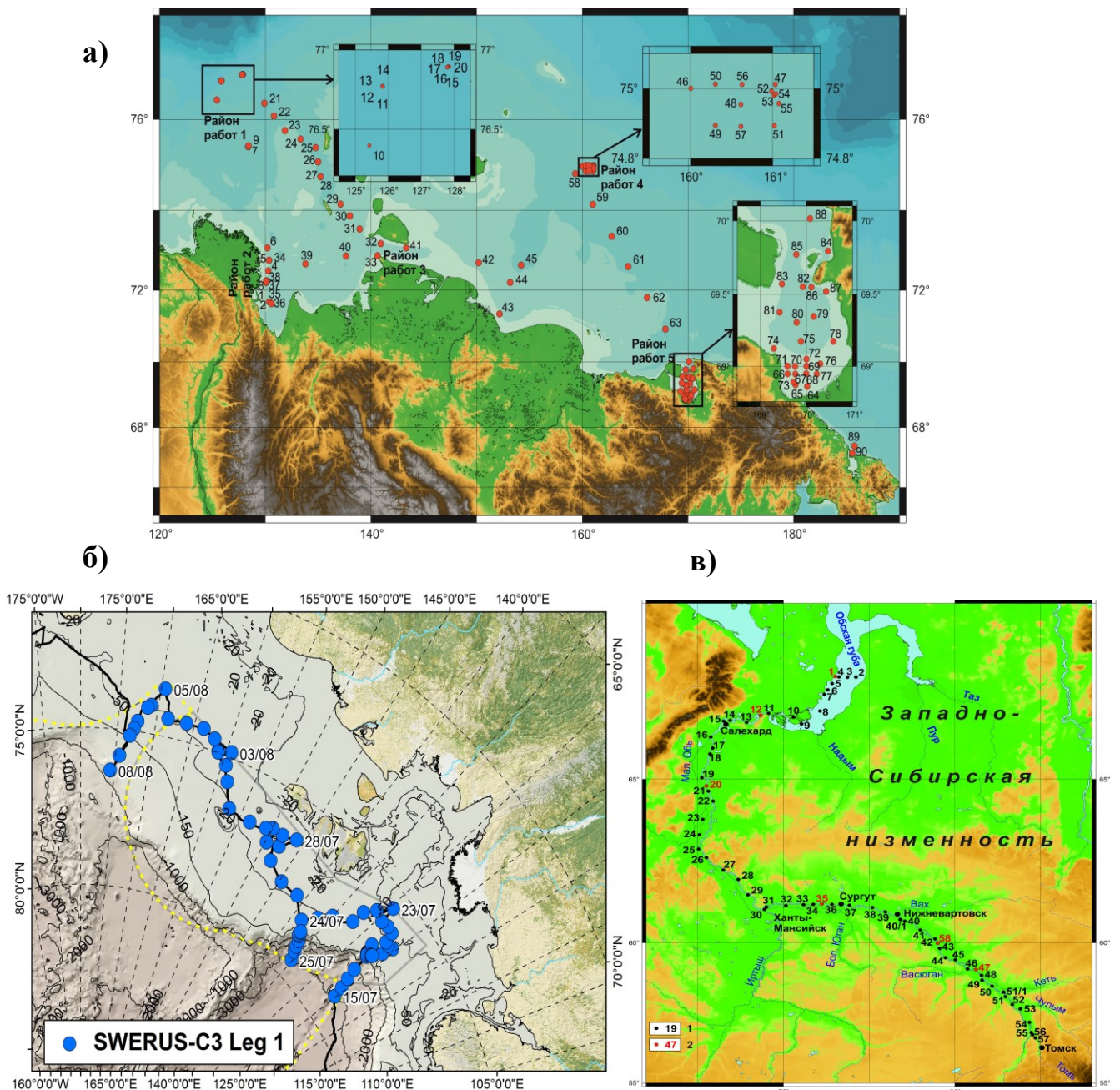


## 1 Материалы и методы исследований

В рамках работ за отчетный период авторами проекта были организованы и проведены четыре комплексные международные экспедиции в арктические моря. Основные летние морские исследования были выполнены в течении: 1) 40-суточной комплексной экспедиции на борту научно-исследовательского судна «Академик М.А. Лаврентьев» в сентябре-октябре 2016 г. (Рис. 1а); 2) 90-суточной комплексной экспедиции на борту шведского научного ледокола Oden (в рамках экспедиции SWERUS-C3) (рис. 1б). Зимние исследования были выполнены в море Лаптевых в марте-апреле 2014 и 2015 гг. Более того, для оценки роли Великих Сибирских рек (и их водосборов) в региональном и глобальном бюджете  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , в июле 2016 г. была организована 25-дневная экспедиция по реке Оби: от Обской губы вверх по течению до г. Томска и обратно в г. Салехард (рис. 1в).

Во всех экспедициях использовались самые современные методы отбора проб воды, воздуха, осадка и аналитические методы. Было измерено более 70 параметров непрерывно по ходу движения судна (в воздухе и поверхностной воде) и во всей водной толще на многочисленных станциях. В экспедициях выполнялись комплексные гидрологические, гидрохимические, седиментологические, метеорологические, гидрооптические, гидрофизические и гидробиологические исследования.

Кроме стандартного оборудования, экспедиции были оснащены уникальными приборами: гидрологическим зондом "SeaBird" с датчиками для измерения температуры, электропроводности, оптическими измерителями радиации, мутности, CDOM, концентрации растворенного кислорода; портативной метеостанцией; сканирующим спектрометриком «FieldSpecPro JR»; оптическим сенсором  $\text{pCO}_2$  «LiCor 7500» (для измерения парциального давления  $\text{CO}_2$  в атмосфере); хроматографом "SRI 8610C" (для анализа метана). Вариации изменения содержания метана в воздухе и его поток между водой и воздухом определялись с помощью лазерного ИК-спектрометра и ультразвукового трехмерного анемометра. Микрометеорологическая техника была также использована для измерения потоков двуокиси углерода, паров воды и тепла. Локатор бокового обзора и два сейсмопрофилографа (Geopulse и SES-2000 standard) были синхронно использованы для детальных исследований на выбранных в МВА полигонах. В экспедиции 2016 г, гидроакустический комплекс включал модернизированный судовой эхолот ELAC и научный эхолот SIMRAD EK15, которые были использованы вдоль всего маршрута движения судна. С целью обнаружения новых выбросов пузырькового метана было пройдено ~10,000 морских миль, обнаружено более 150 новых крупных сипов, которые добавлены в авторскую базу данных, насчитывающих в МВА более 700 крупных, очень крупных, и среднего размера сипов.



**Рисунок 1.1** - Район исследования и расположение океанографических станций, выполненных в 2016 (а), 2014 (б) и карта района работ и станций междисциплинарных исследований вдоль течения реки Обь (в).

В качестве пробоотборников донных осадков использовались дночерпатель VanVeen и гравитационные трубки. Отбор воды для выделения взвеси осуществлялся батометрами системы Niskin, емкостью от 5 до 25 л. Потoki вещества (ПОМ) изучались с помощью седиментационных ловушек, представляющих собою систему из 3-х цилиндрических PVC-контейнеров. Ловушки оснащены баффлами (baffles) для гашения турбулентности у входного отверстия ловушки и стабилизаторами с целью удержания по направлению доминирующего течения. Продолжительность экспозиции ловушек 1-3 суток.

Размерная структура донных осадков изучалась с помощью лазерного анализатора частиц “Analysette 22” фирмы FRITSCH. Во взвеси изучались параметры: общее содержание (ВМ), размерный состав (определения лазерным анализатором «Analysette 22»), органический углерод (С) и общий азот (N), стабильные изотопы  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  (масс-спектрометр «Finnigan MAT Delta Plus», комбинированный с элементным анализатором).

Отобраны сотни килограммов воды и донных осадков для проведения исследований в лабораторных условиях (изотопы гелия, биомаркеры, взвешенное органическое вещество, стабильные и нестабильные (С-14) изотопы растворенного и взвешенного ОВ, а также ОВ донных отложений и т.д.). Таким образом, в проекте используются самые передовые методы, комплекс которых был реализован в морях Российской Восточной Арктики впервые.

## 2 Метан в поверхностных водах окраинных морей северной Евразии

Начиная с 1990-х годов, авторский коллектив выполняет исследования, направленные на изучение источников метана в Арктическом регионе. Следствием наличия таких источников является повышенное содержание метана в атмосфере Арктического региона, которое превышает атмосферные концентрации метана в других регионах планеты на 8-10% [1, 2]. На первом этапе исследования (1994 - 2003 гг.) предполагалось, что основным региональным источником  $\text{CH}_4$  являются термокарстовые озера, которые развиваются на суше вследствие деградации многолетних мерзлых толщ (мерзлота) при смене теплых климатических периодов на теплые [2]. Однако последующие исследования, которые выполнялись в морях Российской Арктики после 2003 г., показали, что роль арктических морей в балансе атмосферного метана сильно недооценена. Данные многолетних наблюдений свидетельствуют о том, что шельфовые воды морей Восточной Арктики, (МВА - море Лаптевых и Восточно-Сибирское море) являются источником метана в атмосферу региона, что приводит к значимому повышению содержания  $\text{CH}_4$  в приземном слое атмосферы МВА [3-9].

На основании этих данных была сформулирована гипотеза о роли деградации подводной мерзлоты и возможной дестабилизации природных запасов углеводородов, накопленных в осадочном чехле МВА [4, 7, 8]. В работах [5, 7] показано, что потоки метана из МВА в атмосферу Арктического региона только за счет диффузионного переноса (определяемого разницей в содержании растворенного  $\text{CH}_4$  в поверхностном слое воды, по сравнению с его содержанием в приземном слое атмосферы), соизмеримы с потоком  $\text{CH}_4$  из акватории всего Мирового океана. Далее было высказано предположение о том, что вклад пузырькового транспорта метана в водной толще может существенно увеличивать эмиссию метана в атмосферу региона [7, 9]. В качестве одного из значимых факторов, усиливающих потоки метана в атмосферу, была показана роль ветрового перемешивания водного столба в ходе штормовых событий [9]. Это значит, что в условиях современного усиления ветровой деятельности в Северном Ледовитом океане (увеличение частоты прохождения циклонов и увеличение их мощности, [1]) можно предполагать усиление активной вентиляции водного столба в МВА, сопровождаемое увеличением эмиссии метана в атмосферу региона.

В то же время, существует мнение, разделяемое частью научного сообщества, которое ставит под сомнение роль деградации мерзлоты как основного фактора, определяющего потоки метана из МВА. В качестве аргументов приводятся данные математического моделирования современного состояния подводной мерзлоты, которые противоречат как многолетним данным натурных наблюдений, так и результатам математического моделирования, полученных нашим научным коллективом за период 1999-2014 гг. [9, 10, 11].

Целью настоящего исследования было сравнить концентрации растворенного метана в поверхностных водах морей, в которых предполагается наличие подводной мерзлоты (Арктические моря - Баренцево, Карское, Восточно-Сибирское и море Лаптевых), с концентрациями метана в поверхностных водах других морей (Берингово, Охотское, Японское), где подводная мерзлота предположительно отсутствует, включая моря, где были обнаружены газгидраты метана (Охотское море).

Данные по распределению растворенного  $\text{CH}_4$  в поверхностном слое воды в перечисленных морях России были получены автоматизированным методом парофазного динамического газохроматографического анализа в двух полномасштабных экспедициях выполненных в конце северного гидрологического лета (сентябрь-октябрь): в 2011 г. на борту научно-исследовательского судна (НИС) Академик М.В. Лаврентьев по маршруту Владивосток - море Лаптевых - Владивосток, и в 2012 г. на борту НИС Виктор Буйницкий, по маршруту Мурманск - море Лаптевых - Мурманск (рис. 2.1)

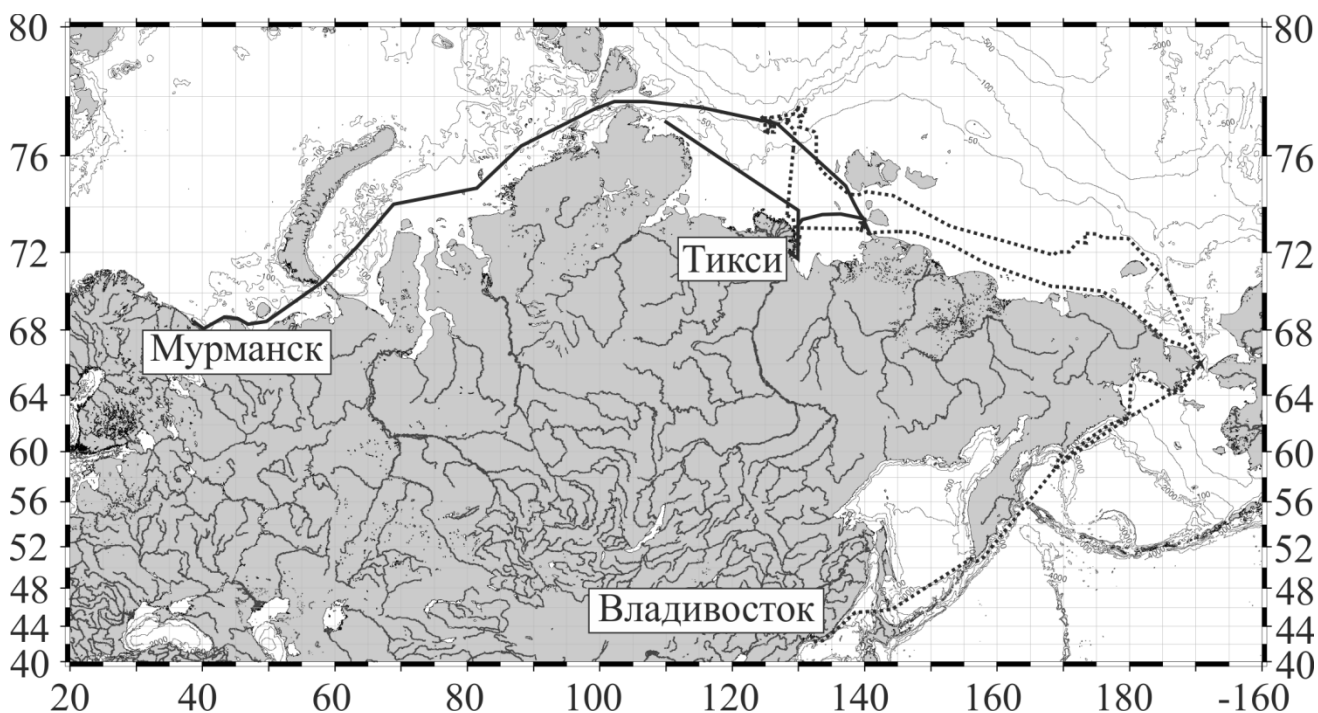
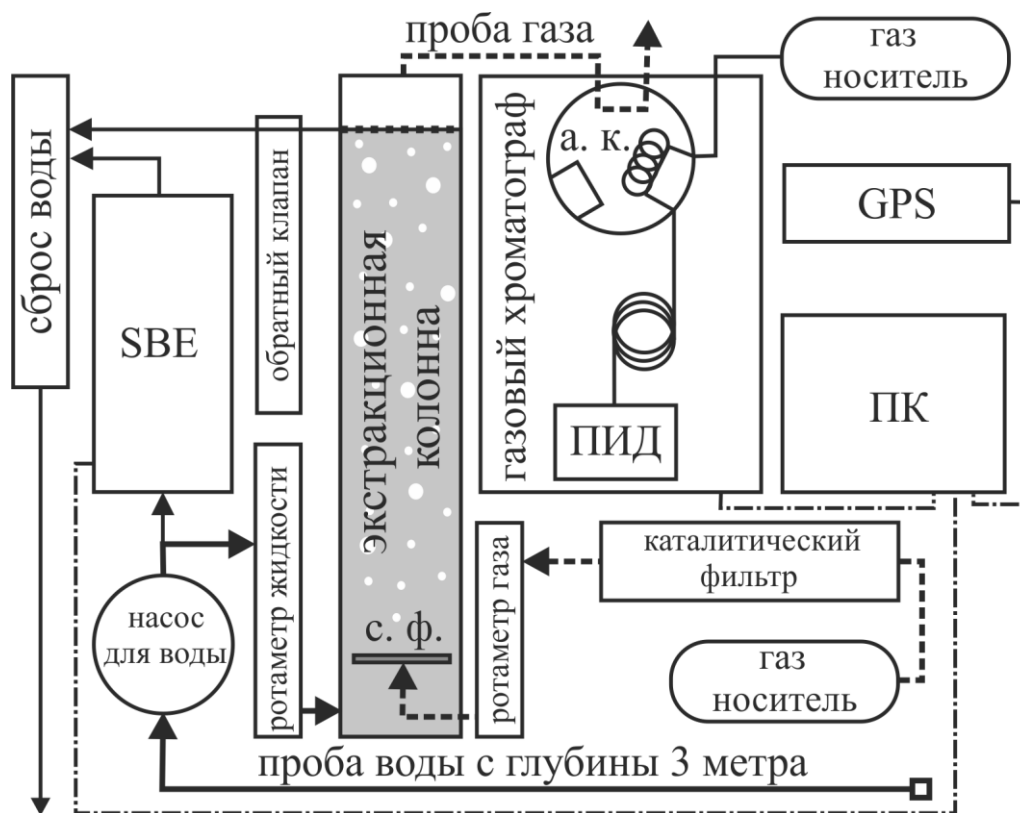


Рисунок 2.1 - Карта-схема экспедиций 2011 и 2012 гг.

Измерения выполнялись с использованием проточной газоаналитической системы (рис. 2.2), основанной на принципе динамического парофазного газохроматографического анализа в модификации близкой к системе детально описанной в обобщающей монографии Витенберга - Иоффе [12]. Динамическая равновесная экстракция достигалась путем использования стеклянного фильтра (с. ф.) с размером пор 0.1 мм для дробления струи газа-носителя (гелий особой чистоты) на мелкие пузыри, которые всплывали в 1-метровой плексигласовой экстракционной колонне, через которую прокачивалась поверхностная морская вода,

отобранная через линию, врезанную на глубине ~3м. Равновесная газовая фаза вводилась в газоаналитический тракт каждые 5 минут с помощью многоходового автоматического крана-дозатора (а. к.) поставляемого в комплекте газового хроматографа SRI-8610с (изготовлен в США) оборудованного пламенно-ионизационным детектором (ПИД).

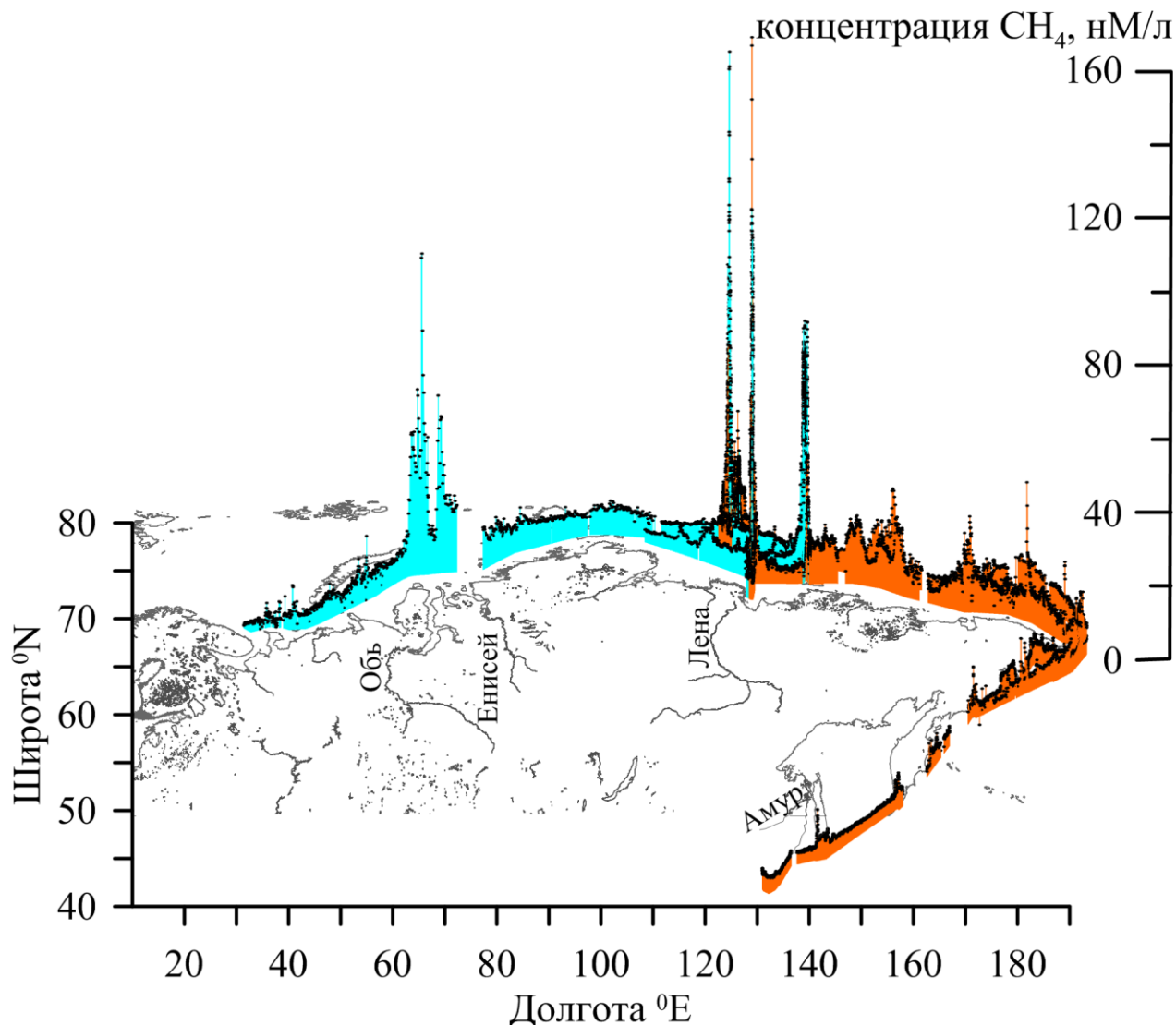


**Рисунок 2.2** - Принципиальная схема проточной газоаналитической системы.

Температура и соленость морской воды определялись с помощью термосалинографа SBE (<http://www.seabird.com/sbe21-seacat-thermosalinograph>), установленного в линию прокачки морской воды. Синхронизация аналитических модулей и системы пространственного позиционирования производилась с помощью бортового компьютера. Расчет концентраций метана в водной фазе выполнялся по методике S. Yamamoto с соавторами в модификации D. Wiesenburg and N. Guinasso с использованием расчетных констант растворимости метана (подробное описание приведено в [5, 7, 13]). Расхождение результатов измерений со стандартным методом статического парофазного газоаналитического анализа [3, 5, 7, 9] на основе серии проб воды отобранных батометром Нискина на глубине 3 м как правило не превышало 5%. В зависимости от скорости движения судна на каждую морскую милю движения по трассе приходилось от 2 до 10 автоматических измерений содержания растворенного  $\text{CH}_4$  в поверхностной воде. Общее число измерений составило свыше 12 тысяч; результаты представлены на трехмерной диаграмме распределения (рис. 2.3).



Полученные данные были разделены на четыре кластера (табл. 2.1). В первый кластер вошли МВА: концентрации растворенного  $\text{CH}_4$  в поверхностном слое морской воды были максимальными (до 154.1 нМ/л); при этом средние значения составили 17.6 нМ/л.



**Рисунок 2.3** - Трехмерная диаграмма распределения метана в приповерхностном слое воды по маршруту следования НИС.

Второй кластер объединил моря с высокими концентрациями метана в поверхностном слое воды (до 91.3 нМ/л), при средних значениях равных 10.5 нМ/л (Баренцево и Карское моря). Чукотское и Берингово моря были объединены в третий кластер: концентрации растворенного метана в поверхностном слое достигали 32.9 нМ/л, при средних значениях равных 8.1 нМ/л. Четвертый кластер составили Дальневосточные моря (Охотское и Японское), в которых концентрации растворенного метана достигали 16.4 нМ/л, при средних значениях равных 6.4 нМ/л.

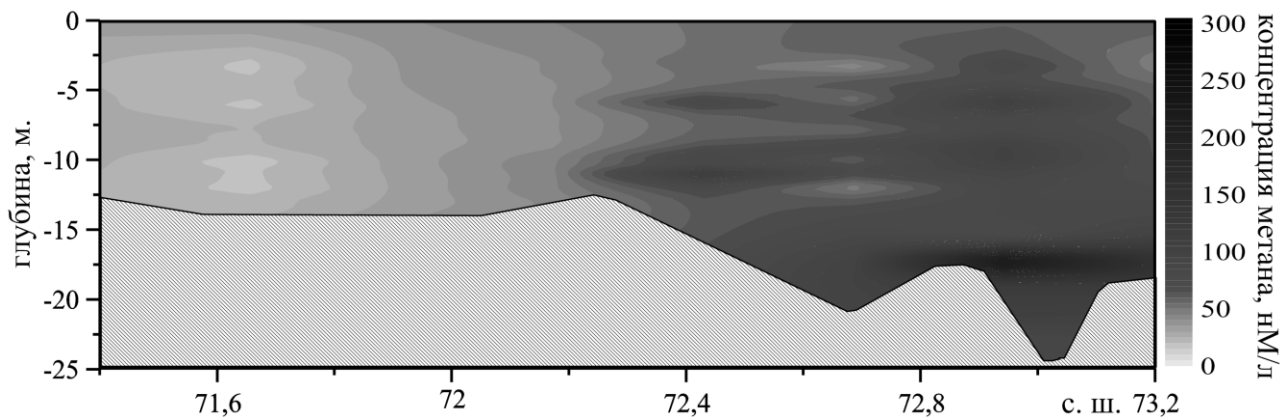
**Таблица 2.1** - Статистическое распределение концентраций растворенного метана в поверхностных водах морей Евразии, измеренных по маршрутам экспедиционных исследований 2011 и 2012 гг.

Названия морей	Максимальная концентрация, нМ/л	Средняя концентрация± ошибка средней, нМ/л
Море Лаптевых, Восточно-Сибирское море (число измерений, n=7856)	154.1	17.6±0.18
Баренцево море, Карское море (n=891)	91.27	10.55±0.28
Чукотское море, Берингово море (n=2191)	32.91	8.05±0.05
Охотское море, Японское море (n=1309)	16.45	6.4±0.03

Следует отметить, что средние концентрации растворенного метана в Арктических морях, подстилаемых подводной мерзлотой и характеризующихся различной степенью деградации [9, 10, 11], были в 2.5 - 3 раза выше, чем в дальневосточных морях, где подводная мерзлота отсутствует. Поверхностные воды всех морей были перенасыщены относительно атмосферы, что свидетельствует о том, что все исследованные акватории являются источниками  $\text{CH}_4$  в атмосферу. Насыщение поверхностных вод растворенным метаном относительно атмосферы в морях четвертого кластера достигало 500%; в морях третьего кластера – 1000%; в морях второго кластера – 2200 – 2500 % и в морях первого кластера 5000%. Отметим, что ранее нами в МВА были обнаружены концентрации поверхностного растворенного метана до 400-600 нМ/л, что соответствует насыщению до 20000% [5, 7, 9]. Локальные аномалии до 16,4 нМ/л были зарегистрированы в Охотском море, где они генетически связаны с дестабилизацией гидратов донных отложений (А. И. Обжиров, личное сообщение). Это свидетельствует об эффективности пузырькового транспорта в водном столбе, что позволяет газообразному метану растворяться в подповерхностных горизонтах, достигая поверхностных вод и выбрасываться далее в атмосферу.

В морях западного сектора Российской Арктики (Баренцево и Карское) в 2012 г. аномально высокие концентрации растворенного метана (до 91 нМ/л) пространственно коррелировали со стоком рек Обь и Енисей; подобные данные были получены нами летом 2005 г. [14]. Данные по содержанию растворенного метана на траверсах Великих Сибирских рек позволяют сделать вывод об определенном вкладе речного стока в метановый пул шельфовых вод [11]. Однако при проведении более детальных исследований на примере реки Лены было показано, что уже на небольшом расстоянии от дельты, концентрации растворенного метана резко снижаются и, следовательно, не могут выполнять роль существенного источника метана в шельфовые воды [5, 15].

Более того, было показано, что содержание растворенного  $\text{CH}_4$  в водной толще МВА не связано с интегральными значениями солености [13], что еще раз свидетельствует об относительно малой значимости латерального выноса растворенного  $\text{CH}_4$  реками в региональном балансе  $\text{CH}_4$ . Для иллюстрации доминирующей роли донных отложений, как основного регионального источника  $\text{CH}_4$  на Рис. 2.4 приведен вертикальный профиль распределения содержания  $\text{CH}_4$  в районе, сильно подверженном стоку реки Лены (в районе выноса Большой Трофимовской и Сардахской проток). Как видно из рисунка 2.4, концентрации растворенного метана увеличиваются при удалении от дельты Лены, а не наоборот.



**Рисунок 2.4** - Профиль распределения концентраций метана в воде по  $130^\circ$  в. д. на основе данных экспедиции НИС «Академик Лаврентьев» в 2011 г.

Такое распределение растворенного метана в водной толще на шельфе МВА, предположительно, обусловлено разгрузкой газообразного метана через глубокие и/или сквозные талики, сформированные в результате длительного воздействия геотермального потока (проекция Усть-Ленского разлома), усиленного отепляющим воздействием относительно теплых вод реки Лены. Данные выводы подтверждаются результатами моделирования, приведенными в работах [10, 11]. Это также хорошо подтверждается выраженной мозаичностью и наличием резких пространственных градиентов распределения концентраций растворенного метана в поверхностных водах изученных морей (рис. 2.3) и согласуется с результатами ранее выполненных исследований [3, 5, 7, 9, 13].

Отметим, что в ходе выполнения моделирования подводной мерзлоты с валидацией по данным колонкового бурения на примере расчетов, выполненных для пролива Дмитрия Лаптевых [10, 11] и для моря Лаптевых [9], было установлено, что термический режим подводной мерзлоты определяется сложным комплексом факторов, в числе которых имеется целый ряд ранее неучтенных, таких как степень минерализации осадка, доля незамерзшей воды в его структуре, сложное строение осадочной толщи, влияние процессов термокарста, теплового эффекта стока рек и др. Из этого следует, что моделирование подводной мерзлоты находится в зачаточном состоянии

и что значительное улучшение данных моделирования может быть достигнуто только после накопления критической массы данных натуральных наблюдений. Поэтому отрицание роли подводной мерзлоты, как фактора, определяющего эмиссию метана в МВА, на основании данных крайне упрощенного моделирования, выполненного рядом ученых, является научно несостоятельным и преждевременным.

## 2.1 Список использованных источников к разделу 2

1. IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis / Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2007. – P. 996.
2. Semiletov, I.P. Atmospheric carbon emissions from northern lakes: a factor of global significance. / I.P. Semiletov, I.I. Pipko, N.Ya. Pivovarov [et al.] // Atmospheric Environment. – 1996. V. 30. - P. 1657-1671.
3. Шахова Н. Е. Растворенный метан в шельфовых водах арктических морей / Н.Е. Шахова, И.П. Семилетов, Н.Н. Бельчева // Доклады Академии Наук. - 2005. Т. 402, № 4. - С. 529-533.
4. Шахова, Н.Е. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана / Н.Е. Шахова, В.И. Сергиенко, И.П. Семилетов // Вестник РАН. - 2009. Т. 79, №6. - С. 507-518.
5. Shakhova, N. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, I. Leifer [et al.] // Journal Geophys. Res. Ocean. - 2010. V. 115, doi: 10.1029/2009JC005602.
6. Шахова, Н.Е. Аномалии метана в приводном слое атмосферы на шельфе Восточно-Сибирской Арктики / Н.Е. Шахова, И.П. Семилетов, А.Н. Салюк [и др.]// Доклады Академии Наук. - 2007. Т. 414, №6. - С. 819-823.
7. Shakhova, N. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, A. Salyuk [et al.] // Science. - 2010. V. 327. - P. 1246-1250.
8. Shakhova, N.E. Methane Hydrate Feedbacks / N.E. Shakhova and I.P. Semiletov // Arctic Climate Feedbacks: Global Implications, Published by WWF International Arctic Programme. - August, 2009. - P. 81-92.
9. Shakhova, N. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, I. Leifer [et al.] // Nature Geosciences. - 2014. V. 7. - P. 64-70.
10. Шахова, Н.Е. О современном состоянии подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными натуральных измерений / Н.Е. Шахова, Д.Ю. Никольский, И.П. Семилетов // Доклады Академии Наук. 2009. - Т. 429, № 4. - С. 541-544.
11. Nicolsky, D. Modeling sub-sea permafrost in the East-Siberian Arctic Shelf: the Dmitry

Laptev Strait / D. Nicolsky, N. E. Shakhova // *Environmental Research Letters*. – 2010. V. 5, doi:10.1088/1748-9326/5/1/015006.

12. Витенберг, А.Г. Газовая экстракция в хроматографическом анализе / А.Г. Витенберг, Б.В. Иоффе - Л.: Химия, 1982. - 280 с.

13. Shakhova, N.E. Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf / N.E. Shakhova, I.P. Semiletov // *Journal of Marine Systems*. – 2007. V. 66. - P. 227-243.

14. Шахова, Н.Е. Великие сибирские реки как источники метана на арктическом шельфе/ Н.Е. Шахова, И.П. Семилетов, Н.Н. Бельчева // *Доклады Академии Наук*. - 2007. Т. 414, №5. - С. 683-685.

15. Semiletov, I.P. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion / I.P. Semiletov, I.I. Pipko, N.E. Shakhova [et al.] // *Biogeosciences*. – 2011. – Vol. 8. – P. 2407-2426.

### **3 Динамика растворенного неорганического и органического углерода на Восточно-Сибирском шельфе**

#### **3.1 Характерные особенности динамики карбонатных параметров вод восточной части моря Лаптевых**

Северный Ледовитый океан (СЛО) является одним из наиболее чувствительных к климатическим изменениям регионов. Он составляет только 4% от площади Мирового океана, но при этом получает около 10% от общепланетарного речного стока и окружен мерзлотой, которая является природным хранилищем огромного количества лабильного органического вещества (ОВ), активно вовлекающегося в современный биогеохимический цикл [15]. Высвобождение ОВ из арктической мерзлоты – один из наиболее действенных механизмов, определяющих перераспределение углерода между наземным, океаническим и атмосферным резервуарами [50, 68]. Известно, что в последние десятилетия скорость роста температуры воздуха в Арктике почти вдвое выше, чем в среднем в мире [50], что проявляется как в интенсификации таяния льда, увеличении речного стока, так и в активизации разрушения мерзлоты. Это вызывает особый интерес в контексте подкисления океана.

Арктические шельфовые моря являются одной из наиболее биогеохимически активных природных сред, и море Лаптевых - яркий тому пример. Море Лаптевых (а особенно его восточная часть) подвержено влиянию интенсивного притока пресных вод, а также получает большое количество наземного ОВ, как с речным стоком, так и в результате береговой эрозии [7, 68, 69, 73, 79]. Вследствие изменения климата подобные условия способствуют прогрессирующему снижению насыщения вод карбонатом кальция, однако степень происходящих изменений и их последствия остаются неизвестными. Можно ожидать, что негативное влияние подкисления океана будет иметь самые тяжелые последствия для экосистем холодных морей высоких широт, где природные концентрации карбонат-ионов и буферная емкость вод низки. Так, например, исследования комбинированного воздействия подкисления и распреснения морской воды на доминирующий вид птероподовых в полярных областях показало, что уменьшение подвижности и смертность планктонных организмов особенно велики, когда рН и соленость снижаются одновременно [56]. Развитие подобных условий наиболее реалистично в морях Восточной Арктики, где так называемое “арктическое усиление” (Arctic amplification), система положительных обратных связей, определяет максимально выраженные изменения климата [75].

В работе представлены новые результаты детального исследования карбонатной системы вод восточной части моря Лаптевых, целью которого является оценка современного состояния морской буферной системы на внутреннем, среднем и внешнем шельфе в теплый сезон и идентификация основных факторов, определяющих ее изменчивость.



В рамках экспедиции на НИС “Академик М.А. Лаврентьев” проведены исследования на внутреннем, среднем и внешнем шельфе моря Лаптевых, а также выполнена глубоководная (650 м) станция над континентальным склоном восточной части моря Лаптевых (рис. 3.1).

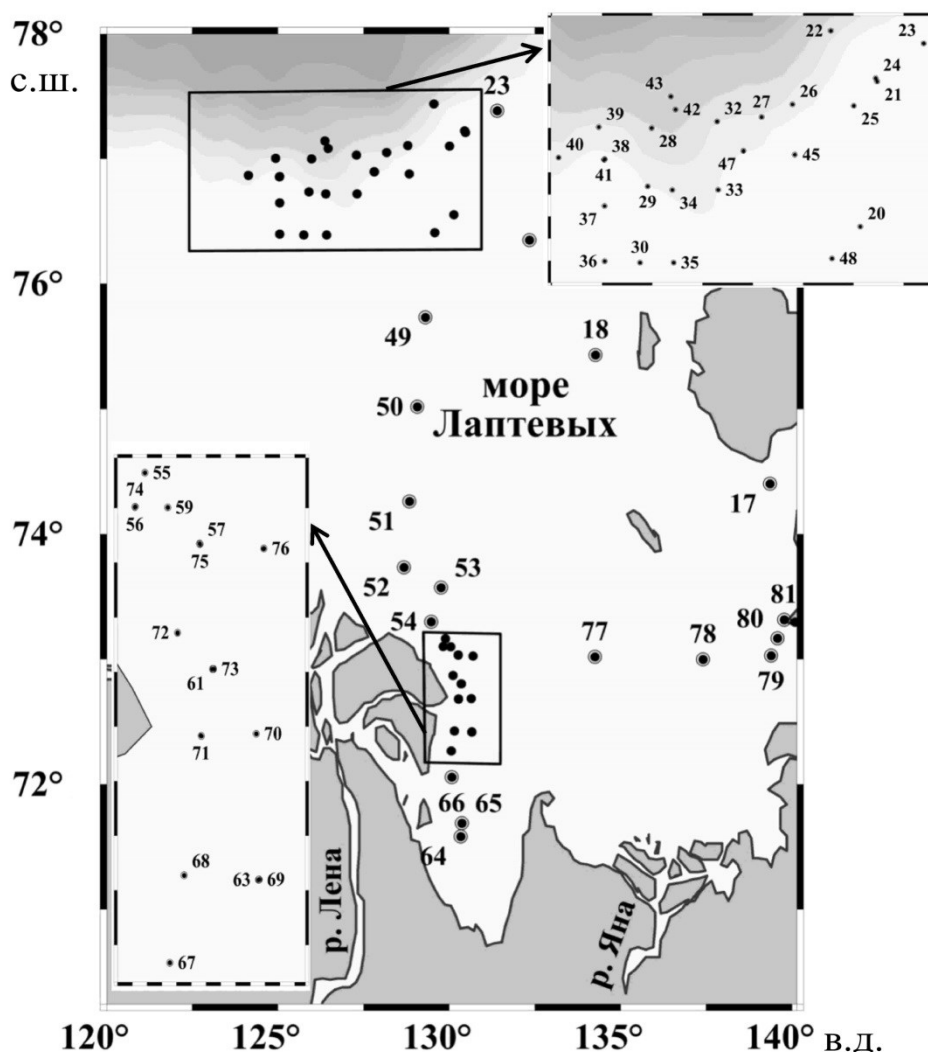


Рисунок 3.1 - Район исследований, сентябрь 2011 г.

В осенний сезон с 18 по 30 сентября 2011 г. в море Лаптевых было выполнено 65 комплексных океанографических станций. Пробы морской воды отбирались с использованием 12-ти позиционного пробоотборника ROSETTE 1015, оснащенного CTD - зондом SeabirdSBE 9plus и дополнительными датчиками, которые позволяли определять в водном столбе фотосинтетически-активную радиацию (PAR), мутность, флуоресценцию, характеризующую распределение хлорофилла, окрашенную фракцию растворенного органического вещества (CDOM), а также концентрацию растворенного кислорода. Растворенный кислород был измерен также модифицированным методом Винклера [14]; на отдельных станциях спектрофотометрическим методом были определены концентрации хлорофилла “а”. Полученные данные были использованы для калибровки датчиков содержания хлорофилла и кислорода. На 58 станциях

измерялись также параметры карбонатной системы (рН в шкале «total» и общая щелочность,  $A_T$ ) и биогенные элементы (кремний, фосфаты, нитраты, нитриты, аммоний). Используемые методы определения карбонатных параметров и биогенных элементов детально представлены в работах [21, 63, 72, 73].

Два других параметра карбонатной системы (общий неорганический углерод,  $C_T$  и парциальное давление углекислого газа,  $pCO_2$ ), а также степени насыщения вод кальцитом и арагонитом были рассчитаны из измеренных параметров (рН и  $A_T$ ) с использованием программы CO2SYS [55] и констант диссоциации угольной кислоты, предложенных Мирбахом [57] и переформулированных в 1987 г. [35].

В соответствии с предшествующими исследованиями, на акватории моря Лаптевых выделены три основные водные массы: речные воды, талые воды и морские воды атлантического происхождения [27, 49]. Для оценки вклада каждой из них были рассчитаны их фракции с использованием уравнений массового баланса и величин общей щелочности и солености как консервативных трассеров вод [23, 84]:

$$f_{MW} + f_{RW} + f_{AW} = 1$$

$$f_{MW} \cdot S_{MV} + f_{RW} \cdot S_{RW} + f_{AW} \cdot S_{AW} = S_{meas}$$

$$f_{MW} \cdot A_{T\_MV} + f_{RW} \cdot A_{T\_RW} + f_{AW} \cdot A_{T\_AW} = A_{T\_meas},$$

где  $f_{MW}$ ,  $f_{RW}$ ,  $f_{AW}$  – доли смешивающихся талых, речных и атлантических вод в выделенном фрагменте воды, а  $S_{MV}$ ,  $S_{RW}$ ,  $S_{AW}$ , и  $A_{T\_MV}$ ,  $A_{T\_RW}$ ,  $A_{T\_AW}$  – соответственно, их соленость и общая щелочность.  $S_{meas}$  и  $A_{T\_meas}$  – соленость и общая щелочность измеряемых проб.

Эффективность любого трассера вод определяется как его консервативностью, так и соотношением “сигнал/шум”. Для подтверждения достоверности параметра - общая щелочность как трассера разделяемых водных масс в исследуемом регионе был рассчитан так называемый градиент эффективности, представляющий собой отношение разницы общей щелочности к разнице солености смешивающихся вод [52]. Рассчитанные градиенты (66.2 и 40.6 мкмоль/г для смешения талых и речных вод с атлантическими водами, соответственно, и 150.9 мкмоль/г для пары речные-талые воды) значительно превосходили точность определения общей щелочности (3 мкмоль/кг).

Наибольшую неопределенность в расчеты фракций водных масс вносит определение конечного члена каждого из параметров, характеризующих смешивающиеся воды. Для характеристики талых вод были использованы величины, предложенные в работе [84] (соленость  $4 \pm 1\%$ , общая щелочность  $263 \pm 65$  мкмоль/кг), для атлантических вод – параметры, измеренные в ядре теплых атлантических вод в экспедиции на НИС “Академик М.А. Лаврентьев” в сентябре 2011 г. (соленость  $34.89 \pm 0.01\%$ , общая щелочность  $2306 \pm 2$  мкмоль/кг), для речных вод - приведенные в работах [42, 43] (соленость 0‰, общая щелочность 913 мкмоль/кг).

**Метеорологическая ситуация.** В летние месяцы (июнь-август) 2011 г. над арктическим бассейном располагалась зона повышенного, а над материковой частью пониженного атмосферного давления. По данным реанализа (<http://www.cdc.noaa.gov>) осредненное значение меридиональной скорости ветра составляла 1.5 м/с, а зональной – 3.5 м/с, что определяло слабые сгонные восточные и юго-восточные ветры со средней скоростью 4 м/с и создавало оптимальные условия для таяния льда и выноса его в Северный Ледовитый океан. По данным ААНИИ (<http://www.aari.nw.ru>) кромка льда в середине сентября была смещена до 82° с.ш., и практически вся акватория моря Лаптевых была свободна ото льда, что также способствовало растеканию теплых распресненных вод реки Лены. В Восточно-Сибирском море ледовая обстановка, напротив, была сложная. Подавляющая часть моря была занята ледяными массивами: Новосибирским и отрогом Айонского океанического. Южная периферия кромки льда в течение лета не сместилась севернее 73° с.ш., а талые воды под действием восточных и юго-восточных ветров выносились в море Лаптевых.

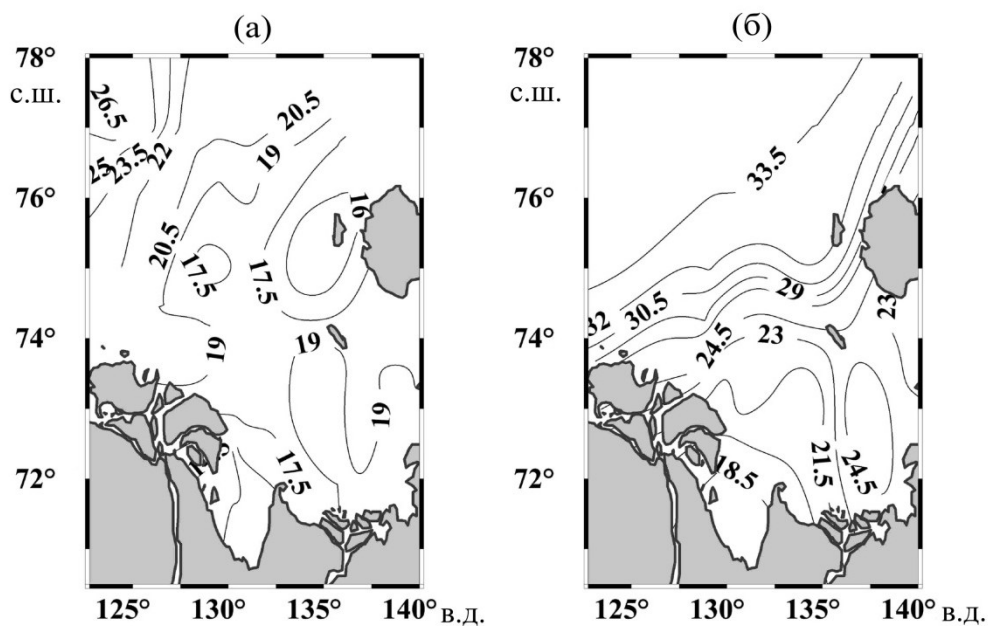
В сентябре ситуация резко изменилась – над арктическим бассейном стал господствовать циклон. Ветер сменил направление на северное и северо-западное и усилился. Нашим исследованиям в море Лаптевых предшествовали два штормовых события, во время которых скорость ветра достигала 15 м/с. Сильный ветер и безледность создавали благоприятные условия для глубокого ветрового перемешивания.

**Гидрологическая ситуация.** Высокая изменчивость солености вод моря Лаптевых связана с влиянием материкового стока, образованием/таянием ледового покрова, а также инициируемыми ветром течениями, определяющим фактором для которого служит доминирующая атмосферная циркуляция [37, 75].

Осенний сезон в море Лаптевых характеризуется значительным снижением материкового стока. Так, водность реки Лены, основного поставщика пресных вод, уменьшается до 33% от паводковых величин, т.е. от 74034 м<sup>3</sup>/с в июне до 24265 м<sup>3</sup>/с в сентябре (<http://rims.unh.edu>).

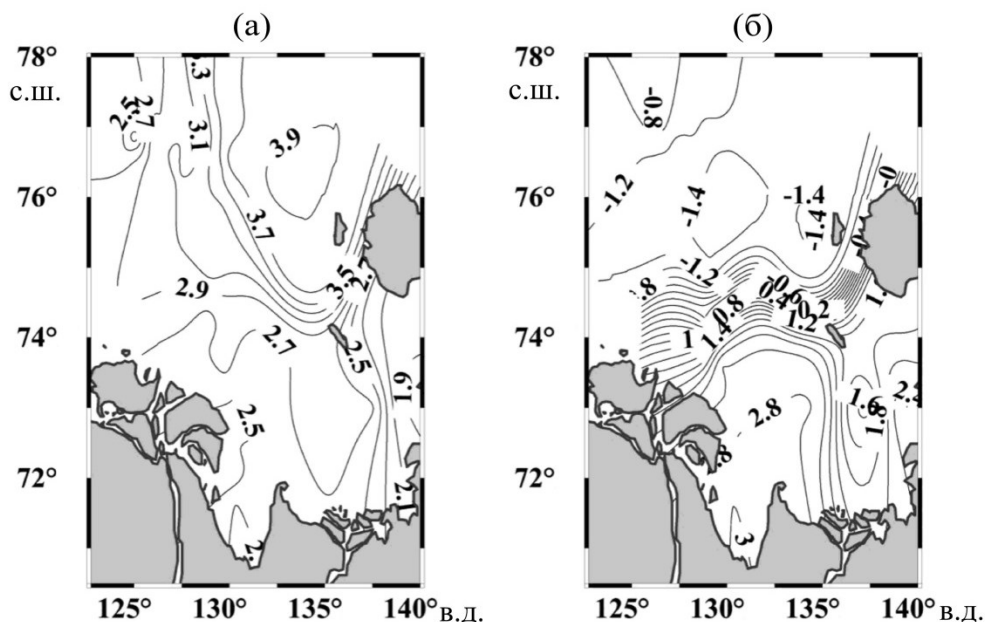
Вклад двух других источников пресных вод во время работ был даже менее значителен: количество атмосферных осадков в сентябре не превышало 9% от годового объема [30], а процесс таяния льда сменился быстрым охлаждением поверхностных вод, предшествующим льдообразованию.

В исследуемый период соленость поверхностных вод изменялась от 8.44 до 29.26‰, в придонном слое диапазон изменчивости составлял 14.79 – 34.44‰. Минимальные солености были обнаружены в придельтовой зоне, на севере полигона ее значения достигали максимальных величин (рис. 3.2). Некоторое снижение солености в поверхностном слое наблюдалось в линзе речных вод, локализованной северо-восточнее дельты Лены. Отметим, что линза речных вод прослеживалась также и по гидрохимическим характеристикам.



**Рисунок 3.2** - Распределение величин солености (‰) в поверхностном (а) и придонном (б) слоях.

В поверхностном слое пространственное распределение температуры имело мозаичный характер, прослеживалась слабая тенденция повышения температуры с увеличением широты (рис. 3.3). В придонном слое была выявлена устойчивая тенденция понижения температуры к северу ( $r = -0.94$ ,  $n = 57$ ).

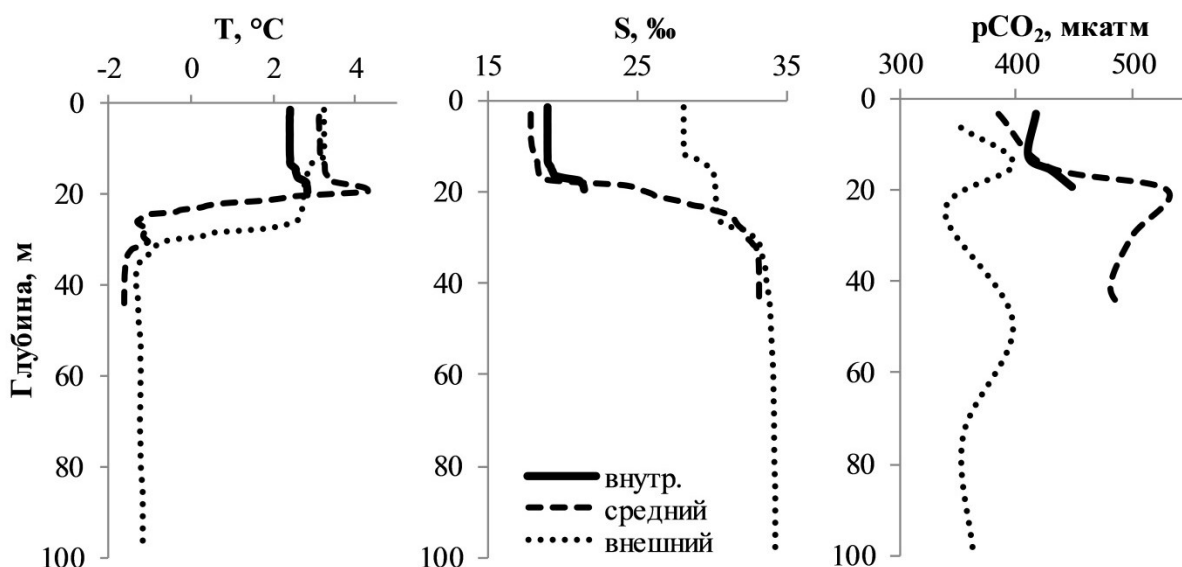


**Рисунок 3.3** - Распределение температуры (°C) в поверхностном (а) и придонном (б) слоях.

Содержание речных вод в поверхностном слое варьировалось от 21 до 81% со средним значением 43%. Наибольшие доли речных вод были рассчитаны вблизи основных проток р. Лены, минимальные – на северо-западе полигона. Несмотря на то, что работы выполнялись в период

наибольшей площади открытой воды, содержание талых вод даже в поверхностном слое составляло, в среднем, 6%, достигая максимальных величин 18-24% только на востоке полигона вблизи проливов Новосибирских островов. Последнее может быть связано с поступлением вод из западной части Восточно-Сибирского моря, где наблюдалась более сложная ледовая обстановка – льды сплоченностью до 8 баллов не отступали севернее 73° с.ш. Повышенные фракции талых вод отмечались и в южной части придельтовой зоны (10-14%). На севере, северо-западе исследуемого района фракция талых вод характеризовалась отрицательными значениями, что свидетельствовало о присутствии рассолов [27, 84].

Согласно предшествующим исследованиям [49], на шельфе моря Лаптевых можно выделить три области – внутренний (с глубинами до 20 м), средний (20-50 м) и внешний (50 - 200 м) шельф. Распределение гидрологических характеристик в каждой из этих зон имело свои особенности (рис. 3.4).



**Рисунок 3.4** - Вертикальное распределение температуры (Т), солёности (S) и  $p\text{CO}_2$  на внутреннем, среднем и внешнем шельфе.

На внутренней части шельфа солёность в поверхностном слое изменялась в широком диапазоне (таблица). При этом градиенты между солёностью поверхностного и придонного слоя были, за редким исключением, малы и на многих станциях воды были перемешаны от поверхности до дна. Распределение температуры в водном столбе на внутреннем шельфе также было близко к однородному (таблица 3.1). Независимо от глубины места разница температур поверхностного и придонного слоев редко превышала 0.5°C, а максимальное различие достигало 1.15°C. Пространственные вариации отличались большим разбросом, в поверхностном слое температура изменялась от 1.34 до 3.37°C, в придонном – от 1.86 до 3.38°C (таблица 3.1). В пространственном распределении величин поверхностной температуры и солёности в исследуемой части внутреннего шельфа какой-либо тенденции обнаружено не было, в придонных

водах была выявлены слабая тенденция снижения температуры и роста солености с увеличением широты.

**Таблица 3.1** - Распределение гидрологических параметров на шельфе восточной части моря Лаптевых (в скобках указано среднее значение)

	Температура, °С		Соленость, ‰	
	поверхностный слой	придонный слой	поверхностный слой	придонный слой
Внутренний шельф, n = 25	1.34 – 3.37 (2.35)	1.86 - 3.38 (2.67)	8.44 – 19.86 (17.01)	14.79 – 26.59 (19.55)
Средний шельф, n = 12	2.06 – 3.96 (3.07)	-1.62 – 3.07 (0.06)	15.71 – 21.94 (18.70)	22.51 – 33.5 (30.72)
Внешний шельф, n = 20	1.91 – 4.23 (3.33)	-1.64 – -0.82 (-1.19)	18.33 – 29.26 (22.08)	33.31 – 34.44 (34.08)

Отметим, что на внутреннем шельфе была выполнена вторая съемка - после двух интенсивных штормов стратификация вод была разрушена, а через 3-4 дня при повторных работах она начала восстанавливаться, особенно в придельтовой зоне на траверзе основных протоков. На поверхности вода стала значительно холоднее и наблюдалась инверсия температуры – у дна она была выше по сравнению с поверхностным слоем. В солености также произошли изменения – ее значения на поверхности уменьшились, а в придонном слое либо остались без изменений, либо несколько возросли.

На среднем шельфе воды были стратифицированы в значительно большей степени. Следует отметить, что устойчивая стратификация вод контролировалась, главным образом, соленостью, что типично для арктических морей [32]. Поверхностные температуры были выше значений, характерных для внутреннего шельфа, а в придонном, напротив, ниже, достигая отрицательных величин (таблица 3.1). На профиле распределения температуры были выявлены промежуточные экстремумы (рис. 3.4), отсутствующие на внутреннем шельфе. Теплые промежуточные воды находились в области пикноклина - на глубине 15-20 м был обнаружен прогретый слой с разницей температуры с верхним перемешанным слоем от 0.7 до 2.4°С. Согласно Дмитренко с соавторами [36], простейшее объяснение его формирования – изопикническая фронтальная конвергенция нагретых шельфовых вод под линзу речных вод. Этот механизм становится наиболее важным в годы, когда атмосферное воздействие вынуждает речное пятно перемещаться далеко на север. Подобная метеорологическая ситуация наблюдалась и в 2011 г., когда в теплый сезон над исследуемой акваторией доминировал антициклон, определяющий перенос распресненных вод к северу от дельты р. Лены. Теплый промежуточный слой (ТПС) достаточно устойчив, он не разрушается во время осеннего охлаждения вод (и в результате штормовых ветров, как показали наши исследования) и может существовать до марта-апреля [26]. Ниже залегал слой минимума температур, обусловленный процессом зимней подледной



конвекции, и их значения были близки к температуре замерзания воды при данной солености. Ко дну наблюдалось некоторое повышение температуры.

На внешнем шельфе обнаружены наибольшие для всего района исследований величины солености как в поверхностном, так и в придонном слоях (таблица 3.1). Распределение температуры характеризовалось значительной неоднородностью, в поверхностных водах были измерены и рассчитаны максимальные абсолютные и средние ее величины. Разницу в температуре поверхностных вод внутреннего и внешнего шельфов можно отнести к штормовым явлениям, вызвавшим перемешивание и выхолаживание вод на внутреннем шельфе. На профилях температуры на ряде станций так же, как и на среднем шельфе, были выявлены экстремумы, но разница между слоем минимума и придонными водами была уже более значима. При общей устойчивой тенденции снижения придонной температуры с юга на север ( $r = -0.94$ ,  $n = 57$ ) и аналогичных трендах на внутреннем и среднем шельфе, на внешнем шельфе прослеживалась слабая обратная зависимость – увеличение температуры придонных вод к северу ( $r = 0.48$ ,  $n = 20$ ), что свидетельствовало об усилении тепляющего влияния атлантических вод.

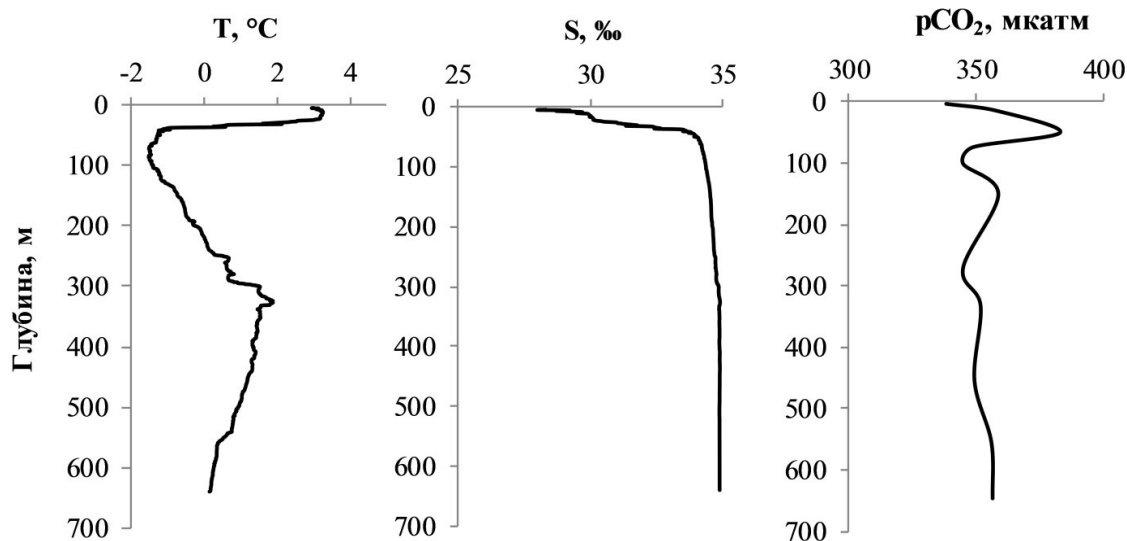
На большинстве станций, выполненных на внешнем шельфе, также был обнаружен ТПС. Зона его распространения была ограничена областью значительного влияния речных вод, где содержание последних в поверхностном слое достигало 40-45%. ТПС отсутствовал на станциях, выполненных на северо-западе района исследований, где соленость поверхностных вод была максимальной (до 29.26‰), а доля речных вод не превышала 30%.

Над материковым склоном была выполнена одна станция (рис. 3.1, ст. 43). Вертикальное распределение гидрологических параметров также имело характерные особенности (рис. 3.5). На этой станции доля речных вод в поверхностном слое составляла 30%, ТПС практически отсутствовал (разница в температуре поверхностного и подповерхностного слоев не превышала  $0.3^{\circ}\text{C}$ ), а ниже пикноклина, начиная с глубины 220 м, был идентифицирован слой теплых промежуточных атлантических вод, выделенный по положительной температуре и характеризующийся в ядре соленостью 34.89‰ и температурой  $1.90^{\circ}\text{C}$ .

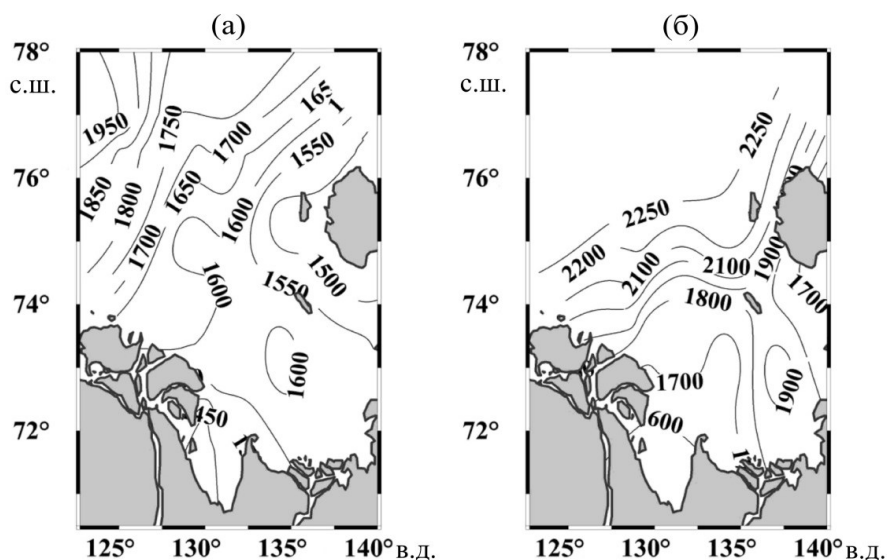
**Распределение гидрохимических параметров.** В районе исследований карбонатные параметры (измеренные величины  $A_T$ , рН и рассчитанные  $p\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ) изменялись в широком диапазоне.

Величина  $A_T$  синхронно с соленостью увеличивалась с юга на север и от поверхности ко дну (рис. 3.6). Минимальные значения  $A_T$  были обнаружены в придельтовой зоне, где прямое влияние вод р. Лены снижало  $A_T$  до 1174 мкмоль/кг. Некоторое уменьшение величин  $A_T$  было отмечено в линзе распресненных вод севернее дельты Лены. Ранее аналогичные линзы рек Оби и Енисея были идентифицированы по гидролого-гидрохимическим характеристикам и в Карском

море [3]. Максимальные величины общей щелочности (2305 мкмоль/кг) были измерены над континентальным склоном моря Лаптевых в слое теплых атлантических вод.



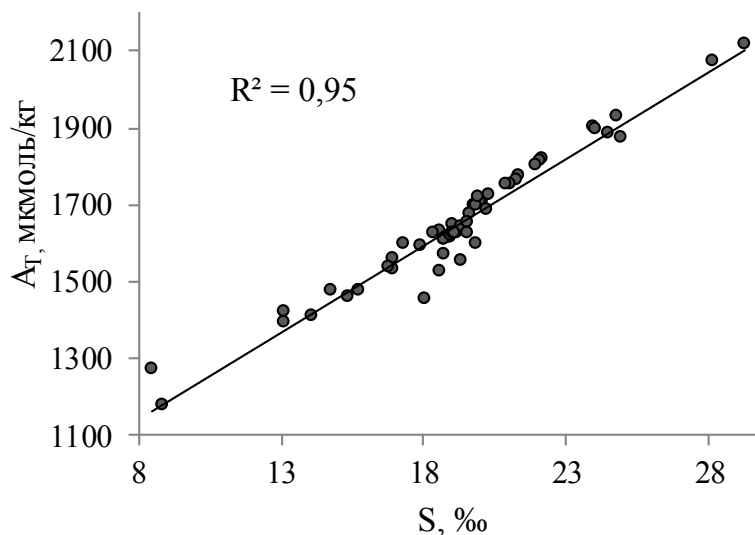
**Рисунок 3.5** - Вертикальное распределение температуры (T), солёности (S) и  $p\text{CO}_2$  над континентальным склоном.



**Рисунок 3.6** - Распределение величин общей щелочности (мкмоль/кг) в поверхностном (а) и придонном (б) слоях.

Обнаруженное отклонение распределения  $A_T - S$  от линейной зависимости (рис. 3.7) определялось вкладом пресных вод с различным отношением солёности и общей щелочности. Более низкие отношения  $A_T/S$  были зафиксированы в юго-восточной части моря севернее Янского залива. Возможно, здесь проявилось влияние вод р. Яны, в которых среднегодовая концентрация бикарбонат-иона почти в 2.5 раза ниже “ленских” величин [43]. Нельзя также исключать присутствия паводковых вод р. Лены с низким содержанием общей щелочности [7]. В период максимального расхода интенсифицируется стокое течение от дельты р. Лены, которое

усиливает общий прибрежный поток в восточном, северо-восточном направлении [16]. Отметим, что на основной части акватории вклад талых вод в динамику щелочности (как и солености) поверхностных вод был незначителен, так как их доля составляла, в среднем, 6%. Но даже в зоне локализации наибольшего количества талых вод их присутствие, снижая общую щелочность и соленость, не вызывало изменения соотношения  $A_T/S$  [5].



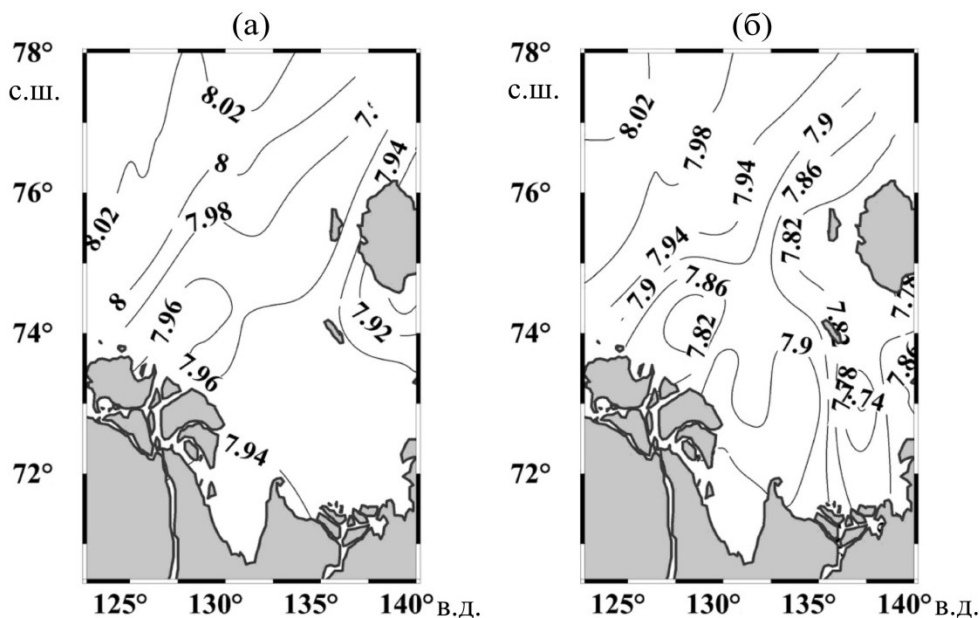
**Рисунок 3.7** - Распределение величин общей щелочности ( $A_T$ ) относительно солености ( $S$ ) в поверхностном слое восточной части моря Лаптевых.

Рассчитанные величины нормализованной щелочности в поверхностном слое изменялись от 2536 до 5284 мкмоль/кг со средним значением 3071 мкмоль/кг, также свидетельствуя о том, что под влиянием речного стока в той или иной степени находилась вся исследуемая акватория. Известно, что поверхностные арктические воды, удаленные от влияния материкового стока, характеризуются нормализованной щелочностью не выше 2450 мкмоль/кг [6, 60].

Величины  $pH_{in situ}$  в поверхностном слое изменялись от 7.679 до 8.084 ед. pH (рис. 3.8). В их распределении прослеживалась общая тенденция возрастания с юга на север (коэффициент корреляции величин pH с широтой составил 0.72 и 0.55 для поверхностного и придонного слоев, соответственно) и снижения от поверхности ко дну (рис. 3.8). Отметим, что на внутреннем шельфе последняя закономерность прослеживалась очень слабо. На среднем и внешнем шельфе, в отличие от распределения величин общей щелочности, на профилях pH были обнаружены промежуточные экстремумы. Верхний подповерхностный минимум ассоциировался с ТПС, следующий экстремум (максимальные значения pH) был обнаружен в нижней части пикноклина и совпадал с минимальными концентрациями кремния, взвеси и низкими значениями CDOM. Еще один промежуточный минимум был обнаружен на глубоких северных станциях внешнего шельфа и над континентальным склоном в зоне отрицательных температур на глубине около 50 м.

Парциальное давление углекислого газа в поверхностных водах шельфа моря Лаптевых снижалось с юга на север (рис. 3.9), коэффициент корреляции величин  $pCO_2$  с широтой в

поверхностном слое составлял  $-0.71$ . Максимальные для поверхностного слоя величины  $p\text{CO}_2$  (427 мкатм) были обнаружены вблизи дельты р. Лены и термоабразионного побережья Новосибирских островов, минимальные (338 мкатм) – на севере района исследований. Корреляционная связь парциального давления углекислого газа с температурой в поверхностном слое отсутствовала, что нетипично для арктических морей в теплый сезон [6, 9, 63, 64].



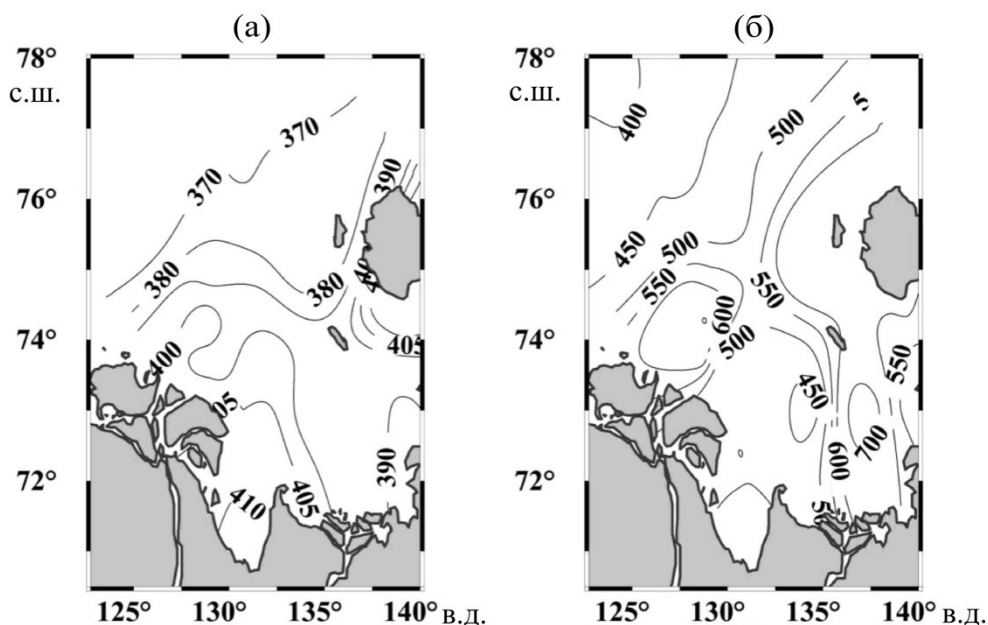
**Рисунок 3.8** - Распределение величин  $p\text{H}_{\text{in situ}}$  (ед. pH) в поверхностном (а) и придонном (б) слоях.

Воды внутреннего шельфа во всей толще были, главным образом, пересыщены углекислым газом относительно атмосферных значений; ко дну наблюдалось небольшое повышение  $p\text{CO}_2$ . Невысокие вертикальные градиенты в распределении карбонатных параметров на внутреннем шельфе были связаны со слабой стратификацией, определяющей интенсивный вертикальный обмен в толще воды.

Вертикальное распределение  $p\text{CO}_2$  на среднем и внешнем шельфе, аналогично величинам pH, характеризовалось наличием экстремумов. Промежуточные максимумы ассоциировались с ТПС и слоем отрицательных температур, а минимум – с относительно холодным промежуточным слоем.

Наши данные показывают, что в летне-осенний сезон в море Лаптевых распределение параметров карбонатной системы характеризовалось значительной пространственной изменчивостью – как от поверхности ко дну, так и от внутреннего шельфа к внешнему. Поверхностные воды были неравновесны по отношению к атмосферному содержанию углекислого газа, являясь источником  $\text{CO}_2$  в атмосферу на юге и стоком на севере полигона. Наибольшее пересыщение было обнаружено в придельтовой зоне, где влияние речных вод было максимально, а также вблизи термоабразионного побережья. Процессы деструкции здесь

преобладали над продукцией ОВ, что также подтверждалось распределением относительных и абсолютных концентраций кислорода. Несмотря на то, что на севере района исследований величина  $p\text{CO}_2$  в морской воде была ниже атмосферного уровня, процессы фотосинтеза во время работ и здесь не играли определяющей роли. Наблюдаемые низкие величины  $p\text{CO}_2$  на северной периферии полигона можно отнести к последствиям процесса интенсивного фотосинтеза, имеющего место при отступании льда; во время исследований степень насыщения поверхностных вод кислородом не превышала 93%, а концентрации хлорофилла “а” не поднимались выше 1.3 мкг/л. Кроме того, работы выполнялись в период осеннего охлаждения вод и определенную роль мог играть термический фактор, что подтверждается одновременным недосыщением вод как углекислым газом, так и кислородом. Вклад талых вод, значительно недосыщенных углекислым газом, здесь был незначим.



**Рисунок 3.9** - Распределение величин  $p\text{CO}_2$  (мкатм) в поверхностном (а) и придонном (б) слоях.

На вертикальных профилях  $p\text{CO}_2$  на внутреннем шельфе не было обнаружено экстремумов, что совпадало с распределением других гидрохимических и гидрологических параметров – эти воды были, в основном, перемешаны от поверхности до дна в результате прошедших штормов и содержали большое количество речных вод. Во всей толще они были пересыщены или близки к равновесному состоянию по отношению к атмосферному содержанию  $\text{CO}_2$ . Последнее наблюдалось в нескольких точках на поверхности на востоке региона, где стратификация была более устойчивой, а концентрация талых вод была выше по отношению к другим районам шельфа. Но несмотря на то, что талые воды существенно недосыщены  $\text{CO}_2$  [40], их доли (~15-20%) в общем объеме вод было недостаточно, чтобы значительно снизить  $p\text{CO}_2$  в воде по отношению к равновесным значениям.

Отметим, что полное перемешивание водной толщи до дна было ранее обнаружено в юго-западной части Восточно-Сибирского моря, что привело к прогреву придонных вод и донных осадков до температуры 2-3°C; это может обусловить вовлечение дополнительного ОВ как субстрата для образования CO<sub>2</sub> в результате дестабилизации подводной мерзлоты [76].

На профилях  $p\text{CO}_2$  на среднем шельфе, как уже отмечалось выше, впервые появились экстремумы. Обнаруженный в слое пикноклина на среднем шельфе подповерхностный максимум  $p\text{CO}_2$  (рис. 3.4) ассоциировался с ТПС, расположенным в высокоградиентной зоне. Отметим, что в отличие от характеристик ТПС, обнаруженного в октябре 1995 г. [36], в конце сентября 2011 г. этот слой характеризовался значительно большими концентрациями кремния и низкими величинами флуоресценции; степень насыщения вод кислородом была выше относительно других слоев, но не достигала равновесных величин. Концентрация CDOM была здесь почти в два раза ниже по сравнению с поверхностными водами, величины кремния были снижены относительно перемешанного поверхностного слоя, но, в отличие от данных, приведенных в работе [36], не являлись минимальными для профиля. Такую межгодовую разницу в характеристиках ТПС можно отнести к динамике водных масс в год, предшествующий исследованиям. Так, в теплый сезон 1994 г. область распространения речных вод, обогащенных кремнием, была ограничена юго-восточной частью моря; в 2010 г., напротив, благодаря доминирующему антициклону распресненные речным стоком воды переносились далеко на север от дельты р. Лены (<http://www.cdc.noaa.gov>).

Основной причиной формирования данного положительного экстремума  $p\text{CO}_2$ , по нашему мнению, является температурный фактор – превышение температуры на 2-4 градуса относительно других горизонтов, и, в частности, поверхностного слоя, могло обеспечить наблюдаемую разницу в  $p\text{CO}_2$ . Кроме того, в ТПС наблюдались максимальные для профиля концентрации рассолов. Они могли быть связаны с устойчивой стратификацией вод, сформированной в предшествующий летне-осенний сезон 2010 г. В зимний сезон 2010-2011 гг. стекающие в процессе формирования льда рассолы (в том числе, и в результате перманентного льдообразования в полынье) не достигали дна, концентрируясь, главным образом, в слое над пикноклином. Таким образом, наличие рассолов с высоким содержанием неорганического углерода и пересыщенных CO<sub>2</sub>, могло быть дополнительным фактором, формирующим положительный экстремум  $p\text{CO}_2$ .

Второй промежуточный максимум  $p\text{CO}_2$  был обнаружен на глубоких станциях внешнего шельфа и над континентальным склоном на горизонте около 50 м (рис. 3.4, 3.5). Его происхождение не было связано с температурным фактором, так как он идентифицирован в зоне отрицательных температур (рис. 3.5). Ранее подобный слой был обнаружен в глубокой восточной части моря Лаптевых в сентябре 2009 г. [8]. По нашему мнению, наиболее вероятным источником этого слоя высоких значений  $p\text{CO}_2$  (и концентраций CO<sub>2</sub>) являются холодные придонные

шельфовые воды, обогащенные углекислым газом благодаря стекающим рассолам и взаимодействию с донными осадками, содержащими высокие концентрации лабильного аллохтонного ОВ. Далее эти трансформированные воды переносятся в глубокие части моря, занимая место в верхнем галоклине согласно плотностным характеристикам [8]. Наши предшествующие наблюдения свидетельствуют о том, что такая ситуация типична только для восточной части моря, что определяется как повышенными концентрациями лабильного ОВ, поступающего с терригенным стоком (с речными водами, а также в результате эрозии берегов) в эту часть моря, так и системой течений. Таким образом, проявление действия так называемого “континентального шельфового насоса” (continental shelf pump - экспорт углерода с шельфа в глубокую часть моря) имеет свои характерные особенности в море Лаптевых. Если в высокопродуктивном Чукотском море одной из основных движущих сил “шельфового насоса” является фотосинтетическая активность морской биоты, сопровождающаяся поглощением  $\text{CO}_2$  из атмосферы, то в олиготрофных водах моря Лаптевых – это, главным образом, следствие огромного притока терригенного органического углерода, синтезированного в разное время наземными экосистемами. Формирование рассолов, что типично для арктических морей, также способствовало переносу углерода в глубокие слои.

На профиле  $p\text{CO}_2$  на внешнем шельфе был обнаружен также промежуточный минимум значений. Он располагался в нижней части пикноклина в области отрицательных температур (но не минимальных) на глубинах около 25-30 м и совпадал с наименьшими для профиля концентрациями кремния, взвеси, низкими концентрациями CDOM, а также максимальными значениями pH и концентрациями кислорода. К основным факторам, определяющим наличие отрицательного экстремума, можно отнести как температурный (снижение температуры на 3-5 градусов относительно поверхностного слоя), так и биологический (низкие концентрации биогенных элементов могли свидетельствовать об их биоассимиляции). Вероятно, в этом слое имела место остаточная фотосинтетическая активность, описанная ранее в работе [46], что также косвенно подтверждается высокими концентрациями кислорода и величинами pH. Отметим, что развитие осеннего цветения характерно для многих арктических морей [24]. Второй пик продуктивности значительно слабее, главным образом, из-за снижения интенсивности солнечного излучения, а его временные рамки существенно отличаются в зависимости от района [24]. Рассчитанное содержание речной воды в этом слое не превышало 10-13%, воды атлантического происхождения доминировали, составляя, в среднем 94-95%, а концентрации рассолов были незначительны. Нормализованная щелочность, один из достоверных трассеров речных вод, была низкой, типичной для арктических вод, не подверженных влиянию речного стока [6, 60]. Нельзя также исключать адвекцию вод западной части моря Лаптевых (холодных, относительно соленых, с низким содержанием кремния) [49]. Ниже, в придонном слое на гидрохимические

характеристики воды (включая карбонатные параметры) оказывали значимое влияние биохимические и обменные процессы на границе вода/осадки и величины  $p\text{CO}_2$  существенно превышали атмосферные значения.

В связи с широко дискутируемой проблемой подкисления вод Мирового океана и арктических морей как наиболее подвижного звена в климатической системе, особый интерес представляет динамика степени насыщения полярных вод кальцитом ( $\Omega_{\text{Ca}}$ ) и арагонитом ( $\Omega_{\text{Ar}}$ ), отражающей “коррозионный статус” вод по отношению к карбонату кальция ( $\text{CaCO}_3$ ).

Известно, что степень насыщения воды карбонатом кальция ( $\Omega$ ) выражается как отношение произведения концентраций кальция и карбонат-иона к растворимости  $\text{CaCO}_3$  при данных температуре, солёности и давлении. Воды с  $\Omega > 1$  благоприятны для образования раковин и скелетов кальцифицирующими морскими организмами, а воды с  $\Omega < 1$  являются коррозионными, и при отсутствии защитных механизмов в них начинается растворение карбоната кальция. Предполагается, что поверхностные воды Северного Ледовитого океана благодаря низким температурам и, как следствие, высокой способности поглощать  $\text{CO}_2$ , первыми станут коррозионными по отношению к карбонату кальция [83]. Модельные оценки предсказывают, что из-за распреснения и дальнейшего роста абсорбции  $\text{CO}_2$  в результате уменьшения площади льда поверхностные воды СЛО станут недосыщены карбонатом кальция уже в течение ближайшего десятилетия [78].

Во время наших исследований степень насыщения поверхностных вод юго-восточной части моря Лаптевых арагонитом, менее стабильной формой карбоната кальция, изменялась от 0.30 до 1.35 со средним значением 0.70, в придонном слое – от 0.42 до 1.37 (среднее значение 0.83). Степень насыщения вод кальцитом изменялась в пределах 0.55 – 2.17 (1.17) и 0.73-2.17 (1.34) на поверхности и у дна, соответственно.

Минимальные величины степени насыщения вод кальцитом и арагонитом были обнаружены на внутреннем шельфе. При этом весь водный столб характеризовался, главным образом, коррозионными свойствами по отношению к карбонату кальция - относительно арагонита недосыщение было обнаружено на всех станциях, относительно кальцита – на большинстве. Следует отметить, что состав фауны и облик раковин также свидетельствовали об уже существующей высокой агрессивности придонных вод приустьевой зоны к карбонатным ионам [4].

На среднем шельфе все поверхностные, а также придонные воды (за исключением трех северо-западных станций – 30, 35, 49) оставались недосыщенными по отношению к арагониту, но здесь уже были выявлены промежуточные слои со значениями  $\Omega_{\text{Ar}}$  выше единицы. Несмотря на высокие величины  $p\text{CO}_2$  в ТПС, он, в отличие от поверхностного перемешанного слоя, был пересыщен арагонитом и кальцитом, что связано со снижением концентрации пресных вод



относительно верхних горизонтов, присутствием рассолов с высокими содержанием неорганического углерода и соленостью, в также повышенной температурой этого слоя. В слое отрицательного экстремума  $p\text{CO}_2$  величины  $\Omega_{\text{Ar}}$  не опускались ниже 1.2, что связано как с доминированием в этом слое атлантических вод (90-98%), так и вероятным увеличением рН в результате остаточной фотосинтетической активности. Между  $\Omega_{\text{Ar}}$  и долей атлантических вод обнаружена тесная связь – коэффициент корреляции составил 0.95 ( $n = 56$ ).

Как отмечалось выше, на среднем шельфе только эти два слоя промежуточных экстремумов  $p\text{CO}_2$  характеризовались пересыщением арагонитом. По отношению к кальциту поверхностные воды оставались недосыщенными на востоке - северо-востоке региона.

На внешнем шельфе воды во всей толще были пересыщены по отношению к кальциту, а недосыщение по арагониту наблюдалось на ряде станций в верхнем перемешанном слое, где влияние речных вод оставалось значительным. На этих станциях глубина коррозионного слоя достигала 20 м, а содержание речных вод в нем изменялось в пределах 40-50%. Максимальные величины  $\Omega$  были обнаружены в слое теплых атлантических вод (1.52 для арагонита и 2.44 для кальцита).

На внешнем шельфе придонный слой был уже пересыщен арагонитом, что определялось значительным влиянием атлантических вод, идентифицированных по температуре и солености.

Совместный анализ данных по распределению  $\Omega_{\text{Ar}}$ , фракции речных ( $f_{RW}$ ) и талых ( $f_{MW}$ ) вод показал устойчивую отрицательную связь степени насыщения вод арагонитом с двумя последними характеристиками. Так, коэффициент корреляции между  $\Omega_{\text{Ar}}$  и фракцией талых вод в поверхностном слое составлял -0.62, речных вод -0.65; следовательно, любое увеличение доли пресных вод с необходимостью вызывало уменьшение  $\Omega$ . Помимо снижения солености и связанным с ним уменьшением концентраций карбонат-ионов и ионов кальция, влияние речных вод на изменение  $\Omega_{\text{Ar}}$  определялось и поставляемым ими большим количеством аллохтонного ОВ, часть из которого является лабильной [19]. Кроме того, речные воды пересыщены углекислым газом, а свойственные им величины рН существенно ниже морских значений [7]. Учитывая тенденцию роста объемов речного стока, в частности, реки Лены [39, 69], и продолжающееся сокращение площади арктического ледового покрова (в сентябре 2012 г. зарегистрирован новый абсолютный минимум за период спутниковых наблюдений с 1979 г., <http://www.noaa.gov>), следует ожидать дальнейшего снижения степени насыщения вод моря Лаптевых карбонатом кальция.

Как отмечалось выше, одним из основных факторов, повышающим кислотность вод и снижающим  $\Omega$ , является окисление ОВ, которое в огромных количествах поступает на шельф моря Лаптевых как с речным стоком, так и в результате эрозии береговой и субаквальной мерзлоты [33, 72]. Ранее объемы поступающего в море Лаптевых наземного органического углерода оценивались величиной порядка  $8.6 \cdot 10^{12}$  г в год (из них  $6.8 \cdot 10^{12}$  г приходилось на

речной сток, а оставшиеся – на эрозию берегового ледового комплекса [79]), для Восточно-Сибирского моря эта величина достигала  $4.06 \cdot 10^{12}$  г ( $1.86 \cdot 10^{12}$  г - речной сток и  $2.2 \cdot 10^{12}$  г – береговая эрозия). Последние исследования показали, что количество древнего органического углерода, освобождающегося в результате деградации ледового комплекса (берегового и субаквального), на восточно-сибирском шельфе может достигать  $44 \cdot 10^{12}$  г в год [80], при этом темпы разрушения побережья возрастают [44].

Влияние деструкции ОБ на изменение степени насыщения вод карбонатом кальция наиболее ярко проявилось на среднем и внешнем шельфе: недосыщение или близкое к равновесному состояние сменялось пересыщением в промежуточном слое и затем снова снижалось ко дну, где на границе раздела вода/донные отложения активно протекали биохимические процессы. Роль эрозионного углерода в снижении величин  $\Omega$  хорошо иллюстрируется сравнением распределения гидрохимических параметров на ст. 18, выполненной вблизи эрозионного побережья Новосибирских островов, где средняя скорость эрозии берегового ледового комплекса, обогащенного древним ОБ, может достигать 10 м в год [53], и станции, расположенной севернее дельты р. Лены на  $75^\circ$  с.ш. (ст. 50). При близких глубинах (33 и 37 м), придонных соленостях (33.0‰), температурах ( $-1.5$  и  $-1.6^\circ\text{C}$ ), вкладе речных вод (8-9%) и устойчивой стратификации вод (на ст. 50 в зоне пикноклина максимальная частота Вэйсяля-Брента составляла  $0.04 \text{ сек}^{-1}$ , на 18 станции -  $0.03 \text{ сек}^{-1}$ ), степень насыщения придонных вод арагонитом на “эрозионной” станции 18 равнялась 0.74, а на 50 станции – 0.91, величины  $p\text{H}_{\text{in situ}}$  и  $p\text{CO}_2$  составляли 7.802 и 7.899 и 687 и 544 мкатм, соответственно.

Отметим, что степень насыщения вод карбонатом кальция осенью 2011 г. оказалась выше величин, обнаруженных в море Лаптевых в 2005 и 1999 гг. [68]. Вероятными причинами снижения коррозионности вод могла быть высокая ветровая активность, определяющая глубокую вентиляцию вод и интенсифицирующая процессы газообмена, а также межгодовая и сезонная динамика объема речного стока.

Данные, полученные в экспедиционных исследованиях в сентябре 2011 г., демонстрируют динамичный характер распределения параметров карбонатной системы на шельфе восточной части моря Лаптевых. Установлено, что основным фактором, контролирующим карбонатную химию шельфовых вод в теплый сезон, является значительный терригенный сток. Выполненные исследования показали, что поверхностные воды внутреннего и среднего шельфа восточной части моря Лаптевых в осенний сезон являются поставщиком углекислого газа в атмосферу, а внешнего - стоком для атмосферного  $\text{CO}_2$ .

На профилях распределения карбонатных параметров были выявлены промежуточные экстремумы, обусловленные как взаимодействием водных масс, так и протекающими в водном столбе и на границе раздела вода - донные отложения биохимическими процессами.

Установлено, что воды внутреннего шельфа восточной части моря Лаптевых во всей водной толще являются коррозионными по отношению к карбонату кальция (на всех выполненных станциях - к арагониту, а на большинстве – и к кальциту). Поверхностные и придонные воды среднего шельфа также были недосыщены по отношению к арагониту. Основными факторами, определяющими обнаруженное недосыщение, является существенный объем пресных вод, поступающих с речным стоком и в результате таяния льда, а также большое количество лабильного аллохтонного ОВ, вовлекаемого на шельфе в современный биогеохимический цикл. Таким образом, шельфовые воды восточной части моря Лаптевых являются одной из самых коррозионных по отношению к карбонату кальция зон Мирового океана. Выявлена устойчивая отрицательная корреляция  $\Omega$  с содержанием речных и талых вод. Учитывая, что в последние шесть лет наблюдаются минимальные за время наблюдений площади ледового покрова в Арктике в теплый сезон, уменьшается его толщина, возрастают объемы речного стока, повышается температура воздуха и регистрируются рекордно высокие температуры арктических почв, следует ожидать продолжающегося снижения насыщения шельфовых вод Восточной Арктики карбонатом кальция. Существующий в арктическом регионе феномен положительных обратных связей или так называемое “арктическое усиление глобального потепления” определяет необходимость дальнейших всепогодных исследований для оценки динамики происходящих процессов и их последствий для морских экосистем и биогеохимических циклов в региональном и глобальном масштабе.

### **3.2 Оценка потоков CO<sub>2</sub> между океаном и атмосферой в восточной части моря Лаптевых в безледный период**

Известно, что воды Мирового океана, а особенно полярных морей, рассматриваются как сток для атмосферного CO<sub>2</sub>. Они поглощают значительную часть антропогенного CO<sub>2</sub>, тем самым смягчая изменения климата. Последние оценки показывают, что океан абсорбирует примерно 27% ежегодных выбросов CO<sub>2</sub>, образованного в результате сжигания ископаемого топлива, производства цемента и изменений в землепользовании [54]. При этом антропогенная эмиссия CO<sub>2</sub> в 2012 г. существенно превысила среднее значение за предшествующую декаду, а ожидаемые выбросы углекислого газа в атмосферу будут на 2.1% выше уровня 2012 г. (и на 61% - 1990 г.) [54]. В настоящее время в научных прогнозах нет определенного мнения о том, сколько CO<sub>2</sub> сможет поглотить океан при изменении климата в будущем, что критически важно и для оценки динамики прогрессирующего снижения pH океанических вод.

Принято считать, что континентальный шельф, в целом, абсорбирует атмосферный углекислый газ с интенсивностью 0.33 – 0.36 Pg C в год, что составляет около 30% от общего

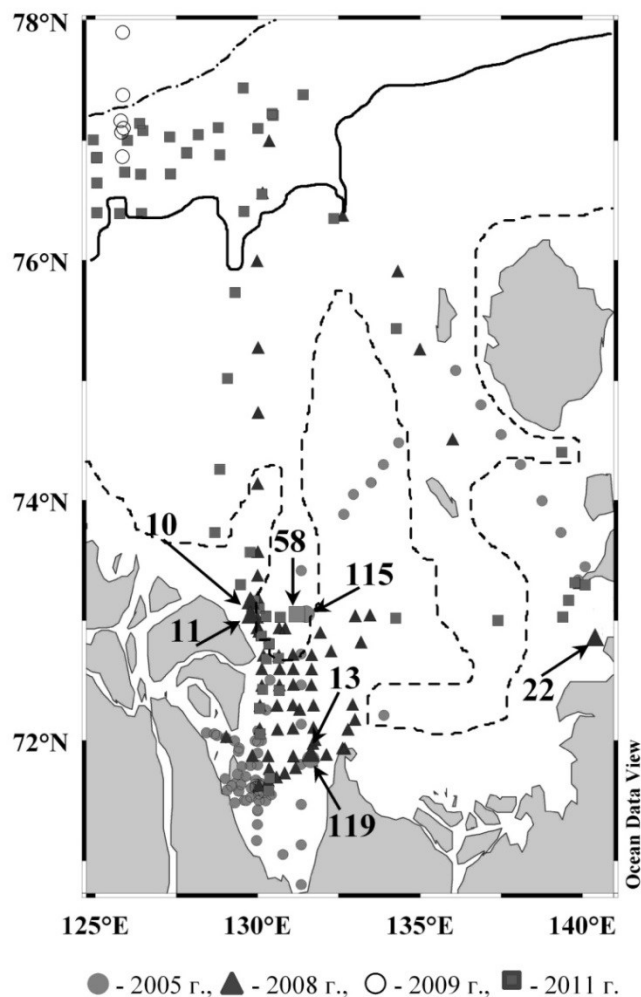
потока  $\text{CO}_2$  в океан [34]. Наши предшествующие исследования в арктических морях показали, что их шельфовые зоны, напротив, могут являться дополнительным источником углекислого газа в атмосферу [9, 15, 63, 68, 69]. Установлено, что формирование областей эвазии на арктическом шельфе, главным образом, определяется влиянием речного стока и эрозией берегового ледового комплекса, обогащенного лабильным органическим веществом (ОВ) [9, 15, 63, 68, 69]. Если первое типично для приустьевых районов Мирового океана, то деградация побережья, сложенного многолетнемерзлыми породами, является характерной особенностью арктических морей. Среди морей Северного Ледовитого океана восточно-арктический шельф характеризуется максимальными скоростями эрозии побережья [1]. За короткий безледный период интенсивного разрушения берегового ледового комплекса в прибрежные воды поступает и впоследствии трансформируется на шельфе огромное количество эрозионного ОВ, соизмеримое [79], а по некоторым оценкам [68, 69] значительно превышающее годовой поток речного ОВ.

Вопрос о площади и эффективности зон эвазии  $\text{CO}_2$  на арктическом шельфе в настоящее время остается дискуссионным. Сложность в определении тенденций в динамике карбонатной системы морей высоких широт связана, главным образом, с эпизодическим характером временных и пространственных наблюдений.

В работе представлены полученные на основе многолетних экспедиционных исследований оценки потоков  $\text{CO}_2$  в системе океан-атмосфера на восточном шельфе моря Лаптевых и проанализированы факторы, определяющие их изменчивость. Использованы материалы работ, выполненных на внутреннем, среднем и внешнем шельфе моря Лаптевых в августе-сентябре 2005, 2008, 2009 и 2011 гг. (рис. 3.10). Из измеряемых параметров карбонатной системы определяли общую щелочность ( $A_T$ ) и pH; на основе этих данных и сопутствующих гидрологических и метеорологических наблюдений были рассчитаны величины парциального давления углекислого газа в морской воде ( $p\text{CO}_2$ ) и потоки  $\text{CO}_2$  в системе океан-атмосфера. Используемые методы определения и расчета этих характеристик приведены в работах [9, 63]. Площадные оценки были выполнены на основе электронного атласа IBCAO [51].

Как отмечалось выше, в восточной части моря Лаптевых существуют два основных источника углерода (как органического - в качестве субстрата для образования  $\text{CO}_2$ , так и неорганического) – речной сток и разрушающийся береговой ледовый комплекс. Они в значительной степени определяют гидрохимический режим вод, который также зависит и от динамики водных масс, обусловленной метеорологической ситуацией.

В пространственном распределении парциального давления  $\text{CO}_2$  в поверхностном слое во время работ была обнаружена тенденция снижения величин  $p\text{CO}_2$  от пересыщения относительно атмосферных величин на внутреннем и среднем шельфе (до 832 мкратм) до недосыщения (до 283 мкратм) на внешнем (рис. 3.11).

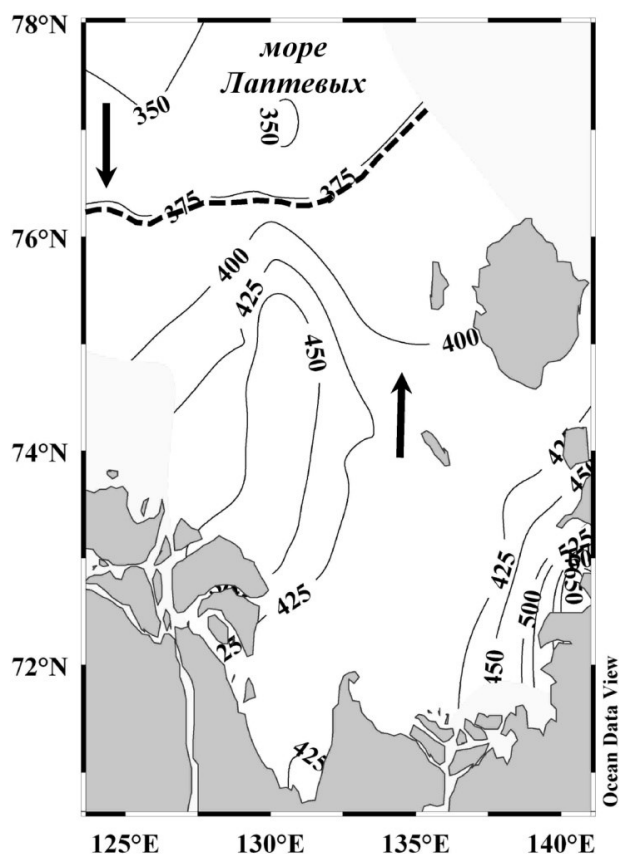


Линиями схематично показаны границы внутреннего (---), среднего (—) и внешнего (- - -) шельфа.

**Рисунок 3.10** - Район работ в море Лаптевых в августе-сентябре 2005, 2008, 2009 и 2011 гг.

В теплый сезон 2005 г. сток реки Лены ( $616 \text{ км}^3$ ) превышал среднюю многолетнюю величину ( $529 \text{ км}^3$  за период 1936-2000 гг.), но был существенно ниже значений, характерных для 2008 г. ( $715 \text{ км}^3$ ) (<http://rims.unh.edu>). Развитие глубокого циклона на западной периферии моря Лаптевых определяло сильные ветры над акваторией восточной части моря (со среднесуточной скоростью до  $\sim 11.2 \text{ м сек}^{-1}$ ) во время работ. В результате интенсивного ветрового воздействия толщина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) достигала 10 м, и на этой глубине располагался резкий пикноклин (рис. 3.12а). Предшествующие экспедиционным работам сильные ветры северных направлений (до  $12 \text{ м сек}^{-1}$ ), определяемые полем низкого давления, препятствовали растеканию речных вод к северу от дельты реки, а также интенсифицировали процессы термоабразии [44] и, как следствие, поступление эрозионного углерода в воду. Содержание взвеси в водном столбе достигало аномально высоких величин: в поверхностном слое среднее значение составляло  $17.5 \text{ мг л}^{-1}$ , а в придонном –  $57.9 \text{ мг л}^{-1}$  [33]. Отметим, что присутствие взвешенных

частиц также повышает и метаболизм прикрепляющихся к ним бактерий, что увеличивает скорость минерализации органического вещества [13].



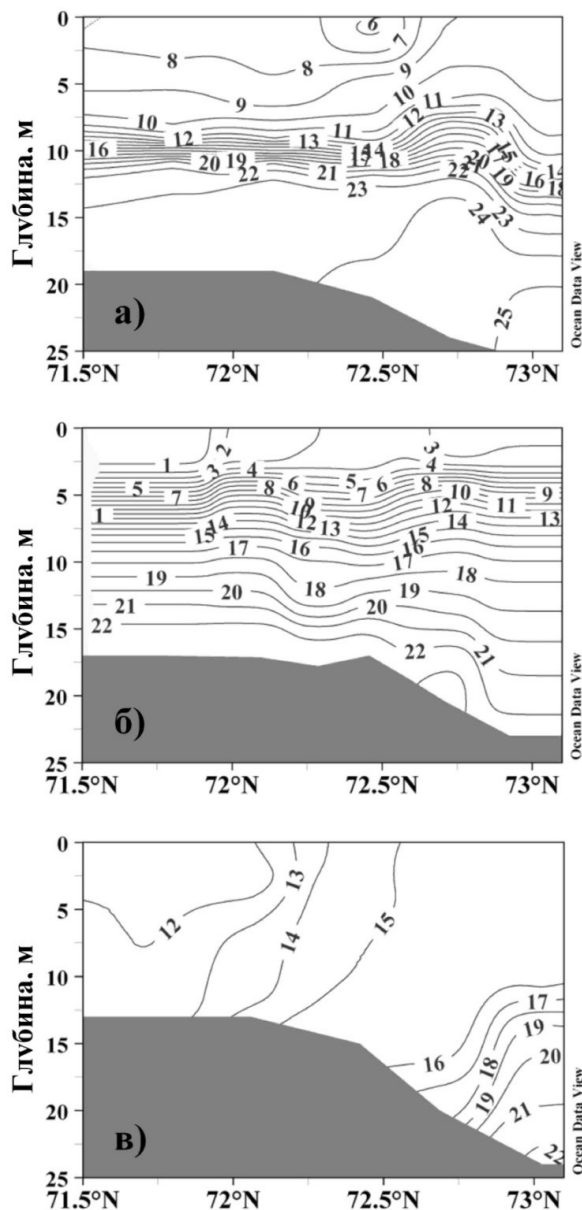
Направление потока  $\text{CO}_2$  между океаном и атмосферой показано стрелками, пунктиром обозначена зона перемены направления потока.

**Рисунок 3.11** - Распределение парциального давления  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ , мкатм) в поверхностном слое моря Лаптевых в августе-сентябре 2005, 2008, 2009 и 2011 гг.

В результате воды внутреннего и среднего шельфа во всем водном столбе были пересыщены углекислым газом. Величины  $p\text{CO}_2$  в поверхностном слое изменялись в пределах от 382 до 512 мкатм со средним значением 426 мкатм и при среднесуточных скоростях ветра 2.55-11.2 м сек<sup>-1</sup> потоки углекислого газа в атмосферу, в среднем, составляли 9.8 ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup> с диапазоном изменчивости от 2.6 до 49.3 ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup>. У дна благодаря поступлению большого количества аллохтонного лабильного органического вещества, ресуспензии осадков из-за интенсивного ветрового влияния [33], наличием резкого заглубленного пикноклина (рис. 3.12а), ограничивающего обменные процессы, парциальное давление углекислого газа достигало аномально высоких величин – до 3858-3905 мкатм. При этом степень насыщения вод кислородом опускалась до 17-19 %.

В теплый сезон 2008 г. поле атмосферного давления определялось доминирующим антициклоном, вызывающим сгонные ветры и растекание речных вод на север от дельты Лены. В отличие от безледного периода 2005 г., при преобладающем относительно слабом ветре [33]

развивались процессы термоденудации [44], при которых мобилизованное в результате таяния берегового ледового комплекса ОВ оставалось на побережье. Среднее содержание взвеси в водах юго-восточной части моря Лаптевых в поверхностном слое составляло  $11.2 \text{ мг л}^{-1}$ , а в придонном  $13.4 \text{ мг л}^{-1}$  [33]. При аномально большом объеме речного стока и относительно слабом ветровом воздействии, толщина ВКС не превышала 4-5 м (рис. 3.12б). Величины  $p\text{CO}_2$  в поверхностном слое внутреннего и внешнего шельфа изменялись в пределах 378 - 538 мкатм.



а) - 2005, б) - 2008 и в) - 2011 гг.

**Рисунок 3.12** - Распределение плотности ( $\text{кг м}^{-3}$ ) на широтном разрезе, выполненном на внутреннем и среднем шельфе моря Лаптевых вдоль  $\sim 131^\circ$  в.д.:

Исключением стали находящиеся в зоне максимального речного влияния станции 10 и 11, а также ст. 22, выполненная вблизи эрозионного побережья мыса Святой Нос (рис. 3.10), на которой вертикальный градиент солёности был мал и величины  $p\text{CO}_2$  в поверхностном и придонном слоях составляли 832 и 1037 мкатм, соответственно, что, вероятно, определялось прибрежным

апвеллингом обогащенных терригенным ОВ вод, обусловленным сгонными ветрами. Потоки углекислого газа в атмосферу изменялись от 0.1 до 40.5 ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup>.

В 2011 г. сильные ветры (до 15 м сек<sup>-1</sup>) наблюдались в течение двух недель до экспедиционных исследований, а также во время работ, что в совокупности с минимальной годовой величиной речного стока (497 км<sup>3</sup>) определяло слабую стратификацию вод и интенсивные обменные процессы (рис. 3.12в). Как следствие, величины рСО<sub>2</sub> в поверхностном слое внутреннего и среднего шельфа изменялись в диапазоне 382- 427 мкатм, а максимальные значения у дна достигали 880 мкатм. Потоки СО<sub>2</sub> в атмосферу с акватории внутреннего и среднего шельфа в 2011 г. находились в пределах 0.1 – 8.17 ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup> со средним значением 1.54 ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup>.

Отметим, что наибольшая межгодовая изменчивость параметров карбонатной системы наблюдалась в придонном слое; аналогичная ситуация ранее была отмечена и на акватории Восточно-Сибирского моря [11]. Максимальные различия наблюдались на внутреннем и среднем шельфе - области, в большей степени подверженной влиянию материкового стока. Так, на близких станциях внутреннего шельфа в 2005 и 2008 гг. (например, ст. 13 в 2008 г. и ст. 119 в 2005 г., Рис. 3.10) при схожих величинах рСО<sub>2</sub> в поверхностном слое (380 и 406 мкатм) у дна они отличались более, чем в 2 раза (1320 и 2721 мкатм), а в 2011 г. в придонном слое внутреннего шельфа величины рСО<sub>2</sub> не превышали 610 мкатм. В придонном горизонте среднего шельфа на совпадающих станциях величины рСО<sub>2</sub> также отличались значительно: 639 мкатм в 2011 г. (ст. 58) и 1562 мкатм в 2005 г. (ст. 115), соответственно (рис. 3.10). Обнаруженная динамика параметров карбонатной системы определялась совокупностью факторов, к основным из которых можно отнести объем поступающего на шельф терригенного вещества (речной сток и продукты разрушения берегового ледового комплекса), а также интенсивность газообменных процессов, обусловленную существующей стратификацией вод. Таким образом, аномалии рСО<sub>2</sub> в придонном слое формировались при интенсификации процессов термоабразии, которые носят циклический характер [33, 44], и повышенном стоке реки Лены, что характерно для ситуации 2005 г.

Поверхностные воды внешнего шельфа были, напротив, недосыщены СО<sub>2</sub> относительно атмосферных величин. В 2008 г. парциальное давление СО<sub>2</sub> в этом слое изменялось от 283 до 368 мкатм и потоки СО<sub>2</sub> в океан составляли 0.7-13.6 ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup>. В 2009 и 2011 гг. значения рСО<sub>2</sub> в поверхностных водах варьировались в пределах 335-341 и 350-378 мкатм, а углекислый газ абсорбировался со скоростью 2.8 – 3.1 и 0.4 – 5.5 ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup>, соответственно, что значительно ниже величин потоков СО<sub>2</sub>, наблюдаемых в высокопродуктивном Чукотском море [10].

Проведенные расчеты показали, что с суммарной площади внутреннего (глубины до 20 м) и среднего (20-50 м) шельфа (229·10<sup>9</sup> м<sup>2</sup>, [51]), гетеротрофной провинции моря, при среднем потоке



CO<sub>2</sub>, равном 7.9 ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup>, за месяц (сентябрь) в атмосферу поступило около 0.7 · 10<sup>12</sup> г С. За это же время внешний шельф восточной части моря Лаптевых площадью 43·10<sup>9</sup> м<sup>2</sup> [51] при среднем потоке углекислого газа в воду 3.9 ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup> абсорбировал приблизительно 0.1·10<sup>12</sup> г С. Суммарный поток CO<sub>2</sub> с акватории шельфа восточной части моря Лаптевых был направлен в атмосферу и его величина оценивается приблизительно в 0.6 Тг С.

В результате выполненных исследований установлено, что в безледный период восточный шельф моря Лаптевых является, в целом, источником углекислого газа; количество углерода, поступающего в атмосферу в течение одного месяца с внутреннего и среднего шельфа, оценивается приблизительно в 0.7 Тг. Учитывая ранее сделанные расчеты [63], с акватории мелководного шельфа восточной части моря Лаптевых и западной части Восточно-Сибирского моря за один месяц безледного периода в атмосферу поступает до 3 Тг С. Принимая во внимание, что общий годовой поток углерода в атмосферу из вод рек, эстуариев и прибрежной части морей составляет около 350 Тг (~29 Тг в месяц) [54], эмиссия CO<sub>2</sub> с акватории шельфа морей Восточной Арктики может оцениваться как значимая, но до настоящего времени неучтенная часть этой величины.

Полученные результаты позволяют уточнить роль восточно-арктического шельфа в современном глобальном бюджете CO<sub>2</sub>; для достоверных оценок и прогнозов динамики карбонатной системы и потоков углекислого газа в между океаном и атмосферой в условиях быстро изменяющегося климата необходимо продолжение регулярных всепогодных исследований вод полярных морей.

### **3.3 Подкисление вод Восточно-Сибирского арктического шельфа вследствие поступления пресных вод и наземного углерода**

Подкисление вод влияет на морские экосистемы и цикл углерода и рассматривается как прямое следствие поглощения антропогенного CO<sub>2</sub> из атмосферы [18, 48, 61]. Предполагается, что накопление атмосферного CO<sub>2</sub> в поверхностных водах океана в два раза повысит их кислотность к концу текущего столетия [20]. Северный Ледовитый океан в этом отношении наиболее уязвим, так как в холодных водах растворяется большее количество углекислого газа [25, 43]. На основе анализа наших многолетних океанографических исследований (1999, 2000-2005, 2008 и 2011 гг.) обнаружено экстремальное недосыщение вод арктического шельфа арагонитом, отражающее уровень подкисления, уже превышающий модельные прогнозы для данного региона к 2100 г. Изотопные данные по растворенному неорганическому углероду и расчет по методу Монте-Карло фракций смешивающихся пресных вод на основе использования величин солености и тяжелого изотопа кислорода δ<sup>18</sup>O показали, что постоянная асидификация вод Восточно-арктического

шельфа определяется деградацией наземного органического вещества и стоком арктических речных вод с повышенными концентрациями углекислого газа, скорее, чем поглощением атмосферного  $\text{CO}_2$ . Мы предполагаем, что воды Восточно-Арктического сибирского шельфа могут стать еще более подкисленными, если дальнейшее таяние мерзлоты приведет к увеличению потока терригенного органического углерода и, если пресноводный сток также будет расти, что в результате приведет к усилению эффективности этих двух источников  $\text{CO}_2$ .

Известно, что степень насыщения воды карбонатом кальция ( $\Omega$ ) как для арагонита ( $\text{Ar}$ ,  $\Omega_{\text{Ar}}$ ), так и для кальцита, выражается как отношение произведения концентраций иона кальция и карбонат-иона к растворимости  $\text{CaCO}_3$  при данных температуре, солености и давлении. Воды с  $\Omega > 1$  благоприятны для образования раковин и скелетов кальцифицирующими морскими организмами, а воды с  $\Omega < 1$  являются коррозионными, и при отсутствии защитных механизмов в них начинается растворение карбоната кальция. Предполагается, что поверхностные воды Северного Ледовитого океана благодаря низким температурам и, как следствие, высокой способности поглощать  $\text{CO}_2$ , первыми станут коррозионными по отношению к карбонату кальция [20, 25, 43]. Модельные оценки предсказывают, что из-за дальнейшего роста абсорбции  $\text{CO}_2$  в результате уменьшения площади льда поверхностные воды этого океана станут недосыщены карбонатом кальция уже в течение ближайшего десятилетия [38, 59]. Речной сток, талые воды и антропогенное загрязнение также усиливают асидификацию океанических вод (ОА) [28, 78, 83]. Настоящее исследование систематизирует более, чем десятилетние наблюдения, выполненные на труднодоступном арктическом шельфе с целью изучения степени, в которой природные процессы в арктической экосистеме, такие, как деградация наземного органического вещества, поступающего из тающей мерзлоты в шельфовые воды [69, 81], речной сток [62, 67], талые воды [83], вероятно, интенсифицирующиеся региональным потеплением [76], могут служить общим механизмом, определяющим недосыщение арагонитом вод Северного Ледовитого океана.

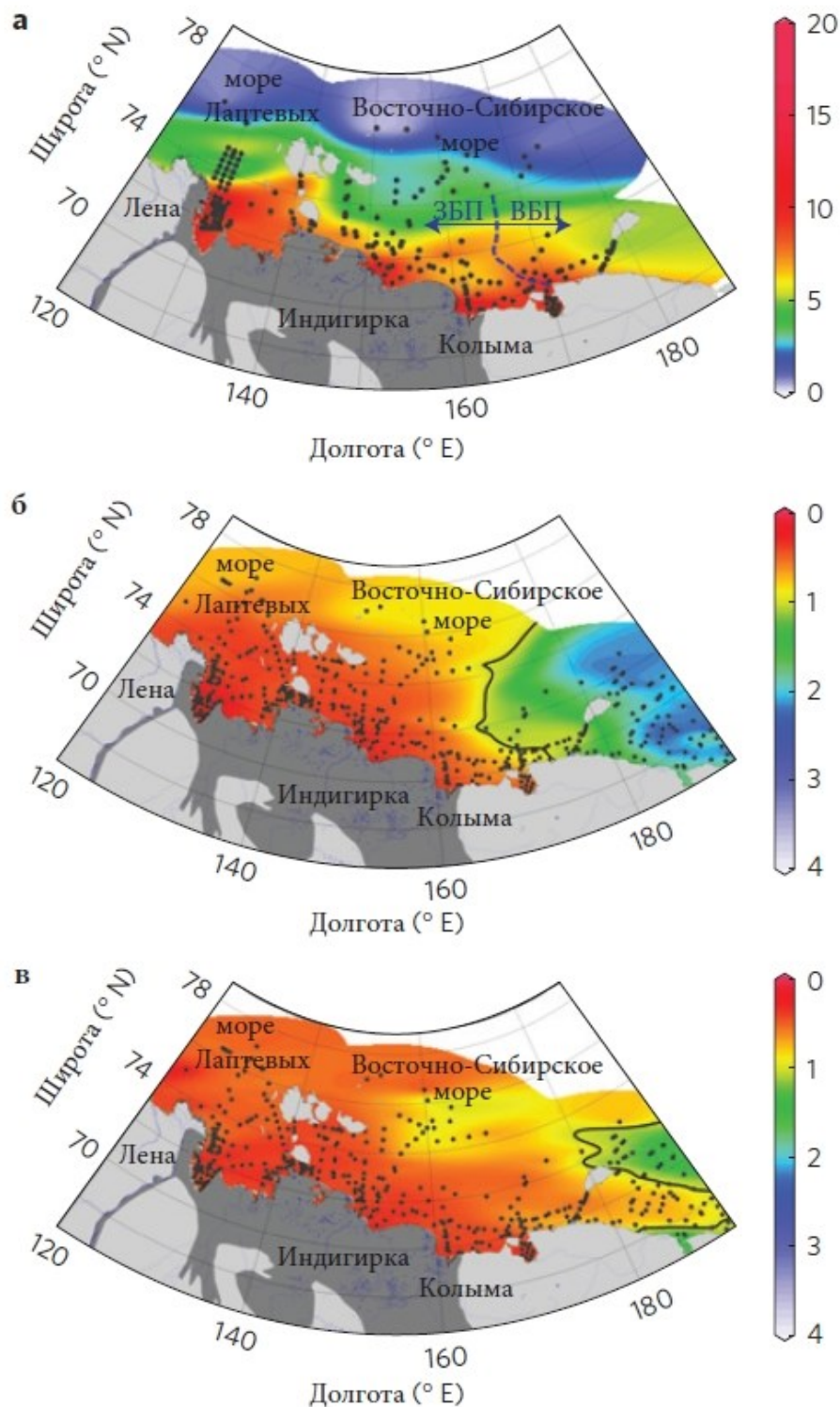
Широкий Восточно-Сибирский арктический шельф (ВСАШ), включающий в себя море Лаптевых, Восточно-Сибирское море и российскую часть Чукотского моря и составляющий 25% от арктического континентального шельфа, является особо уязвимой зоной. ВСАШ получает сток четырех крупных арктических рек (Лены, Индигирки, Яны и Колымы), который аккумулирует воды с обширного дренажного бассейна, подстилаемого вечной мерзлотой. Речной сток представляет собой значимый источник распреснения шельфовых вод [28]; с ним же на шельф поступает терригенный органический углерод (терр-ОУ), мобилизованный в бассейне рек в результате таяния мерзлоты [68, 72, 81]. Прибрежная система ВСАШ, включающая в себя речные банки, дельты и береговую линию, включает и тысячи километров плейстоценового ледового комплекса, состоящего из мерзлых пород с массивными ледяными жилами. Эта система в наибольшей степени подвержена воздействию потепления, начавшегося в раннем Голоцене, когда

море начало наступление на сушу и нынешний шельф оказался затоплен морской водой [65]. Это длительное потепление определило эрозионное разрушение береговых уступов со скоростью до нескольких метров в год, с выделением старого органического вещества, заключенного в мерзлоте, в шельфовые воды [33, 44]. Огромное количество терр-ОУ, поступающее на шельф с речными водами и в результате береговой эрозии, деградировано лишь частично и продолжает разрушаться во время пребывания в шельфовых водах [45, 80]. Продолжающаяся деградация терригенного органического вещества подтверждается высоким уровнем пересыщения вод углекислым газом [6, 22, 63], скоростями изымания растворенного [19] и взвешенного [66] органического вещества, а также молекулярно-специфическим трендом  $\delta^{13}\text{C}-\Delta^{14}\text{C}$  взвешенного органического углерода на арктическом шельфе [81].

Для исследования  $\Omega_{\text{Ag}}$  и выявления факторов, контролирующих ОА в двух биогеохимических провинциях ВСАШ [70] (рис. 3.13а), мы определяли общую щелочность (ТА), рН, растворенный неорганический углерод (DIC),  $\text{pCO}_2$ , растворенный кислород ( $\text{O}_2$ ), кажущееся потребление кислорода (АОУ) окрашенное растворенное органическое вещество (CDOM), взвешенное вещество (SPM), мутность, температуру, соленость, общую биомассу бентоса (TSB), выполнили расчет фракций смешивающихся вод методом Монте-Карло, используя значения солености и тяжелого изотопа кислорода, и оценили соотношения DIC и  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  в образцах проб по отношению к линии консервативного смешения речных и талых вод. Более теплые и пресные воды Западной биогеохимической провинции (ЗБП, расположенной восточнее дельты Лены до  $\sim 160-170^\circ \text{E}$ ) характеризуются сильным влиянием рек и береговой эрозии (рис. 3.13а). Более соленые и холодные воды восточной биогеохимической провинции (ВБП, расположенной восточнее  $160-170^\circ \text{E}$ ), подвержены влиянию, главным образом, обогащенных биогенными веществами вод тихоокеанского генезиса, что определяет высокую летнюю первичную продукция в этой области [21]. Широкий набор данных был получен в 1999, 2000-2005, 2008 и 2011 гг.

Наиболее низкий уровень  $\Omega_{\text{Ag}}$  был обнаружен в ЗБП, где совместное влияние речного стока и поступающего терр-ОУ значительно более интенсивно, чем в ВБП. В ЗБП  $\Omega_{\text{Ag}}$  изменялась от 0.01 до 1.42 (среднее значение = 0.45, стандартное отклонение = 0.23) в поверхностном слое (выше пикноклина) (рис. 3.13б) и от 0.01 до 1.27 (среднее значение = 0.44, стандартное отклонение = 0.23) в придонном слое (ниже пикноклина) (рис. 3.13в). Наиболее низкие величины  $\Omega_{\text{Ag}}$  в ЗБП ассоциировались с наиболее высокими  $\text{pCO}_2$  и низкими рН в поверхностных и придонных водах. В придонном слое воды уменьшение степени насыщения вод  $\text{O}_2$  (<40%) сопровождалось уменьшением рН ( $r = 0.79$ ,  $n=316$ ,  $p < 0,05$ ) и увеличением DIC ( $r = -0.59$ ,  $n=316$ ,  $p < 0,05$ ); обнаруженная сильная корреляция между рН и АОУ ( $r = -0.97$ ,  $n = 108$ ,  $p < 0,05$ ), указывающая на

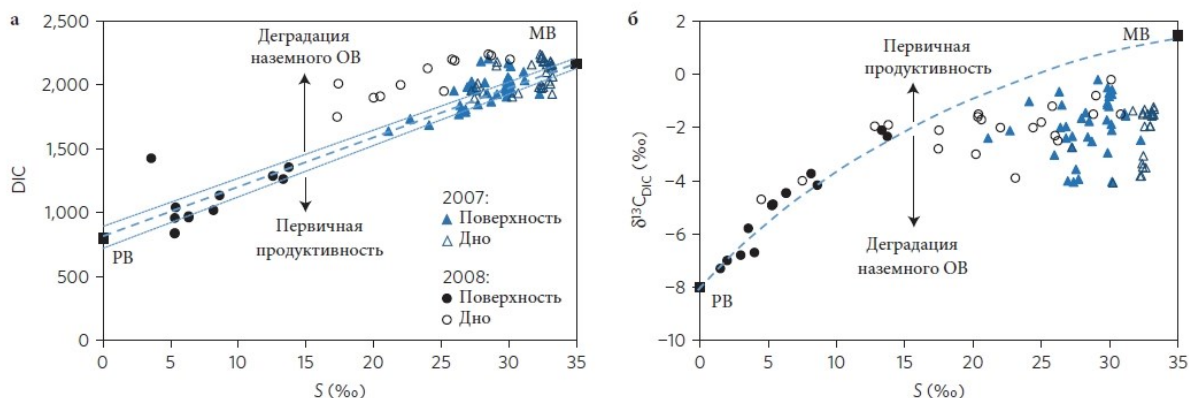
минерализацию органического вещества (ОВ) *in situ*, что проявилось в росте  $p\text{CO}_2$  и уменьшении  $\Omega_{\text{Ag}}$ .



**а)** распределение терр-ОУ ( $\text{мг терр-ОУ (г сух осадка)}^{-1}$ ); распределение  $\Omega_{\text{Ag}}$  в поверхностном **б)** и придонном **в)** слоях (1999-2011 гг.). Пунктирной линией схематически показано положение границы между биогеохимическими провинциями, сплошной линией – изолиния  $\Omega_{\text{Ag}}$ , равная 1.

**Рисунок 3.13** - Пространственное распределение на ВСАШ терр-ОУ в поверхностном слое донных отложений и  $\Omega_{\text{Ag}}$  в водном столбе.

Сравнение между данными наблюдений и консервативной линией смешивания для DIC и  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  показало, что многие из образцов в анализируемом наборе данных не совпадают с линией консервативного смешения между водами реки Лена и морской водой (рис. 3.14). Наибольшее количество значений DIC располагалось над линией смешения, а величины  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  были легче, чем ожидалось; что согласуется с деградацией терр-ОУ и предполагает лишь незначительную роль первичной продуктивности (ПП).



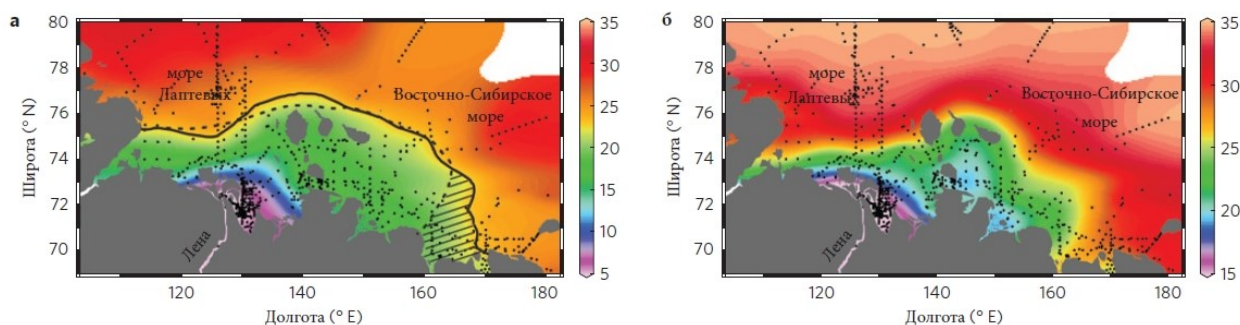
Пунктиром показаны рассчитанные линии смешения. В качестве конечных членов взяты характеристики морской (атлантической) и речной воды [19].

**Рисунок 3.14** - Распределение величин DIC и  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  относительно солёности.

Было показано, что в прибрежной воде ЗБП первичная продуктивность подавлена из-за отсутствия солнечного света вследствие низкой прозрачности шельфовых вод в результате высоких концентраций взвешенного вещества (SPM) и окрашенного растворенного органического вещества (CDOM), поставляемого реками. Действительно, наши данные показали, что средние концентрации SPM и CDOM в поверхностных водах ЗБП были  $12.8 \pm 26.6 \text{ мг л}^{-1}$  и  $25.6 \pm 19.1 \text{ мкг л}^{-1}$  соответственно; то есть в десять раз больше, чем в поверхностных водах ВБП.

$\Omega_{\text{Ar}}$  в ВБП варьировала от 0.45 до 3.28 (среднее значение = 1.74, стандартное отклонение = 0.68) в поверхностных водах и от 0.35 до 2.21 (среднее значение = 0.88, стандартное отклонение = 0.42) в придонном слое воды. Более низкие величины  $\Omega_{\text{Ar}}$  были связаны с более глубокими, солеными водами с низкими рН. Корреляция между рН и  $\text{O}_2$  ( $r = 0.75$ ,  $n = 121$ ,  $p < 0,05$ ), а также между DIC и  $\text{O}_2$  ( $r = -0.64$ ,  $n = 121$ ,  $p < 0,05$ ) в придонной воде однозначно указывает на процессы разложения ОС в толще воды и на границе раздела вода /осадок. В поверхностных водах высокие величины рН коррелировали с пониженными величинами  $\text{pCO}_2$  ( $r = -0.85$ ,  $n=121$ ,  $p < 0,05$ ), как и ожидалось вследствие развития ПП. В то же время, корреляции между  $\text{O}_2$  и  $\text{pCO}_2$  отсутствовала; это могло быть связано с их различными скоростями газообмена в системе океан-атмосфера. Корреляция между  $\Omega_{\text{Ar}}$  и солёностью ( $r = 0.76$ ,  $n=121$ ,  $p < 0,05$ ) могла быть связано с распреснением морской воды. Анализ многолетних данных (1999- 2002 по сравнению с 2008- 2011) выявил значимую тенденцию ( $t(331) = 12.77$ ,  $p < 0,05$ ) снижения  $\Omega_{\text{Ar}}$  в поверхностных водах.

Обнаруженный тренд определяется расширением зоны влияния речных вод, распространившихся с Сибирским прибрежным течением существенно дальше на восток за последние десять лет (рис. 3.15).



а) поверхностный слой, б) придонный слой. Положение изохалины 23 ‰ за период 2000-2012 показано черной линией, заштрихованная область – ее смещение за 12 лет относительно среднего положения в период 1932-2000 гг. Площадь заштрихованной зоны составляет около 116000 км<sup>2</sup>.

**Рисунок 3.15** - Пространственное летнее распределение величин солености (‰) на ВСАШ

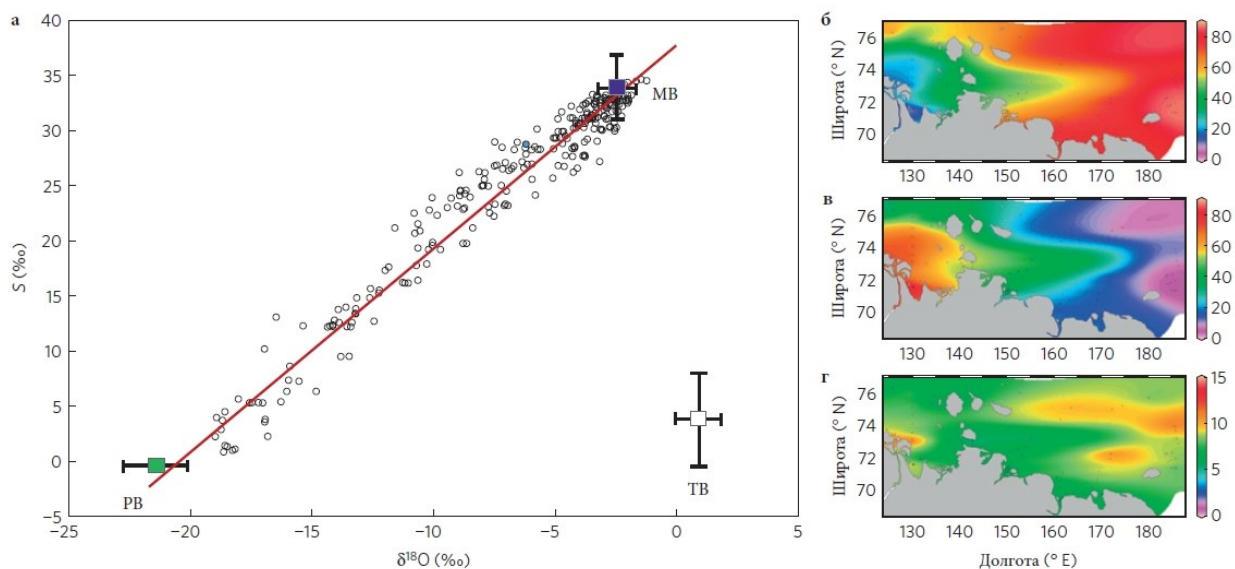
Для того, чтобы оценить вклад источников пресных вод в состояние  $\Omega_{Ag}$  в обоих биогеохимических провинциях, мы провели расчет баланса масс методом Монте-Карло с использованием солености и  $\delta^{18}O$ . Результаты анализа показывают, что средние вклады каждого из трех членов смешения (морская вода, речная вода и талая вода) в поверхностных водах составляют  $59.7 \pm 4\%$ ,  $34.3 \pm 3.5\%$  и  $5.9 \pm 4\%$  в ЗБП и  $87.5 \pm 5.4\%$ ,  $5 \pm 2.8\%$  и  $7.4 \pm 5\%$  в ВБП, соответственно (рис. 3.16).

Поверхностное распределение  $\Omega_{Ag}$  в ЗБП отражает распресняющий эффект речного стока, с которым в шельфовую воду поступает и  $CO_2$ , а также влияние поступающего на шельф и разрушающегося там до углекислого газа терригенного ОВ; в результате в ЗБП  $\Omega_{Ag}$  более, чем в 3.5 раза ниже по сравнению с ВБП, чем в ЕВР (0,45 по сравнению с 1,74,  $t(141) = 20.91$ ,  $p < 0,05$ ).  $\Omega_{Ag}$  в поверхностных водах ВБП колебалась от 0,45 до 3,28, но в среднем была несколько выше 1, что, возможно, отражает взаимодействие между распресняющим эффектом рек и удалением  $CO_2$  в процессе фотосинтеза, поддерживающегося богатыми питательными веществами водами тихоокеанского генезиса [19, 21].

Для того, чтобы исследовать роль распресняющего эффекта рек на изменение рН по сравнению с вкладом терр-ОУ, поступающего в результате береговой эрозии, мы выделили в ЗБП две группы мест, где вклад от каждого источника должен был быть очень высоким: эстуарная зона реки Лены (огромный распресняющий эффект, пять станций) и зона вблизи эрозионного побережья, где скорости разрушения максимальны (наибольший «эрозионный» эффект, три станции). Мы также выделили две группы контрольных участков: одна группа в дельте реки Лена (10 станций), одна группа станций вдалеке от прямого воздействия как речного стока, так и эрозии береговой линии (28 станций). Наши результаты показали, что подкисляющий эффект разложения



терр-ОУ вблизи эрозионного побережья был более, чем в пять раз сильнее, чем у устья реки (531% против 100,5%). Межгодовая изменчивость DIC и  $\Omega_{Ar}$  может быть связана с динамикой скорости береговой эрозии [44] и гидравлического режима арктических рек.



**Рисунок 3.16** - Распределение величин тяжелого изотопа кислорода относительно солености (а); приведены характеристики трех смешивающихся вод – речной (РВ), морской (МВ) и талой (ТВ). Справа приведено поверхностное распределение фракций морской (б), речной (в) и талой (г) воды.

Мы полагаем, что низкие величины  $\Omega_{Ar}$ , наблюдающиеся в придонной воде в обеих биогеохимических провинциях, определяются разложением ОВ *in situ*. Поскольку темпы эрозии береговой линии и подкисляющий эффект от поступления Терр-ОУ в результате береговой эрозии и с речными водами в ЗБП выше, чем в ВБП [44, 63], это приводит к вдвое меньшему среднему значению  $\Omega_{Ar}$  на западе региона, чем на востоке (0,44 по сравнению с 0,88,  $t(158) = 12.35$ ,  $P < 0,054$ ). Поскольку шельфовые воды с  $\Omega_{Ar} < 1$  являются коррозионными, это может привести к растворению  $CaCO_3$ , который образует раковины и скелеты бентических видов. Долгосрочный эффект пониженного  $\Omega_{Ar}$  может привести к снижению биомассы донных кальцифицирующих видов и дальнейшему сокращению их биомассы. Действительно, мы наблюдали, что биомасса макробентоса кальцифицирующих видов варьируется в пять раз, с экстремально низкими значениями в зонах наибольших величин  $pCO_2$  и самых низких  $\Omega_{Ar}$ . Обнаруженное распределение плотности бентического кальцифицирующего сообщества может быть прямым следствием подкисления морской воды.

Результаты этого исследования ясно показывают основную особенность ВСАШ - экстремально высокое подкисление и недосыщение арагонитом шельфовых вод, вызванные

деградацией терр-ОУ, экспортируемого из оттаивающей прибрежной вечной мерзлоты и речным стоком, а также из-за растущего распреснения речным стоком и таянием льда.

В отличие от других морских экосистем, где органический углерод имеет автохтонное (морской планктон) или речное происхождение, на ВСАШ значительный источник терр-ОУ представляет собой береговая эрозия. Анализ двух изотопов углерода ( $\delta^{13}\text{C}$  и  $^{14}\text{C}$ ) в составе органического вещества на арктическом шельфе показал, что древний эрозионный ОУ вечной мерзлоты доминирует в поверхностных донных отложениях шельфа и что  $57 \pm 2\%$  этого терр-ОУ берегового ледового комплекса – плейстоценового возраста [80]. Этот транспортируемый терр-ОУ представляет собой источник ОА на шельфе, в отличие от известного механизма подкисления морских вод в результате поглощения  $\text{CO}_2$  из атмосферы. Стойкое и потенциально увеличивающееся недосыщение Ar вод ВСАШ уже значительно превзошло прогнозируемый на 2100 год уровень, расчеты которого основаны только на поглощении  $\text{CO}_2$  из атмосферы. Поскольку недосыщение арагонитом является характерной особенностью придонных вод всего ВСАШ, мы полагаем, что наблюдаемое подавление бентического кальцифицирующего сообщества может быть распространено на весь шельф, который составляет  $> 25\%$  от Северного Ледовитого океана. Поскольку подкисленные коррозионные воды экспортируются в поверхностный слой центральной части Северного Ледовитого океана, последствия ОА, усиливаемой в результате изменения климата, могут воздействовать на арктические морские экосистемы в более широких масштабах. Выполненное исследование также ставит под сомнение сохранение способности Северного Ледовитого океана поглощать растущее количества антропогенного  $\text{CO}_2$ .

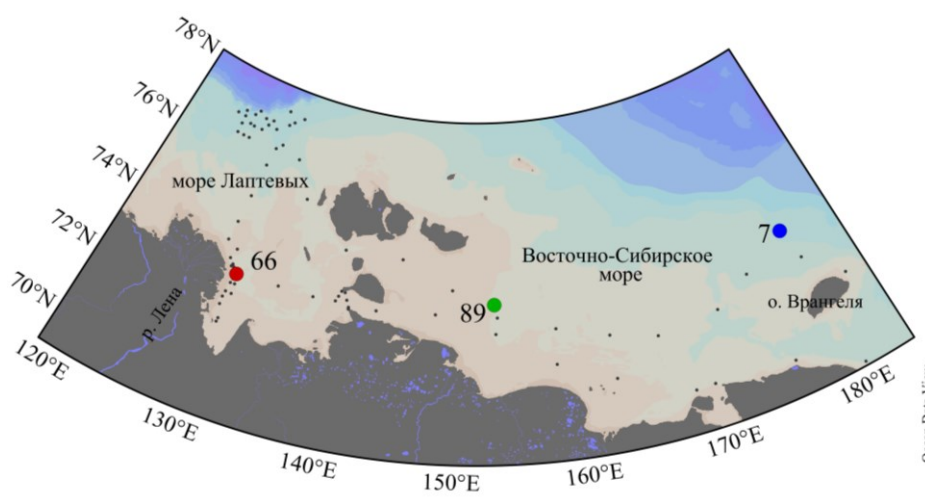
### **3.4 Оптические характеристики окрашенного растворенного органического вещества на Восточно-Сибирском шельфе**

Растворенное органическое вещество (РОВ) природного происхождения является одним из наиболее важных компонентов пресноводных и морских экосистем, играющих ключевую роль в круговороте углерода и изменении климата на планете. Его оптически активная окрашенная фракция (ОРОВ), интенсивно поглощающая солнечную радиацию в ультрафиолетовой и коротковолновой видимой области спектра, в значительной степени определяет оптические свойства природных вод, влияя на глубину фотического слоя, экранируя водную биоту от излишнего воздействия солнечной радиации, а также участвуя в ряде биохимических и фотохимических процессов [58]. В условиях потепления климата, которое в Арктике происходит в 2 раза быстрее, чем в среднем на планете [50], увеличивается речной сток, интенсифицируется таяние многолетней мерзлоты, и все возрастающее количество наземного РОВ (и ОРОВ) выносится на арктический шельф, изменяя биогеохимический режим арктических морей.



Ранее нами были определены связи между концентрацией РОВ и его окрашенной фракцией на акватории Восточно-Сибирского моря, позволяющие восстанавливать поля РОВ из экспресс-измерений ОРОВ [12, 63, 73]. Целью настоящего исследования было изучение оптических характеристик ОРОВ вод Восточно-Сибирского шельфа на основе экспедиционных материалов, полученных в сентябре 2011 г. в рейсе лаборатории арктических исследований ТОИ ДВО РАН на НИС «Академик М.А. Лаврентьев», и возможности их использования для оценки генезиса и состава РОВ.

Комплекс гидрооптических исследований был выполнен на свободной от льда акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирского (рис. 3.17).



**Рисунок 3.17** - Схема района экспедиционных работ на Восточно-Сибирском шельфе в сентябре 2011 г.

Для определения концентрации ОРОВ использовался оптический сенсор WETStar DOM флуориметр (WET Labs Inc.), установленный на гидрологический зонд Seabird19<sup>+</sup>, который позволяет измерять флуоресценцию без предварительной фильтрации воды в условиях *in situ*. Дискретный отбор проб выполнялся батометрами конструкции Нискина из поверхностного и придонного, а также с промежуточных горизонтов в зависимости от глубины места отбора и стратификации водного столба. После фильтрации воды через стекловолокнистый фильтр (GF/F) в этих образцах определялась оптическая плотность ( $A_\lambda$ ) с использованием двухлучевого спектрофотометра ЮНИКО 2804 (длина оптического пути 1 см). Спектры поглощения проб морской воды снимали в диапазоне 200 – 400 нм с разрешением 1 нм и аппроксимировали методом наименьших квадратов по формуле:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp \{-S(\lambda - \lambda_0)\},$$

где  $a(\lambda)$ ,  $a(\lambda_0)$  – коэффициенты поглощения на конкретной длине волны в исследуемом диапазоне и на длине волны  $\lambda_0 = 254$  нм,  $S$  – параметр, характеризующий крутизну спектральной кривой поглощения [2]. Коэффициент поглощения для каждой длины волны рассчитывался по формуле:

$$a(\lambda) = 2.303A(\lambda)/L,$$

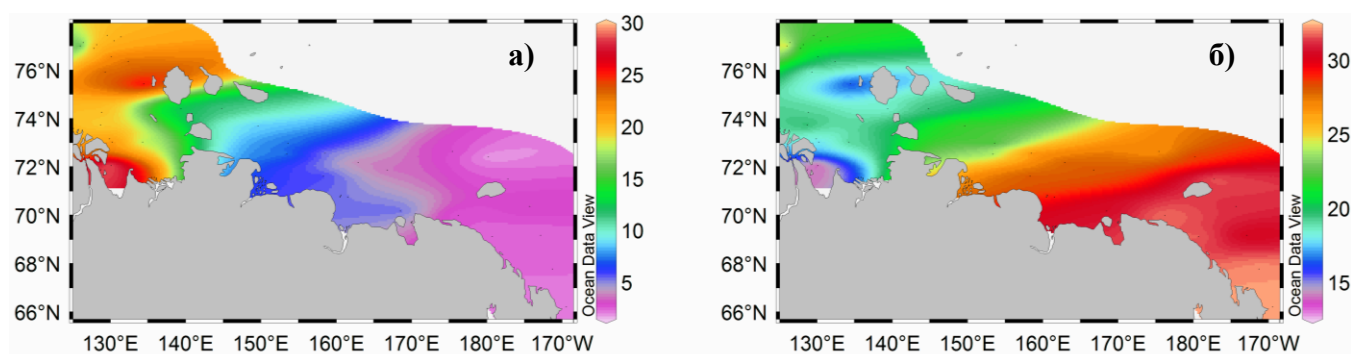
где  $L$  – длина оптического пути в метрах.

Концентрация растворенного органического углерода (РОУ) измерялась в лаборатории гидрохимии ТОИ ДВО РАН на автоанализаторе Shimadzu TOC-VCPN [12].

Для качественного анализа ОРОВ в работе использован ряд оптических характеристик: коэффициент поглощения  $a_{254}$ , спектральный угол наклона  $S$ , отношение спектральных углов наклона  $S_R = S_{275-295} / S_{350-400}$  и коэффициент молярной или специфической абсорбции ( $a^*$ ), который представляет собой отношение коэффициента поглощения на длине волны 254 нм к концентрации РОУ в исследуемом образце.

На рисунке 3.18 представлено пространственное распределение коэффициента поглощения на длине волны 254 нм ( $a_{254}$ ), который служит индикатором концентрации хромофорного РОВ, и солености в поверхностных водах, из которого видно, что по мере удаления от зоны прямого влияния речного стока с ростом солености коэффициент поглощения уменьшается. Высокая степень корреляции этих параметров (коэффициент корреляции  $r = -0.85$ ) подтверждает, что основным источником РОВ на восточно-арктическом шельфе является материковый сток [7, 12, 72].

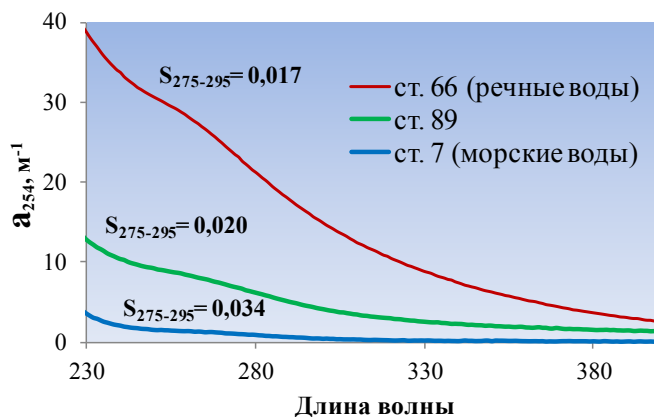
Использование спектральных углов наклона  $S$  позволяет дополнить информацию, получаемую на основе анализа величин поглощения, данными о молекулярном весе и ароматичности растворенных органических веществ [29]. Для детального анализа спектров нами был выбран интервал длин волн 275-295 нм, демонстрирующий наиболее широкую изменчивость оптических параметров в условиях смешения вод, имеющих контрастные оптические характеристики [31, 47].



**Рисунок 3.18** - Распределение коэффициента поглощения ( $a_{254}$ ,  $m^{-1}$ ) (а) и солености (‰) (б) в поверхностных водах морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в сентябре 2011 г.

На рисунке 3.19 показаны спектральные зависимости для трех типичных зон: станции 66, находящейся под мощным влиянием стока реки Лена (море Лаптевых), ст. 89, расположенной в Восточно-Сибирском море (умеренная зона смешения речных и морских вод) и ст. 7, находящейся севернее острова Врангеля, где влияние речного стока минимально (рис. 3.17). На рисунке 3.19

также приведены рассчитанные для этих же станций величины  $S_{275-295}$ . Минимальные значения  $S_{275-295}$  ( $0.017 \text{ нм}^{-1}$ ), обнаруженные в придельтовой зоне моря Лаптевых, являются характерными для вод с доминирующим влиянием аллохтонного РОВ. Так, в реке Юкон в период пика паводка  $S_{275-295}$  достигают значения  $0.012 \text{ нм}^{-1}$  [77]. В восточной части ВСМ  $S_{275-295}$  увеличивается до  $0.034 \text{ нм}^{-1}$ , что близко к значениям, полученным ранее в автохтонных водах [47].

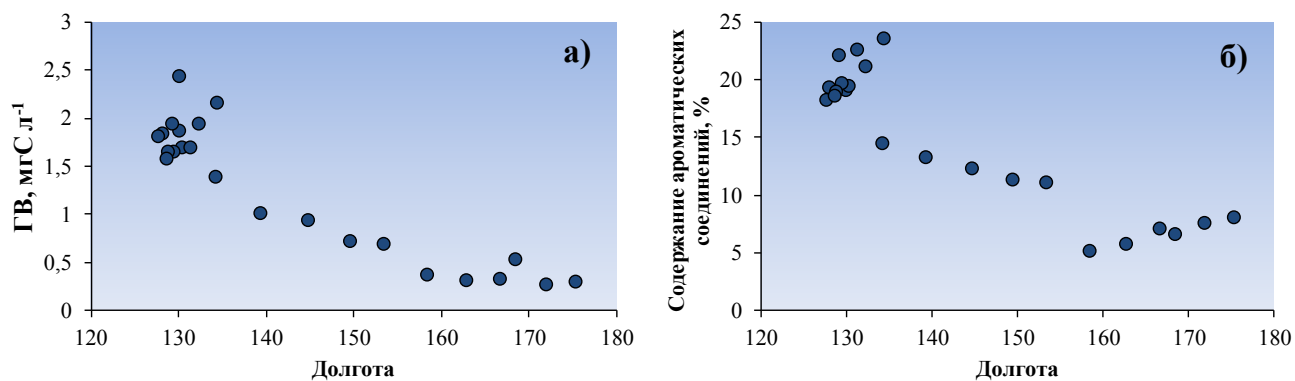


**Рисунок 3.19** - Зависимость коэффициента поглощения ОРОВ от длины волны (нм) для трех различных районов Восточно-Сибирского шельфа.

Как отмечалось выше, для типичных районов шельфа были рассчитаны и величины  $S_R$ . Самые низкие величины также получены в юго-восточной части моря Лаптевых в придельтовой зоне ( $0.92$ ), что близко к значениям, обнаруженным в арктических реках (Юкон и Енисей –  $0.79$ , [77]). Разницу в величинах можно объяснить тем, что наши исследования проводились в сентябре, а в работе Спенсера с соавторами [77] приведены расчеты, полученные во время паводка, когда в составе РОВ преобладают продукты распада высших наземных растений. Максимальные величины  $S_R$  ( $4.76$ ) обнаружены в зоне влияния высокопродуктивных тихоокеанских вод севернее острова Врангеля.

По величине оптической плотности на длине волны  $254 \text{ нм}$  для разных районов ВСШ методом, описанным в работе [17], были определены концентрации гуминовых веществ (ГВ) в воде. На рисунке 3.20а приведено пространственное распределение полученных значений для ВСШ, из которого видно, что по мере удаления от устьев рек содержание ГВ уменьшается: на станциях, находящихся под влиянием вод Чукотского моря концентрация ГВ в 5 раз меньше, чем в юго-восточной части моря Лаптевых, где преобладают воды, распресненные стоком реки Лена. В работе [82] было проведено исследование процентного содержания ароматических соединений для проб, взятых из различных природных источников (от морских вод до заболоченных озер) с помощью ядерной магнитно-резонансной спектроскопии. Была обнаружена сильная корреляция ( $r = 0.98$ ) между коэффициентом молярной абсорбции ( $a^*_{\lambda}$ ) и содержанием ароматических углеводов. В исследовании использовались ГВ, обладающие различными химическими свойствами, поэтому результаты являются репрезентативными для широкого диапазона

природных объектов. Используя приведенное в работе уравнение, мы рассчитали процентное содержание ароматических соединений и для наших проб (рис. 3.20б), которое совпадает с распределением содержания гуминовых веществ, подтверждая тот факт, что ГВ, входящие в ОРОВ терригенного происхождения, имеют высокую ароматичность. Из представленных рисунков видна тенденция уменьшения ароматичности ОРОВ по мере удаления от зоны влияния речного стока.



**Рисунок 3.20** - Распределение содержания гуминовых веществ (а) и степени ароматичности соединений (б) в поверхностных водах Восточно-Сибирского шельфа в сентябре 2011 г.

Таким образом, на основе экспериментальных данных впервые показана возможность использования оптических характеристик не только для количественных оценок [12, 63], но и для определения состава РОВ в водах ВСШ. Подтверждено, что основная часть прибрежно-шельфовой зоны восточной части моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря находится под влиянием терригенного растворенного органического вещества, поступающего с материковым стоком. Основная часть наземного ОРОВ представлена гуминовыми соединениями с высокой степенью ароматичности и большим молекулярным весом.

### 3.5 Список использованных источников к разделу 3

1. Григорьев, М.Н. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции / М.Н. Григорьев, С.О. Разумов, В.В. Куницкий, В.Б. Спектор // Криосфера Земли. – 2006. – № 4. – С. 74-95.
2. Ерлов, Н.Г. Оптика моря / Н.Г. Ерлов. – Л. : Гидрометеиздат, 1980. - 248 с.
3. Маккавеев, П.Н. Гидрохимическая характеристика вод западной части Карского моря / П.Н. Маккавеев, П.А. Стунжас, З.Г. Мельникова [и др.] // Океанология. - 2010. - Т. 50, № 5. - С.730-739.
4. Матуль, А.Г. Современные и позднеголоценовые природные условия на шельфе юго-восточной части моря Лаптевых по данным микрофоссилий / А.Г. Матуль, Т.А. Хусид, В.В. Мухина [и др.] // Океанология. - 2007. - Т. 47, № 1. - С. 90-101.

5. Недашковский, А.П. Щелочность морского льда высокоширотной Арктики (наблюдения на дрейфующей станции “Северный полюс-34”) и оценка роли арктического льда в обмене CO<sub>2</sub> / А.П. Недашковский, С.В. Хведынич, Т.В. Петровский // Океанология. - 2009. - Т. 49, № 1. - С. 61–69.
6. Пипко, И.И. Изменчивость параметров карбонатной системы в прибрежно-шельфовой зоне Восточно-Сибирского моря в осенний сезон / И.И. Пипко, И.П. Семилетов, П.Я. Тищенко [и др.] // Океанология. – 2008. – Т. 48, №1. – С. 59-72.
7. Пипко, И.И. Карбонатные параметры вод реки Лены: характеристики и распределение / И.И. Пипко, С.П. Пугач, О.В. Дударев [и др.] // Геохимия. – 2010. – Т. 48, №11. – С. 1206-1213.
8. Пипко, И.И. Карбонатные характеристики вод материкового склона Северного Ледовитого океана / И.И. Пипко, С.П. Пугач, И.П. Семилетов [и др.] // Доклады Академии наук. - 2011. - Т. 438, № 5. -С. 699–704.
9. Пипко, И.И. О карбонатной системе вод Восточно-Сибирского моря / И.И. Пипко, С.П. Пугач, И.П. Семилетов // Доклады Академии наук. - 2005. - Т. 402, № 3. - С. 398-401.
10. Пипко, И.И. Об обмене CO<sub>2</sub> в системе океан-атмосфера на шельфе Чукотского моря / И.И. Пипко, И.П. Семилетов, С.П. Пугач // Доклады Академии наук. – 2006. – Т. 410, №5. – С. 679-683.
11. Пипко, И.И. Распределение парциального давления CO<sub>2</sub> в придонных водах Восточно-Сибирского моря в осенний сезон / И.И. Пипко, С.П. Пугач, И.П. Семилетов // Доклады Академии Наук. – 2009. – Т. 425, № 2. – С. 245-250.
12. Пугач, С.П. Динамика растворенного окрашенного органического вещества на шельфе Восточно-Сибирского моря / С.П. Пугач, И.И. Пипко // Доклады Академии Наук. – 2012. – Т 447, №6. – С. 671-674.
13. Рубцова, С.И. К методике экспериментальной оценки скорости осаждения иловых частиц морских донных осадков / С. И. Рубцова // Экология моря. - Севастополь, 2000. - Вып. 50. - С. 109-110.
14. Руководство по химическому анализу морских вод. - СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 264 с.
15. Семилетов, И.П. Разрушение мерзлых пород побережья как важный фактор в биогеохимии шельфовых вод Арктики / И.П. Семилетов // Доклады Академии наук. - 1999. - Т. 368, № 5. - С. 679-682.
16. Суховой, В.Ф. Моря Мирового океана / В.Ф. Суховой. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 287 с.
17. Ходоренко, Н.Д. Кинетика извлечения и количественное определение гуминовых веществ в донных осадках / Н.Д. Ходоренко, Т.И. Волкова, В.И. Звалинский [и др.] // Геохимия. – 2012. – № 4. – С. 423-430.
18. ACIA: Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment, Chapter 4: Future Climate Change: Modeling and Scenarios / Cambridge : Cambridge University Press, 2005. – P. 99-150.

19. Alling, V. Nonconservative behavior of dissolved organic carbon across the Laptev and East Siberian seas / V. Alling, L. Sanchez-Garcia, D. Porcelli [et al.] // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2010. – Vol. 24. – GB4033.
20. AMAP Assessment 2013: Arctic Ocean Acidification / Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Oslo : AMAP, 2013. – viii + 99 p.
21. Anderson, L.G. East Siberian Sea, an Arctic region of very high biogeochemical activity / L.G. Anderson, G. Björk, S. Jutterström, [et al.] // *Biogeosciences*. – 2011. – Vol. 8. – P. 1745-1754.
22. Anderson, L.G. Fluxes and transformation of carbon in the Siberian shelf seas under changing environment / L.G. Anderson, S. Jutterström, S. Hjalmarsson [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – Vol. 36, L20601.
23. Anderson, L.G. Variability in river runoff distribution in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean / L.G. Anderson, S. Jutterström, S. Kaltin [et al.] // *J. Geoph. Res.* 2004. V. 109. C01016, doi:10.1029/2003JC001773.
24. Ardyna, M. Parameterization of vertical chlorophyll a in the Arctic Ocean: impact of the subsurface chlorophyll maximum on regional, seasonal, and annual primary production estimates / M. Ardyna, M. Babin, M. Gosselin [et al.] // *Biogeosciences*. - 2013. - V. 10. - P. 4383–4404, doi:10.5194/bg-10-4383-2013.
25. Bates, N.R. Ocean acidification and biologically induced seasonality of carbonate mineral saturation states in the western Arctic Ocean / N.R. Bates, J.T. Mathis, L.W. Cooper // *J. Geophysical. Res.* – 2009. - Vol. 114, C11007.
26. Bauch, D. Eurasian Arctic shelf hydrography: Exchange and residence time of southern Laptev Sea waters / D. Bauch, I. Dmitrenko, S. Kirillov [et al.] // *Continental Shelf Res.* - 2009. - V. 29. - P. 1815-1820.
27. Bauch, D. Atmospheric controlled freshwater release at the Laptev Sea continental margin / D. Bauch, M. Gröger, I. Dmitrenko [et al.] // *Polar Res.* - 2011. - V. 30, doi: 10.3402/polar.v30i0.5858.
28. Bianchi, T.S. Enhanced transfer of terrestrially derived carbon to the atmosphere in a flooding effect / T.S. Bianchi, F. Garcia-Tigreros, S.A. Yvon-Lewis [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* – 2013. – Vol. 40. – P. 116-122.
29. Blough, N.V. Chromophoric DOM in the coastal environment / N.V. Blough, R. Del Vecchio // *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. – San Diego : Academic Press, 2002. – P. 509–546.
30. Boike, J. Baseline characteristics of climate, permafrost, and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011) / J. Boike, B. Kattenstroth, K. Abramova [et al.] // *Biogeosciences*. - 2013. - V. 10. - C. 2105–2128, doi:10.5194/bg-10-2105-2013.

31. Carder, K.L.R. Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll / K.L.R. Carder, G. Steward, G.R. Harvey [et al.] // *Limnology and Oceanography*. – 1989. – Vol. 34. – P. 68–81.
32. Carmack, E.C. The alpha/beta ocean distinction: freshwater fluxes, ventilation, nutrients and primary productivity in high-latitude seas / E.C. Carmack // *Deep-Sea Res. II*. - 2007. - V. 54. - P. 2578–2598.
33. Charkin, A.N. Seasonal and interannual variability of sedimentation and organic matter distribution in the Buor Khaya Gulf – the primary recipient of input from Lena River and coastal erosion in the SE Laptev Sea / A.N. Charkin, O.V. Dudarev, I.P. Semiletov [et al.] // *Biogeosciences*. – 2011. – Vol. 8. – P. 2581-2594.
34. Chen, C.T.A. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO<sub>2</sub> / C.T.A. Chen, A.V. Borges // *Deep-Sea Research II*. - 2009. - Vol. 56. - P. 578–590.
35. Dickson, A.G. A comparison of the equilibrium constants for the dissociation of carbonic acid in seawater media / A.G. Dickson, F.J. Millero // *Deep-Sea Res.* - 1987. - V. 34. - P. 1733–1743.
36. Dmitrenko, I. Oceanographic causes for transarctic ice transport of river discharge. / I.A. Dmitrienko, P. Golovin, V. Gribanov [et al.] // In: Kassens H., Bauch H.A., Dmitrenko I.A. et al. (Eds.), *Land–Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History*. - Springer-Verlag, Berlin, P. 73– 92. 1999.
37. Dmitrenko, I.A. Wind-driven summer surface hydrography of the eastern Siberian shelf / I.A. Dmitrienko, S. Kirillov, H. Eicken [et al.] // *Geoph. Res. Letters*. - 2005. - V. 32. - L14613, doi:10.1029/2005GL023022.
38. Doney, S.C. Ocean acidification: the other CO<sub>2</sub> problem / S.C. Doney, V.J. Fabry, R.A. Feely [et al.] // *Annual Reviews of Marine Science*. – 2009. – Vol. 1. – P. 169-192.
39. Fichot, C.G. Pan-Arctic distributions of continental runoff in the Arctic Ocean / C.G. Fichot, K. Kaiser, S.B. Hooker [et al.] // *Scientific Report*. - 2013. - V. 3, № 1053, doi:10.1038/srep01053.
40. Gao, Z. Distribution and air-sea fluxes of carbon dioxide in the Western Arctic Ocean / Z. Gao, L. Chen, H. Sun [et al.] // *Deep-Sea Res. II*. - 2012. - V. 81-84. - P. 46-52.
41. Gordeev, V.V. Concentrations of major elements and their outflow into the Laptev Sea by the Lena River / V.V. Gordeev, I.S. Sidorov // *Marine Chemistry*. – 1993. – Vol. 43. – P. 33-45.
42. Gordeev, V.V. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements and nutrients to the Arctic Ocean / V.V. Gordeev, J.M. Martin, I.S. Sidorov, M.V. Sidorova // *Amer. J. Sci.* – 1996. – Vol. 296. – P. 664-691.
43. Guinotte, J.M. Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems / J.M. Guinotte, V.J. Fabry // *Annals of the New York Academy of Science*. – 2008. – Vol. 1134. – P. 320-342.

44. Günther, F. Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region / F. Günther, P.P. Overduin, A.V. Sandakov [et al.] // *Biogeosciences*. – 2013. – V. 10. – P. 4297-4318.
45. Gustafsson, Ö. Widespread release of old carbon across the Siberian Arctic echoed by its large rivers / Ö. Gustafsson, B.E. van Dongen, J.E. Vonk [et al.] // *Biogeosciences*. – 2011. – Vol. 8. – P. 1737-1743.
46. Heiskanen, A.S. Distribution and sinking rates of phytoplankton, detritus and particulate biogenic silica in the Laptev Sea and Lena River (Arctic Siberia) / A.S. Heiskanen, A. Keck // *Mar. Chem.* - 1996. - V. 53. - P. 229–245.
47. Helms, J.R. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter / J.R. Helms, A. Stubbins, J.D. Ritchie [et al.] // *Limnol. Oceanogr.* – 2008. – Vol. 53, N 3. – P. 955–969.
48. Hoegh-Guldberg, O. The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems / O. Hoegh-Guldberg, J.F. Bruno // *Science*. – 2010. - Vol. 328. – P. 1523-1528.
49. Holemann, J.A. Near-bottom water warming in the Laptev Sea in response to atmospheric and sea-ice conditions in 2007 / J.A. Holemann, S. Kirillov, T. Klagge [et al.] // *Polar Res.* - 2011. - V. 30, № 6425, doi: 10.3402/polar.v30i0.6425.
50. IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis / Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2007. – P. 996.
51. Jakobsson, M. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 / M. Jakobsson, L. A. Mayer, B. Coakley [et al.] // *Geophysical Research Letters*. - 2012. - V. 39. -L12609.
52. Lansard, B. Seasonal variability of water mass distribution in the southeastern Beaufort Sea determined by total alkalinity and  $\delta^{18}\text{O}$  / B. Lansard, A. Mucci, L.A. Miller [et al.] // *J. Geoph. Res.* - 2012. - V. 117, C03003, doi:10.1029/2011JC007299.
53. Lantuit, H. The arctic coastal dynamics database. A new classification scheme and statistics on arctic permafrost coastlines / H. Lantuit, P.P. Overduin, N. Couture [et al.] // *Estuaries and Coasts*. - 2012. - V. 35, № 2. - P. 383–400.
54. Le Quéré, C. Global carbon budget 2013/ C. Le Quéré, G.P. Peters, R.J. Andres [et al.] // *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* - 2013. - Vol. 6. - P. 689-760.
55. Lewis, E. Program Developed for CO<sub>2</sub> System Calculations / E. Lewis, D.W.R. Wallace // ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. – 1998.



56. Manno, C., Morata N., Primicerio R. Combined effect of ocean acidification and seawater freshening: response of pteropod swimming behavior / C. Manno, N. Morata, R. Primicerio // AGU Fall Meeting. 3- 7 December 2012. San Francisco, USA. 2012. Abstract OS53C-1987.
57. Mehrbach, C. Measurements of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure / C. Mehrbach, C.H. Culberson, J.E. Hawley [et al.] // *Limnology and Oceanography*. - 1973. - V. 18, № 6. - P. 897-907.
58. Mopper, K. Fluorescence as a possible tool for studying the nature and water column distribution of DOC components / K. Mopper, C.A. Schultz // *Marine Chemistry*. – 1993. – Vol. 41, N 1-3. – P. 229–238.
59. Mucci, A. The solubility of calcite and aragonite in seawater at various salinities, temperatures, and one atmosphere total pressure / A. Mucci // *American Journal of Science*. – 1983. – Vol. 283. – P. 780-799.
60. Murata, A. Summertime CO<sub>2</sub> sinks in shelf and slope waters of the western Arctic Ocean / A. Murata, T. Takizawa // *Continental Shelf Res.* - 2003. - V. 23. - P. 753-776.
61. Orr, J.C. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms / J.C. Orr, V.J. Fabry, O. Aumont // *Nature*. – 2005. - Vol. 437. – P. 681-686
62. Peterson, B.J. Increasing river discharge to the Arctic Ocean / B.J. Peterson, R.M. Holmes, J.W. McClelland [et al.] // *Science*. – 2002. – Vol. 298. – P. 2171–2173.
63. Pipko, I. I. Interannual variability of air-sea CO<sub>2</sub> fluxes and carbon system in the East Siberian Sea / I. I. Pipko, I. P. Semiletov, S. P. Pugach [et al.] // *Biogeosciences*. - 2011. - Vol. 8. - P. 1987-2007.
64. Pipko, I.I. Carbonate chemistry dynamics in Bering Strait and the Chukchi Sea / I.I. Pipko, I.P. Semiletov, P.Ya. Tishchenko [et al.] // *Progress in Oceanography*. – 2002. – Vol. 55, N 1-2. – P. 77-94.
65. Romanovskii, N.N. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian seas / N.N. Romanovskii, H.-W. Hubberten, A. Gavrilov [et al.] // *Geo Mar. Lett.* – 2005. – Vol. 25. – P. 167-182.
66. Sánchez-García, L. Distribution, sources and inventories of particulate organic carbon in the Laptev and East Siberian Seas / L. Sánchez-García, V. Alling, S. Pugach [et al.] // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2011. – Vol. 25. – GB2007.
67. Savelieva, N.I. A climate shift in seasonal values of meteorological and hydrological parameters for Northeastern Asia / N.I. Savelieva, I.P. Semiletov, L.N. Vasilevskaya [et al.] // *Prog. Oceanogr.* – 2000. – Vol. 47, N 2–4. – P. 279–297.
68. Semiletov, I. P. On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System / I.P. Semiletov, N.E. Shakhova, V.I. Sergienko [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2012. – Vol. 7. – 015101.

69. Semiletov, I. P. Space-time dynamics of carbon and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay and adjacent part of the Laptev Sea / I.P. Semiletov, N.E. Shakhova, I.I. Pipko [et al.] // *Biogeosciences*. – 2013. – Vol. 10, N 9. – P. 5977-5996.
70. Semiletov, I. The East-Siberian Sea as a transition zone between the Pacific origin water and local shelf water / I. Semiletov, O. Dudarev, V. Luchin [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – Vol. 32. – L10614.
71. Semiletov, I.P. Atmospheric carbon emissions from northern lakes: a factor of global significance. / I.P. Semiletov, I.I. Pipko, N.Ya. Pivovarov [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 1996. V. 30. - P. 1657-1671.
72. Semiletov, I.P. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion / I.P. Semiletov, I.I. Pipko, N.E. Shakhova [et al.] // *Biogeosciences*. – 2011. – Vol. 8. – P. 2407-2426.
73. Semiletov, I.P. Carbonate chemistry dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean: Pacific sector of the Arctic / I.P. Semiletov, I.I. Pipko, I. Repina [et al.] // *Journal of Marine Systems*. – 2007. – Vol. 66, N 1-4. – P. 204-226.
74. Semiletov, I.P. The Dispersion of Siberian River Flows into Coastal Waters: Meteorological, Hydrological and Hydrochemical Aspects / I. P. Semiletov, N. I. Savelieva, G. E. Weller [et al.]; // *The freshwater budget of the Arctic Ocean* / ed. E.L. Lewis. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2000. – P. 323-366.
75. Serreze, M.C. The Arctic Amplification Debate / M.C. Serreze, J.A. Francis // *Climatic Change*. - 2006. - V. 76. - P. 241–264, doi: 10.1007/s10584-005-9017-y.
76. Shakhova, N. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf / N.E. Shakhova, I.P. Semiletov, I. Leifer [et al.] // *Nature Geosciences*. – 2014. – Vol. 7. – P. 64-70.
77. Spencer, R.G.M. Detecting the signature of permafrost thaw in Arctic rivers / R.G.M. Spencer, P.J. Mann, T. Dittmar [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2015. – Vol. 42. – P. 2830–2835.
78. Steinacher, M. Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model / M. Steinacher, F. Joos, T.L. Frölicher [et al.] // *Biogeosciences*. - 2009. - V. 6. - P. 515–533.
79. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean* / R. Stein, R.W. MacDonald (Eds.). – Berlin: Springer-Verlag, 2004. – 363 p.
80. Vonk, J.E. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia / J.E. Vonk, L. Sánchez-García, B.E. van Dongen [et al.] // *Nature*. – 2012. – Vol. 489. – 137-140.
81. Vonk, J.E. Permafrost-carbon complexities / J.E. Vonk, Ö. Gustafsson // *Nature Geoscience*. – 2013. – Vol. 6. – P. 675–676.

82. Weishaar, J.L. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon / J.L. Weishaar, G.R. Aiken, B.A. Bergamaschi [et al.] / *Environ. Sci. Technol.* – 2003. – Vol. 37. – P. 4702–4708.

83. Yamamoto-Kawai, M. Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: effects of ocean acidification and sea ice melt / M. Yamamoto-Kawai, F.A. McLaughlin, E.C. Carmack [et al.] // *Science*. - 2009. - V. 326. - P. 1098–1100, doi:10.1126/science.1174190.

84. Yamamoto-Kawai, M. Freshwater and brine behaviors in the Arctic Ocean deduced from historical data of  $\delta^{18}\text{O}$  and alkalinity (1929–2002 A. D.) / M. Yamamoto-Kawai, N. Tanaka, S. Pivovarov // *J. Geoph. Res.* - 2005. - V. 110. - C10003, doi:10.1029/2004JC002793.

## **4 Процессы современного криоморфолитогенеза и состояние подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском арктическом шельфе**

Восточно-арктический шельф – идеальная природная платформа для изучения процессов осадконакопления и рельефообразования в области развития охлажденных ниже 0° позднечетвертичных (многолетнемерзлых) и новообразованных отложений, в совокупности определяющих облик современного шельфа и понятие «криолитоморфогенеза». Ввиду недостаточной изученности некоторые его аспекты до сих пор остаются дискуссионными, требуют неоднозначного подхода к решению. Абсолютно ясно, что познание особенностей криолитоморфогенеза - ключ к пониманию нередко феноменальных природных процессов. Основу новых результатов составляют не теоретические разработки, а натурные наблюдения на модельных полигонах различных пространственных масштабов.

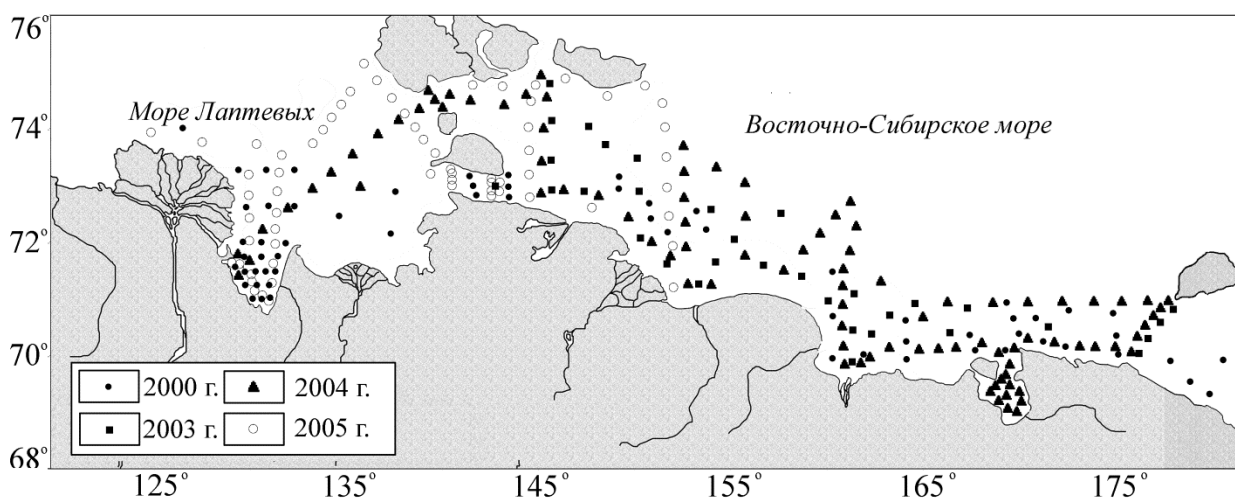
### **4.1 Потоки взвешенного материала**

В рамках проблемы деградации криолитозоны системы «суша-шельф» необходимо выяснить особенности формирования межгодовой и короткопериодной изменчивости распределения взвеси в шельфовых морях Восточной Арктики. Работа базируется на результатах четырех международных экспедиций, организованных лабораторией арктических исследований ТОИ ДВО РАН. Комплекс междисциплинарных наблюдений выполнен на 289 океанографических станциях арктическим летом 2000, 2003, 2004 и 2005 гг. (рис. 4.1). Взвесь выделялась ультрафильтрацией проб воды на мембранные фильтры Millipore с диаметром калиброванных пор 0.45 мкм [11]. Изучение термохалинных характеристик и мутности вод осуществлялось STD-зондом «SeaBird 19Plus», оснащенным сенсором мутности «OBS-3». При интерпретации полученных результатов использовались данные по приземному давлению, скорости и направлению ветра (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis>), ледовому покрову (<http://nsidc.org/data>), а также спутниковые изображения морской акватории (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>).

**Пространственная структура распределения взвеси в сентябре 2000 г.** Годовой водный сток р. Лена, в значительной степени распресняющий восточную часть моря Лаптевых (ВМЛ) и западную половину Восточно-Сибирского моря (ЗВСМ), на 17% превысил среднемноголетний показатель (табл. 4.1). Близость к побережью кромки дрейфующего ледового поля наряду с ветровым и конвективным перемешиванием, привели к выхолаживанию свободной ото льда акватории. Северо-западные ветры вызвали нагон вод к побережью. Синоптическая обстановка в ЗВСМ осложнилась сильным волнением. В такой обстановке начался размыв береговых

термоабразионных уступов и мобилизация во взвесь активного слоя осадков подводного берегового склона.

Над обширным мелководьем восточнее острова Большой Ляховский в результате штормового перемешивания сформировалось поле с высоким и однородным по вертикали содержанием взвеси (ВМ). Такое распределение отражает равновесное состояние восходящих и нисходящих токов турбулентного перемешивания в аседиментогенном волновом поле [8, 16-17]. Содержание ВМ на мелководье ЗВСМ варьировало в пределах  $26 \div 106$  мг/л ( $\bar{x}=59$  мг/л) (табл. 4.1). Области высокого содержания ВМ идентифицируются на спутниковых изображениях по бурому цвету водной поверхности. Гидрометеорологическая обстановка в ВВСМ (восточная часть Восточно-Сибирского моря) выделялась сложными ледовыми условиями. Дрейфующие льды лимитировали развитие сильного волнения и на одном из участков приблизились к о. Айон (язык Айонского ледового массива) вплотную приблизился к берегу. В результате на пути взвесенесущего потока вод Сибирского Прибрежного течения возник природный седиментационный барьер ледового типа. При его пересечении с запада на восток содержание ВМ уменьшилось почти в 4 раза (рис. 4.2).



**Рисунок – 4.1** Район исследований и положение океанографических станций многолетних наблюдений

**Пространственная структура распределения взвеси в сентябре 2003 г.** При слабых ветрах высота волнения в ЗВСМ не превышала 1 м, а в ВВСМ доминировала невысокая остаточная зыбь. Около 60% акватории ВСМ освободилось от полей дрейфующих льдов (рис. 4.2). Годовой сток реки Лена снизился относительно среднемноголетнего почти на 13%, однако под влиянием отжимных западных и юго-западных ветров граница области смешения сместилась от меридиана  $163^\circ$  в.д. (среднемноголетнее положение) в Колымском заливе на 390 км к востоку,

почти до пролива Лонга. В отличие от 2000 г. средняя соленость в ВВСМ в 2003 г. уменьшилась на 2.5‰ и на 3.4‰ в ЗВСМ.

**Таблица – 4.1** Параметры межгодовой изменчивости термохалинной структуры вод и содержания взвеси

Параметры	Годы	ВМЛ		ЗВСМ		ВВСМ		В целом для ВМЛ и ВСМ	
		пов.	прид.	пов.	прид.	пов.	прид.	пов.	прид.
ВМ, min÷max	2000	2.2÷11.1 (n=26)	3.9÷25.5 (n=26)	4.7÷79.7 (n=20)	10.6÷106 (n=20)	1.2÷3.6 (n=17)	2.4÷7.9 (n=17)	1.2÷79.7 (n=63)	2.4÷106(n=63)
	2003	-	-	0.5÷17.7 (n=21)	1.7÷29 (n=21)	0.1÷2.4 (n=23)	1.2÷4.1 (n=23)	0.1÷17.7 (n=44)	1.2÷29 (n=44)
	2004	0.96÷7.8 (n=11)	1.3÷13.1 (n=11)	0.6÷29 (n=53)	3.6÷74.1 (n=53)	0.2÷1.7 (n=32)	0.9÷6.2 (n=32)	0.2÷29 (n=96)	0.9÷74 (n=96)
	2005	1.6÷98.4 (n=33)	5.1÷156 (n=33)	1.7÷242 (n=53)	2.4÷289 (n=53)	-	-	1.6÷242 (n=86)	2.4÷289 (n=86)
ВМ, x	2000	4.9	14.1	27.7	30.1	2.6	4.6	11.7	16.2
	2003	-	-	5.1	7.8	0.8	2.4	2.9	5.1
	2004	2.2	8.6	8.7	15.5	0.9	2.4	3.9	8.8
	2005	12	30.5	28.2	32.2	-	-	20.1	31.3
Т, min÷max	2000	1.51÷8.2	-1.3÷4.1	1.4÷4.7	0.7÷3.6	-0.9÷1.4	-1.8÷0.8	-0.9÷8.2	-1.8÷4.1
	2003	-	-	0.9÷4.6	-0.6÷3.9	0.3÷1.9	-1.4÷0.1	0.3÷4.6	-1.4÷3.9
	2004	0.39÷4.9	-1.2÷2.1	0.8÷6.3	-1.3÷6	0.3÷8.2	-1.6÷7.9	0.3÷8.2	-1.6÷7.9
	2005	2.32÷5.2	-1.2÷5.1	1.8÷3.8	0.7÷3.8	-	-	1.8÷5.2	-1.2÷5.1
Т, x	2000	6.2	0.2	2.7	2.4	0.5	-0.3	3.1	0.6
	2003	-	-	2.6	1	1.2	-1	1.9	0
	2004	2.1	0.2	2.9	0.9	3.5	0.4	2.8	1.5
	2005	3.8	0.8	2.7	2.7	-	-	3.2	1.7
S, min÷max	2000	2.18÷26.2	16.6÷31.9	10.4÷22.3	19÷25.6	27.5÷31.7	31.4÷33.3	2.18÷31.7	16.6÷33.3
	2003	-	-	12.7÷22.4	16.3÷28.8	23.2÷27.3	27.6÷31.9	12.7÷27.3	16.3÷31.9
	2004	2.6÷16.6	16.7÷31.3	8.3÷22.5	19÷25.6	16.3÷24.1	19.4÷32.5	2.6÷24.1	16.3÷32.5
	2005	4.9÷18.8	8.9÷32.1	12.8÷23.3	12.9÷26.4	-	-	4.9÷23.3	8.97÷32.1
S, x	2000	7.4	25.4	21.7	23.1	29.7	32.1	19.6	26.8
	2003	-	-	17.9	22	25.2	31	21.5	26.5
	2004	12.4	25.9	16.1	21.1	20.9	27.8	16.4	24.9
	2005	11.5	24.2	17.8	18.8	-	-	14.6	21.4

ВМ – содержание взвеси (мг/л), Т – температура (°С) и S – соленость (‰) воды. Статистические параметры: min÷max - предел изменчивости значений, x – среднее значение

Диапазон значений ВМ в поверхностных водах составлял 0.1÷17.7 мг/л (x=4.1 мг/л), у дна 1.2÷29.0 мг/л (x=6.7 мг/л). Средневзвешенное содержание в сравнении с 2000 сократилось более

чем в 3 раза (в ЗВСМ в 5 раз и в 2 раза в ВВСМ) (табл. 4.1). При ослабленном гидродинамическом воздействии уровень содержания взвеси в ЗВСМ не превышал 13 мг/л, как например, на мелководье к востоку от о. Большой Ляховский. Восточнее Чаунской губы содержание не превышало 5-3 мг/л. Наибольшие в 2003 величины ВМ до 21 мг/л зафиксированы вблизи полуострова Чукочий, известного в Восточной Арктике высокими темпами разрушения берегового ледового комплекса (рис. 4.2).

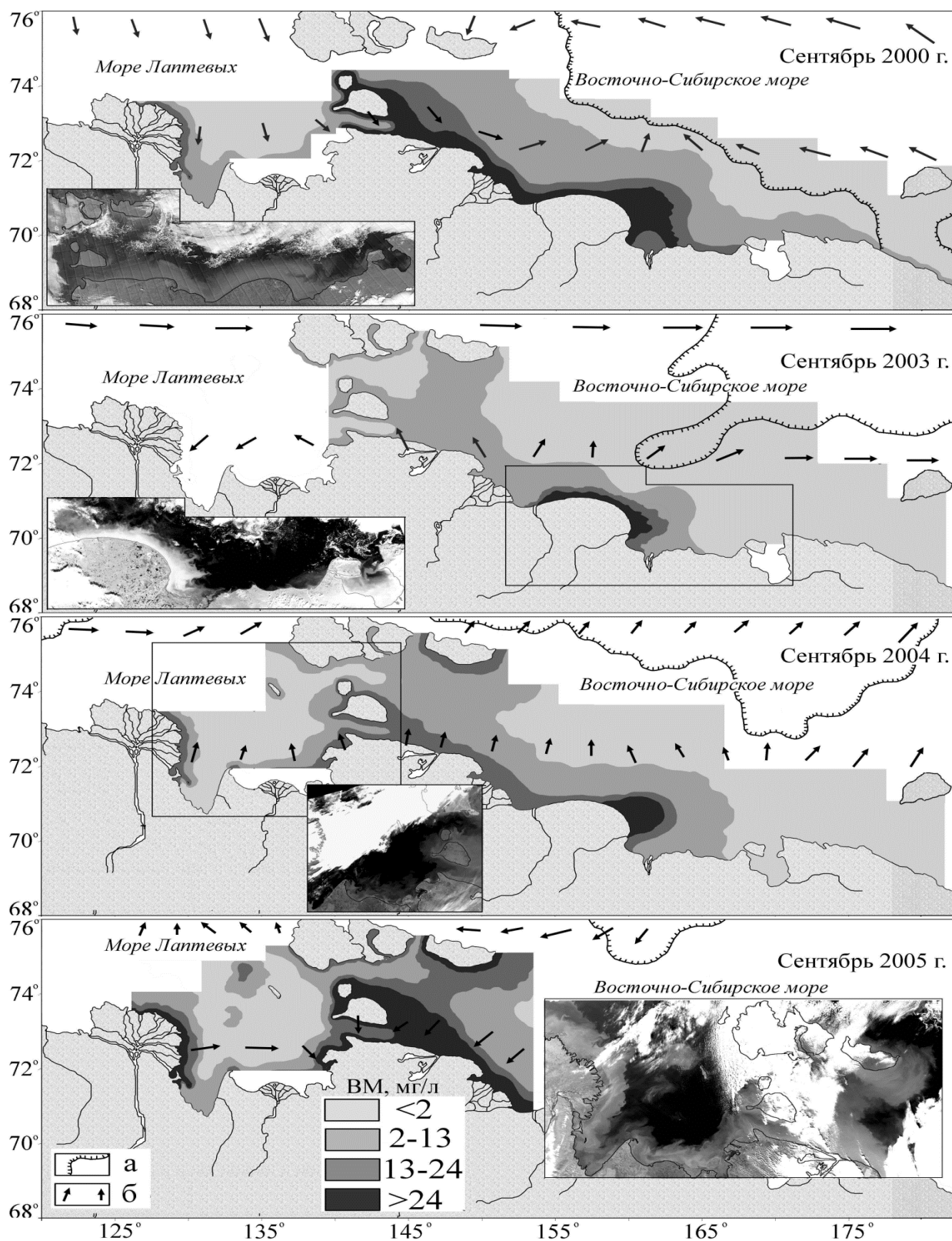
**Пространственная структура распределения взвеси в сентябре 2004** Для ЗВСМ периода работ были характерны слабые отжимные южные и юго-западные ветры и незначительное волнение; в ВВСМ наблюдалась зыбь. По сравнению с предыдущим годом водный сток восточно-сибирских рек возрос в среднем на 11%. В такой гидрометеорологической обстановке область распространения относительно теплых и распресненных вод расширилась к северу. В то же время площадь безледной акватории сократилась на 15%.

Содержание ВМ в поверхностном горизонте варьировало от 0.2 до 29.0 мг/л ( $\bar{x}=3.9$  мг/л), у дна - от 0.9 до 74.2 мг/л ( $\bar{x}=8.8$  мг/л). Средневзвешенное содержание в водной толще ВСМ составило 6.8 мг/л – это примерно в 1.5 раза выше показателя 2003 и свидетельствует о незначительном увеличении экспорта терригенной взвеси. Близкой к этому году оказалась и структура пространственного распределения ВМ. Максимальные значения (до 30÷74 мг/л) выявлены на мелководье вблизи п-ова Чукочий (рис. 4.2). Содержание в ВВСМ уменьшилось в среднем до 1.5 мг/л. Как и в 2003, усиление переноса на восток привело к смещению меридиональной границы между арктическими шельфовыми и тихоокеанскими водами восточнее относительно среднемноголетнего положения.

**Пространственная структура распределения взвеси в сентябре 2005** Наблюдениями в этом году были охвачены только акватории ВМЛ и ЗВСМ. В приконтинентальных водах преобладали умеренные прижимные ветры (северные, северо-западные и северо-восточные), на внешнем шельфе - восточные и юго-восточные. Объем речного стока реки Лена превысил среднемноголетний показатель на 15%. Ледовая обстановка характеризовалась как очень благоприятная, в пользу чего свидетельствует освобождение от льда до 90% района работ (рис. 4.2).

В перемешанных водах ЗВСМ при умеренном ветровом волнении и 1.5-2.5 м зыби содержание ВМ слабо изменялось по вертикали. Между тем, отмечается размах диапазона пространственной изменчивости - 1.6-242 мг/л ( $\bar{x}=20.1$  мг/л) в поверхностном горизонте и 2.4÷289 мг/л ( $\bar{x}=31.3$  мг/л) у дна (табл. 4.1).





На врезках спутниковые изображения в видимом диапазоне спектро радиометра MODIS на период экспедиционных исследований (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>). Ключевые гидрометеорологические факторы контроля формирования полей взвеси: а - положение кромки дрейфующих льдов в год исследований (<http://nsidc.org/data>); б - направление ветра на период исследований (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis>)

**Рисунок – 4.2** Межгодовая изменчивость содержания взвешенного материала в поверхностном горизонте водной толщи.



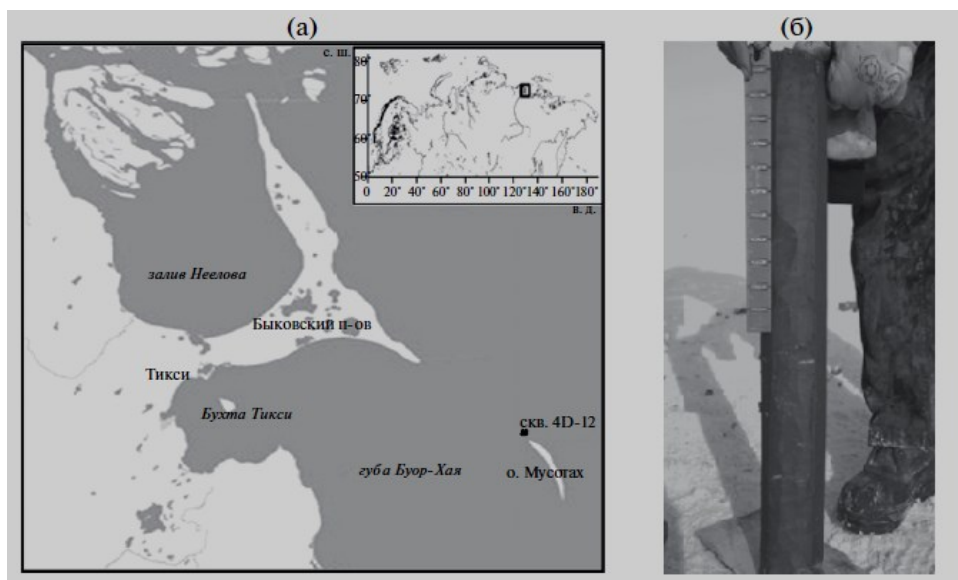
**Выводы и практическое приложение результатов.** Межгодовая изменчивость структуры пространственного распределения взвеси в морях Восточной Арктики, прежде всего, обусловлена вариациями условий мобилизации и поставки терригенного материала в водосборном бассейне. Эти факторы отражают суммарный эффект интенсивности береговой эрозии, объема речного стока, ледовых условий и поля ветра на фоне конкретной синоптической обстановки. Под влиянием прижимных ветров северных румбов создаются благоприятные условия для активизации береговой термоабразии и донной эрозии на мелководье. В результате формируется циркумтерральная структура пространственного распределения взвеси с трендом уменьшения ее содержания от берега к внешнему шельфу. Взвешенная фаза речного стока играет подчиненную роль в суммарном балансе терригенного материала в шельфовых водах. Такая литодинамическая обстановка наблюдалась в 2000 и 2005 г. Кроме того, в 2005 процессами донной эрозии было охвачено все мелководье ВМЛ и ЗВСМ. Наоборот, во время отжимных ветров (2003 ) гидродинамический прессинг на мелководье ослабевает, что отражается уменьшением содержания ВМ в несколько раз. Пространственная структура распределения ВМ приобретает черты однородности.

#### **4.2 Картирование кровли подводной мерзлоты**

Исследование особенностей распределения и деградации реликтовых мерзлых толщ (ММП) – одно из актуальных направлений исследований на арктическом шельфе. Рассматривается инструментальный подход к решению проблемы выявления уровня залегания подводной мерзлоты. Он основан на технологии электромагнитного (ЭМ) зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) путем создания первичного ЭМ-поля в среде и измерении возникающего вторичного ЭМ-поля. Измеряя вторичное ЭМ-поле на разных частотах можно оценить удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород на разных глубинах. Необходимо учитывать, что УЭС ММП на несколько порядков превышает УЭС талых пород. Впервые результаты ЭМ-зондирования заверены результатами бурения скважин.

В качестве района исследования была выбрана губа Буор-Хая (море Лаптевых). Здесь на натурном полигоне с припайного льда с 2011 по 2105 г. ТОИ ДВО РАН выполнялись буровые работы и океанографические исследования [25, 27]. В первый же год работ (март–апрель 2011 ) выяснилось, что глубина залегания кровли ММП отличается от предполагавшейся ранее по результатам математического моделирования эволюции и современного состояния мерзлых пород на шельфе моря Лаптевых [21]. Более того, при глубине моря 12 м ММП отсутствует как минимум до глубины 100 м, а температура верхнего 60-метрового слоя осадков примерно на 10°C выше, чем на суше [29]. Вследствие этого, в 2012 для буровых и ЭМ-работ были выбраны точки в пределах

четырёхметровой изобаты (рис. 4.3а), где наличие МПП было установлено (рис. 4.3б). После ЭМ-зондирования в геометрическом центре петель антенны была пройдена скважина 4D-12 до глубины 57 м от поверхности дна. Глубина воды в точке бурения составила 2.5 м при толщине припайного льда 2 м. С поверхности залежали немерзлые (талые и охлажденные) отложения, кровля мерзлоты выявлена на гор. 24.3 м. ММП представлены твердомерзлыми песками с массивными криогенными текстурами.



а - точки ЭМ-зондирования и скважины 4D-12; б - мерзлый керн с массивной криогенной текстурой и шширами льда, скважина 4D-12 интервала 30–31 м

**Рисунок – 4.3** Схема района работ

Геофизические исследования проводили с поверхности морского льда. Они осуществлялись с помощью антенны, состоящей из генераторной и измерительной квадратных петель, и аппаратного комплекса “Цикл-7” [15]. На первом этапе работ ЭМ-поле возбуждалось петлей 25×25 м, расположенной на льду, а его измерение – петлей 20×20 м, расположенной соосно с возбуждающей петлей, для изучения верхней части геоэлектрического разреза. Такая комбинация позволила получить высокое разрешение анализируемого сигнала до гор. 100 м. Глубинную часть геоэлектрического разреза исследовали с помощью генераторных петель размером 400×400 м и измерительной петли размером 100×100 м, расположенной на льду соосно с возбуждающей петлей. Размеры антенны измерения ЭМ-поля дали возможность получить информацию об удельном электрическом сопротивлении пород до глубины около 1 км.

**Результаты ЭМ-зондирования.** Выявлено существование в геоэлектрическом разрезе вблизи юго-восточного края дельты р. Лена и о. Муостах высокоомного слоя (рис. 4.4а). Анализ кривых ЗСБ с генераторной петлей 25×25 м свидетельствует об увеличении кажущегося сопротивления со временем (т.е. с глубиной) в интервале времен 0.4–4 мс. Анализ кривых ЗСБ с

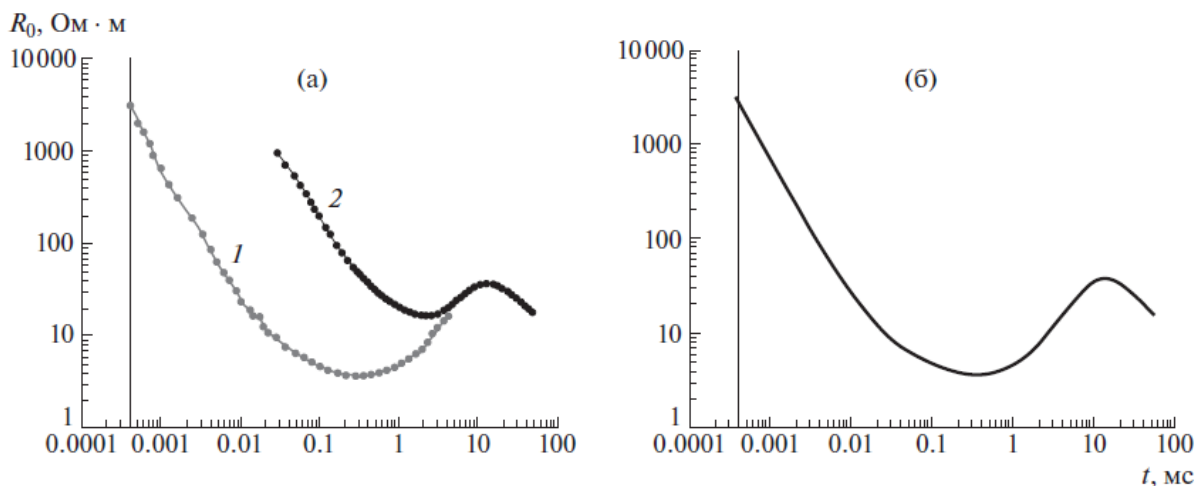
генераторной петлей  $400 \times 400$  м говорит об увеличении кажущегося сопротивления с глубиной в интервале 3–10 мс и уменьшении кажущегося сопротивления с глубиной в интервале 20–50 мс (рис. 4.4а). Сводная кривая ЗСБ в районе о. Муостах приведена на рис. 4.4б. Анализ сводной кривой позволяет сделать вывод, что по данным электромагнитных зондирований в районе о. Муостах зафиксирован высокоомный слой с кажущимся сопротивлением 40 Ом м и выше, тогда как кажущееся сопротивление мерзлых пород оказалось на 1-2 порядка меньше. Полученные данные позволяют оценить УЭС этого слоя и глубины до его кровли и подошвы.

Первой задачей при проведении ЭМ-зондирований стала оценка достоверности и точности получаемых при этом результатов. Для этого вблизи северной оконечности о. Муостах (рис. 4.3а) в точке бурения были выполнены два электромагнитных зондирования с размерами генераторных петель  $25 \times 25$  м и  $400 \times 400$  м (рис. 4.4а). Это позволило исключить влияние металла техники на результаты зондирований и получить неискаженные данные о положении кровли МПП. После зондирований было проведено математическое моделирование геоэлектрического разреза по данным ЗСБ. Математическое моделирование осуществлялось с помощью программного обеспечения Faraday (П.Ю. Пушкарев, МГУ). Программное обеспечение позволило выполнить расчет ЭМ-поля диполя в 1D-среде. Постановка и решение задачи расчета электромагнитного поля диполя на поверхности горизонтально-слоистой среды подробно описаны М.С. Ждановым (1986). Ниже приведен пример реализации этой модели для точки, где скважина 4D-12 была выполнена после электромагнитного зондирования.

Математическое моделирование заключалось в задании трехслойной горизонтально-слоистой модели среды (рис. 4.5) и расчете ЭМ-поля, которое создается генераторной петлей (диполем) на поверхности среды и измеряется в приемной петле. Далее программное обеспечение позволило рассчитать кривую кажущегося сопротивления на поверхности среды согласно [14]. Затем кривые ЗСБ, модельная и наблюдаемая, сравниваются. Если эти кривые не совпадают, то, изменяя геоэлектрическую модель среды (меняя УЭС и мощности слоев), добиваются совпадения модельной кривых с наблюдаемой (рис. 4.5). После совпадения с точностью до 5% модельной и наблюдаемой кривой изменения геоэлектрической модели останавливаются и моделирование считается выполненным. Последняя геоэлектрическая модель, которая обеспечила совпадение модельных и наблюдаемых кривых, считается итоговой (рис. 4.5).

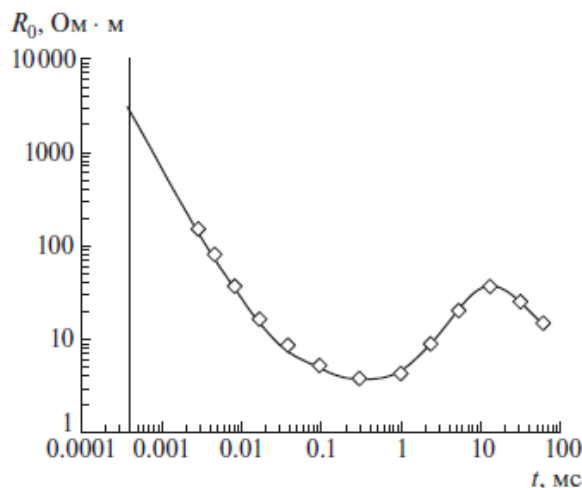
Результаты моделирования геоэлектрического разреза вблизи о. Муостах приведены на рис. 4.3. По данным наблюдений и математического моделирования было получено положение кровли высокоомного слоя на глубине 25 м. УЭС высокоомного слоя достигает 300 Ом м (рис. 4.5). Для получения истинных значений УЭС мерзлых отложений, вскрытых бурением, были проведены измерения по образцам керна естественного сложения и засоления из скважины 4D-12. Для более льдистой средней части ММП инт. глубин 31.5–40 м получено УЭС песка 500 Ом м, ниже по

разрезу, в интервале глубин 40–55 м, получено УЭС песков 300 Ом м. Измерения УЭС образцов керна из скважин позволяют задавать истинные величины УЭС слоев в геоэлектрической модели при моделировании результатов ЭМ-зондирований. Поскольку поле ЭМ-диполя на поверхности горизонтально-слоистой среды зависит как от УЭС слоев, так и от их мощности [14], то использование УЭС, измеренных в кернах из скважин, позволяет определять мощности слоев с различным УЭС, в частности, глубину до кровли ПМ.



Размеры антенн: 1 – 25×25 м, 2 – 400×400 м (а) и сводная кривая ЗСБ для района о. Муостах (б)

**Рисунок – 4.4** Наблюдаемые кривые ЗСБ в районе о. Муостах, море Лаптевых



Линия – наблюдаемая кривая ЗСБ, точки – результаты моделирования. Геоэлектрическая модель:  $R_0=3.8$  Ом м,  $H=25$  м (1-й слой);  $R_0=300$  Ом м,  $H=600$  м (2-й слой);  $R_0=1.5$  Ом м (3-й слой).

**Рисунок – 4.5** Результаты моделирования геоэлектрического разреза в точке бурения скважины 4D-12.

**Выводы и практическое приложение результатов.** Вопрос о возможности картирования кровли ММП требует дополнительного исследования, так как в настоящее время нет возможности ассоциировать глубину залегания подошвы высокоомного слоя с подошвой ММП – УЭС

высокоомного слоя может быть проявлением существования высокоомного слоя (слоев) газгидратов, газов, выходов коренных пород или их комбинацией. Тем не менее, имеется возможность использования ЭМ-зондирования для картирования кровли ММП. Сопоставление результатов опережающего ЭМ-зондирования методом ЗСБ и бурения скважины 4D-12 показало хорошее совпадение глубины залегания кровли мерзлых пород: 25 и 24.3 м соответственно. Таким образом, по результатам электромагнитных зондирований на шельфе моря Лаптевых в районе губы Буор-Хая обнаружен высокоомный слой. Сравнение глубины залегания кровли высокоомного слоя геоэлектрического разреза и результатов бурения показало, что, по крайней мере в верхней части разреза, существование высокоомного слоя связано с ПМ, а положение кровли ПМ определяется с высокой степенью точности. Это позволяет использовать ЭМ-зондирование методом ЗСБ для картирования кровли реликтовых мерзлых толщ на арктическом шельфе.

### **4.3 Современное состояние криогенных реликтов субэдрального рельефа позднечетвертичного времени**

Трансгрессивно-регрессивные колебания уровня моря позднечетвертичного времени вызывали кризисные или даже катастрофические природные обстановки. Откликом на них были не только перестройка среды криолитоморфогенеза, но и деградация или аградация ММП, изменение гидрологического режима шельфовых вод и их биологической структуры.

Обширный и выположенный восточно-арктический шельф  $\sim 25 \div 18$  тыс. лет назад (сартанская эпоха позднеплейстоценовой регрессии) полностью осушался. В условиях очень холодного и сухого климата это событие сопровождалось формированием толщ ММП (ледовый комплекс, ЛК). К настоящему времени подобные криогенные образования и связанные с ними формы скульптурного экзогенного рельефа достаточно хорошо изучены на суше [2, 5, 9, 19 и др.]. В то же время, для затопленных участков приморских низменностей Восточной Сибири такая информация практически отсутствует. Имеются только предположения о частичном изменении подводного рельефа волновым воздействием, базирующиеся на результатах дешифровки эхограмм [4 и др.]. Поэтому, проблема состояния затопленных реликтов субэдрального рельефа до сих пор остается дискуссионной, и любые новые сведения крайне необходимы для реконструкции палеообстановок и создания модели эволюции прибрежно-шельфовой криолитозоны.

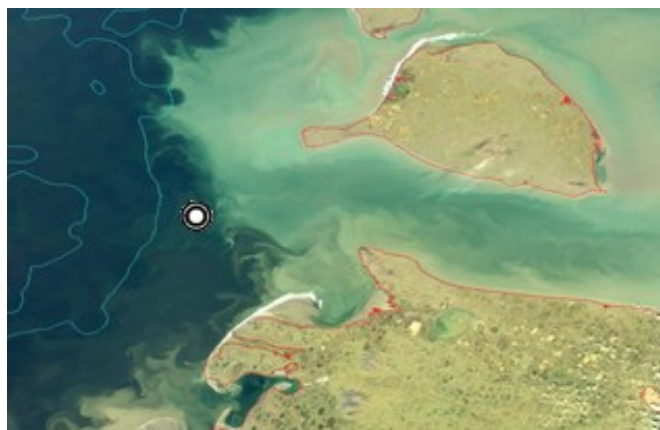
#### **4.3.1 Полигонально-валиковый рельеф**

На одном из участков юго-восточной части моря Лаптевых интерферометрическим гидролокатором бокового обзора «Гидра» в форматах 2D и 3D получен ряд изображений поверхности дна (рис. 4.6, 4.7а). В комплекс работ также входили пробоотбор донных осадков

(дночерпатель типа Van Veen, вибрационная трубка «Seabed SVC 500»), регистрация термохалинной структуры водной толщи (CTD-зонды «SBE19 plus», «SBE19 plus V2» [12, 13]. При интерпретации использовались результаты 8 океанографических экспедиций лаборатории арктических исследований ТОИ ДВО РАН за период 1999-2012 г (ГС «Дунай», «Николай Коломейцев», «Иван Киреев», «Яков Смирницкий», ПТС «Ауга» и «ТБ-0012», НИС «Академик М.А. Лаврентьев» и «Виктор Буйницкий»).

На рисунке 4.7а представлено изображение участка поверхности дна (глубина ~15 м) со сторонами ~45x45 м и площадью ~2025 м<sup>2</sup>. Снимок демонстрирует множество выпуклых полигонов, возможно образовавшихся при выдавливании толщи отложений растущей ледяной жилой в нижележащей мерзлой породе [19]. Клумбовидные (тетрагональные) по очертаниям полигоны имеют размеры ~5÷15 м и высоту относительно днища ложбин протаивания до 1 м. Сравнивая рис. 4.7б, 4.7в приходим к выводу о сходстве морфоскульптуры поверхности дна с рельефом современной поймы озерно-аллювиальных приморских низменностей Восточной Арктики. Подобный участок в настоящее время известен на полуострове Широкостан, всего в 50 км от района работ (рис. 4.7а). Рассмотрим возможные причины феномена сохранности некоторых форм реликтового субаэрального рельефа.

В безледный период акватория юго-восточной части моря Лаптевых подвержена тепловому и распресняющему влиянию стока рек Лена и Яна. По указанной причине, водная толща отличается умеренной стратификацией (величина безразмерного показателя Хансена-Раттри составляет 0.1÷0.6) и устойчивостью вертикальной термохалинной структуры к волновому перемешиванию. Слой сезонного скачка температуры и солености (ТХС) в районе работ заглублен до горизонта 11-14 м, т.е. находится в нескольких метрах от дна. Вертикальные градиенты солености могут достигать 2.6÷4.9‰/м, температуры - 4.7°/м. Ослабление вертикального теплообмена на этом фоне проявляется в снижении температуры под ТХС на 1° и в увеличении солености на 6‰ в сравнении с поверхностными водами (рис. 4.8). Примерно в 4 раза вблизи дна уменьшается содержание взвеси. Расчеты по известным литодинамическим алгоритмам [17] показывают, что интенсивность воздействия штормового волнения на поверхность дна ослаблена, из-за чего деформация рельефа и эрозия вследствие придонного трения незначительны. Отметим, что в более мелководном проливе Дмитрия Лаптева (Восточно-Сибирское море) всего в 46 км восточнее района работ, ветровым перемешиванием обычно охватывается толща вод до дна. Из-за этого, подводная криолитозона испытывает здесь негативное тепловое и гидродинамическое воздействие [12, 13, 24, 28].



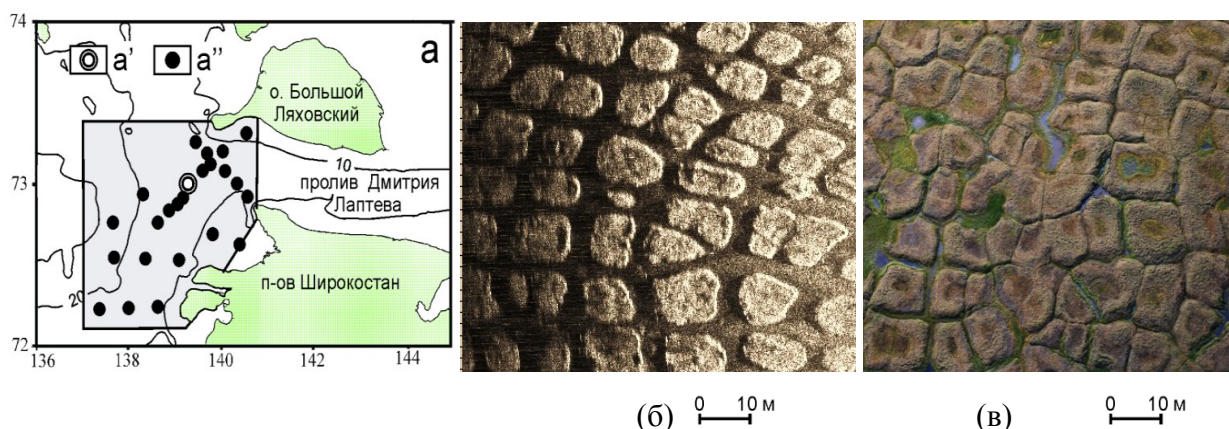
**Рисунок – 4.6.** Изображение спектро радиометра MODIS акватории района исследований

Результаты выполненных исследований выявили сходство морфоскульптурных форм дна района работ с полигонально-валиковым рельефом прилегающей к побережью приморской низменности. Видимые изменения зафиксированы только в расширении до нескольких раз межполигонных ложбин протаивания. Субаквальный полигонально-валиковый рельеф плащеобразно облекается маломощным чехлом голоценовых отложений, из-за чего все его деформации, приобретенные на этапе континентального и прибрежно-морского криолитоморфогенеза, хорошо экспонируются на поверхности дна.

Как видно, мы имеем дело с своеобразной консервацией реликтового рельефа, причины которой могут состоять в следующем. В масштабе последних тысячелетий голоцена субаэральный рельеф района работ во время трансгрессивного подъема уровня моря подвергался волновому воздействию относительно кратковременный период. Предполагая стабильные и близкие к современным условия криолитоморфогенеза последние ~5 тыс. лет после завершения трансгрессии, можно говорить о лимитировании волновой эрозии дна в это время существованием вертикальной термохалинной структуры водной толщи и продолжительным ледовым периодом. Диагенетические преобразования при низких темпах седиментации могли вызвать уплотнение, усиление пластичности и связности частиц толщи голоценовых осадков, и таким образом подготовили ее к повышенной сопротивляемости размыву и устойчивости к деформации рельефа в период прибрежно-морского криолитоморфогенеза. Определенный вклад в эти преобразования может вносить агрегация коллоидов металлов при участии глинистых частиц и органического вещества [30]. Расчетное сопротивление сдвигу  $\sigma$  пластичной и уплотненной толщи голоценовых осадков может достигать  $1\div 2 \text{ Н/см}^2$ , а размывающая скорость  $u_o > 100 \text{ см/с}$ . При указанных значениях  $u_o$  в движение способны вовлекаться даже грубообломочные литологические разности [17, 18]. Однако, столь высокие придонные скорости не характерны для данного участка юго-восточной части моря Лаптевых. Ранее полигональный микрорельеф был обнаружен гидролокацией в Колымском заливе во время морских геофизических исследований Янской ГРЭ

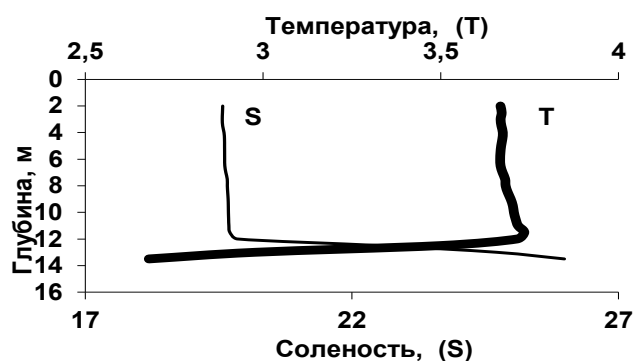


ПГО «Якутскгеология» в диапазоне глубин 13-19 м. Было показано большее соответствие его черт современному полигональному микрорельефу суши на глубинах более 15 м [20].



**Рисунок – 4.7.** Район исследований (а), изображения полигонального микрорельефа на дне (б; на а' – точка гидролокации) и на поверхности прилегающей приморской низменности (в; аэрофото М.Н. Григорьева)

На гипсометрическом уровне -12-14 м полигональный рельеф выражен менее отчетливо, что объясняется воздействием волновых процессов на фоне ослабленной вертикальной термохалинной стратификации вод (рис. 4.8). На глубине 10 м поверхность дна уже хорошо препарирована волнением, но в западинах еще сохранились сильно измененные остатки полигонального микрорельефа [20].



**Рисунок – 4.8.** Типовой вертикальный термохалинный разрез в районе работ

#### 4.3.2 Подводные банки и мелководья

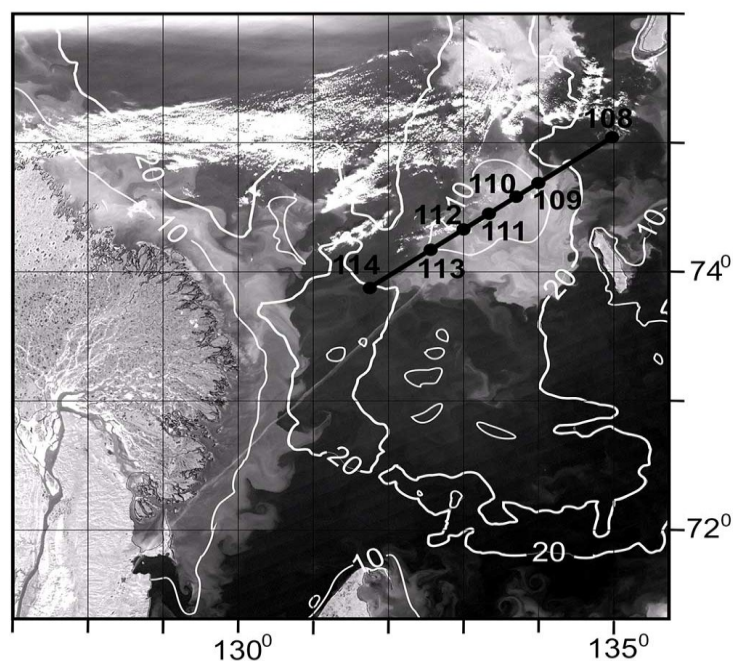
Послеледниковая голоценовая трансгрессия моря (начало ~12 тыс. лет назад) привела к затоплению приморских равнин и обособлению их возвышенностей в острова. Так на шельфе появились высокольдистые острова, известные как «Земля Васема», «Земля Санникова», «Земля Андреева» [5, 6]. Согласно кривой гляциоэвстатических колебаний уровня восточно-арктических морей, «Земля Васема» стала островом примерно 8÷7 тыс. лет назад. На рубеже 6÷5 тыс. лет назад



уровень моря стабилизировался, и в береговой зоне активизировались процессы тепловой и гидродинамической абразии [1]. Уже к 1815 году на месте острова существовало только мелководье, названное гидрографами Семеновским с относительно небольшими островами Семеновский и Васильевский, но и они к 1950 перешли в состояние подводных банок [6].

В качестве натурального полигона для исследований реликтовых подводных возвышенностей был выбран наиболее крупный останец позднеплейстоценового субаэрального рельефа на восточно-сибирском шельфе – Семеновское мелководье (СМ) (рис. 4.9) с минимальными глубинами 0.8-1.0 м. В своих современных очертаниях по изобате 10 м СМ расположено в 130 км к северо-востоку дельты реки Лены. Протяженность составляет 85 км, а площадь около 3 тыс. км<sup>2</sup>. Ранее авторами были получены новые данные о современном состоянии банки Диомида – таком же, как СМ останце позднеплейстоценового субаэрального рельефа, но площадью почти в 330 раз меньше [13]. Исследования подобного плана крайне важны для понимания факторов, контролирующих темпы деградации субаквальной мерзлоты ВСШ в контексте дестабилизации законсервированных «панцирем» многолетней мерзлоты газовых гидратов [29] и вовлечения органического вещества едомных отложений в современный биогеохимический цикл [22, 26, 27]. Для обеспечения безопасности мореплавания в мелководном районе и получения при этом максимума возможной научной информации 140 км разрез был проложен между склонами банок Семеновская (ст. 111) и Васильевская (ст. 112) по направлению 230° (рис. 4.9). Подводный рельеф изучался с помощью судового навигационного эхолота «FURUNO». Регистрация параметров термохалинной структуры водной толщи обеспечивалась CTD-зондом «SBE19 plus». Донные осадки отбирались дночерпателем типа Van Veen, взвесь выделялась на фильтры с диаметром пор 0.4 мкм. Аналитические исследования осадочного материала выполнялись в лабораториях ТОИ ДВО РАН и МАНЦ [10, 13, 26].

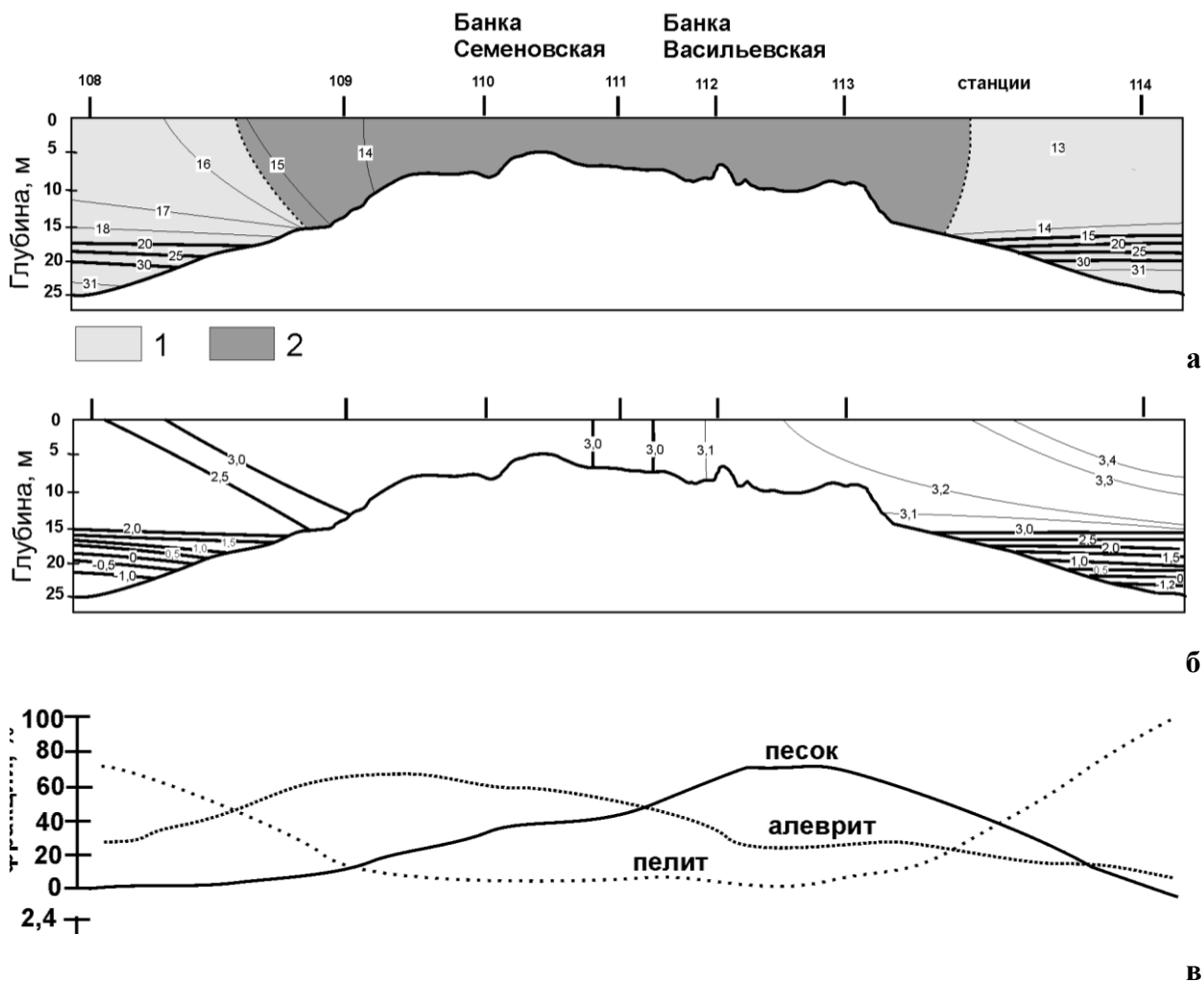
Профили верхней части ортогональных склонов СМ (глубины < 15 м) квазисимметричны относительно друг друга. Северо-восточный - слабо выпуклый и более пологий по сравнению с юго-западным, перегиб поверхности находится на гипсометрическом уровне 8.8 м. Юго-западный склон имеет большие уклоны и слабовогнутый профиль, а перегиб поверхности здесь заглублен до 7.2 м, т.е. на 1.6 м в отличие от северного. Относительно пологие склоны изрезанного рельефа с перепадами глубин до 0.9-1.3 м, вероятно, отражают серии подводных валов, образующихся в зоне разрушения волнения. Крутые склоны понижений рельефа, скорее всего, представляют последствия экзарационной деятельности торосов. Во время экспедиционных исследований лаборатории арктических исследований ТОИ ДВО РАН в 2008-2012 г на шельфе Восточно-Арктических морей было обнаружено множество борозд выпаживания днищами и киями торосов [27]. С глубины 15 м склоны начинают выполаживаться и далее плавно переходят в аккумулятивно-эрозионную морскую равнину.



**Рисунок – 4.9** Положение океанографических станций на разрезе через Семеновское мелководье (основа карты - изображение в видимом диапазоне спектрорадиометра MODIS).

Термохалинная структура вод района исследований определялась взаимодействием речных и шельфовых вод. На всем протяжении разреза с юга на север соленость ( $S$ ) и температура ( $T$ ) поверхностных вод варьировали в диапазонах соответственно,  $12.6 \div 16.6 \text{ ‰}$  и  $3.4 \div 2.5^\circ\text{C}$ . Горизонтальные градиенты изменения  $S$  составляли  $0.04 \text{ ‰/км}$ ,  $T=0.01^\circ\text{C/км}$ . Слой сезонного скачка солености был заглублен до 15 м – гипсометрического уровня нижней части склона СМ. Поэтому водная толща над слоем скачка имела однородную термохалинную структуру. Ниже горизонта 20 м залежали придонные шельфовые воды ( $S=31.6 \text{ ‰}$ ,  $T=1.9^\circ\text{C}$ ), а над равниной к югу от мелководья – остаточные воды прошлой зимы с отрицательной температурой ( $S=32.0 \text{ ‰}$ ,  $T= -1.2^\circ\text{C}$ ) (рис. 4.10; табл. 4.2).

Во время наблюдений в северной части мелководья было зарегистрировано дрейфовое течение, направленное на юго-запад со скоростью  $35 \div 50 \text{ см/с}$ . При шероховатой поверхности дна за счет песчано-алевритовых осадков, такой скорости достаточно для срыва и вовлечения в перенос частиц размерами до 0.5-1.0 мм [17]. По этой причине здесь было обнаружено наиболее высокое содержание взвеси (до  $22.0 \div 26.3 \text{ мг/л}$ ). Ослабление волновых процессов в южной части мелководья сопровождалось уменьшением ее содержания более чем в 2 раза (до 10 мг/л). Вблизи Васильевской банки этот показатель сократился еще в 2 раза (до 4-5 мг/л), что свидетельствует о дефиците вещества, по своим гидравлическим характеристикам способного к ремобилизации с данного участка дна.



**Рисунок 4.10** – Пространственная изменчивость распределения на разрезе: **(а)** солености и вертикальной соленостной стратификации (1 – умеренно стратифицированные, 2 – перемешанные воды), **(б)** температуры водной толщи, **(в)** содержания (%) осадкообразующих фракций

**Таблица 4.2** - Изменчивость величин термохалинных характеристик на разрезе через Семеновское мелководье

Параметры	Южный склон и подножье	Семеновское мелководье				Северный склон и подножье	
		114	113	112	111	110	109
Станция	114	113	112	111	110	109	108
Глубина, м	25	9	7	7	10	17	27
Соленость, ‰	12.6/32.0*	13.3/13.7	13.5/13.5	13.3/13.3	13.1/13.1	14.4/15.2	16.5/31.6
Температура, °С	3.4/-1.2	3.2/3.2	3.1/3.1	3.0/3.0	3.0/3.0	3.2/3.0	2.5/1.9
Содержание взвеси, мг/л	3.5/6.5	4.1/6.9	3.6/4.5	12.6/22.0	18.0/26.3	8.8/8.7	1.6/8.4

\* поверхностный / придонный горизонты

За пределами СМ содержание взвеси в поверхностных водах не превышало 1.6÷2.9 мг/л с тенденцией увеличения ко дну в 3 раза до 6.5÷8.7 мг/л (рис. 4.10а, 4.10б; 4.3а; табл. 4.2). При наличии плотностной вертикальной стратификации, характерной для значительной части акватории ВСШ, подверженной сильному влиянию речного стока [23, 26, 27] и ограничивающей

обмен между водами выше и ниже пикноклина, придонный максимум взвеси мог сформироваться из-за кратковременного разрушения пикноклина, что возможно во время штормов. Отметим, что интенсивное волновое перемешивание может привести к эффективной вентиляции вод до дна и к дополнительному прогреву системы «придонная вода - донные осадки», а это крайне важно для понимания факторов, ответственных за термическое состояние донных осадков и глубины залегания кровли подводной мерзлоты, что в свою очередь критично для дестабилизации низезалегающих гидратов [29].

Литологическая структура донных осадков (типизация на основе классификации [3]) на разрезе отражает характер морфолитогенеза на различных гипсометрических уровнях. Пелитовые илы (глубина 25 м) вскрыты на поверхности эрозионно-аккумулятивной равнины к югу от СМ. С его противоположной стороны залегает пелит алевритовый (глубина 27 м). Плохая сортированность последнего указывает на поступление осадочного материала, мобилизованного из других источников. Агентами транспортировки могут быть линзы с ремобилизованной взвесью, оторванные от поверхности мелководья во время штормов, а также ледовый разнос.

**Таблица 4.3** - Литологическая структура донных осадков Семеновского мелководья

Район	Глубина, м	Содержание фракций, %			Литологический тип осадка
		1-0.1 мм	0.1-0.01 мм	<0.01 мм	
Склон Васильевской банки	7-9	69.1	27.5	3.4	Мелкозернистый песок
Средняя часть мелководья	7	43.5	47.0	9.5	Миктит алевритовый
Склон Семеновской банки	10	37.9	56.9	5.2	Алеврит песчаный
Подножье мелководья	17	15.2	67.8	17.0	Алеврит пелитовый
Аккумулятивная равнина к северу от мелководья	27	4.2	28.6	67.2	Пелит алевритовый
Аккумулятивная равнина к югу от мелководья	25	0.0	6.5	93.5	Пелит

Осадки мелководья отличаются более крупнозернистым составом по сравнению с прилегающей аккумулятивно-эрозионной равниной. При неоднородном рельефе за счет притока воды к возвышенным участкам и оттока к их краям здесь способна развиваться специфическая горизонтальная циркуляция типа градиентных струйных потоков [11, 17]. Такого рода течения трансформируют волновое поле и литодинамический режим, поэтому формирующиеся осадки плохо сортированы. К ним относятся миктит алевритовый (гл. 7 м) и приуроченный понижениям в рельефе дна алеврит песчаный (гл. 10 м). На склоне Васильевской банки (гл. 7-9 м) развиты умеренно сортированные мелкозернистые пески со средним содержанием модальной группы фракций 69.1% (медианной подфракции 63.0%). Пояс осадков Семеновского мелководья с содержанием песчаных фракций до 69% не опускается ниже гипсометрического уровня 15 м, в

чем проявляется связь с особенностями вертикальной плотностной стратификации вод. Вблизи подножья мелководья начинается зона накопления алеврита пелитового (гл. ~ 17 м) (рис. 4.10в; табл. 4.3). Появляется окисленный слой, свидетельствующий об изменении условий седиментации и диагенеза в стратифицированных водах.

Донные осадки СМ имеют невысокое содержание органического углерода  $C_{орг}$  (среднее  $x=0.1\%$ ) и его относительно тяжелый изотопный состав ( $\delta^{13}C=-24.4\div-23.7\text{‰}$ ,  $x=-24.1\text{‰}$ ) по сравнению с другими участками восточно-сибирского шельфа [29], что на наш взгляд определяется гидродинамическим вымыванием обогащенных  $C_{орг}$  тонкодисперсных фракций. Содержание общего азота в песках Васильевской банки на уровне аналитического нуля может говорить не только о последствиях эффекта вымывания, но и о высокой степени биodeградации органического материала. Вклад терригенного источника  $C_{орг}$  в его суммарный пул (ТОС), рассчитанный по методу изотопно-материального баланса [33] варьировал в диапазоне  $45\div57\%$  ( $x=51\%$ ). Считая маркерами терригенного и морского  $C_{орг}$  соответственно,  $\delta^{13}C=-21\text{‰}$  и  $\delta^{13}C=-27\text{‰}$ , можно сделать вывод о сопоставимом вкладе аллохтонного и автохтонного источников, как например, в восточной части Восточно-Сибирского моря. Здесь в результате ослабления вдольберегового переноса с запада и усиления влияния притока трансформированных тихоокеанских вод происходит замещение терригенного источника  $C_{орг}$  морским планктогенным [26, 27]. Отметим, что вклад  $C_{орг}$  в донные осадки шельфа моря Лаптевых вблизи термоабразионных берегов может достигать 100% [22, 26, 27].

**Таблица 4.4** - Элементный и изотопный сигнал источников органического материала взвеси и донных осадков на разрезе через Семеновское мелководье

Район исследования и объекты		$C_{орг}, \%$	$\delta^{13}C, \text{‰}$	C/N	ТОС, %**
Южный склон и подножье	осадки	<b>2.15</b>	<b>-25.6</b>	<b>11.3</b>	<b>77</b>
	взвесь	<b>1.7 / 0.6</b>	<b>-27.7 / -26.4</b>	<b>9.0 / 11.1</b>	<b>96 / 77</b>
Семеновское мелководье	осадки	0.05÷0.13 ( <b>0.1</b> )	-24.4÷-23.7 ( <b>-24.1</b> )	0÷13.0 ( <b>10.7</b> )	45÷57 ( <b>51</b> )
	взвесь	1.2÷1.4 ( <b>1.3</b> ) / 0.7÷1.8 ( <b>1.2</b> )*	-27.2÷-27.0 ( <b>-27.1</b> ) / -27.8÷-26.7 ( <b>-27.4</b> )	9.3÷9.5 ( <b>9.4</b> ) / 9.4÷9.6 ( <b>9.5</b> )	86÷89 ( <b>88</b> ) / 81÷97 ( <b>91</b> )
Северный склон и подножье	осадки	0.27÷1.04 ( <b>0.7</b> )	-25.0÷-24.9 ( <b>-25.0</b> )	10.4÷13.2 ( <b>11.8</b> )	65÷67 ( <b>66</b> )
	взвесь	1.2 ( <b>1.2</b> ) / 0.8÷5.3 ( <b>3.1</b> )	-28.0÷-27.3 ( <b>-27.7</b> ) / -27.5÷-25.9 ( <b>-26.7</b> )	8.4÷9.0 ( <b>8.7</b> ) / 9.6÷11.0 ( <b>10.3</b> )	90÷100 ( <b>95</b> ) / 70÷93 ( <b>82</b> )

\* диапазон значений (**среднее**). Дробное выражение: величины параметра для поверхностного / придонного горизонтов водной толщи; \*\* ТОС - вклад  $C_{орг}$  терригенного генезиса

В илах аккумулятивно-эрозионной равнины содержание  $C_{орг}$  увеличивалось более чем на порядок ( $x=1.4\%$ ) и отмечалось некоторое облегчение его изотопного состава ( $x=-25.3\text{‰}$ ). Учитывая значения C/N ( $x=11.5$ ) и ТОС ( $x=72\%$ ), можно предполагать усиление влияния терригенного источника. Его доминирующий вклад прослеживается и во взвеси вод над

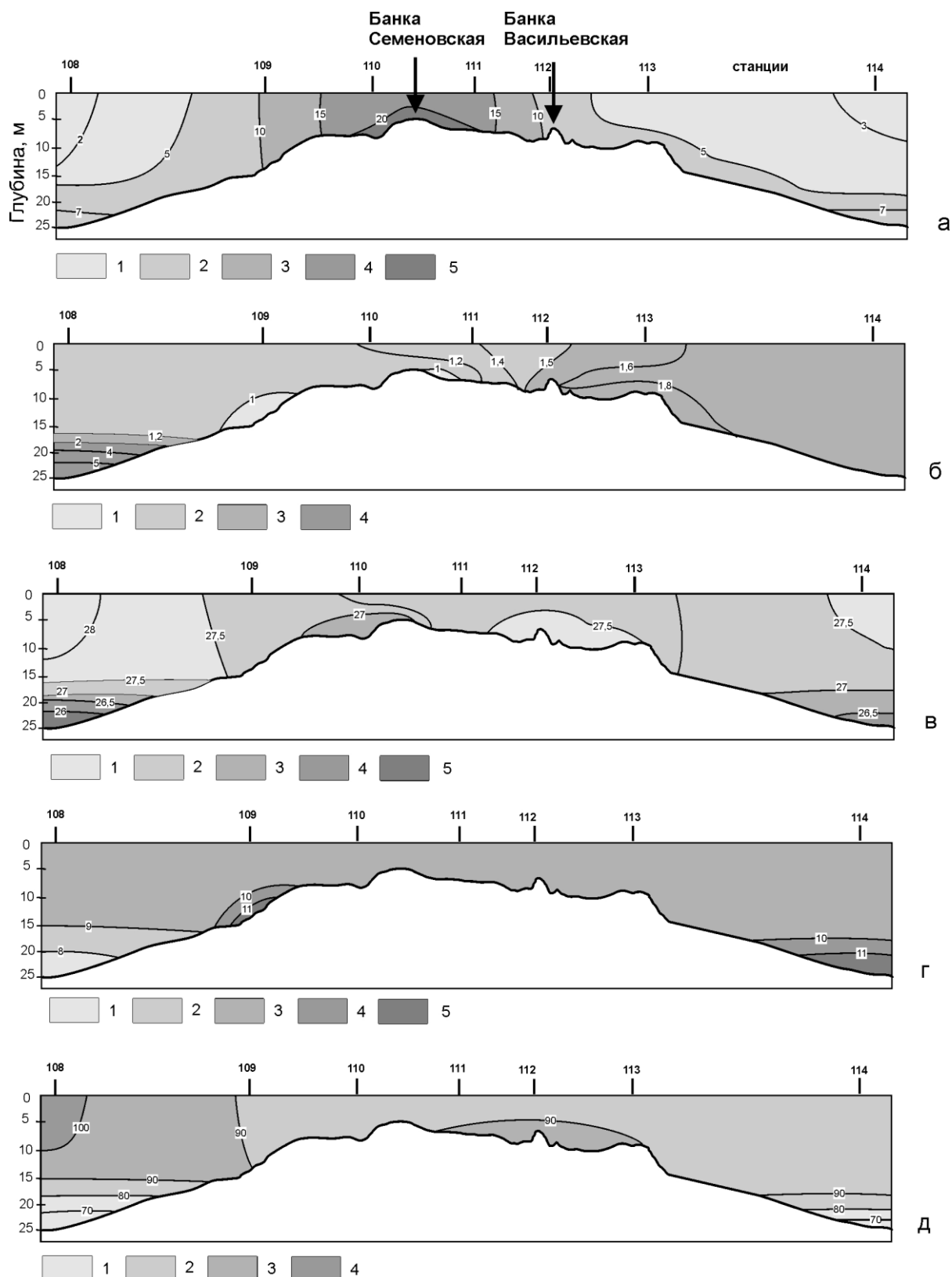
мелководьем ( $\delta^{13}\text{C}=-27.3\text{‰}$ ,  $\text{C/N}=9.5$  и  $\text{TOC}=90\%$ ) и аккумулятивно-эрозионной равниной (рис. 4.11б-г; табл. 4.4).

Анализ современных очертаний СМ свидетельствует о наибольшем врезе в его морфоскульптуру с южной и юго-восточной сторон, в меньшей степени с запада. Слабо выпуклый и пологий профиль с неизрезанной выровненной бровкой северного склона позволяет предположить, что он мало изменился за период субаквальной экспозиции (рис. 4.10а). Это означает более сильное эрозионное воздействие часто повторяющегося волнения южных направлений [11, 22]. Не менее важным представляется фактор теплового воздействия шлейфа стоковых вод р. Лены [13, 29].

На основе вышеизложенного можно прийти к выводу о том, что в пределах СМ существуют аседиментогенные эрозионные и эрозионно-аккумулятивные участки. Первые маркируются реликтовыми песчаными осадками, образовавшимися в результате размыва первично алевритовой осадочной толщи с дефицитом песчаного материала. За время нахождения мелководья в области волнения, размерный состав едомной толщи в 3 раза обеднел частицами фракции  $< 0.01$  мм, тогда как содержание песчаной фракции увеличилось примерно в 70 раз. Это важная особенность формирования литологической структуры осадков реликтовых банок.

Состав органического материала донных осадков на всем протяжении 140 км разреза через СМ выделяется смешанным генезисом, в отличие от преимущественно терригенного состава  $\text{C}_{\text{орг}}$  взвеси, характерного для большей части мелководного восточно-сибирского шельфа [22, 27]. Доля терригенной компоненты  $\text{C}_{\text{орг}}$  может усиливаться не только за счет продуктов эрозии берегового ледового комплекса, поставляемого в шельфовые воды сгонными течениями, но и вследствие вымывания из донных осадков реликтовой органики. Влиянием вышеперечисленных факторов может регулироваться и интенсивность поступления в донные осадки  $\text{C}_{\text{орг}}$  из терригенного источника. На мелководье терригенный материал аккумулируется в западных формах рельефа и ложбинах, а его выведение из транзита и седиментация, вероятно, обусловлены эффектом торможения взвесенесущего потока о поверхность мелководья. Усиление морского сигнала  $\text{C}_{\text{орг}}$  в осадках мелководья может быть объяснено развитием планктонных сообществ в гидродинамически активной среде, находящихся под влиянием транзитных стоковых вод с повышенным содержанием биогенных элементов.

Подтверждением данного вывода является обилие пресноводных и солоноватоводных бентических диатомей (в количестве до нескольких десятков тыс. экз./г), свидетельствующее об их избирательности к комфортным условиям обитания. В своем большинстве раковины диатомей по размерам попадают в алевритовую фракцию, среднее содержание которой в осадках СМ составляет 44% (табл. 4.3).



**(а)** - содержание взвеси, мг/л: 1 - <5, 2 - 5-10, 3 - 10-15, 4 - 15-20, 5 >20; **(б)** - содержание  $C_{орг}$  во взвеси, %: 1 - <1, 2 - 1-1.5, 3 - 1.5-2.0, 4 - >2.0; **(в)** - величина  $\delta^{13}C$ , ‰: 1 - <27.5, 2 - 27.5-27.0, 3 - 27.0-26.5, 4 - 26.5-26.0, 5 - >26; **(г)** - значение C/N-отношения: 1 - <8, 2 - 8-9, 3 - 9-10, 4 - 10-11, 5 - >11; **(д)** - вклад  $C_{орг}$  терригенного генезиса в его суммарный пул, %: 1 - 70-80, 2 - 80-90, 3 - 90-99, 4 - 100

**Рисунок – 4.11** Изменчивость некоторых характеристик взвеси на разрезе через Семеновское мелководье.

Спутниковые изображения свидетельствуют, что эпицентры мутности приурочены к вершинам Васильевской и Семеновской банок. Это указывает на их близкое расположение к поверхности моря в течение последних 20 лет с момента последнего навигационного промера и подтверждается результатами визуальных наблюдений с вертолета в сентябре 2013. В точке с координатами вершины Васильевской банки была обнаружена песчаная осушка размерами ~150x150 м. Возникновение этого природного феномена, скорее всего, обусловлено кратковременной денивеляцией уровня поверхности юго-восточной части моря Лаптевых. Такая обстановка обычно возникает в результате сильного сгона воды на фоне сизигийной фазы приливного цикла, как, например, в октябре 1993 [1].

Несмотря на потери тонкозернистого материала в результате вымывания, мелководье до сих пор является локализованным источником осадочного вещества в юго-восточной части моря Лаптевых, куда он транспортируется в линзах оторванных вод. Единовременный объем такого материала по нашим оценкам составляет около 281 тыс. т при объеме средней линзы 15.3 км<sup>3</sup>.

Благодаря своим размерам, расположению и рельефу, мелководье также является одним из эпицентров сосредоточения торосов припайного льда на шельфе моря Лаптевых. Глубина килей этих ледяных глыб на восточно-сибирском шельфе по результатам инструментальных наблюдений может достигать 4-14 м при толщине припайного льда около 2 м [10]. Очевидно, что торосы здесь – один из главных рельефообразующих факторов (подтверждение – экзарационные борозды). Другая роль торосов состоит в обеспечении устойчивости мелководья к термокарсту и просадочным деформациям. Очевидно, что участки дна СМ, на которых большую часть года залегают торосы, наименее подвержены деградации подводной мерзлоты, типичной для рассматриваемого шельфа в целом. При неглубоком протаивании в условиях короткого арктического лета новообразования подводной мерзлоты могут служить одним из основных факторов сохранения едомной толщи, еще, возможно, существующей под слоем переработанных морем ее верхних горизонтов. Так, например, результаты бурения прибрежной зоны юго-восточной части моря Лаптевых показали, что при глубинах моря более 4 м кровля подводной мерзлоты заглублена по крайней мере, до уровня - 60 м от поверхности дна [29].

#### **4.3.3 Выводы и практическое приложение результатов**

Результаты исследований дают новые представления о современном криолитоморфолитогенезе на островных реликтах субаэрального рельефа Восточно-Сибирского шельфа, что важно для понимания характерных особенностей деградации субаквальной мерзлоты.

Сохранность морфоскульптуры реликтового полигонально-валикового микрорельефа на мелководном шельфе отражает результат совокупного воздействия двух факторов:



палеогеографического (обеспечившего кратковременность пребывания рельефа в зоне волнового размыва и современное гипсометрическое положение) и гидрометеорологического (контролирующего состояние вертикальной плотностной стратификации вод и продолжительность ледового режима).

Стагнация процесса деградации СМ является редким примером сохранения затопленной едомной толщи на акватории Восточно-Арктических морей, что важно для понимания механизмов, контролирующих замедление скорости деградации подводного участка плейстоценовой суши, исторически называемой «Землей Васема» по сравнению с другими районами восточно-сибирского шельфа. При выполнении тесно взаимосвязанной цепочки природных событий: сохранении тренда современного потепления, дальнейшего отступления к северу границы дрейфующих льдов, увеличения длины разгона и силы штормового волнения, следует ожидать усиления темпов деградации и деформаций рельефа мелководья.

Деградация ММП на фоне климатических изменений кроме массивованного выброса метана, способствует расширению областей разгрузки подмерзлотных вод на сибирском арктическом шельфе. В этом аспекте крайне важны данные о состоянии ММП. В отличие от континентальных условий, где геофизические методы для мерзлотной съемки разработаны несколько десятков лет назад, для арктического шельфа опыт подобных работ весьма ограничен. Так, например, картировать распространение ММП на основе буровых скважин, число которых на восточно-арктическом шельфе крайне ограничено, не представляется возможным. Это приводит к повышению инженерно-геологических рисков при разведке и освоении шельфовых нефтегазовых месторождений,

В настоящее время на восточно-арктическом шельфе наблюдается интенсификация геолого-разведочных изысканий на стратегические сырьевые ресурсы. Перспективы трансформации стратегической трассы Северного морского пути в практически круглогодичную международную магистраль обретают выраженную необходимость.

Таким образом, результаты постоянных натурных наблюдений на восточно-арктическом шельфе как направление исследований имеют практическую ценность, как например, для проведения геоинженерных изысканий по трассе Северного Морского пути, планирования разведки и добычи углеводородных ресурсов в Восточно-Арктических морях. Поэтому, результаты изучения ведущих факторов, контролирующих формирование пространственно-временных неоднородностей потоков осадочного материала будут полезными в контексте ожидаемого изменения фонового экологического состояния морей Восточной Арктики. Подобная обстановка может возникнуть не только в связи с разведочно-промышленным освоением акваторий, но и в результате усиления деградации прибрежно-шельфовой криолитозоны на фоне глобальных климатических изменений.

#### 4.4 Список использованных источников к разделу 4

1. Арэ, Ф.Э. Термоабразия берегов моря Лаптевых и ее вклад в баланс наносов моря / Ф.Э. Арэ // Криосфера Земли. – 1998. – Т. II. – С. 55-61.
2. Арэ, Ф.Э. Термоабразия морских берегов / Ф.Э. Арэ. – Новосибирск: Наука, 1985. – 171 с.
3. Безруков, П.Л. Классификация осадков современных и морских водоемов / П.Л. Безруков, А.П. Лисицын // Труды / Ин-т океанол. АН СССР. – 1960. – Т. 32. – С. 3-14.
4. Валпетер, А.В. Характерные формы рельефа прибрежного шельфа Восточно-Сибирского моря и их значение для палеогеографических реконструкций / А.В. Валпетер // Геоморфология и палеогеография шельфа. – М.: Наука, 1978. – С. 134-139.
5. Гаврилов, А.В. Палеогеографический сценарий послеледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых / А.В. Гаврилов, А.В., Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В. // Криосфера Земли. – 2006. – Т. X. – № 1. – С. 39-50.
6. Гаккель, Я.Я. Разрушение острова Семеновского / Я.Я. Гаккель // В кн.: Проблемы Арктики. – 1958. - Вып. 4. Л.: Морской транспорт. - С. 95-97.
7. Галимов, Э.М. Природа биологического фракционирования изотопов / Э.М. Галимов. – М.: Наука, 1981. – 247 с.
8. Геоэкология шельфа и берегов морей России / отв. ред. действ. чл. РАЕН проф. Н.А. Айбулатов. – М.: Ноосфера, 2001. – 428 с.
9. Григорьев, М.Н. Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири / М.Н. Григорьев // автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. – Якутск, 2008. – 38 с.
10. Давыдов, А.А. Обнаружение стамух на акватории Восточно-Сибирского и Карского морей при помощи данных ДЗЗ / А.А. Давыдов, С.П. Дейнека, А. Ким // Земля из космоса. Наиболее эффективные решения. – 2011. – Вып. 10. – С. 40-43.
11. Дударев, О.В. Масштабы неоднородностей состава взвеси в системе река Лена – море Лаптевых / О.В. Дударев, И.П. Семилетов, А.Н. Чаркин // Доклады Акад. наук РАН - 2006. - Т.411, № 4, - С. 112-128.
12. Дударев, О.В. Седиментационные обстановки на приконтинентальном шельфе Восточно-Сибирского моря / О.В. Дударев, И.П. Семилетов, А.Н. Чаркин, А.И. Боцул // Доклады Акад. наук РАН – 2006а. – Т. 409, № 6. – С. 822-827.
13. Дударев, О.В. О современном состоянии подводных островных реликтов на Восточно-Сибирском шельфе / О. В. Дударев, А.Н. Чаркин, И.П. Семилетов [и др.] // Докл. Акад. наук. – 2008. – Т. 419, № 2. – С. 225-261.
14. Жданов, М.С. Электроразведка / М.С. Жданов - М.: Недра, 1986. - 316 с.

15. Захаркин, А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой “Цикл”/ А.К. Захаркин - Новосибирск: СНИИГГиМС, 1981. - 98 с.
16. Леонтьев, И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов / И.О. Леонтьев. – М.: ГЕОС, 2001. – 272 с.
17. Лонгинов, В.В. Очерки литодинамики океана / В.В. Лонгинов. – М.: Наука, 1966. – 244 с
18. Молочушкин, Е.Н. К мерзлотной характеристике донных пород восточной части Ванькиной губы, море Лаптевых / Е.Н. Молочушкин // Вопросы географии Якутии. -1973. - Вып. 6. Л.: Гидрометеоздат. - С. 123-129.
19. Попов, А.И. Криогенные формы рельефа / А.И. Попов, Т.П. Кузнецова, Э. Розенбаум // М.: МГУ, 1983. – 40 с.
20. Разумов, С.О. Реликты субаэрального криогенеза микрорельефа на шельфе Восточно-Сибирского моря / С.О. Разумов // Криолитозона и подземные воды Сибири. Ч. I. Морфология криолитозоны. – Якутск, 1996. – С. 118-129.
21. Романовский, Н.Н. Распространение субмаринной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых / Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Пустовойт Т.П. [и др.] // Криосфера Земли. - 1997. - Т. 1. № 3. - С. 9–18.
22. Charkin, A.N. Seasonal and interannual variability of sedimentation and organic matter distribution in the Buor-Khaya Gulf: the primary recipient of input from Lena River and coastal erosion in the southeast Laptev Sea / A.N. Charkin, O.V. Dudarev, I.P. Semiletov, [et al.] [et al.] // Biogeosciences. – 2011. – Vol. 8, Is. 9. – P. 2581-2594.
23. Pipko, I. I. Interannual variability of air-sea CO<sub>2</sub> fluxes and carbon system in the East Siberian Sea / I.I. Pipko, I.P. Semiletov, S.P. Pugach, [et al.] // Biogeosciences. - 2011. - Vol. 8. P. 1987-2007.
24. Semiletov, I.P., The East-Siberian Sea as a transition zone between the Pacific origin water and local shelf water / I. Semiletov, O. Dudarev, V. Luchin, A. Charkin [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2005. – Vol. 32, Is. 10. – L10614. doi: 10.1029/2005GL022490.
25. Semiletov, I.P., Atmospheric Carbon Emissions from Northern Lakes: a Factor of Global Significance / I.P. Semiletov, I.I. Pipko, N. Ya. Pivovarov [et al.] // Atmos. Environ. - 1996. - V. 30. - P. 1657–1671.
26. Semiletov, I.P. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion / I.P. Semiletov, I.I. Pipko, N.E. Shakhova [et al.] // Biogeosciences. – 2011. – Vol. 8. – P. 2407–2426. doi: 10.5194/bg-8-2407-2011
27. Semiletov, I.P. On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System / I.P. Semiletov, N.E. Shakhova, V.I. Sergienko, [et al.] // Environmental Research Letters. – 2012. – Vol. 7, N 1. – P. 015201. doi: 10.1088/1748-9326/7/1/015201

28. Semiletov, I.P. Carbonate chemistry dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean: Pacific sector of the Arctic erosion / I.P. Semiletov, I.I. Pipko, I.A. Repina, N.E. Shakhova // Journal of Marine Systems. – 2007. – Vol. 66, Is. 1/4. – P. 204-226.

29. Shakhova, N. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, I. Leifer [et al.] // Nature Geoscience. – 2014. – N 7. – P. 64-70.

30. White, W.A. Colloid phenomena in sedimentation of argillaceous rocks / W.A. White // J. Sediment. Petrol. – 1961. - № 31. - P. 560-570.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В рамках работ по заявленной теме организованы и проведены комплексные междисциплинарные исследования окраинных морей Восточной Арктики, включающие гидрологические, гидрохимические, гидрофизические, гидрооптические и биогеохимические наблюдения.

Одним из наиболее ярких результатов отчетного периода является подтверждение аномалий растворенного метана в районах Восточно-Сибирского шельфа, которые исследуются нами в режиме мониторинга. На основе более 12 тысяч измерений концентраций растворенного метана, полученных в поверхностных водах окраинных морей Евразии, показано, что все исследованные акватории являются источниками  $\text{CH}_4$  в атмосферу. Пространственное распределение концентраций поверхностного растворенного  $\text{CH}_4$  в российских арктических морях, и особенно в морях Восточной Арктики (МВА), отличается мозаичностью и наличием выраженных пространственных градиентов. В МВА выделяются локализованные области, в которых перенасыщение поверхностной воды растворенным метаном относительно атмосферы достигает 5000%, при максимальных значениях за период наших наблюдений до 20000%.

Проведено исследование карбонатной системы вод на внутреннем, среднем и внешнем шельфе восточной части моря Лаптевых. Показано, что основным фактором, контролирующим карбонатную химию шельфовых вод в теплый сезон, является значительный терригенный сток. Поверхностные воды внутреннего и среднего шельфа восточной части моря Лаптевых в осенний сезон являются поставщиком углекислого газа в атмосферу, а внешнего - стоком для атмосферного  $\text{CO}_2$ . Установлено, что в настоящее время воды внутреннего шельфа восточной части моря Лаптевых во всей водной толще уже являются коррозионными по отношению к карбонату кальция. Поверхностные и придонные воды среднего шельфа также недосыщены по отношению к арагониту. Показано, что основными факторами, определяющими обнаруженное недосыщение, является существенный объем пресных вод, поступающих с речным стоком и в

результате таяния льда, а также большое количество лабильного аллохтонного органического вещества, вовлекаемого на шельфе в современный биогеохимический цикл. Проведенные исследования показали, что шельфовые воды восточной части моря Лаптевых являются одной из самых коррозионных по отношению к карбонату кальция зон Мирового океана.

В ходе исследования было обнаружено экстремальное недосыщение вод арагонитом и чрезвычайно высокая кислотность вод, уже превышающие уровни, ожидаемые для этого региона в 2100. Данные по изотопному составу растворенного неорганического углерода и моделирование методом Монте-Карло с использованием величин солености и  $\delta^{18}\text{O}$  показали, что постоянное подкисление вод определяется деградацией терригенного органического вещества и стоком вод арктических рек с повышенным содержанием  $\text{CO}_2$ , а не поглощением атмосферного  $\text{CO}_2$ . Мы предполагаем, что воды Восточно-Сибирского арктического шельфа могут стать более кислыми, если таяние мерзлоты приведет к интенсификации поступления терригенного органического углерода и если сток пресных вод будет продолжать расти, что может увеличить эффективность выделения  $\text{CO}_2$  из шельфовых вод в атмосферу.

Проведен анализ оптических характеристик одного из наиболее характерных компонентов речного стока – оптически активной окрашенной фракции растворенного органического вещества (ОРОВ), интенсивно поглощающей солнечную радиацию в коротковолновой части спектра. На основе экспериментальных данных впервые показана возможность использования оптических характеристик не только для количественных оценок, но и для определения состава растворенного органического вещества в водах Восточно-Сибирского шельфа.

Восточно-арктический шельф – идеальная природная платформа для изучения процессов осадконакопления и рельефообразования в области развития охлажденных ниже 0о позднечетвертичных (многолетнемерзлых) и новообразованных отложений, в совокупности определяющих облик современного шельфа и понятие «криолитоморфогенеза». Ввиду недостаточной изученности некоторые его аспекты до сих пор остаются дискуссионными, требуют неоднозначного подхода к решению. Абсолютно ясно, что познание особенностей криолитоморфогенеза - ключ к пониманию нередко феноменальных природных процессов. В основу работы положены результаты натурных исследований на модельных полигонах различных пространственных масштабов. В рамках проблемы деградации криолитозоны системы «суша-шельф» изучались особенности формирования межгодовой и короткопериодной изменчивости распределения взвеси в шельфовых морях Восточной Арктики. Показано, что межгодовая изменчивость структуры пространственного распределения взвеси обусловлена результирующим эффектом интенсивности береговой эрозии, объема речного стока, ледовых условий и поля ветра на фоне конкретной синоптической обстановки. Рассмотрены возможности практического использования электромагнитного зондирования для картирования кровли реликтовых мерзлых

толщ на арктическом шельфе. Впервые получены данные о реальном современном состоянии реликтовых форм субаэрального рельефа, крайне важные для понимания характерных особенностей деградации субаквальной мерзлоты.

Исследования, выполненные в рамках проекта, являются принципиально новыми, что было признано международным сообществом. Результаты исследований были представлены на осенней сессии Американского Геофизического Союза в 2014-2015 г. Ряд статей по теме проекта уже опубликован в отечественных и зарубежных изданиях (“Доклады Академии Наук”, “Океанология“, “Nature”, “Nature Geoscience”, “Biogeosciences”, “Journal of Geophysical Research”, “Environmental Research Letters” и др.).

Общий вывод из наших текущих работ: при дальнейшем потеплении климата, разрушении наземной и подводной мерзлоты, атмосферная эмиссия обоих парниковых газов (CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>) усилится. Для полного понимания этого вопроса и создания адекватной модели климата требуются дальнейшие комплексные исследования в системе «суша-шельф» в Арктике. Это возможно только путем объединения ресурсов всех развитых стран, где Россия, как самая крупная арктическая держава, должна занять лидирующую позицию, что в первую очередь требует изыскания дополнительных ресурсов.

По материалам работ за отчетный период опубликованы следующие статьи:

1. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernikh D., Stubbs Ch., Nicolsky D., Tumskey V., and Gustafsson Ö. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Geoscience*, 2014. 7, 64-70. doi: 10.1038/NGEO2007.

2. Дударев О.В., Чаркин А.Н., Семилетов И.П., Шахова Н.Е., Дмитриевский Н.Н., Лобковский Л.И., Ананьев Р.А., Мелузов А.А., Росляков А., Сергиенко В.И. Новые данные о субаэральном полигонально-валиковом рельефе и факторах, контролирующих его трансформацию и современное состояние на восточно-сибирском шельфе // *Доклады Академии наук*, 2014. 457, 2, 226–229.

3. Sánchez-García L., Vonk J. E., Charkin A. N., Kosmach D., Dudarev O. V., Semiletov I. P., and Gustafsson Ö. Characterisation of three regimes of collapsing Arctic ice complex deposits on the SE Laptev Sea coast using biomarkers and dual carbon isotopes // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2014, 25, 172–183.

4. Tesi T., Semiletov I., Hugelius G., Dudarev O., Kuhry P., Gustafsson Ö. Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land–ocean continuum in East Siberia: Insights from biomarkers and carbon isotopes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014. 133, 235–256.

5. Vonk J.E., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Eglinton T.I., Andersson A., Shakhova N., Charkin A., Heim B., Gustafsson Ö. Preferential burial of permafrost derived organic carbon in Siberian-Arctic shelf waters // *Journal of Geophysical Research*, 2014. 119, 12, doi: 10.1002/2014JC010261.

6. Пипко И.И., Пугач С.П., Семилетов И.П. Характерные особенности динамики карбонатных параметров вод восточной части моря Лаптевых // *Океанология*, 2015, 55, №1, 78-92.
7. Karlsson E.S., Bruchert V., Tesi T., Charkin A., Dudarev O., Semiletov I., Gustafsson O. Contrasting regimes for organic matter degradation in the East Siberian Sea and the Laptev Sea assessed through microbial incubations and molecular markers // *Marine Chemistry*, 2015, 170, 11–22.
8. Doğrul Selver A., Sparkes R.B., Bischoff J., Talbot H.M., Gustafsson Ö., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Boulton S., van Dongen B.E. Distributions of bacterial and archaeal membrane lipids in surface sediments reflect differences in input and loss of terrestrial organic carbon along a cross-shelf Arctic transect // *Organic Geochemistry*, Volumes 83–84, June–July 2015, P. 16-26.
9. Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Сергиенко В.И., Пипко И.И., Пугач С.П., Черных Д.В. Особенности современного морфолитогенеза на шельфе моря Лаптевых: Семеновское мелководье («Земля Васема») // *Доклады Академии наук*, 2015, т. 462, № 2, с. 223-229.
10. Чаркин А.Н., Дударев О.В., Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Пипко И.И., Пугач С.П., Сергиенко В.И. Влияние синоптических процессов и речного стока на формирование полей взвеси в морях Восточной Арктики // *Доклады Академии наук*, 2015, т. 462, № 5, с. 595-600.
11. Sparkes R. B., Doğrul Selver A., Bischoff J., Talbot H. M., Gustafsson Ö., Semiletov I. P., Dudarev O. V. and van Dongen B.E. GDGT distributions in the East Siberian Sea: implications for organic carbon export, burial and degradation // *Biogeosciences*, 2015, 3753-3768, doi:10.5194/bg-12-3753-2015.
12. Пипко И.И., Пугач С.П., Репина И.А., Дударев О.В., Чаркин А.Н., Семилетов И.П. Распределение и потоки углекислого газа на шельфе Чукотского моря // *Исследование Земли из Космоса*, 2015, № 3, с. 43-59.
13. Дударев О.В., Чаркин А.Н., Пипко И.И., Пугач С.П., Космач Д.А., Черных Д.В., Семилетов И.П., Винников А.В. Биогеохимические исследования в системе «река Анадырь – Берингово море» в летний период 2013 // *Океанология*, 2015, 55, 5, 858-860.
14. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A. and Gustafsson Ö. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2015, 373: 20140451. (*Philosophical Transactions of the Royal Society A*).
15. Космач Д.А., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Куриленко А.В., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Метан в поверхностных водах окраинных морей Евразии // *Доклады Академии наук*, 2015, 465, № 4, 441-445.

16. Salvadó, J. A., Tesi, A., Andersson, J., Ingri, O. V., Dudarev, I. P., Semiletov, and Ö. Gustafsson, Organic carbon remobilized from thawing permafrost is resequenced by reactive iron on the Eurasian Arctic Shelf // *Geophys. Res. Lett.*, 2015, 42, 8122–8130, doi:10.1002/2015GL066058.
17. Feng, X., Ö. Gustafsson, R.M. Holmes, J.E. Vonk, B.E. van Dongen, I.P. Semiletov, O.V. Dudarev, M.B. Yunker, R.W. Macdonald, L. Wacker, et al. Multimolecular tracers of terrestrial carbon transfer across the pan-Arctic:  $^{14}\text{C}$  characteristics of sedimentary carbon components and their environmental controls // *Global Biogeochem. Cycles*, 2015, 29, doi:10.1002/2015GB005204.
18. Пугач С. П., Пипко И. И., Семилетов И. П., Сергиенко В. И. Оптические характеристики растворенного окрашенного органического вещества на Восточно-Сибирском шельфе // *Доклады Академии наук*, 2015, 465, № 5, С.608-611.
19. Bröder L., Tommaso T., Andersson A., Eglinton T.I., Semiletov I. P., Dudarev O. V., Roos P., Gustafsson Ö. Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea // *Organic Geochemistry*, 2016, Vol. 91, P. 16-30.
20. Пипко И.И., Пугач С.П., Семилетов И.П. Оценка потоков  $\text{CO}_2$  между океаном и атмосферой в восточной части моря Лаптевых в безледный период // *Доклады Академии наук*, 2016, т. 467, № 5, 594-597.
21. Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö., Anderson L.G., Sergienko V., Pugach S., Dudarev O., Charkin A., Gukov A., Bröder L., Andersson A., Spivak E., Shakhova N. Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // *Nature Geoscience*, 2016, vol. 9, 361-365, doi: 10.1038/NGEO2695.
22. Tesi T., Semiletov I., Dudarev O., Andersson A., and Ö. Gustafsson. Matrix association effects on hydrodynamic sorting and degradation of terrestrial organic matter during cross-shelf transport in the Laptev and East Siberian shelf seas // *Journal of Geophysical Research - Biogeosci.*, 2016, vol. 121, P. 731–752.
23. Sparkes, R. B., Doğrul Selver, A., Gustafsson, Ö., Semiletov, I. P., Haghypour, N., Wacker, L., Eglinton, T. I., Talbot, H. M., and van Dongen, B. E.: Macromolecular composition of terrestrial and marine organic matter in sediments across the East Siberian Arctic Shelf, *The Cryosphere*, 2016, 10, 2485-2500, doi:10.5194/tc-10-2485-2016.
24. Bröder, L., Tesi, T., Salvadó, J. A., Semiletov, I. P., Dudarev, O. V., and Gustafsson, Ö.: Fate of terrigenous organic matter across the Laptev Sea from the mouth of the Lena River to the deep sea of the Arctic interior, *Biogeosciences*, 2016, 13, 5003-5019, doi:10.5194/bg-13-5003-2016.
25. Кошурников А.В., Тумской В.Е., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Гунар А.Ю., Пушкарев П.Ю., Семилетов И.П., Кошурников А.А. Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // *Доклады Академии наук*, 2016, т. 469, № 5, С. 616-620.



26. Karlsson, E., J. Gelting, T. Tesi, B. van Dongen, A. Andersson, I. Semiletov, A. Charkin, O. Dudarev, and Gustafsson Ö. Different sources and degradation state of dissolved, particulate, and sedimentary organic matter along the Eurasian Arctic coastal margin // *Global Biogeochem. Cycles*, 2016, 30, 898–919, doi:10.1002/2015GB005307.

27. Sapart, C. J., Shakhova, N., Semiletov, I., Jansen, J., Szidat, S., Kosmach, D., Dudarev, O., van der Veen, C., Egger, M., Sergienko, V., Salyuk, A., Tumskoy, V., Tison, J.-L., and Röckmann, T.: The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis, *Biogeosciences Discuss.*, doi:10.5194/bg-2016-367, 2016.