



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления

прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Формирование донного взмучивания на мелководьях в морях Лаптевых и
Восточно-Сибирском в результате ветрового воздействия»

Исполнитель: Адамовская Полина Олеговна

Научный руководитель: к. ф.-м. н., доцент, Ерёмина Татьяна Рэмовна

Научный консультант: д. ф.-м. н., в.н.с. Лаборатории взаимодействия океана с водами
суши и антропогенных процессов Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН,

Осадчиев Александр Александрович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«27» 06 2025 г.

г. Санкт-Петербург

2025

Содержание

Введение	1
Глава 1: Физико-географическое описание района исследования	2
1. Море Лаптевых	
1.1 Географическое описание акватории	
1.2 Гидрометеорологические условия акватории	
1.3 Гидрологический режим акватории	
2. Восточно-Сибирское море	
2.1 Географическое описание акватории	
2.2 Гидрометеорологические условия акватории	
2.3 Гидрологический режим акватории	
Глава 2: Материалы и методы исследования	
Глава 3: Результаты исследования	
Глава 4: Зависимость площади взмучивания региона с ветровым воздействием	
Заключение	
Список литературы	

Введение

Северный Ледовитый океан особенно уязвим к происходящим изменениям климатической системы Земли. Потепление в Арктике, в частности, проявляется в снижении площади ледового покрова и в повышении температуры воздуха [1, 2]. В некоторых районах потепление также приводит к интенсивной береговой эрозии [3–6] и деградации подводной вечной мерзлоты [7–9]. Данные два процесса особенно активно происходят в море Лаптевых, обширные площади шельфа и берегов которого относятся к областям вечной мерзлоты [10–14]. Прибрежная и подводная вечная мерзлота в море Лаптевых представляет собой крупный углеродный бассейн, деградация которого напрямую связана с выбросами парниковых газов [4, 15, 16]. Более того, окисление эродированного углерода до углекислого газа (CO_2) играет ключевую роль в сверхнасыщении водной толщи моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, что приводит к закислению океана в данном регионе [17–19].

Таяние арктической вечной мерзлоты может привести к выбросу значительного количества углерода в атмосферу в данном столетии. Отложения древних ледовых комплексов, выходящие на поверхность вдоль береговой линии шельфа Восточной Сибири протяженностью около 7000 км, и связанная с ними мелководная подводная вечная мерзлота — это два крупных углеродных бассейна, чья уязвимость к таянию и дальнейшей эрозии в значительной степени неизвестна [15, 20]. Продолжающееся потепление Арктики оказывается на несколько градусов выше, чем ранее прогнозировалось, и происходит оно особенно выражено над прибрежной частью Восточной Сибири. Увеличение теплоотдачи реки Лена и перемешивание поступающих вод под в результате ветрового воздействия вызывают прогрессирующее потепление поверхностных отложений и приводят к высоким темпам вертикальной деградации подводной вечной

мерзлоты [7, 21]. Соответственно, существует острая необходимость в улучшении понимания о существующей связи между поступлением углерода из деградирующей вечной мерзлоты и изменением климата в данном труднодоступном регионе.

Береговая эрозия и речной сток являются основными источниками взвешенных вещества в море Лаптевых, которые подробно изучались в предыдущих работах [22–24]. Горизонтальный и вертикальный перенос взвешенных веществ в морях регулируется распространением и перемешиванием крупных речных плюмов, а также прибрежными и шельфовыми течениями, которые имеют большую сезонную и межгодовую изменчивость [25–33]. Вмерзание взвешенных веществ в морской лёд и их последующая адвекция в глубоководную центральную часть Северного Ледовитого океана в холодное время года также является важным механизмом крупномасштабного выноса взвешенных наносов из моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря [27, 34–36].

Эрозия вечной мерзлоты морского дна также может вносить ощутимый вклад в общий бюджет осадков моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Как правило, этот процесс происходит в мелководных районах, где ветровая и волновая турбулентность поверхностного слоя достигает морского дна и вызывает вовлечение донных осадков в водную толщу [15, 37–39]. В Северном Ледовитом океане на эрозию подводных районов вечной мерзлоты также влияет температура моря в придонном слое [40]. В некоторых мелководных районах эродированные осадки могут подниматься до поверхностного слоя и значительно увеличивать его мутность. В частности, интенсивная эрозия морского дна в разных частях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря часто проявляется на спутниковых снимках через появление мутных регионов [41, 42]. Ранее этому данному процессу уделялось мало внимания в научных исследованиях. На данный момент неизвестно ни об одном комплексном

исследовании, которое бы рассматривало динамику эрозии вечной мерзлоты морского дна в мелководных районах моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря и предоставляло соответствующие оценки потоков осадков, что обуславливает актуальность текущей работы.

Текущее исследование фокусируется на изучении эрозии морского дна на нескольких крупных отмелях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, которая могла быть зафиксирована на спутниковых снимках. **Цель** исследования заключалась в оценке процесса деградации подводной вечной мерзлоты на мелководьях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. В **задачи** исследования входило:

- вычисление площади (в км²) мутных регионов (образующихся в результате эрозии морского дна на отмелях), которые были зафиксированы на оптических спутниковых снимках;

- сравнение рассчитанных площадей мутных зон с синхронными ветро-волновыми условиями, реконструированными для рассматриваемых дней с помощью численной модели;

- воссоздание интенсивности деградации вечной мерзлоты для каждого безлёдного дня в период с 1979 по 2021 год благодаря временному покрытию численной модели;

- использование натурных измерения концентраций осадков для оценки потока эродированного осадочного материала с изучаемых отмелей в безлёдные периоды с 1979 по 2021 год.

Результаты проведенного исследования представлялись автором на следующих конференциях:

1. XIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU-2024» (г. Москва, 28 октября - 1 ноября 2024 года);

2. Сямэньский симпозиум по наукам о морской среде «XMAS 2025» (г. Сямэнь, 14 – 17 января 2025 года).

Глава 1. Физико-географическое описание района исследования

1. Море Лаптевых

1.1 Географическое описание моря Лаптевых

Море Лаптевых является материковым окраинным морем Северного Ледовитого океана и находится в самом центра Российского сектора Арктики. Море Лаптевых располагается у северо-восточного побережья Сибири (Рисунок 1) и ограничено полуостровом Таймыр и архипелагом Северная Земля на западе и Новосибирскими островами на востоке [43]. С запада граничит с Карским морем, с которым соединяется проливами Красной Армии, Шокальского и Вилькицкого, с востока – с Восточно-Сибирским морем, с которым соединено проливами Санникова и Дмитрия Лаптева.

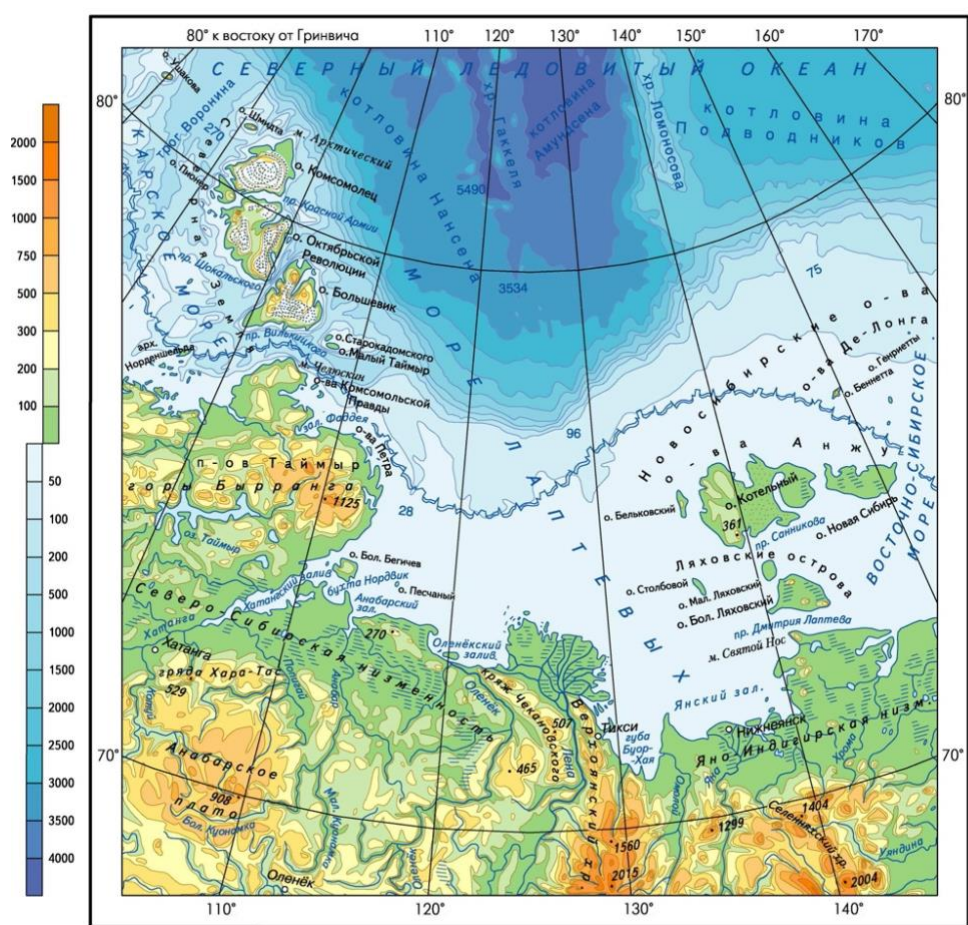


Рисунок 1: физико-географическая карта моря Лаптевых [44]

Море Лаптевых относительно мелководно: континентальный шельф в южной части моря занимает около половины площади моря с глубинами менее 50 м. Площадь моря Лаптевых составляет 662 тысячи км² [43], в то время как по оценкам [45] континентальный шельф занимает около 440 тысяч км², что составляет $\sim 2/3$ всей площади моря. В северной части моря Лаптевых, начиная примерно с 76° с.ш., наблюдается резкое увеличение глубин в связи с переходом континентального шельфа в ложе океана. В северном секторе моря наблюдается самое глубоководное место моря Лаптевых – котловина Амундсена с глубинами 2000 м и более.

Береговая линия моря характеризуется повышенной изрезанностью, присутствует большое количество заливов и бухт. К самым крупным относятся: залив Фаддея, Хатангский залив, Анабарский и Оленёкский заливы, губа Буор-Хая и Янский залив. В акватории моря Лаптевых также находится большое количество островов, как в составе архипелагов (Новосибирские острова, Северная Земля), так и одиночные (о. Большой Бегичев, о. Песчаный). Рельеф прибрежных территорий также разнообразен: встречаются как низменности в районах речных дельт, так и хребты и невысокие горы.

1.2 Гидрометеорологические условия моря Лаптевых

В отличие от западных и восточных районов Евразийской Арктики, на которые влияет циклоническая деятельность Атлантического и Тихого океанов (например, Атлантического в Карском море и Тихого в Чукотском море), влияния циклонической деятельности в море Лаптевых практически нет, оно отличается суровыми климатическими условиями, включающими в себя экстремально низкие зимние температуры и короткий безлёдный период [46]. Помимо этого, на суровость климата моря Лаптевых также сильно влияет его высокоширотное расположение. Положительная

температура воздуха наблюдается только в два летних месяца, в июле и в августе, и, в среднем, составляет $+3^{\circ}\text{C}$, а в зимние месяцы, с декабря по февраль, температура воздуха колеблется от -27 до -30°C . Среднегодовая температура воды в море Лаптевых составляет -1.1°C , максимальная температура воды приходится на август, достигая отметки в чуть менее 2°C [47].

За счёт большой протяжённости с запада на восток море Лаптевых может быть зонировано в соответствии с воздействием разнящихся климатических условий [43]. В зимний период море Лаптевых можно подразделить на три части: северную, западную и юго-восточную, на которые влияют три разные барические системы. В северной части моря Лаптевых наблюдается влияние Полярного максимума, в западной части прослеживается влияние Исландского минимума, а юго-восточная часть моря подвержена влиянию Сибирского антициклона. В соответствии с описанным зонированием, в зимние месяцы в море Лаптевых превалирует безоблачная погода. В противоположность этому, в летний период море Лаптевых большую часть времени закрыто облаками. Влажность воздуха в летний период может превышать 95%, что приводит к образованию частых туманов [48].

Ледовый режим моря Лаптевых характеризуется коротким безлёдным периодом: с октября по май море покрыто льдом. Отмечается, что западная часть моря Лаптевых более ледовита и в некоторых регионах западной части сезон открытой воды не превышает полутора месяцев [49]. Интенсивное таяние льда начинается в конце июня - начале июля, и к августу-сентябрю акватория моря освобождается ото льда. Ледообразование начинается в октябре, к концу октября - началу ноября море Лаптевых полностью покрывается льдом [50].

1.3 Гидрологический режим моря Лаптевых

В гидрологическом режиме моря Лаптевых первостепенную роль играет материковый сток, поступление большого объёма пресных вод в значительной роли обуславливает гидрологическую структуру моря. В море Лаптевых впадают такие крупные реки как Лена, Анабар, Оленёк, Хатанга и Яна. В среднем, за год в море Лаптевых поступает чуть менее 750 км³ речного стока, из них 70% приходится на реку Лену, пик половодья которой приходится на июнь и объём речного стока которой ежегодно составляет 525 км³ [46, 51]. Основная часть речного стока поступает в море Лаптевых в течение безлёдного периода, с июня и по сентябрь.

Устье реки Лена представляет собой разветвлённую дельту, общая площадь которой составляет 32 тысячи км² [52] и которая выступает далеко за пределы окружающей береговой линии. Большая площадь дельты и её пространственная организация, вкупе с высокой скоростью речного стока Лены, который, в среднем, составляет около 17 тысяч м³/с, обуславливают транспорт опреснённых вод реки Лена в центральную часть акватории моря Лаптевых. Будучи более тёплыми и более пресными, речные воды наслаиваются на арктические воды моря, которые имеют более низкую температуру и более высокую солёность, образуя речной плюм. Наслаивание вод с различными гидрологическими характеристиками приводит к увеличению стратификации вод в районе речного плюма. В свою очередь, это влияет на гидрологическую структуру акватории, так как повышенная стратификация осложняет вертикальное перемешивание вод, приводя к снижению его интенсивности. Данный факт существенно влияет на общий гидрологический режим моря Лаптевых, так как обуславливает не только гидрологические особенности прибрежных зон, но и всей акватории моря.

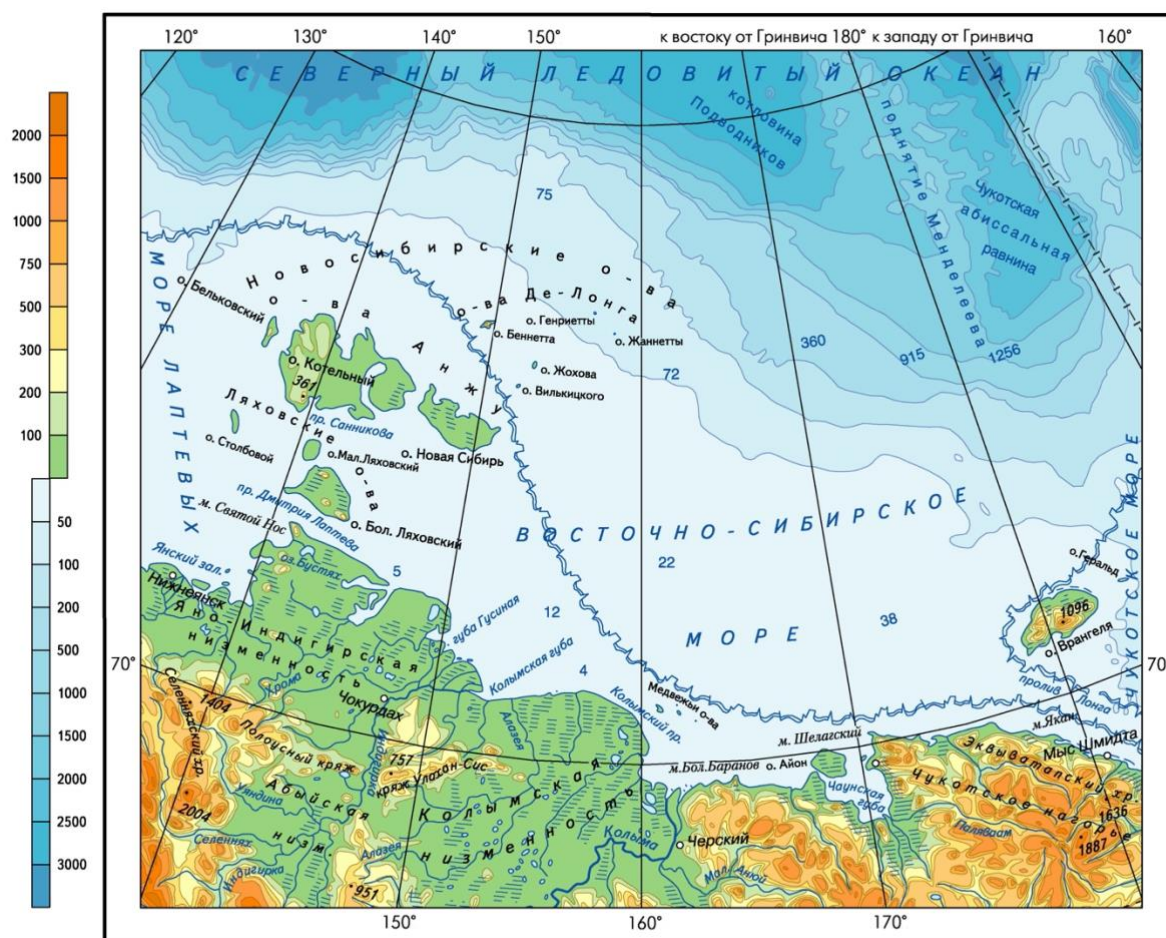
2. Восточно-Сибирское море

2.1 Географическое описание Восточно-Сибирского моря

Аналогично морю Лаптевых, Восточно-Сибирское море относится к окраинным материковым морям Северного Ледовитого океана и находится на самом востоке Российского сектора Арктики. Западной границей Восточно-Сибирского моря принято считать архипелаг Новосибирских островов, с востока условную границу принято проводить по 180° параллели в.д., которая проходит через остров Врангеля и соединяется с материком у мыса Якан. С юга граница Восточно-Сибирского моря проходит по береговой линии материка от мыса Святой Нос на западе и мыса Якан на востоке [43]. Через проливы Санникова и Дмитрия Лаптева Восточно-Сибирское море сообщается с морем Лаптевых на западе, через пролив Лонга – с Чукотским морем на востоке.

Восточно-Сибирское море является самым крупным по площади морем Российской Арктики (чуть более 910 тысяч км²), а также самым мелководным [53]. Около 70% площади моря не превышают глубины 50 м, а площадь мелкого континентальном шельфа составляет 820 тысяч км², что составляет 90% от площади всего моря. Континентальный шельф уменьшается вдвое при продвижении с запада на восток: у восточной окраины Новосибирских островов 70% шельфа Восточно-Сибирского моря имеют глубину менее 20 м, но в центральной части моря внутренняя 20-метровая изобата продвигается на юг, и внутренняя часть шельфа в районе Медвежьих островов уже имеют глубину чуть менее 40 м. На самом востоке моря, у острова Врангеля, внутренняя часть шельфа ещё более углубляется и в данном месте уже превалирует 50-метровая изобата [45]. Отличительными чертами батиметрии Восточно-Сибирского моря

являются палеоруслу рек Индигирки и Колымы, которые образуют две широкие долины и нарушают относительную гладкость шельфа моря.



Масштаб 1:12 500 000

Рисунок 2: физико-географическая карта Восточно-Сибирского моря [44]

В отличие от моря Лаптевых Восточно-Сибирское море не отличается большим количеством островов. Не считая архипелага Новосибирских островов на западной границе и острова Врангеля на восточной границе, в Восточно-Сибирском море присутствует архипелаг Медвежий острова, состоящий из 6 островов, и одиночный остров Айон в Чаунской губе. Береговая линия не характеризуется большой изрезанностью, в основном присутствуют протяжённые участки ровной береговой линии, из крупных неоднородностей береговой линии отмечаются Омуляхская и Хромская губы у юго-западного берега и Чаунская губа у юго-восточного берега моря. Рельеф прибрежных территорий отличается в западной и восточной частях

побережья Восточно-Сибирского моря. От мыса Святой Нос до устья реки Колымы побережье характеризуется заболоченными низменными берегами, в то время как восточнее устья реки Колымы до мыса Якан побережье становится холмистым, у западной границы побережья находится Чукотское нагорье с высотами, местами достигающими до отметки чуть менее, чем 2000 м.

2.2 Гидрометеорологические условия Восточно-Сибирского моря

Специфика климатических условий Восточно-Сибирского моря в основном определяется его высокоширотным расположением между 69° и 79° с.ш. На климат акватории также отчасти влияет его относительная географическая близость к Тихому океану: в восточной части моря нередко наблюдается влияние тихоокеанских циклонов. При этом влияние циклонической активности Тихого океана невелико, и климат Восточно-Сибирского моря всё ещё можно охарактеризовать как полярный и континентальный. Для зимних месяцев в акватории Восточно-Сибирского моря характерны температуры -27 - 28 °С, в летние месяцы температура варьируется от +1.7 °С у побережья до -0.1 °С в северной части моря [54]. Среднегодовая температура воды в Восточно-Сибирском море в прибрежной зоне составляет -0.6 °С, максимальная температура воды приходится на август, достигая отметки в +2.24 °С [54]. В открытом море средняя температура воды на протяжении всего года остаётся отрицательной и составляет, в среднем, -1.26 °С.

Атмосферная циркуляция над Восточно-Сибирским морем разнится от сезона к сезону. В среднем, в зимний период над акваторией Восточно-Сибирского моря преобладает область пониженного давления, минимум которой приходится на регион к северо-западу от Новосибирских островов. В весенние и летние месяцы акватория Восточно-Сибирского моря

находится под влиянием арктических антициклонов и над акваторией преобладают области повышенного давления, чей максимум приходится на северо-запад акватории моря. В осенний период в центральной части акватории Восточно-Сибирского моря образуется седловина, которая приводит к тому, что восточные и западные секторы моря подвергаются влиянию областей пониженного давления, а южные и северные – влиянию областей повышенного давления [46]. Влажность воздуха в акватории моря высока в течение всего года, её максимум приходится на конец календарного лета, когда в южном секторе моря наблюдается влажность от 85 до 90%, а в северном секторе её значения колеблются от 92 до 95%.

Восточно-Сибирское море является самым ледовитым из всех арктических морей. Безлёдный период в данном регионе наблюдается с августа по сентябрь, на протяжении остальных 10 месяцев Восточно-Сибирское море покрыто льдом. Только к концу календарного лета юго-западные акватории моря освобождаются ото льда, остальная же акватория моря занята дрейфующим льдом; ледостав происходит в октябре [46].

2.3 Гидрологический режим Восточно-Сибирского моря

К самым крупным рекам, впадающим в Восточно-Сибирское море, относятся Индигирка, Колыма и Алазея. В год в Восточно-Сибирское море поступает речной сток объёмом 250 тысяч км³, из которого более 50% попадает из Колымы и чуть менее 25% – из Индигирки [51]. В отличие от других морей Российской Арктики, например Карского моря и моря Лаптевых, в которые впадают такие крупные реки как Енисей, Обь и Лена, речной сток Восточно-Сибирского моря крайне незначителен. Объём речного стока в Восточно-Сибирское море составляет одну десятую от общего речного стока всех арктических морей [43]. Значительная часть объёма материкового стока приходится на безлёдный период, когда море

свободно ото льда, в августе и в сентябре, при этом за счёт небольшого размера рек и небольшой скорости их потоков (средний расход воды для Колымы составляет $3400 \text{ м}^3/\text{с}$, для Индигирки – $1565 \text{ м}^3/\text{с}$, для Алазеи – $43.6 \text{ м}^3/\text{с}$ [46]), опреснённые воды не имеют возможность распространиться на большую площадь акватории и, в основном, остаются в прибрежной зоне непосредственно у устьев рек. Из-за описанных особенностей распространения речного стока в описанной акватории опреснённые воды крайне незначительно влияют на гидрологический режим Восточно-Сибирского моря и их влияние распространяется исключительно на береговую зону моря.

Береговая эрозия и речной сток являются важными источниками взвешенных наносов в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море, которые образуют мутные зоны вдоль побережья и вблизи речных дельт и эстуариев. Зоны же мутности, образованные эрозией морского дна, наоборот, локализуются в прибрежных морских районах, что обычно дает возможность отличить их от зон мутности, связанных с прибрежной эрозией и речным стоком. Однако во многих случаях зоны мутности, образованные эрозией морского дна, сливаются либо с зонами прибрежной эрозии, либо с мутными речными плюмами. Этот процесс затрудняет точное определение внешних границ зон мутности эрозии морского дна.

Согласно последним данным термодинамического осадконакопления и электромагнитным исследованиям, подводная мерзлота непрерывна на большей части шельфа моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря от береговой линии до изобат 80–100 м [55, 56]. Однако, на определённых участках шельфа подводная мерзлота прерывиста и содержит скопления газа и газогидратов. Толщина подводной мерзлоты составляет несколько сотен метров и деградирует со скоростью от 14 до 18 см в год [7, 11, 57, 58].

В море Лаптевых наиболее интенсивная эрозия морского дна происходит в районе крупнейшего мелководного района к западу от острова Столбовой, который состоит из близко расположенных Васильевской и Семеновской отмелей (далее - ВС) [41] (Рисунок 3b). Эрозия подводной мерзлоты на этой отмели вызвана ветро-волновой термоабразией подводной мерзлоты в безлёдные периоды и усиливается положительными температурами придонного слоя [40]. Этот процесс проявляется в виде повышенной мутности на спутниковых снимках, что не связано с речным стоком или береговой эрозией, так как регион находится в отдалении от береговой линии. Интенсивная эрозия морского дна также зарегистрирована спутниковыми наблюдениями на мелководье к северо-востоку от заливов Анабар и Оленёк (далее - АО) и вблизи дельты Лены

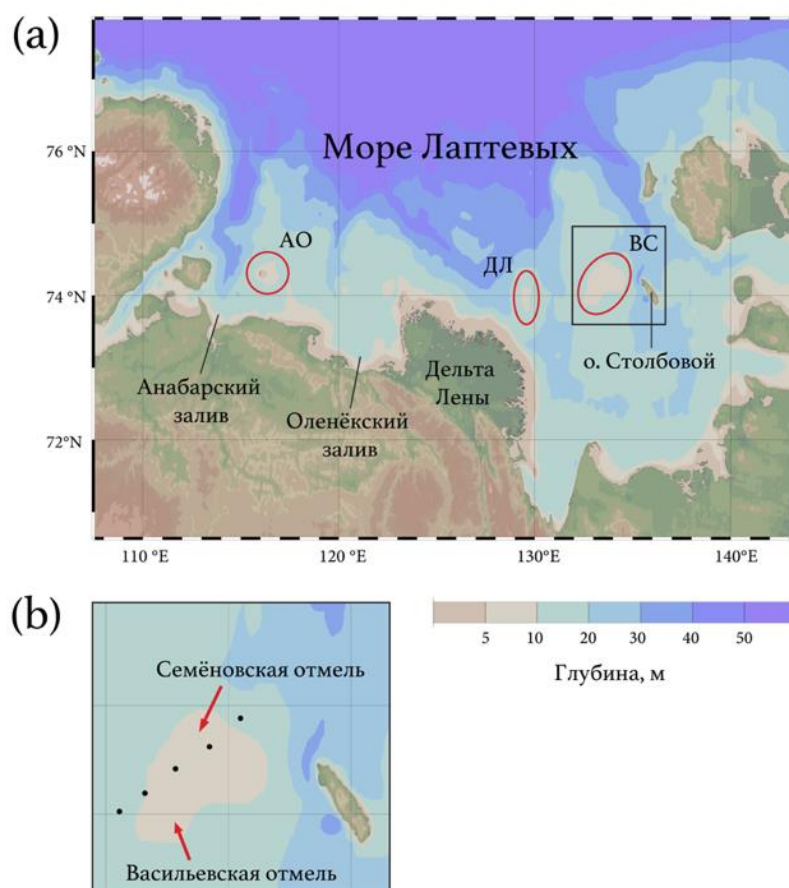


Рисунок 3: (a) батиметрия моря Лаптевых и расположение основных отмелей, обозначенных красными эллипсами, (b) локальная батиметрия Васильевской и Семеновской отмелей и расположение натуральных измерений, полученных в сентябре 2005 года (чёрные маркеры) [59].

(далее - ДЛ) (обозначены красными эллипсами на Рисунке 3), а также в других более мелких по площади мелководных районах на шельфе моря Лаптевых. Быстрое таяние вечной мерзлоты на упомянутых отмелях из-за повышения температуры придонного слоя увеличивает вовлечение взвешенных веществ в толщу воды, что изменяет локальные закономерности переноса и осаждения осадков [13]. Этот процесс существенно влияет на местный рельеф и батиметрию: в прошлом он вызвал эрозию и исчезновение островов Васильевский (в 1930-х годах) и Семеновский (в 1960-х годах) и последующее образование острова Яя (в 2010-х годах) на ВС [13].

Зона повышенной мутности поверхности моря в Восточно-Сибирском море может наблюдаться в регионе мелководного плато между палеоруслами Индигирки и Колымы (далее – ИК) (обозначена синей заштрихованной областью на Рисунке 4). Данный мутный регион часто

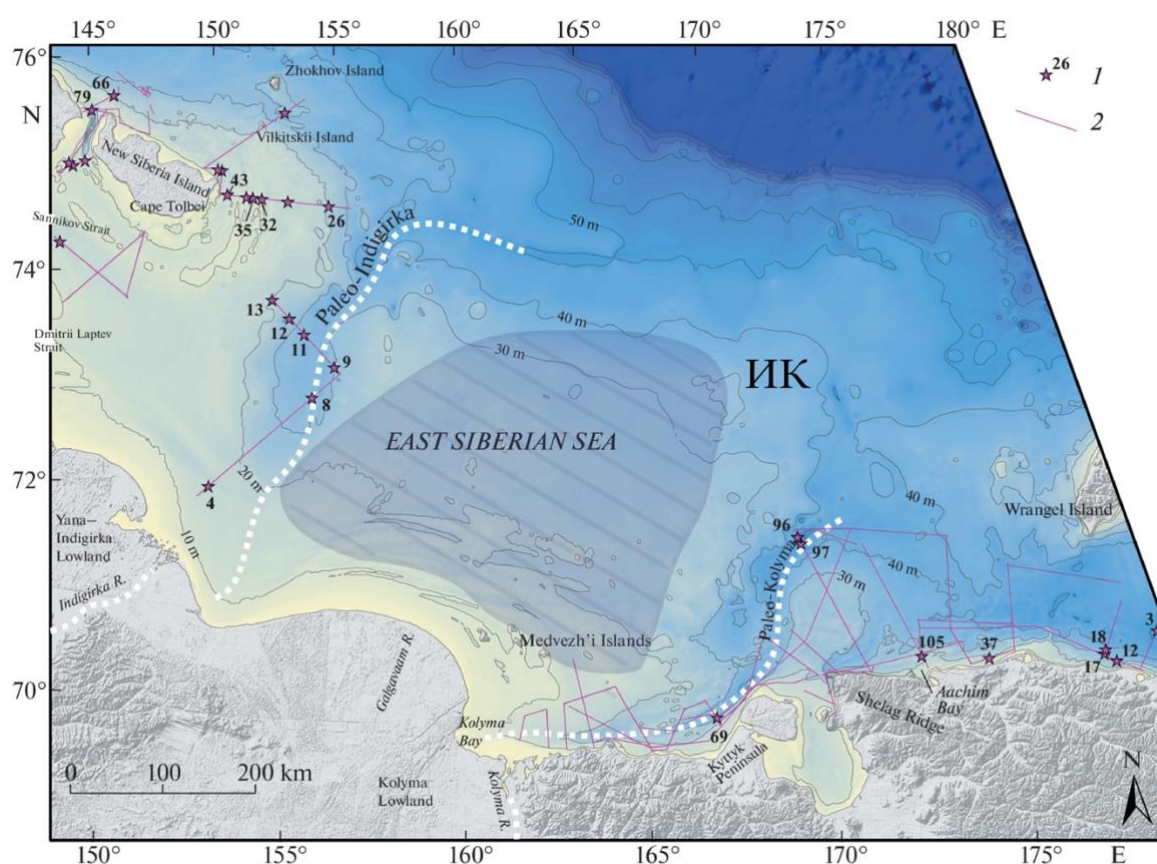


Рисунок 4: батиметрия Восточно-Сибирского моря с обозначением палеорусел рек Индигирки и Колымы (белые пунктирные линии) и расположение зоны мутности ИК, источник [60]

наблюдается между 71 и 74° с.ш. и вплотную примыкает к прибрежной зоне моря и зоне речных эстуариев, что затрудняет определение границ региона мутности, образованного непосредственно эрозией морского дна. При этом, зона мутности ИК распространяется намного дальше береговой зоны моря, что говорит в пользу того, что он также является примером процессом ветро-волновой термоабразии подводной мерзлоты, но из-за своей пространственной близости к береговой зоне, нередко сливается с мутными регионами, образованными прибрежной эрозией.

Как уже отмечалось, батиметрия Восточно-Сибирского моря относительно однородна и палеоруслы Индигирки и Колымы выделяются на фоне мелководного шельфа моря, образуя ложбины с глубиной от 40 м. Палеоруслы рек по своим характеристикам могут влиять на региональную циркуляцию вод, и согласно исследованиям, в частности, могут усиливать ветровые апвеллинги [61]. Согласно [61] палеоруслы рек могут выступать в роли подводных каньонов (обозначены белыми пунктирными линиями на Рисунке 4), которые, в условиях ветрового апвеллинга, за счёт своей конфигурации, усиливают процесс адвекции эродированных донных отложений. Соответственно, предполагается, что подъём глубинных вод в условиях апвеллинга вовлекает взвешенные вещества и выносит их на мелководное плато, повышая мутность поверхности моря в данном регионе.

Глава 2. Материалы и методы исследования

Методика данного исследования заключалась в следующем. Сначала была вычислена площадь (в км²) мутных зон (образующихся в результате эрозии морского дна на отмелях), которые были зафиксированы на спутниковых снимках. В результате была получена оценка интенсивности эрозии морского дна за ~100 безоблачных и безлёдных дней только за период с 2000 по 2021 год за счёт ограниченного временного покрытия спутниковых данных. Далее, рассчитанные площади мутных зон были сравнены с синхронными ветро-волновыми условиями, реконструированными для рассматриваемых дней с помощью численной модели. После того, как была получена зависимость интенсивности эрозии (в Тг) морского дна от ветровых и волновых условий, вычисленная интенсивность эрозии воспроизводилась для каждого безлёдного дня в период с 1979 по 2021 год, что стало возможным благодаря временному покрытию численной модели. Финальным шагом исследования было применение натурных измерений концентрации осадков для оценки потока эродированного осадочного материала с изучаемых отмелей в безлёдные периоды с 1979 по 2021 год.

2.1. Спутниковые данные

Данная работа основана на совместном анализе спутниковых снимков, ветрового и волнового реанализа и натурных измерений. Спутниковые данные состояли из оптических снимков MODIS Terra/Aqua с пространственным разрешением в 250 м и ежедневным временным покрытием за промежуток с 2000 по 2021 год. Для того чтобы отобрать соответствующие спутниковые данные, все снимки за безлёдный период года (с конца июня по начало октября) были визуально проанализированы.

В процессе анализа были отобраны те снимки, где интересующая зона исследования была максимально освобождена от остатков морского льда и облачности. В работе не использовались доступные спутниковые снимки с более высоким разрешением (например, Sentinel-2/3, Landsat 7/8, MERIS). Несмотря на то, что они могли бы обеспечить более высокую точность для изучения мутных зон в исследуемых областях, они имеют менее частую временную дискретность, что имело решающее значение для этой работы.

Береговая эрозия и речной сток являются важными источниками взвешенных наносов в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море, которые образуют мутные зоны вдоль побережья и вблизи речных дельт и эстуариев. Зоны же мутности, образованные эрозией морского дна, наоборот, локализуются в прибрежных морских районах, что обычно дает возможность отличить их от зон мутности, связанных с прибрежной эрозией и речным стоком. Однако во многих случаях зоны мутности, образованные эрозией морского дна, сливаются либо с зонами прибрежной эрозии, либо с мутными речными плюмами. Этот процесс затрудняет точное определение внешних границ зон мутности эрозии морского дна, что является одной из основных сложностей их изучения с использованием спутниковых данных.

Зона мутности ВС, которая является одной из крупнейших в море Лаптевых, расположена далеко от береговой линии (Рисунок 1). Данная зона мутности (даже при своей максимальной площади) не сливается с зонами прибрежной эрозии или мутными речными плюмами. В результате этого, внешняя граница и зона мутности морского дна в ВС могут быть безошибочно обнаружены на спутниковых снимках. При этом, другая большая зона мутности морского дна, АО, расположена в непосредственной близости от береговой линии (Рисунок 1) и часто перекрывается зоной мутности прибрежной эрозии. Подобно АО, зоны эрозии морского дна на более мелких отмелях, расположенных вблизи ЛД

и в юго-восточной части моря Лаптевых (Рисунок 1), часто неотличимы от зон мутности, образованных речным стоком и береговой эрозией.

Зона повышенной мутности ИК в Восточно-Сибирском море по своей площади больше тех зон, что рассматриваются в данной работе в море Лаптевых. В то время как северная граница зоны мутности ИК (Рисунок 2) чётко просматривается на спутниковых снимках, так как не сливается с зонами мутных речных плюмов и термоабразии берегов, южная граница зоны мутности ИК расположена в непосредственной близости к береговой линии, где почти всегда сливается с зонами повышенной мутности вблизи речных эстуариев и зонами прибрежной эрозии.

Все доступные безоблачные и свободные ото льда спутниковые снимки ВС, который является основным регионом исследования в море Лаптевых (черный прямоугольник на Рисунке 1), были подвергнуты численной обработке с целью определения наличия или отсутствия зоны повышенной мутности в регионе (т.е. процесса эрозии морского дна). В случае наличия процесса, с помощью автоматизированного кода Python была получена численная оценка площади мутной зоны. Для этого были определены следующие диапазоны значений для модели RGB, которые бы соответствовали мутным зонам на обработанных снимках: 30–50 для красного (R), 30–60 для зеленого (G) и 20–50 для синего (B). В случае, если пиксель попадал по значениям во все три диапазона, он отмечался как часть мутной зоны, в противном случае он считывался как «чистое море». Точные значения площади мутной зоны (в км²), полученные с помощью описанной процедуры, использовались для дальнейшей количественной оценки изменчивости интенсивности эрозии в ВС в качестве ответа на внешнее воздействие. В частности, была выявлена зависимость восстановленных значений интенсивности эрозии в разные дни в период с 2000 по 2021 год в зависимости от условий синхронного ветро-волнового воздействия, полученных с помощью численной модели, которая будет описана далее.

2.2. Данные спутникового реанализа

Параметры ветровых волн в море Лаптевых были промоделированы с помощью модели WAVEWATCH III (WWIII), разработанной NOAA/NCEP [62]. Данная модель позволяет учитывать такие факторы как влияние ветра, влияние океанического льда, рассеивания энергии волн, нелинейного взаимодействия и придонного трения. WWIII применяет численное решение уравнения: $dN/dt = S/\sigma$, где $N(k, \theta) \equiv F(k, \theta)/\sigma$ — плотность волнового воздействия, F — плотность энергии, k — волновое число, θ — направление волны, σ — относительная частота, d/dt — полная производная, а S — общее воздействие источников и стоков [62]. S является функцией, которая воспроизводит передачу энергии ветра, нелинейного взаимодействия волн, рассеивания энергии волн при обрушении волн на мелководье, придонного трения, отражения волн и других процессов. Выходные параметры WWIII состоят из значительной высоты волны (SWH), направления распространения волны, среднего периода волны (WP) и средней длины волны (WL).

В данном исследовании использовалась реализация WWIII со схемой ST6 [63, 64]. Для воспроизведения нелинейных волновых взаимодействий использовалось дискретное приближение взаимодействия (DIA). Покрытие морского льда рассматривалось с использованием схемы IC0, где точка сетки считается покрытой льдом, если концентрация льда в ней больше 0,5. Донное трение на мелководье рассматривалось с помощью схемы JONSWAP. Модель применялась с 36 спектральными направлениями и 36 частотными интервалами (0,03 – 0,843 Гц) с шагом по времени равным 15 минутам.

В качестве входных данных модели использовались поля ветра и данные о концентрации океанического льда, полученные из реанализа NCEP/CFR (за период с 1979 по 2010 год с пространственным

разрешением $\sim 0,3^\circ$) [65] и реанализа NCEP/CFSv2 (за период с 2011 по 2021 год с пространственным разрешением $\sim 0,2^\circ$) [66], временной шаг каждого реанализа составляет 1 час (<https://rda.ucar.edu>, дата обращения 22 октября 2023 г.). Временной шаг на выходе был равен 3 часам. Данные реанализа были линейно интерполированы в специальную неструктурированную сетку, состоящую из 36 176 узлов (Рисунок 5). Линейная интерполяция данных реанализа в неструктурированную сетку была выполнена с использованием кода Python. Интерполированные поля ветра использовались в волновой модели в режиме «как есть». Цифровая модель рельефа дна была получена из базы данных ETOPO с добавлением оцифрованных навигационных карт. Навигационные карты имели пространственное разрешение около 500 м в прибрежной зоне. Сетка модели покрывала море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское море, а также море Бофорта (Рисунок 5). Пространственное разрешение сетки составляет ~ 800 м в прибрежной зоне и ~ 15 км в северной части этих морей. Расчётная сетка имеет открытую границу на севере без каких-либо входных данных, однако эти области покрыты устойчивым морским льдом в течение всего года. Открытые границы также расположены в узких проливах на западе (пролив Вилькицкого), востоке (пролив Мак-Клура и залив Амундсена) и юге (Берингов пролив), что существенно ограничивает поток волновой энергии (Рисунок 5). Модель WWIII дает качественные результаты при низких вычислительных затратах [67, 68]. Сравнение смоделированной и измеренной значительной высоты волны причальной станцией в Чукотском море дает коэффициент корреляции равный 0,94, и RMSE равный 0,31 м [69]. Предварительные результаты, основанные на данной реализации модели WWIII, технические детали и настройки, а также оценки качества модели представлены в [69, 70].

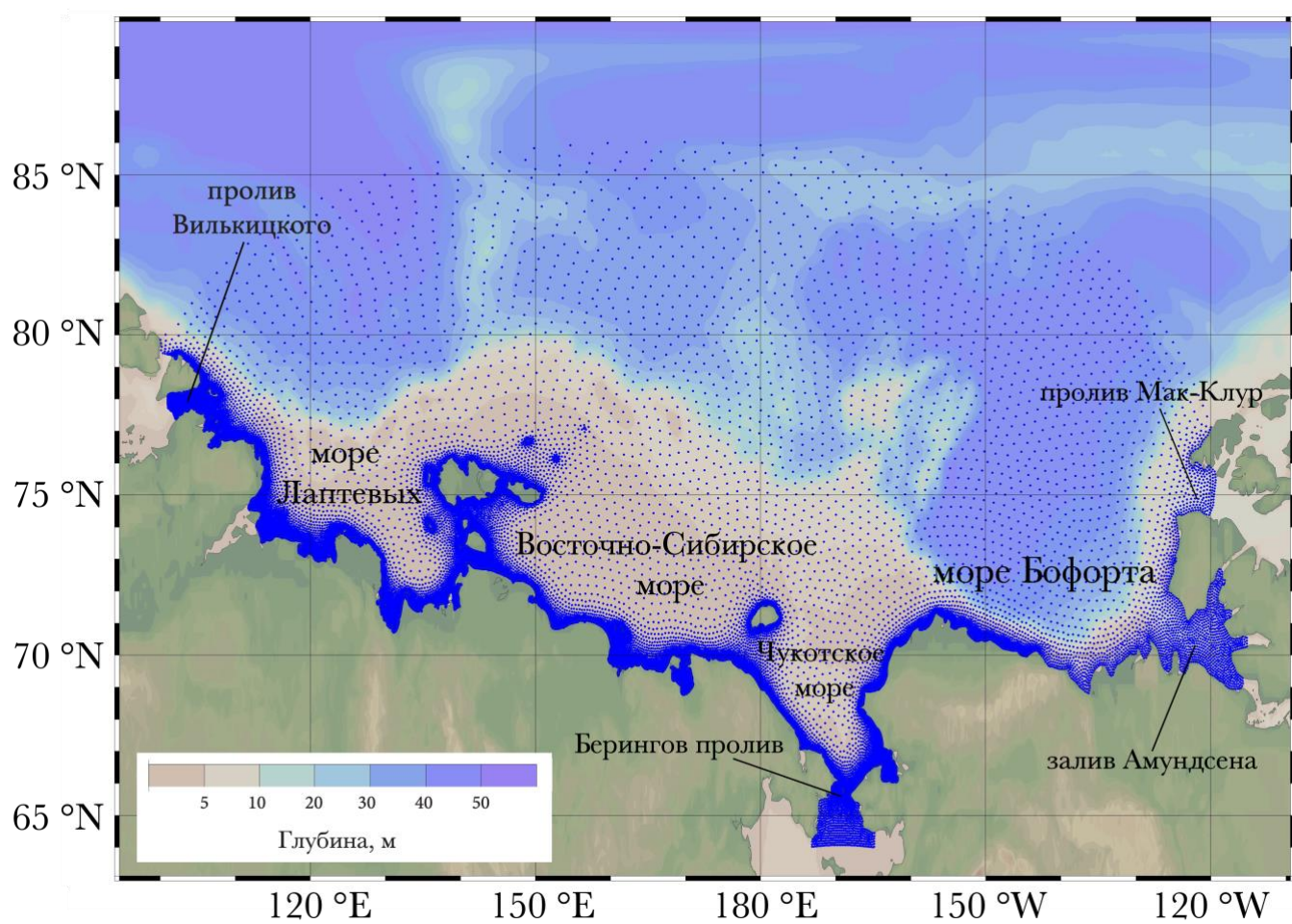


Рисунок 5: Неструктурированная сетка волновой модели для морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского и Бофорта.

Глава 3. Результаты исследования

В данной работе была проанализирована пространственная и временная изменчивость, наблюдаемая в зонах эрозии морского дна в море Лаптевых (ВС, АО и на более мелких отмелях около ЛД) и Восточно-Сибирском море (ИК). Особое внимание было затем уделено изолированной мутной зоне ВС для дальнейшего изучения её отклика на внешнее воздействия и получения количественных оценок потоков взвешенного вещества из этой области. Аналогичные исследования для других отмелей не проводились, поскольку были затруднены из-за их общего слияния с мутными зонами, образованными речным стоком и прибрежной эрозией, а также отсутствием достаточного количества спутниковых снимков и натурных изменений.

3.1. Эрозия морского дна в районе ВС

Эрозия морского дна в районе ВС изучалась на основе отобранных 106 спутниковых снимков. Большинство отобранных снимков относились к августу и сентябрю, в то время как только 15 снимков соответствовали июлю и октябрю из-за почти постоянного присутствия морского льда до конца июля и пасмурных погодных условий в октябре. Мутный регион в районе ВС показывает высокую изменчивость своей формы, размера и пространственного положения в рамках синоптической шкалы времени, что вызвано тремя основными процессами (Рисунок 6). В определенные периоды (длительностью от нескольких дней до нескольких недель) площадь мутной зоны увеличивается, что свидетельствует о непрерывном процессе эрозии морского дна. На Рисунке 6а показан пример этого процесса, наблюдавшегося в конце июля и августе 2011 года. Несмотря на частичную облачность в исследуемом регионе, отчетливо видно, что мутная зона увеличилась более чем в 10 раз в течение 2,5 недель с 29 июля года по

15 августа 2011 года. Стоит обратить внимание, что интенсивность роста мутной области не является однородной. Площадь зоны мутности растет значительно медленнее в период с 29 июля по 8 августа 2011 года по сравнению с периодом с 8 по 15 августа 2011 года. Спутниковый снимок исследуемой территории, полученный 15 августа 2011 года, демонстрирует полностью развитые мутные области на ВС с максимальной площадью, равной 9300 км². Внешняя граница этой области хорошо соответствует изобате 10 м (Рисунок 3b).

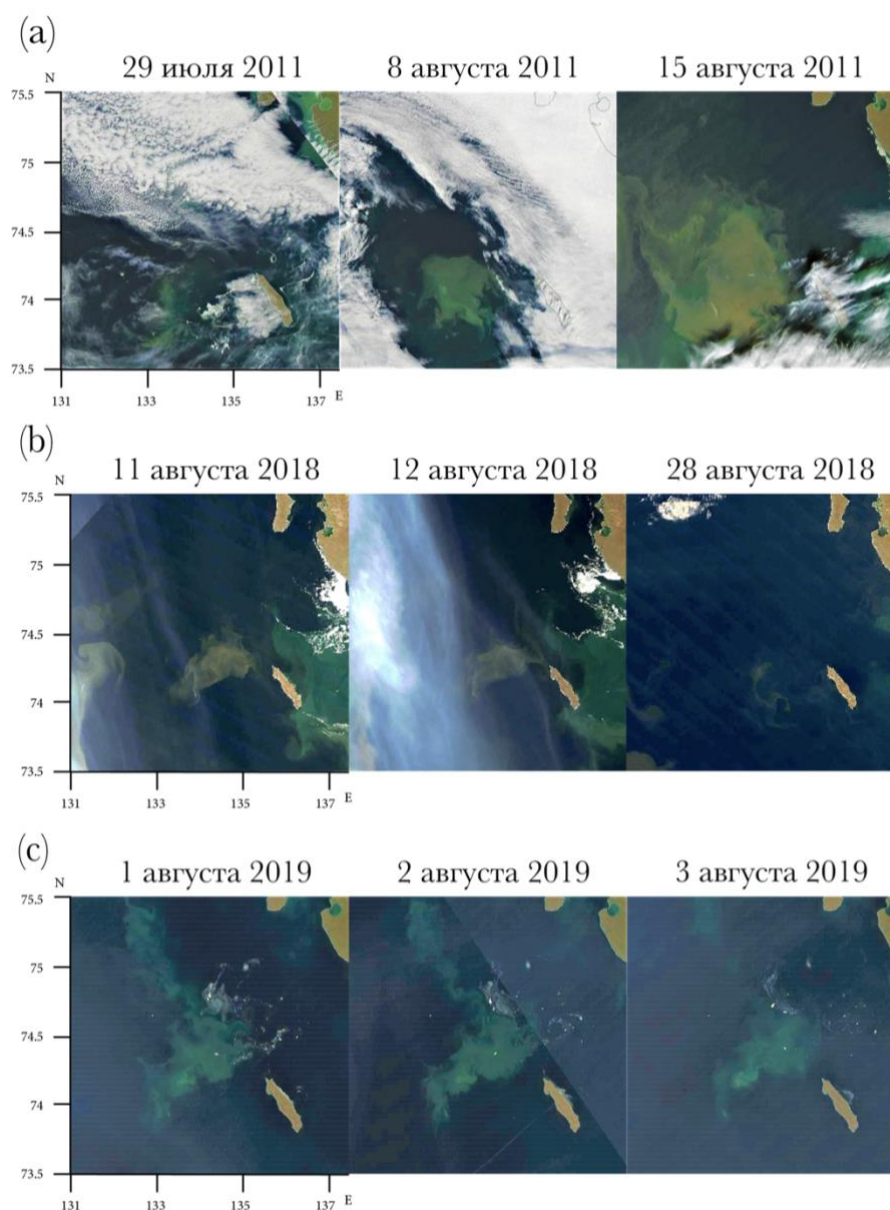


Рисунок 6: Изображения скорректированного отражения MODIS Terra/Aqua района ВС, иллюстрирующие (а) формирование, (б) рассеивание и (с) адвекцию локальной мутной области, образованной эрозией морского дна.

Рассеивание мутного региона, связанное с остановкой процесса эрозии морского дна, также часто наблюдается на спутниковых снимках. Этот процесс проявляется в уменьшении площади мутного региона. На Рисунке 6b показан пример рассеивания зоны мутности, который наблюдался в районе отмели ВС в августе 2018 года. Площадь мутной зоны существенно уменьшилась в течение одних суток, как это наблюдалось между 11 и 12 августа и 28 августа 2018 года. Через 16 суток, площадь мутной зоны на ВС составила менее 772 км², что свидетельствует о её практически полной рассеивании. Как и в периоды формирования, скорость рассеивания не была однородной для разных наблюдаемых периодов.

Третьим важным процессом, наблюдаемым на отмели ВС, является адвекция мутной зоны, то есть изменение её формы и положения без существенного изменения её площади (Рисунок 6с). Этот процесс связан с горизонтальным перемещением мутной зоны, которое вызвано интенсивной шельфовой циркуляцией, но без дополнительного притока размываемых донных осадков. Согласно анализируемым спутниковым снимкам, продолжительность процесса адвекции относительно невелика и не превышает нескольких суток. При этом, характерный временной масштаб формирования и рассеивания мутной зоны гораздо больше и составляет 2–3 недели. Можно сделать вывод, что процесс адвекции можно рассматривать как раннюю стадию процесса рассеивания.

3.2. Эрозия морского дна в районе АО и малых отмелях

Анализ пространственной и временной изменчивости в зоне мутности, связанной с эрозией морского дна на АО, был её регулярным слиянием с зоной мутности, образованной береговой эрозией и речным стоком (Рисунок 7). Определение границ и размеров зоны мутности АО были затруднены этим слиянием (Рисунок 7b), поэтому рассматривались

только те случаи, когда слияния не случалось (Рисунок 7а). В результате, было проанализировано всего 38 спутниковых снимков АО.

Как и ранее с ВС, были выявлены процессы формирования, рассеивания и адвекции мутной зоны на АО (Рисунок 8). В связи с меньшей площадью самой отмели ($\sim 2000 \text{ км}^2$) на АО по сравнению с отмелью на ВС ($\sim 6000 \text{ км}^2$), что соответствует площади хорошо развитой зоны эрозии морского дна, типичный временной масштаб формирования и рассеивания мутной зоны на АО составил 6–10 дней. На Рисунке 8а показан пример формирования мутной зоны на АО, наблюдавшийся в период с 8 по 12 августа 2011 года. Как и на ВС, адвекция мутной зоны на АО длилась всего 2–3 дня (Рисунок 8b), после чего последовало её рассеивание.

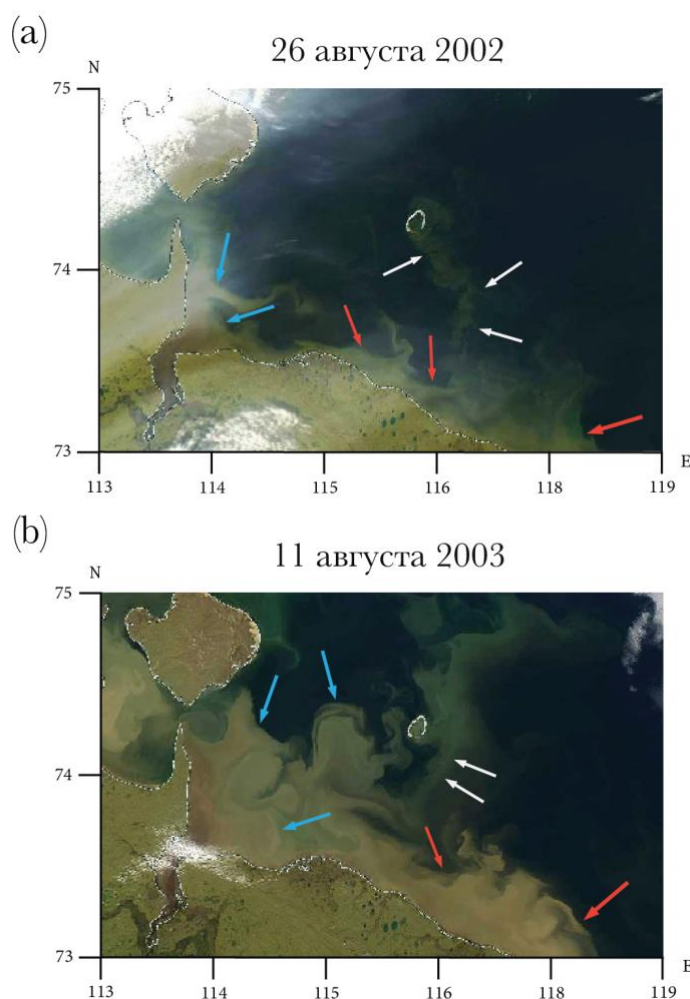


Рисунок 7: изображения скорректированного отражения MODIS Terra/Aqua района АО, иллюстрирующие (а) разрозненные и (б) объединённые зоны мутности, связанные с эрозией морского дна (белые стрелки), прибрежной эрозией (красные стрелки) и речными плюмами (синие стрелки).

Помимо двух крупных мелководных районов, ВС и АО, эрозия морского дна и образование зон взмучивания в открытом море наблюдается также на десятке небольших отмелей в море Лаптевых (Рисунок 9). Несколько отмелей расположены в заливе Оленёк (Рисунок 9а) и между заливом Оленёк и дельтой Лены вблизи острова Лейкина (Рисунок 9b). Еще несколько отмелей расположены к северо-востоку (Рисунок 9b) и северо-западу (Рисунок 9с) от дельты Лены. Интенсивная эрозия морского дна в этих районах обусловлена процессами ветрового апвеллинга, описанными в [42]. Третья группа отмелей расположена в юго-восточной части моря Лаптевых вблизи острова Затопляемый [13] (Рисунок 9d). Общая площадь всех мелких отмелей в море Лаптевых (кроме АО и ВС), ограниченных изобатами 10 м, оценивается примерно в $\sim 2000 \text{ км}^2$.

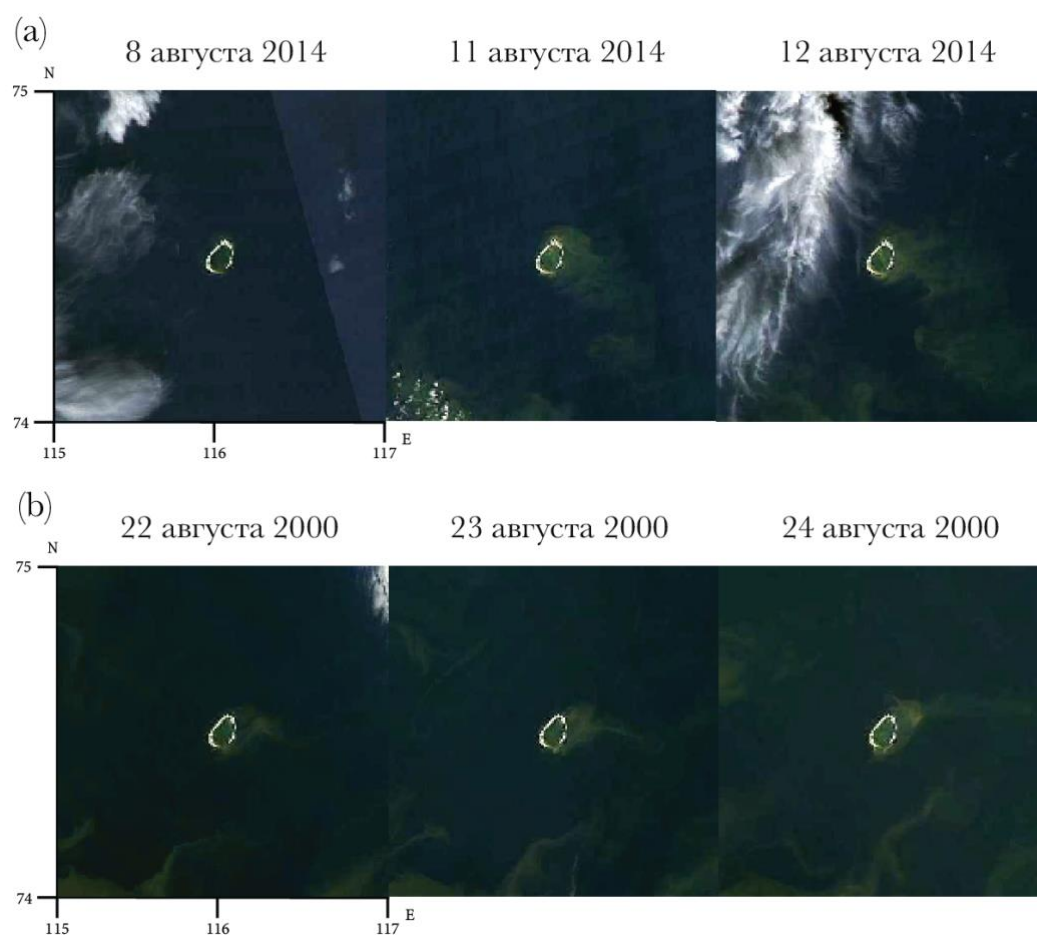


Рисунок 8: изображения скорректированного отражения MODIS Terra/Aqua района АО, иллюстрирующие (а) формирование и (б) адвекцию локальной мутной области, образованной эрозией морского дна.

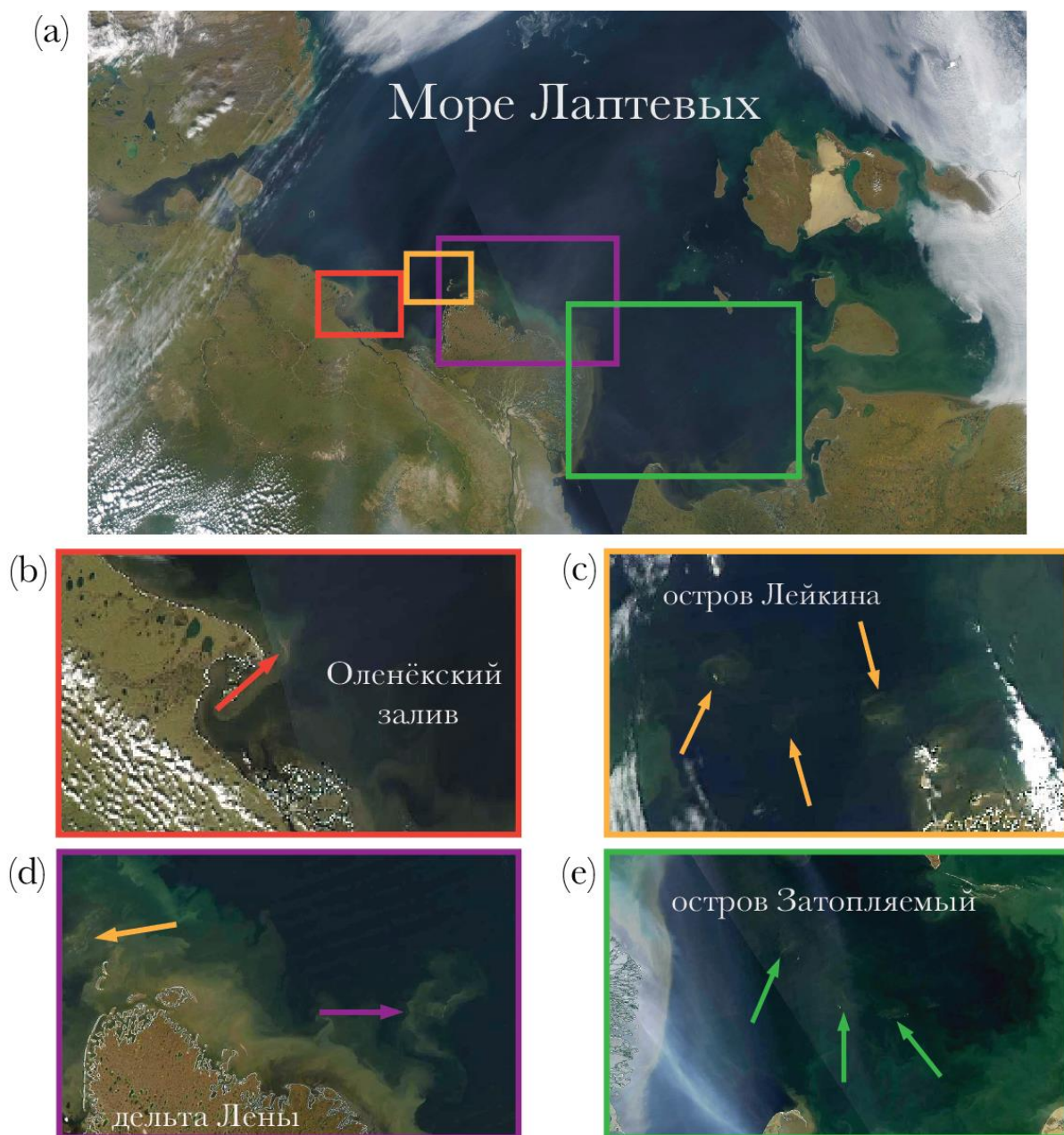


Рисунок 9: спутниковые снимки MODIS Terra/Aqua более мелких отмелей (указаны стрелками)
 (а) в море Лаптевых, (б) в заливе Оленёк, (с) к северо-западу от дельты Лены, (д) к северо-востоку от дельты Лены, (е) к юго-востоку от дельты Лены.

3.3. Эрозия морского дна в районе ИК

Изучение зоны эрозии морского дна в районе ИК (Рисунок 10) в Восточно-Сибирском море, аналогично району эрозии морского дна в районе АО, было затруднено из-за частого слияния этой зоны с зонами мутности, образованными речными плюмами и береговой термоабразией

(Рисунок 10b). Помимо этого, из-за частой облачности в регионе, было получено малое количество спутниковых снимков, где район ИК был полностью освобождён от облачного покрова. Всего для данного региона было выделено 16 подходящих для изучения спутниковых снимков.

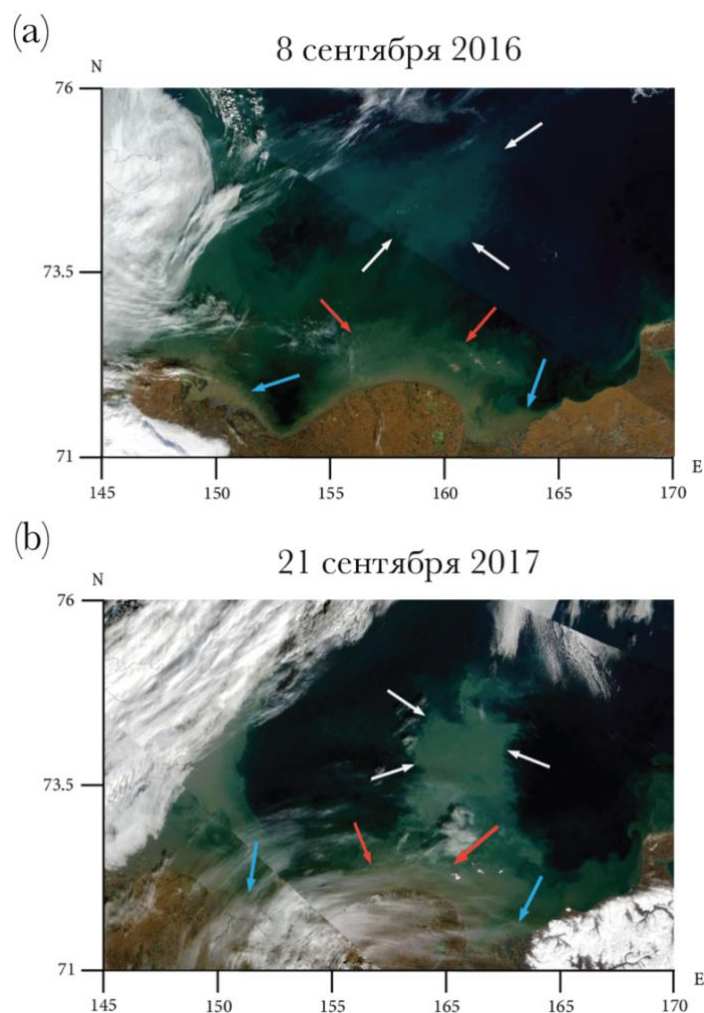


Рисунок 10: изображения скорректированного отражения MODIS Terra/Aqua района ИК, иллюстрирующие (а) разрозненные и (б) объединённые зоны мутности, связанные с эрозией морского дна (белые стрелки), прибрежной эрозией (красные стрелки) и речными плюмами (синие стрелки).

Глава 4. Зависимость площади взмученного региона от ветрового воздействия

Ветровые волны оказывают прямое влияние на области повышенной мутности поверхности моря. В мелководных районах, где ветровая и волновая турбулентность, оказывающая воздействие на поверхностный слой океана, способна достигать морского дна, донные осадки, размываемые процессом термической абразии, вовлекаются в толщу воды и поднимаются в поверхностный слой, проявляясь как мутная область на спутниковых снимках. Для выявления зависимости площади мутного участка от внешних воздействующих условий, а именно ветра и волн, упор был сделан на мутную зону в районе исследования ВС в море Лаптевых из-за её удаленного расположения от прибрежных районов и относительно большого размера. Для выявления упомянутой зависимости были проанализированы данные о скорости ветра, полученные из реанализа NCEP/CFSR/CFSv2, и данные о длине волны, полученные из волновой модели, описанной в Главе 2 (2.2. Данные спутникового реанализа). Площадь мутной зоны в районе ВС для 106 случаев показала умеренно сильную линейную зависимость ($R > 0,6$) при сопоставлении со значениями длины волны, осреднёнными за периоды от 2 до 16 дней. С другой стороны, не было обнаружено никакой связи между площадью мутной зоны в регионе ВС и как ветровым напряжением, так и скоростью ветра. Это показывает, что длина волны играет преобладающую роль в образовании донной взвеси в районе ВС. Наибольший коэффициент корреляции Пирсона R (0,74) между длиной волны (L в м) и площадью мутной зоны в ВС (S в км²) соответствует периоду осреднения значений длины волны за 9 дней (Рисунок 11). Полученное уравнение регрессии, описывающее численную зависимость между двумя переменными, выглядит следующим образом: $S = 354 \cdot L - 7148$.

Средняя абсолютная ошибка в 38% количественно характеризует способность этого уравнения воспроизводить абсолютные значения площади мутной зоны в ВС. Среднеквадратичная ошибка составляет 1423 км², что обусловлено чувствительностью этой характеристики к большим ошибкам. Отметим, что полученное уравнение регрессии показало лучшее согласие с измерениями для случаев слабого волнового воздействия по сравнению со штормовыми условиями.

Значимость полученного коэффициент корреляции $R = 0,74$ была проанализирован с использованием t-критерия Стьюдента. Используя уровень значимости 0,05 ($\alpha = 0,05$, доверительный интервал 95%) и число степеней свободы 104 ($v = n - 2$) для определения критического значения t , было обнаружено, что абсолютное значение t исследуемой выборки было больше критического значения t . Таким образом, можно сделать вывод, что корреляция, присутствующая между длиной волны и площадью мутной зоны в ВС, является статистически значимой.

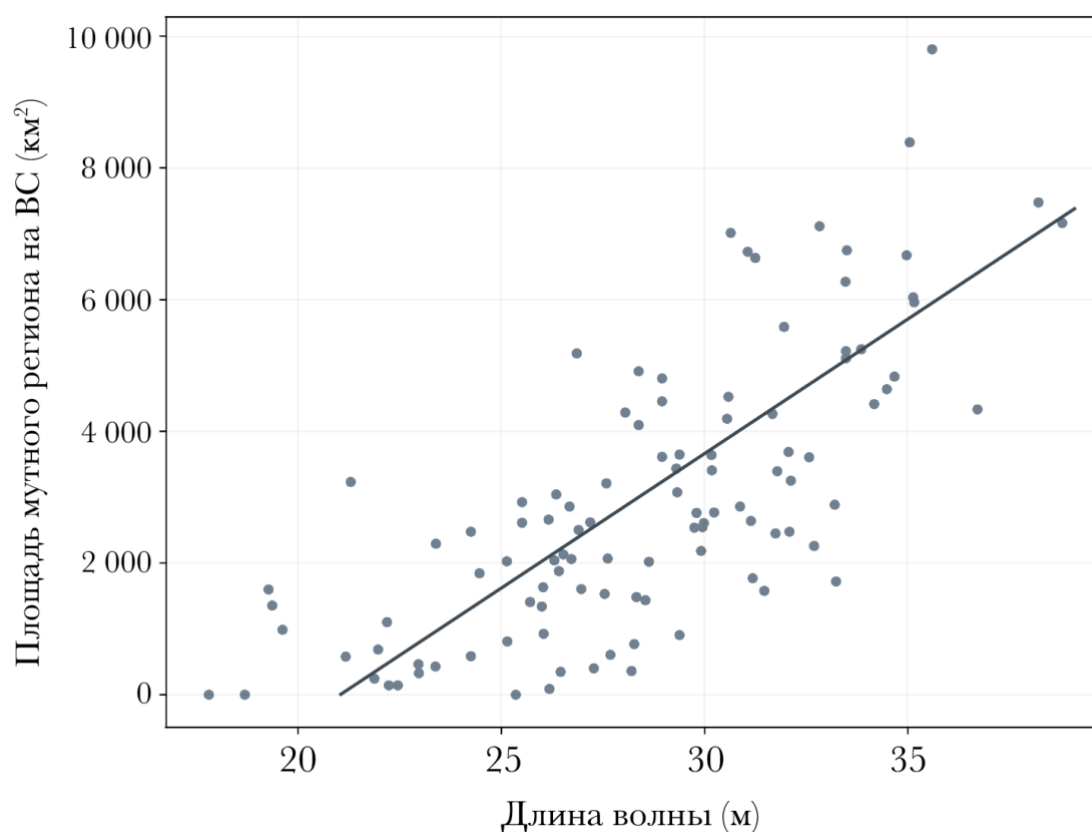


Рисунок 11: зависимость площади мутной зоны в ВС от 9-дневной средней длины волны.

Полученное уравнение регрессии, описанное выше, было применено для получения суточных площадей мутной зоны в ВС в безлёдный сезон с 1979 по 2021 год с использованием данных волнового реанализа, рассчитанных для данного периода. Стоит обратить внимание, что в случае, если осреднённое значений длины волны за 9 предшествующих дней равнялось 20.2 м или менее, площадь мутной зоны в VS в этот день предполагалась равной нулю, т. е. мутная зона отсутствовала. Полученные значения площади затем использовались для расчёта, во-первых, объёма морской воды V в районе ВС, которая содержит взвешенное вещество, с использованием данных батиметрии из [59, 71], и, во-вторых, массы повторно взмученного осадка $M = V \cdot C$, где средняя локальная концентрация взвешенного осадка $C = 15$ мг/л была получена из натурных измерений, выполненных в районе ВС в сентябре 2005 года (Рисунок 3b) [59]. Основные статистические характеристики суточного потока взвешенных наносов на ВС в безлёдный период, реконструированные за период с 1979 по 2021 год, приведены в Таблице 1.

Таблица 1: основные статистические характеристики суточного потока взвешенных наносов (в Тг) на ВС в безлёдный период года, реконструированные за 1979–2021 гг.

Количество случаев взмучивания	Среднее арифметическое	Медиана	Min значение	Max значение	Стандартное отклонение	Коэфф. вариации	Коэфф. асимметрии
2948	0.33	0.31	0	1.05	0.17	53.22	0.53

Для расчёта общей годовой массы взвешенного вещества в районе ВС, полученная суточная масса взвешенных осадков в регионе ВС была проанализирована и разделена на отдельные случаи, которые соответствовали независимым событиям взмучивания эродированного вещества. Изменение массы для каждого из этих событий было рассчитано и суммировано для получения общей массы повторно взмученных осадков

за год. Рисунок 12 иллюстрирует межгодовую изменчивость реконструированной общей годовой массы повторно взмученных осадков в ВС в безлёдный сезон за период с 1979 по 2021 год. Годовая общая масса поступающего взвешенного вещества варьируется от 0,6 до 2,1 Тг, среднегодовое значение равно 1,2 Тг. Учитывая тот факт, что ежегодно речной сток поставляет в море Лаптевых 24,1 Тг осадка, а прибрежная абразия обеспечивает 58,4 Тг [59], полученный среднегодовой поток взвешенных веществ за счет эрозии морского дна в районе ВС всего на порядок меньше, чем поток взвешенных веществ за счет прибрежной эрозии и речного стока.

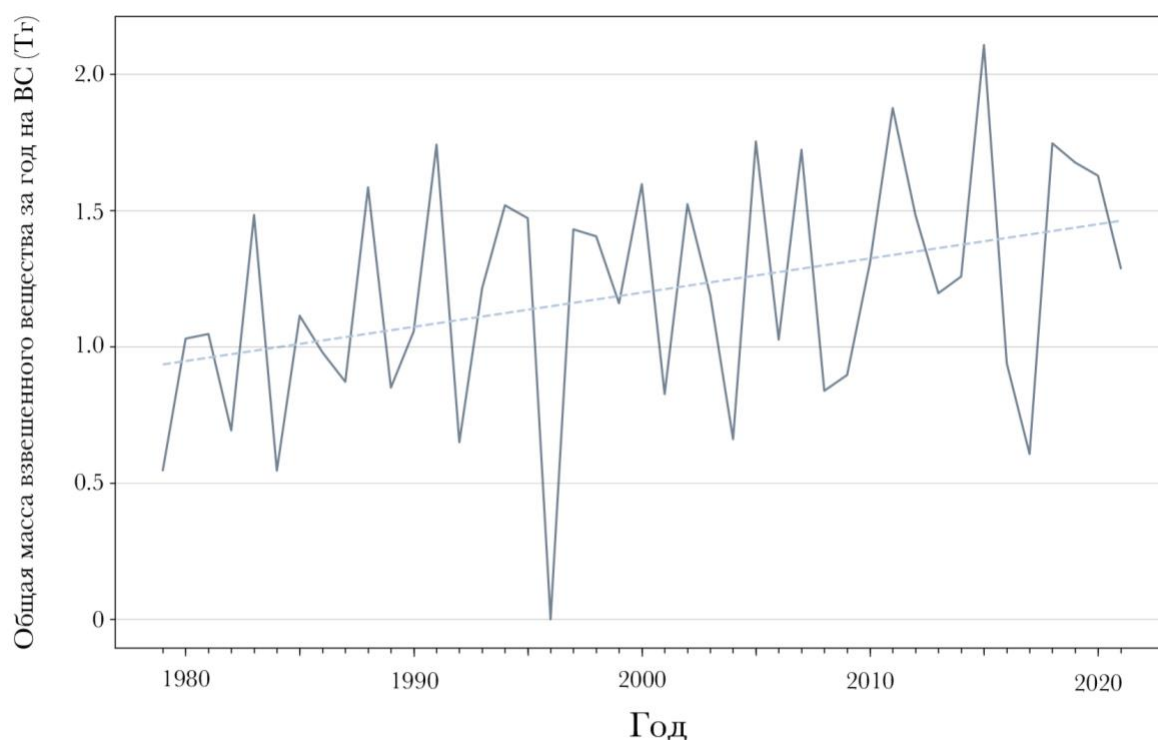


Рисунок 12: общий годовой поток взвешенных веществ, связанный с эрозией морского дна в ВС в безлёдный сезон в 1979–2021 гг. Пунктирной линией обозначен межгодовой тренд. В 1996 году поток взвешенного вещества был равен 0, поскольку ВС был покрыт морским льдом в течение всего года.

Несмотря на значительные колебания в значениях, общая тенденция для анализируемого 43-летнего периода является положительной, и среднегодовой поток увеличивается на 0,13 Тг каждое десятилетие. Эта особенность обусловлена увеличением продолжительности безлёдного сезона (Рисунок 13а) в море Лаптевых (реконструировано по спутниковым наблюдениям с 1979 года [72]) и, как следствие, увеличением средней длины волны. Количество событий взмучивания в течение года также показывает отчетливую тенденцию к росту за исследуемый период

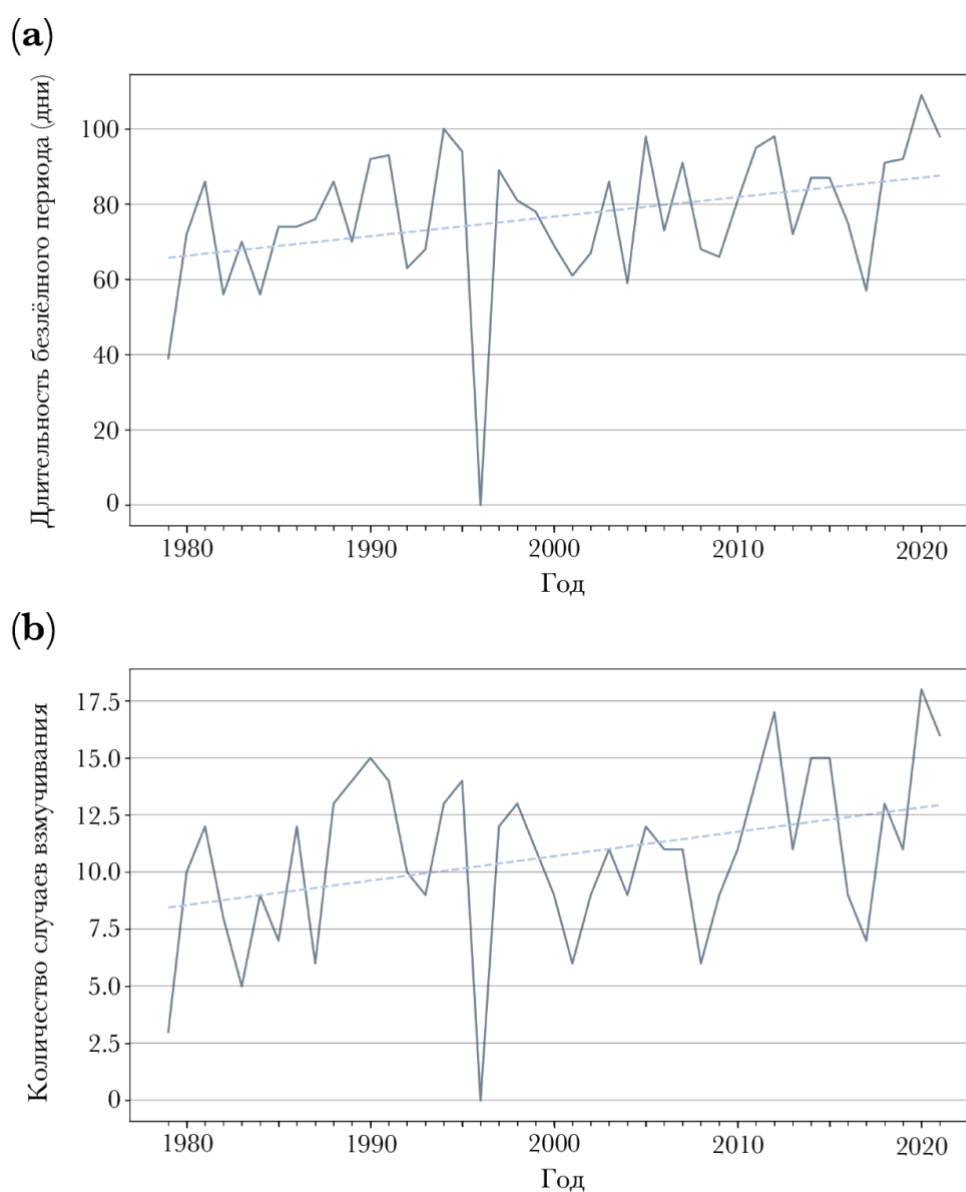


Рисунок 13: продолжительность безлёдного периода и (а) количество случаев взмучивания в безлёдный сезон (б) в ВС в 1979–2021 годах. Пунктирными линиями обозначаются межгодовые тенденции.

(Рисунок 13б). Сезонная изменчивость массы взмученных осадков демонстрирует низкий поток в июле (0,1 Тг) и значительное увеличение в августе-октябре (0,3–0,35 Тг) (Рисунок 14), что также связано с местными ледовыми условиями. Наибольший месячный поток взмученных осадков за исследуемый период был зарегистрирован в октябре 2015 года и составил 0,68 Тг.

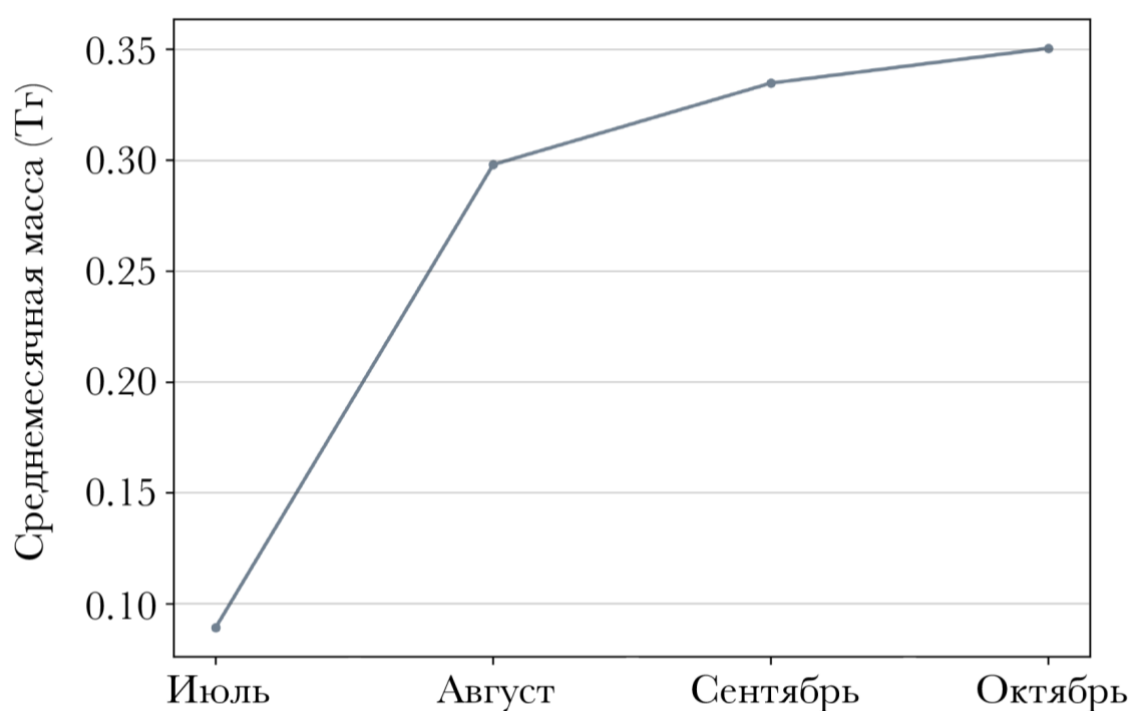


Рисунок 14: среднемесячный поток взвешенных веществ, связанный с эрозией морского дна в районе ВС в июле–октябре 1979–2021 гг.

Заключение

В данной статье основное внимание было уделено областям эрозии морского дна в море Лаптевых, которые соответствуют прибрежным отмелям (с глубинами менее 10 м). Осадки, взвешенные со дна, проникают в толщу и достигают поверхности моря, в результате чего эрозия морского дна на этих отмелях может быть визуально обнаружена на безоблачных оптических спутниковых снимках в виде зоны мутности. На основе оптических снимков MODIS Terra/Aqua за 2000–2021 гг., были выявлены области частой эрозии морского дна на прибрежных отмелях в море Лаптевых и была описана синоптическая изменчивость в этих зонах мутности, связанная с их образованием, рассеиванием и адвекцией.

Особое внимание было уделено процессу повторного взмучивания осадков на Васильевской и Семеновской отмелях (ВС), которые расположены в юго-восточной части моря Лаптевых. С использованием данных ветрового и волнового реанализа было выявлено, что поток осадка на ВС в первом приближении регулируется волновым воздействием, а не ветровым. Интенсивное взмучивание донных отложений в ВС образуется, если 9-дневная средняя длина волны, предшествующая рассматриваемому дню, превышает 20 м. В этом случае площадь мутной зоны (S , в км^2), образующейся в ВС, показывает значимую линейную зависимость ($R = 0,74$) от локальной длины волны (L , в м), осредненной за период 9 дней:

$$S = 354 \cdot L - 7148.$$

Используя эту зависимость, натурные измерения концентрации взвешенных веществ в морской воде в исследуемом районе и данные волнового реанализа, были оценены суточные объемы потока отложений в ВС в безледный сезон в 1979–2021 гг. Основным ограничением данного подхода является отсутствие данных, относящихся к изменчивости концентрации отложений. Более того, мы предполагаем, что образование

мутной области в ВС демонстрирует эрозию подводной вечной мерзлоты, а не повторное взмучивание ранее накопленных осадков [73].

Реконструированный поток осадочных веществ за счёт эрозии морского дна на ВС (в среднем 1,2 Тг в год) в 20–50 раз меньше, чем от двух других основных источников поступления осадков в море Лаптевых, а именно, речного стока (24,1 Тг в год) и прибрежной абразии (58,4 Тг в год). Межгодовая изменчивость потока осадков в ВС в 1979–2021 гг. демонстрирует устойчивую тенденцию к росту (0,13 Тг каждое десятилетие), что обусловлено увеличением продолжительности безлёдного периода в исследуемом регионе. Эта особенность демонстрирует возрастающую роль эрозии подводной вечной мерзлоты на мелководных участках моря Лаптевых, вызванную продолжающимся изменением климата. Более того, общий вклад эрозии морского дна со всех прибрежных отмелей моря Лаптевых может играть более значительный вклад в бюджет осадочного материала.

Наконец, эрозия подводной вечной мерзлоты важна для местных циклов питательных веществ и углерода [15, 18, 74]. Море Лаптевых и весь Восточно-Сибирский арктический шельф могут быть использованы в качестве интегратора продолжающегося изменения климата в окружающей среде. Мы предполагаем, что при продолжающихся климатических изменениях больше питательных веществ, продуктов донной и прибрежной эрозии органического углерода, а также речного стока будут поступать в Северный Ледовитый океан с его сокращающимся ледяным покровом, потенциально увеличивая первичную продукцию за пределами шельфа. В то же время, поскольку область шельфа характеризуется очень низкой прозрачностью, что ограничивает толщину фотического слоя, избыточный pCO_2 не будет использоваться фотосинтезом, а будет скорее всего выбрасываться в атмосферу с возрастающей скоростью, влияя на региональный баланс CO_2 . Таким образом, предлагаемая спутниковая

технология может стать эффективным инструментом для мониторинга и оценки растущей эрозии подводной вечной мерзлоты, которая может быть потенциальным и всё ещё неучтённым фактором, влияющим на региональную систему CO₂. Предлагаемая методология может также применяться к различным прибрежным и мелководным районам Мирового океана, где происходит интенсивное поступление терригенных осадков, эрозия морского дна и повторное взмучивание осадков [75–78].

Список литературы

1. Stroeve, J.; Notz, D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons. *Environ. Res. Lett.* 2018. 13, 103001.
2. Box, J.E.; Colgan, W.T.; Christensen, T.R.; Schmidt, N.M.; Lund, M.; Parmentier, F.-J.W.; Brown, R.; Bhatt, U.S.; Euskirchen, E.S.; Romanovsky, V.E. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017. *Environ. Res. Lett.* 2019. 14, 045010.
3. Lantuit, H.; Overduin, P.P.; Couture, N.; Wetterich, S.; Aré, F.; Atkinson, D.; Brown, J.; Cherkashov, G.; Drozdov, D.; Frobese, D.L.; et al. The Arctic coastal dynamics database: A new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines. *Estuaries Coasts*. 2012. 35, P. 383–400.
4. Fritz, M.; Vonk, J.E.; Lantuit, H. Collapsing Arctic coastlines. *Nat. Clim. Chang.* 2017. 7, P. 6–7.
5. Ramage, J.L.; Irrgang, A.M.; Morgenstern, A.; Lantuit, H. Increasing coastal slump activity impacts the release of sediment and organic carbon into the Arctic Ocean. *Biogeosciences*. 2018. 15, P. 1483–1495.
6. Martens, J.; Romankevich, E.; Semiletov, I.; Wild, B.; van Dongen, B.; Vonk, J.; Tesi, T.; Shakhova, N.; Dudarev, O.V.; Kosmach, D.; et al. CASCADE—The Circum-Arctic Sediment Carbon Database. *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. 13, 2561–2572.
7. Shakhova, N.; Semiletov, I.; Gustafsson, O.; Sergienko, V.; Lobkovsky, L.; Dudarev, O.; Tumskoy, V.; Grigoriev, M.; Mazurov, A.; Salyuk, A.; et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nat. Commun.* 2017. 8, 15872.
8. Angelopoulos, M.; Overduin, P.P.; Miesner, F.; Grigoriev, M.; Vasiliev, A. Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost. *Permafr. Periglac. Process.* 2020. 31, 442–453.

9. Paull, C.K.; Dallimore, S.R.; Jin, Y.K.; Melling, H. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2022. 119, e2119105119.
10. Gavrilov, A.V.; Romanovskii, N.N.; Hubberten, H.-W.; Romanovskii, V.E. Distribution of islands—Ice complex remnants on the East Siberian arctic shelf. *Earth's Cryosphere*. 2003. 7, 18–32.
11. Romanovskii, N.N.; Tumskey, V.E. Retrospective approach to the estimation of the contemporary extension and structure of the shelf cryolithozone in east Arctic. *Earth's Cryosphere*. 2011. 15, 3–14.
12. Overduin, P.P.; Wetterich, S.; Günther, F.; Grigoriev, M.N.; Grosse, G.; Schirmeister, L.; Hubberten, H.-W.; Makarov, A. Coastal dynamics and submarine permafrost in shallow water of the central Laptev Sea, East Siberia. *Cryosphere*. 2016. 10, 1449–1462.
13. Gavrilov, A.V.; Pizhankova, E.I. Dynamics of permafrost in the coastal zone of Eastern-Asian of the Arctic. *Geogr. Environ. Sustain*. 2018. 11, 20–37.
14. Irrgang, A.M.; Bendixen, M.; Farquharson, L.M.; Baranskaya, A.V.; Erikson, L.H.; Gibbs, A.E.; Ogorodov, S.A.; Overduin, P.P.; Lantuit, H.; Grigoriev, M.N.; et al. Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts. *Nat. Rev. Earth Environ*. 2022. 3, 39–54.
15. Vonk, J.; Sánchez-García, L.; van Dongen, B.E.; Alling, V.; Kosmach, D.; Charkin, A.; Semiletov, I.P.; Dudarev, O.V.; Shakhova, N.; Roos, P.; et al. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia. *Nature*. 2012. 489, 137–140.
16. Wild, B.; Shakhova, N.; Dudarev, O.; Ruban, A.; Kosmach, D.; Tumskey, V.; Tesi, T.; Grimm, H.; Nybom, I.; Matsubara, F.; et al. Organic matter composition and greenhouse gas production of thawing subsea permafrost in the Laptev Sea. *Nat. Commun*. 2022. 13, 5057.
17. Semiletov, I.P. Destruction of frozen coastal rocks as an important factor in the biogeochemistry of Arctic shelf waters. *Dokl. Earth Sci*. 1999. 368, 679–682.

18. Semiletov, I.; Pipko, I.I.; Repina, I.A.; Shakhova, N. Carbonate dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean Pacific sector of the Arctic. *J. Mar. Syst.* 2007. 66, 204–226.
19. Semiletov, I.; Pipko, I.; Gustafsson, O.; Anderson, L.; Sergienko, V.; Pugach, S.; Dudarev, O.; Charkin, A.; Gukov, A.; Bröder, L.; et al. Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon. *Nat. Geosci.* 2016. 9, P. 361–365.
20. Friedlingstein, P.; Cox, P.; Betts, R.; Bopp, L.; von Bloh, W.; Brovkin, V.; Cadule, P.; Doney, S.; Eby, M.; Fung, I.; et al. Climate–carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison. *J. Clim.* 2006. 19, P. 3337–3353.
21. Shakhova, N.; Semiletov, I.; Leifer, I.; Sergienko, V.; Salyuk, A.; Kosmach, D.; Chernikh, D.; Stubbs, C.; Nicolsky, D.; Tumskey, V.; et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nat. Geosci.* 2014. 7, P. 64–70.
22. Vetrov, A.A.; Romankevich, E.A. *Carbon Cycle in the Russian Arctic Seas*; Springer: Berlin, Germany, 2004.
23. Charkin, A.V.; Dudarev, O.V.; Semiletov, I.P.; Kruhmaliev, A.V.; Vonk, J.E.; Sánchez-García, L.; Karlsson, E.; Gustafsson, Ö. 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. *Biogeosciences*. 2011. 8, P. 2581–2594.
24. Semiletov, I.P.; Pipko, I.I.; Shakhova, N.E.; Dudarev, O.V.; Pugach, S.P.; Charkin, A.N.; McRoy, C.P.; Kosmach, D.; Gustafsson, Ö. 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. *Biogeosciences*. 2011. 8, P. 2407–2426.
25. Wegner, S.; Hölemann, J.A.; Dmitrenko, I.; Kirillov, S.; Tuschling, K.; Abramova, E.; Kassens, H. Suspended particulate matter on the Laptev Sea shelf

(Siberian Arctic) during ice-free conditions. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2003. 57, P. 55–64.

26. Wegner, S.; Hölemann, J.A.; Dmitrenko, I.; Kirillov, S.; Kassens, H. Seasonal variations in Arctic sediment dynamics—Evidence from 1-year records in the Laptev Sea (Siberian Arctic). *Glob. Planet. Chang.* 2005. 48, P. 126–140.

27. Wegner, S.; Bauch, D.; Hölemann, J.A.; Janout, M.A.; Heim, B.; Novikhin, A.; Kassens, H.; Timokhov, L. Interannual variability of surface and bottom sediment transport on the Laptev Sea shelf during summer. *Biogeosciences*. 2013. 10, P. 1117–1129.

28. Drits, A.V.; Pasternak, A.F.; Arashkevich, E.G.; Kravchishina, M.D.; Sukhanova, I.N.; Sergeeva, V.M.; Flirt, M.V. Influence of riverine discharge and timing of ice retreat on particle sedimentation patterns on the Laptev Sea shelf. *J. Geophys. Res. Ocean.* 2021. 126, e2021JC017462.

29. Osadchiev, A.; Medvedev, I.; Shchuka, S.; Kulikov, M.; Spivak, E.; Pisareva, M.; Semiletov, I. Influence of estuarine tidal mixing on structure and spatial scales of large river plumes. *Ocean Sci.* 2020. 16, P. 781–798.

30. Osadchiev, A.; Frey, D.; Spivak, E.; Shchuka, S.; Tilinina, N.; Semiletov, I. Structure and inter-annual variability of the freshened surface layer in the Laptev and East-Siberian seas during ice-free periods. *Front. Mar. Sci.* 2021. 8, 735011.

31. Osadchiev, A. Spreading and transformation of river discharge in the Arctic Ocean. *Her. Russ. Acad. Sci.* 2021. 91, P. 694–699.

32. Spivak, E.A.; Osadchiev, A.A.; Semiletov, I.P. Structure and variability of the Lena River plume in the south-eastern part of the Laptev Sea. *Oceanology*. 2021. 61, P. 839–849.

33. Xie, L.; Yakushev, E.V.; Semiletov, I.; Grinko, A.; Gangnus, I.; Berezina, A.; Osadchiev, A.; Zhdanov, I.; Polukhin, A.; Moiseeva, J.; et al. Biogeochemical structure of the Laptev Sea in 2015, 2017-2020 associated with the river Lena plume. *Front. Mar. Sci.* 2023. 10, 1180054.

34. Eicken, H.; Reimnitz, E.; Alexadrov, V.; Martin, T.; Kassens, H.; Viehoff, T. Sea-ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export. *Cont. Shelf Res.* 1997. 17, P. 205–233.
35. Dethleff, D. Entrainment and export of Laptev Sea ice sediments, Siberian Arctic. *J. Geophys. Res. Ocean.* 2005. 110, C07009.
36. Wegner, C.; Wittbrodt, K.; Hölemann, J.A.; Janout, M.A.; Krumpen, T.; Selyuzhenok, V.; Novikhin, A.; Polyakova, Y.; Krykova, I.; Kassens, H. Sediment entrainment into sea ice and transport in the Transpolar Drift: A case study from the Laptev Sea in winter 2011/2012. *Cont. Shelf Res.* 2017. 141, P. 1–10.
37. Clarke, T.L.; Lesht, B.; Young, R.A.; Swift, D.J.P.; Freeland, G.L. Sediment resuspension by surface-wave action: An examination of possible mechanisms. *Mar. Geol.* 1982. 49, P. 43–59.
38. Kularatne, S.; Pattiaratchi, C. Turbulent kinetic energy and sediment resuspension due to wave groups. *Cont. Shelf Res.* 2008. 28, P. 726–736.
39. Carlin, J.A.; Lee, G.-h.; Dellapenna, T.M.; Laverty, P. Sediment resuspension by wind, waves, and currents during meteorological frontal passages in a micro-tidal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2016. 172, P. 24–33.
40. Dmitrenko, I.A.; Hölemann, J.; Kirillov, S.A.; Berezovskaya, S.L.; Kassens, H. Role of barotropic sealevel changes in current formation on the eastern shelf of the Laptev Sea. *Dokl. Earth Sci.* 2001. 5, P. 243–249.
41. Juhls, B.; Overduin, P.P.; Hölemann, J.; Hieronymi, M.; Matsuoka, A.; Heim, B.; Fischer, J. Dissolved organic matter at the fluvial–marine transition in the Laptev Sea using in situ data and ocean colour remote sensing. *Biogeosciences* 2019. 16, P. 2693–2713.
42. Osadchiev, A.; Silvestrova, K.; Myslenkov, S. Wind-driven coastal upwelling near large river deltas in the Laptev and East-Siberian seas. *Remote Sens.* 2020. 12, P. 844.
43. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. - М: Издательство МГУ, 1982. С. 113-123.

44. Национальный атлас России, том 2 / Редколл.: А. В. Бородко (предс.), В.В. Свешников (гл. ред.) и др.. М. : Роскартография, 2004–2008.
<https://nationalatlas.ru/>
45. Williams WJ, Carmack EC. The “interior” shelves of the Arctic Ocean: physical oceanographic setting, climatology and effects of sea-ice retreat on cross-shelf exchange. *Prog. Oceanogr.* 139, 2015. P. 24-41.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.07.008>
46. Pavlov, V.K.; Timokhov, L.A.; Baskakov, G.A.; Kulakov, M.Y.; Kurazhov, V.K.; Pavlov, P.V.; Pivovarov, S.V.; Stanovoy, V.V. Hydrometeorological Regime of the Kara, Laptev, and East-Siberian Seas; Technical Memorandum, APL-UW TM 1-96; Defense Technical Information Center: Fort Belvoir, VA, USA. 1996.
47. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). Климатические данные по гидрометусловиям прибрежной зоны моря Лаптевых, платформа: остров Преображения. Температура воздуха, температура воды. (RU_RIHMI-WDC_994)
<http://portal.esimo.ru/dataview/>
48. Pivovarov S., Hoelemann J.A., Kassens H., Piepenburg D., Schmid M.K. Laptev and East Siberian Seas // *Havard University Press*, 2005. P. 1110-1137.
49. Мокиевский В.О., Цетлин А.Б., Сергиенко Л.А. и др. Экологический Атлас. Море Лаптевых // М.: ООО "Арктический научный центр", 2017. С. 303.
50. Osadchiev, A.; Frey, D.; Spivak, E.; Shchuka, S.; Tilinina, N.; Semiletov, I. Structure and inter-annual variability of the freshened surface layer in the Laptev and East-Siberian seas during ice-free periods. *Front. Mar. Sci.* 2021. 8, 735011.
51. Gordeev, V. V., Martin, J. M., Sidorov, J. S. & Sidorova, M. V. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean. *Am. J. Sci.* 296, 1996. P. 664-691.
<https://doi.org/10.2475/ajs.296.6.664>

52. Алексеевский, Н. И., Айбулатов, Д. Н., Куксина, Л. В., & Четверова, А. А. Структура водотоков в дельте Лены и ее влияние на процессы трансформации речного стока. География и природные ресурсы, 1, 2014. С. 91-99.
53. Ershova, E.A., Kosobokova, K.N. Cross-shelf structure and distribution of mesozooplankton communities in the East-Siberian Sea and the adjacent Arctic Ocean. Polar Biol. 42, 2019. P. 1353-1367.
54. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). Климатические данные по гидрометусловиям прибрежной зоны Восточно-Сибирского моря, платформа: остров Жохова, остров Четырёхстолбовой. Температура воздуха, температура воды. (RU_RIHMI-WDC_2350)
55. Chuvilin, E.; Bukhanov, B.; Yurchenko, A.; Davletshina, D.; Shakhova, N.; Spivak, E.; Rusakov, V.; Dudarev, O.; Khaustova, N.; Tikhonova, A.; et al. In-situ temperatures and thermal properties of the East Siberian Arctic shelf sediments: Key input for understanding the dynamics of subsea permafrost. Mar. Pet. Geol. 2022. 138, 105550.
56. Bukhanov, B.; Chuvilin, E.; Zhmaev, M.; Shakhova, N.; Spivak, E.; Dudarev, O.; Osadchiev, A.; Spasennykh, M.; Semiletov, I. In situ bottom sediment temperatures in the Siberian arctic seas: Current state of subsea permafrost in the Kara Sea vs Laptev and East Siberian seas. Mar. Pet. Geol. 2023. 157, 106467.
57. Koshurnikov, A.V.; Tumskoy, V.E.; Shakhova, N.E.; Sergienko, V.I.; Dudarev, O.V.; Gunar, A.Y.; Pushkarev, P.Y.; Semiletov, I.P. The first ever application of electromagnetic soundings for mapping of submarine permafrost table on the Laptev Sea shelf. Dokl. Earth Sci. 2016. 469, P. 860–863.
58. Alekseev, D.A.; Koshurnikov, A.V.; Gunar, A.Y.; Balikhin, E.I.; Semiletov, I.P.; Shakhova, N.E.; Palshin, N.A.; Lobkovsky, L.I. Time-domain electromagnetics for subsea permafrost mapping in the Arctic: The synthetic

response analyses and uncertainty estimates from numerical modelling data. *Geosciences*. 2023. 13, P. 144.

59. Dudarev, O.V.; Charkin, A.N.; Shakhova, N.E.; Semiletov, I.P.; Sergienko, V.I.; Pipko, I.I.; Pugach, S.P.; Chernykh, D.V. Features of modern morpholithogenesis on the shelf of the Laptev Sea: Semenovskoe shoal (“Vasema Land”). *Dokl. Earth Sci.* 2015. 462, P. 223–229.

60. Petrov, O.V., Ryabchuk, D.V., Sergeev, A.Y. et al. New Data on Geology and Paleogeographical Evolution of the Southern East Siberian Sea in the Quaternary. *Dokl. Earth Sc.* 513. 2023. P. 1085–1095.

61. Allen S. E., Hickey B. M. Dynamics of advection-driven upwelling over a shelf break submarine canyon // *J. Geoph. Res.* 2010. Vol. 115.

62. Tolman, H.L. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III TM Version 3.14; Technical note, MMAB Contribution; National Oceanic and Atmospheric Administration: Washington, DC, USA, 2009.

63. Rogers, W.E.; Babanin, A.V.; Wang, D.W. Observation-consistent input and whitecapping dissipation in a model for wind-generated surface waves: Description and simple calculations. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2012. 29, P. 1329–1346.

64. Zieger, S.; Babanin, A.V.; Rogers, W.E.; Young, I.R. Observation-based source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH. *Ocean Model.* 2015. 96, P. 2–25.

65. Saha, S.; Moorthi, S.; Pan, H.L.; Wu, X.; Wang, J.; Nadiga, S.; Goldberg, M. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010. 91, P. 1015–1057.

66. Saha, S.; Moorthi, S.; Wu, X.; Wang, J.; Nadiga, S.; Tripp, P.; Becker, E. The NCEP climate forecast system Version 2. *J. Clim.* 2014. 27, P. 2185–2208.

67. Liu, Q.; Rogers, W.E.; Babanin, A.V.; Young, I.R.; Romero, L.; Zieger, S.; Qiao, F.; Guan, C. Observation-based source terms in the third-generation wave

model WAVEWATCH III: Updates and verification. *J. Phys. Oceanogr.* 2019. 49, P. 489–517.

68. Myslenkov, S.; Kruglova, E.; Medvedeva, A.; Silvestrova, K.; Arkhipkin, V.; Akpinar, A.; Dobrolyubov, S. Number of storms in several Russian seas: Trends and connection to large-scale atmospheric indices. *Russ. J. Earth Sci.* 2023. 23, ES3002.

69. Myslenkov, S.A. Modeling of the wind waves in the Laptev, East Siberian and Chukchi seas. *Hydrometeorol. Res. Forecast.* 2023. 1, P. 87–101.

70. Myslenkov, S.A.; Platonov, V.S.; Dobrolyubov, S.A.; Silvestrova, K.P. Increase in storm activity in the Kara Sea from 1979 to 2019: Numerical simulation data. *Dokl. Earth Sci.* 2021. 498, P. 502–508.

71. Jakobsson, M.; Mayer, L.A.; Coakley, B.; Dowdeswell, J.A.; Forbes, S.; Fridman, B.; Hodnesdal, H.; Noormets, R.; Pedersen, R.; Rebesco, M.; et al. The international bathymetric chart of the Arctic Ocean (IBCAO), Version 3.0. *Geophys. Res. Lett.* 2012. 39, L12609.

72. Cavalieri, D.J.; Parkinson, C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *Cryosphere.* 2012. 6, P. 881–889.

73. Rachold, V.; Grigoriev, M.N.; Are, F.E.; Solomon, S.; Reimnitz, E.; Kassens, H.; Antonow, M. Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas. *Int. J. Earth Sci.* 2000. 89, P. 450–460.

74. Sukhanova, I.N.; Flirt, M.V.; Georgieva, E.J.; Lange, E.K.; Kravchishina, M.D.; Demidov, A.B.; Nedospasov, A.A.; Polukhin, A.A. The structure of phytoplankton communities in the eastern part of the Laptev Sea. *Oceanology* 2017. 57, P. 75–90.

75. Korotkina, O.A.; Zavialov, P.O.; Osadchiev, A.A. Submesoscale variability of the current and wind fields in the coastal region of Sochi. *Oceanology* 2011. 51, P. 745–754.

76. Korotkina, O.A.; Zavialov, P.O.; Osadchiev, A.A. Synoptic variability of currents in the coastal waters of Sochi. *Oceanology.* 2014. 54, P. 545–556.

77. Korotenko, K.A.; Osadchiev, A.A.; Zavialov, P.O.; Kao, R.-C.; Ding, C.-F. Effects of bottom topography on dynamics of river discharges in tidal regions: Case study of twin plumes in Taiwan Strait. *Ocean Sci.* 2014, 10, P. 865–879.
78. Osadchiev, A.A.; Korotenko, K.A.; Zavialov, P.O.; Chiang, W.-S.; Liu, C.-C. Transport and bottom accumulation of fine river sediments under typhoon conditions and associated submarine landslides: Case study of the Peinan River, Taiwan. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2016, 16, 41–54. 2010. Vol. 115.