

На правах рукописи

Лемешко Егор Евгеньевич

**КРУПНОМАСШТАБНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ И ТЕЧЕНИЙ
СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ**

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Севастополь – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Станичный Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: **Иванов Владимир Владимирович**
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», главный научный сотрудник кафедры океанологии географического факультета

Хворостовский Кирилл Сергеевич
кандидат географических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет», научный сотрудник Лаборатории спутниковой океанографии, заведующий Арктической лабораторией

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

Защита состоится **«20» марта 2024 года** в 14 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета 24.1.229.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: **299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте Института http://mhi-ras.ru/news/thesis_defense_202309151630.html

Автореферат разослан **«25» октября 2023 года**

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.01
кандидат географических наук

Харитоновна Людмила Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Исследование пространственно-временной изменчивости уровня и поверхностных геострофических течений в условиях глобальных климатических изменений в настоящее время является фундаментальной и актуальной задачей для Северного Ледовитого океана (СЛО), поскольку до сих пор не сформировано достаточно полное представление о характеристиках их изменчивости не только для свободных ото льда областей океана, но также и для покрытых льдом районов океана (Моря., 2021). Недостаточная изученность пространственно-временной изменчивости уровня и течений океана в условиях существенных современных климатических изменений тормозит развитие наукоемких и высокотехнологических прикладных исследований важных для решения народно-хозяйственных задач для устойчивого социально-экономического развития региона и обеспечения национальной безопасности в Арктике (Государственная..., 2021). За период 1985–2015 гг. произошло улучшение ледовых условий плавания на трассах Северного морского пути. Однако опасные ледовые явления также зависят от пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических факторов (ветер, наклон уровня океана, течения) и от неоднородности ледяного покрова, которые в настоящий момент плохо поддаются длительному прогнозированию и влияют на безопасность эксплуатации Северного морского пути.

С 2011 года появились спутниковые данные на основе альтиметрических измерений об уровне океана для покрытых льдом областей СЛО и были рассчитаны поверхностные геострофические течения (Kwok et al., 2016; Armitage et al., 2016). Результаты диссертации помогут уточнить существующие схемы поверхностных геострофических течений, поскольку в зимний период инструментальных наблюдений за течениями практически не выполнялось. Наибольший вклад в потепление климата Арктики обеспечивает адвекция тепла к полюсу в результате циркуляции атмосферы и океана. Поэтому результаты работы по влиянию типов атмосферной циркуляции на формирование режимов поверхностной геострофической циркуляции актуальны для оценки поступления теплых и соленых атлантических вод, что влияет на сокращение площади морских льдов. Развитие представлений о динамике поверхностных течений в СЛО актуально также и для решения экологических задач, например, для уточнения трансграничного переноса радиоизотопов в арктических морях и уточнения оценки их радиэкологического состояния в «постъядерную эпоху» (Matishov et al., 2004). Оказалось, что большая часть поступающих в арктические моря радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}S , как показано на примере Баренцева моря (Матишов и др., 2022), выводится через их границы именно в процессе водообмена.

Степень разработанности темы исследования. Арктика играет значительную роль в климатической системе Земли. Изменчивость уровня и циркуляции СЛО является индикатором воздействия атмосферы и ее теплообмена с океаном, водообмена с Атлантическим и Тихим океанами, изменения

пресноводного баланса, включая таяние ледовых щитов Гренландии, морского льда и стока северных рек. Рост глобальной температуры воздуха вызвал такой феномен как усиленный рост приземной температуры воздуха (ПТВ) в Арктике (Арктическое усиление). В свою очередь повышение температуры воздуха способствует ускорению таяния ледниковых щитов Гренландии, а поступление пресной воды в СЛО и вынос ее течениями в приполярную область Атлантики оказывает воздействие на термохалинную циркуляцию в регионе. В последние десятилетия наблюдалось усиление таких важных климатообразующих процессов в арктической климатической системе как увеличение притока атлантических вод (АВ), усиление циклонической завихренности атмосферы над СЛО и переноса тепла и влаги из Атлантики (Алексеев и др., 2016, 2019). Кроме того, сокращение площади морского льда оказывает влияние на радиационный и тепловой баланс региона и передачу импульса от воздействия ветра к океану из-за ослабления демпфирующего влияния льда. В результате усиления стратификации верхних слоев субполярных морей прогнозируется ослабление тепловых потоков из океана в атмосферу с последующим уменьшением атмосферного меридионального переноса тепла в Арктику с циклонами. Это окажет существенное влияние на дальнейшее развитие климата, поскольку ослабление меридионального переноса тепла является отрицательной обратной связью, сдерживающей Арктическое усиление при происходящем глобальном потеплении (Dukhovskoy et al., 2019; Proshutinsky et al., 2015). Таким образом Арктика представляет собой сложную многокомпонентную климатическую систему с цепью различных положительных и обратных связей, для понимания которых требуется дальнейшее изучение физических механизмов о взаимосвязях между влиянием атмосферы, изменениями площади распространения льда, температуры поверхности воды, уровня и течений океана (Bony et al., 2006).

Традиционно изменчивость уровня океана изучалась на основе многолетних архивных данных наблюдений на уровневых постах, а изменчивость термохалинной структуры СЛО – на основе многолетних гидрологических данных, полученных в морских экспедициях. В результате анализа архивных наблюдений был сделан вывод, что на рубеже XX и XXI вв. произошел климатический переход в эволюции термохалинного состояния и динамики течений СЛО, поскольку величины большинства океанографических характеристик в период 2007–2013 гг. значительно отличались от наблюдавшихся величин во второй половине XX в. (Тимохов и др., 2016). Пространственная изменчивость уровня океана на станциях арктических морей России также характеризуется значительной неоднородностью, которая связана с изменчивостью гидрометеорологических факторов, со стоком крупных сибирских рек. Сопоставление многолетних изменений уровня на постах арктических морей с изменениями стерической составляющей уровня моря, зависящей от плотности морской воды, воздействия атмосферного давления и ветра показало, что наибольший вклад вносит ветровая составляющая и барометрические изменения уровня («обратный» барометр) (Моря..., 2021).

Характерным для межгодовой изменчивости уровня океана является

наличие трендов. По данным уровенных постов за 1995–2015 гг. были получены следующие оценки трендов: для побережья Канады $+ 0,4 \pm 1,5$ мм/год, для Шпицбергена $+ 0,5 \pm 0,7$ мм/год, для побережья Норвегии $+ 2,3 \pm 1,7$ мм/год (Ludwigsen et al., 2022), для арктических морей России: $+1,39$ мм/год для среднего уровня Баренцева моря, $+2,71$ мм/год для Карского моря, $+ 2,59$ мм/год для моря Лаптевых, $+ 1,77$ мм/год для Восточно-Сибирского моря и $2,45$ мм/год для Чукотского моря (Моря..., 2021).

С появлением спутниковых альтиметрических наблюдений уровня СЛО с 1992г., а в 2016–2020 гг. с запуском спутников SARAL/AltiKa, CryoSat-2 и Sentinel-3A и развитием алгоритмов получения данных для покрытых льдом областей океана удалось получить представления о пространственной изменчивости уровня и сопоставить их с береговыми данными. Корреляции уровня по спутниковым данным и береговым измерениям за 1991–2018 гг. составили $0,89–0,92$, среднеквадратические отклонения $4,4$ см для областей открытой воды в течение всего года; а для покрытых льдом районов $0,64–0,78$ и $5,9$ см соответственно (Armitage et al., 2016; Rose et al., 2019; Prandi et al., 2021a). Оценка тренда среднего уровня СЛО $66–82^\circ$ с.ш. за эру альтиметрических наблюдений 1992–2014 гг. составила $2,1 \pm 1,1$ мм/год, что больше тренда среднего уровня по данным береговых наблюдений за тот же период, который достигал $1,79 \pm 0,63$ мм/год (Andersen et al., 2016; Carret et al., 2017; Ludwigsen et al., 2022). Установлено также влияние крупномасштабной атмосферной циклонической/антициклонической циркуляции, связанной с арктическим колебанием (АК) (Proshutinsky et al., 2015), на межгодовую изменчивость уровня океана и ее влияние на пути распространения вод с пониженной соленостью (Morison et al., 2012). Основной причиной такого характера изменчивости уровня считается изменение макроциркуляционных процессов в атмосфере северного полушария (Вангенгейм, 1952; Гирс, 1971; Классификация ..., 2009; Кононова, 2018; Дмитриев и др., 2019).

До сих пор недостаточно полно исследованы пространственно-временные характеристики изменчивости уровня океана и поверхностных геострофических течений, зависящие от различных типов атмосферной циркуляции.

Цель работы заключалась в установлении пространственно-временных характеристик и количественных оценок изменчивости уровня и поверхностных геострофических течений СЛО на основе анализа спутниковых данных в зависимости от воздействия крупномасштабной атмосферной циркуляции на сезонных и межгодовых масштабах; в уточнении характеристик изменчивости стерической и манометрической компонент уровня океана в условиях современных климатических изменений. В качестве **объекта** исследования выступает Северный Ледовитый океан, **предметом** исследования является крупномасштабная изменчивость уровня и поверхностных течений СЛО по спутниковым данным.

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

1. Оценить характеристики изменчивости уровня и поверхностных геострофических течений СЛО на основе анализа спутниковых альтиметрических наблюдений.

2. Оценить характеристики изменчивости манометрической компоненты уровня СЛО на основе анализа спутниковых гравиметрических наблюдений GRACE.

3. Оценить характеристики изменчивости стерической компоненты уровня СЛО на основе взаимного анализа спутниковой альтиметрии, гравиметрии и гидрологических данных.

4. Оценить влияние крупномасштабной атмосферной изменчивости на формирование режимов циркуляции СЛО последних десятилетий.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Уточнена повторяемость типов атмосферной циркуляции в Арктике методом построения самоорганизующихся карт на основе нейронной сети и предложены индексы сезонной, межгодовой и суммарной повторяемости типов атмосферной циркуляции.

2. Установлены особенности отклика аномалий уровня моря и поверхностных геострофических течений СЛО на циклонические/антициклонические типы циркуляции атмосферы. Получены количественные оценки изменчивости уровня моря и компонент поверхностных геострофических скоростей на основе регрессионных соотношений в зависимости от величины предложенного в работе индекса суммарной повторяемости типов атмосферной циркуляции

3. Уточнены оценки пространственно-временной изменчивости уровня и поверхностных геострофических течений по спутниковым данным альтиметрии за 2003–2020 гг., включая покрытые льдом области океана и полярную область 82–89° с.ш., до 2011 года недоступную для спутниковых наблюдений.

4. Получены оценки трендов и характеристики межгодовой изменчивости стерической компоненты уровня на основе реконструкции по данным альтиметрии и гравиметрии GRACE. Установлено, что для области «слепого» пятна 82–89° с.ш. и круговорота Бофорта стерический уровень является индикатором увеличения распреснения/осолонения водных масс и установлена его взаимосвязь с индексом суммарной повторяемости типов атмосферной циркуляции.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач использовался анализ современных данных альтиметрии и гравиметрии (массивы сформированы в 2019–2022 гг.) с более высоким пространственным разрешением и улучшенной точностью по сравнению с предыдущими продуктами. Используемые данные покрывают всю область СЛО, включая область «слепого» пятна 82°–89° с.ш. и покрытые льдом районы океана. Применялись современные методы анализа гидрометеорологической и спутниковой информации: метод построения самоорганизующихся карт на основе нейронной сети, корреляционный и регрессионный анализы, методы пространственно-временной фильтрации. Это

позволило впервые провести районирование объекта исследования по величинам трендов уровня и его стерической и манометрической компонент, по многолетним режимам океанической циркуляции. Кроме того, удалось оценить количественные взаимосвязи этих величин в зависимости от выделенных типов атмосферной циркуляции.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценки пространственно-временной изменчивости уровня СЛО и поверхностных геострофических течений по спутниковым данным альтиметрии и гравиметрии на сезонных и межгодовых масштабах.
2. Особенности отклика аномалий уровня и поверхностных геострофических течений СЛО на циклонические/антициклонические типы циркуляции атмосферы.
3. Количественные оценки регрессионных соотношений для уровня моря и компонент поверхностных геострофических скоростей в зависимости от величины предложенного в работе индекса суммарной повторяемости типов атмосферной циркуляции.
4. Закономерности межгодовой изменчивости стерической компоненты уровня океана, реконструированной по спутниковым данным, в зависимости от типов атмосферной циркуляции.

Степень достоверности результатов

В диссертационной работе использовался большой объем данных разного типа. Для их анализа применялись как общепринятые методы анализа спутниковой информации, так и специализированные методы обработки данных. Комплексный анализ данных альтиметрии, гравиметрических данных GRACE позволил реконструировать стерический уровень для выбранных районов СЛО, ранее недоступных для спутниковых наблюдений. Достоверность полученных результатов основывается на валидации спутниковых данных по имеющимся контактными измерениям уровня моря в прибрежной зоне и на островах СЛО, данных донных мареографов и скоростей течений по данным автономных буйковых станций и геострофических скоростей, рассчитанных динамическим методом по архивам гидрологических наблюдений.

Достоверность изменчивости реконструированной по спутниковым данным стерической компоненты уровня основана на удовлетворительном сопоставлении с оценками изменчивости термостерической и халостерической компонент стерического уровня, рассчитанных на основе использования непосредственно архивной гидрологической информации.

Достоверность выделенных типов атмосферной циркуляции и их влияния на крупномасштабную изменчивость уровня и поверхностных геострофических течений подтверждается сопоставлением с типами циркуляции атмосферы, характерными для климатических индексов АК и арктического диполя (АД).

Достоверность подтверждается также публикациями в рецензируемых журналах из списка ВАК и SCOPUS, а также выступлениями на всероссийских и международных конференциях.

Выводы, сделанные в рамках диссертационной работы, подтверждают и развивают представления, полученные другими авторами за последние десятилетия.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в выявлении физико-географических закономерностей крупномасштабной изменчивости уровня и поверхностных геострофических течений СЛО и в уточнении представлений о влиянии на них различных типов атмосферной циркуляции. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения взаимосвязей между воздействием атмосферы, динамикой океана, изменчивостью площади покрытия океана льдом для развития представлений о климатической системе Арктики.

Полученные автором новые результаты по реконструкции стерического уровня океана по спутниковым данным позволили предложить концептуальную схему режимов поверхностной циркуляции вод и распространения распресненных вод от стока арктических рек и таяния льда в зависимости от типов атмосферной циркуляции. Практическая значимость работы заключается в получении количественных оценок изменчивости аномалий уровня и скоростей поверхностных геострофических течений океана в зависимости от типа атмосферной циркуляции в Арктике. Полученные соотношения имеют прикладное значение для прогностических систем на основе использования спутниковой информации для обеспечения безопасности мореплавания Северного морского пути и морехозяйственной деятельности, для оценивания трансграничного переноса радиоизотопов.

Апробация результатов. Основные результаты работы представлялись на 11 международных и всероссийских научных конференциях: VII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп, 15–19 мая 2023 г.); Всероссийская конференция с международным участием «XXIX Береговая конференция: натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования» (Калининград, 18–24 апреля 2022 г.); XXVII Международный Симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Москва, 05–09 июля 2021 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: Год науки и технологий в РФ – Десятилетие наук об океане ООН» (Севастополь, 21–24 сентября 2021 г.); VI Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (Москва, 18–24 апреля 2021 г.); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021» (Москва, 12–23 апреля 2021 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: исследования береговой и шельфовой зон» (XXVIII Береговая конференция) (Севастополь, 21–25 сентября 2020 г.); 18-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 16–20 ноября 2020 г.); XXV Международный Симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Новосибирск, 01–05 июля 2019 г.); XV Международная научно-техническая конференция

«Современные методы и средства океанологических исследований» (Москва, 16–18 мая 2017 г.); Молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования» (Севастополь, 25–29 апреля 2016 г.).

Связь с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с научными планами и программами исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» (2018–2021 гг.) и в рамках гранта РФФИ № 20-35-90061 «Аспирант».

Личный вклад соискателя. Постановка задач диссертационной работы проводилась соискателем совместно с научным руководителем к.ф.-м.н. С.В. Станичным. Соискателем лично проводился поиск и формирование баз спутниковых данных, массивов атмосферного реанализа, гидрологической информации, осуществлялся выбор методов исследования, алгоритмов для анализа данных, проведены расчеты реконструированной стерической компоненты уровня океана, выполнена типизация атмосферных полей методом построения самоорганизующихся карт на основе нейронной сети. Анализ и интерпретация полученных результатов проводились автором самостоятельно. Обсуждение результатов отдельных этапов исследования осуществлялось соискателем совместно с научным руководителем и соавторами научных публикаций. Соискатель лично представлял результаты работы на российских и международных конференциях, семинарах и школах.

Публикации по теме диссертации. Результаты диссертации опубликованы в 22 научных работах, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах, 15 статей в рецензируемых сборниках научных трудов и 3 работы в сборниках тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях. Требованиям ВАК при Минобрнауки России по специальности 1.6.17 – океанология (географические науки) удовлетворяют 4 статьи в рецензируемых российских научных изданиях [1–4]. В их числе 1 работа в рецензируемом научном издании, входящем в наукометрическую базу SCOPUS.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 153 страницы. Текст исследования иллюстрирован 47 рисунками. Библиографический список включает в себя 147 наименований, в том числе 85 на английском языке. В приложении содержится 8 иллюстраций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении представлена общая характеристика работы, включающая актуальность и степень разработанности темы, цель и задачи исследования, научную новизну и методы исследования, практическую значимость работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

Приводятся сведения о теоретической и практической значимости работы, связи с научными программами, о степени достоверности и апробации результатов исследования, личном вкладе автора.

В **Главе 1** приведен обзор публикаций, дающий современное представление о физических факторах, определяющих изменчивость уровня океана и циркуляции вод СЛО. Приводятся характеристики данных спутниковой альтиметрии и гравиметрии, применяемые методы геофизической коррекции, источники ошибок и точность измерений уровня океана, даны основные достижения спутниковой океанологии в регионе.

В *параграфе 1.1* приводится подробная характеристика объекта исследования, климатических изменений в Арктике, разновидностей атмосферных процессов западной и восточной форм циркуляции атмосферы, термохалинной структуры и течений, распределения ледяного покрова СЛО.

В *параграфе 1.2* перечислены основные факторы, влияющие на изменчивость уровня СЛО. На основе анализа данных гидрометеорологических наблюдений изменчивость уровня СЛО объясняется стерическими эффектами (35%), барометрическим вкладом (закон обратного «барометра») (30%), воздействием ветра (10%) и изменением объема океана (25%) (Proshutinsky et.al., 2004). Изменения стерического уровня СЛО меньше, чем в Мировом океане. При этом халостерическая компонента дает больший вклад в стерический уровень, чем термостерическая (Ludwigsen et.al., 2022).

В *параграфе 1.3* описана климатическая изменчивость циркуляции вод и гидрологических полей в СЛО. В последних публикациях по климату Арктики основное внимание уделено улучшению понимания роли СЛО в изменениях климата и процессов, ответственных за формирование современного состояния вод и морского льда, циркуляции океана и теплообмена с атмосферой (Алексеев, 2004; Wunsch et al., 2007; Саркисян и др., 2013; Голубева и др., 2015; Колдунов и др., 2015; Яковлев, 2008, 2015; Кальницкий и др., 2020; Timmermans et al., 2020; Proshutinsky et al., 2015; Wang et al., 2017, 2022).

Параграф 1.4 посвящен проблеме наблюдения за уровнем океана с помощью средств дистанционного зондирования Земли из космоса, приведены схема измерений уровня океана при работе альтиметра и спутника Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) и основные термины.

В **Главе 2** описывается типизация атмосферных полей в Арктике методом построения самоорганизующихся карт на основе нейронной сети, вводятся и рассчитываются индексы сезонной, межгодовой и суммарной повторяемости типов атмосферной циркуляции, приводится классификация гидрометеорологических полей на основе предложенного композитного метода.

Параграф 2.1. содержит описание используемых в работе методов анализа данных и используемые материалы (массивы данных).

В *параграфе 2.1.1* описывается метод построения самоорганизующихся карт Кохонена (СОК) для нейронной сети, который позволяет выделить аномальные пространственно-временные особенности метеорологических и гидрофизических полей (Кохонен, 2008). В последнее время метод получил

широкое распространение в геофизике (Sonnewald, M. et al., 2019), в метеорологии и климатологии (Mwasiagi, 2011; Johnsson, 2012; Wahle et al., 2023) [4,5,7,8].

В результате выполненной на основе метода СОК типизации поля приземного атмосферного давления по данным реанализа в Арктике (Архив ERA-Interim) за 1979–2018 гг. получено шесть типов атмосферной циркуляции. Повторяемость в процентах для каждого типа приведена в Таблице 1 и указаны общие характеристики поля приземного давления над Арктикой (Ц – циклонический; АЦ – антициклонический; Ц\АЦ – циклонический/антициклонический), все шесть типов приведены в диссертации [4].

Таблица 1 – Повторяемость (%) типов атмосферной циркуляции для Северного полушария за 1979–2018 гг.

№, тип циркуляции	1	2	3	4	5	6
Повторяемость, [%], (до целых)	14	13	15	15	25	18
Условная характеристика типа поля над Арктикой (Ц – циклонический; АЦ – антициклонический)	Ц\АЦ	Ц\АЦ	Ц\АЦ\Ц	АЦ	Ц	АЦ

В качестве примера на (Рисунке 1, а) приведено пространственное распределение приземного атмосферного давления, характерное для циклонического типа №5, которое демонстрирует зональное распределение атмосферного давления, при этом над центром Арктики находится обширный циклон. Такое распределение давления характерно для арктического колебания, находящегося в положительной фазе (Рисунок 1, б) (Arctic Oscillation). Меридиональный тип циркуляции, характерный для климатического индекса арктического диполя, когда область высокого давления находится над морем Бофорта и Гренландией, а область низкого давления над северо-восточной Евразией (Wang et al., 2009) соответствует нашему типу №6 [4].

В параграфе 2.2 представлено описание временной изменчивости типов атмосферной циркуляции над Арктикой, полученных на основе самоорганизующихся карт атмосферного давления. Для описания сезонной изменчивости типов атмосферной циркуляции нами введен индекс сезонной повторяемости в % каждого типа циркуляции в климатический месяц за период 1979–2018 гг., сумма повторяемости всех выделенных типов составляет 100% [4]. Для описания межгодовой изменчивости режимов циркуляции атмосферы нами был введен индекс годовой повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления $\alpha_i(t)$, т.е. повторяемость каждого i -го типа циркуляции рассчитывается в течение текущего года в процентах [4], представлена на Рисунке 2.

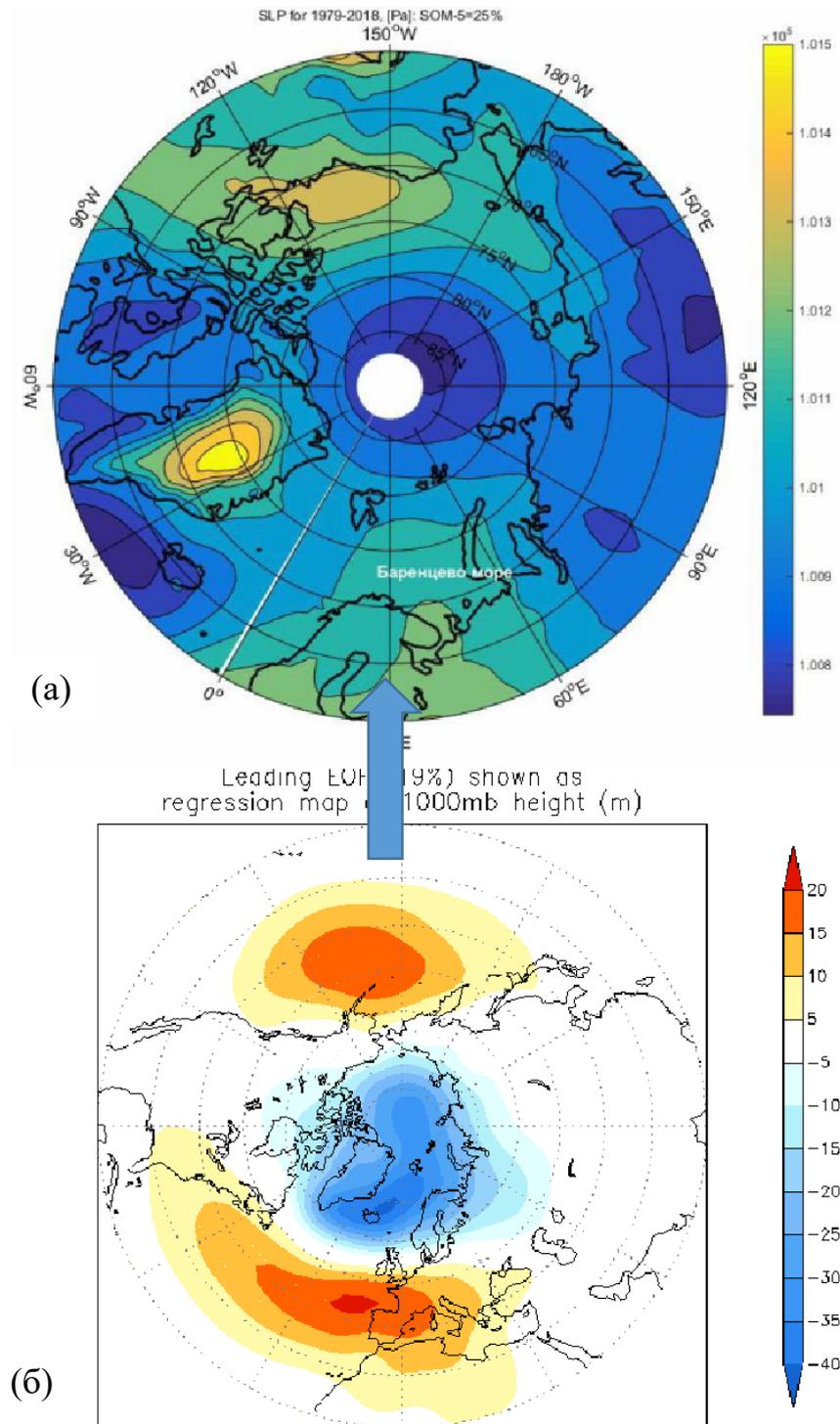


Рисунок 1 – Циклонический тип приземного давления над Арктикой за 1979–2018 гг. тип №5 (Па) (повторяемость 25%). Изобара нормального атмосферного давления $1,013 \cdot 10^5$ Па (а) и арктическое колебание (б)

Этот индекс позволяет оценить межгодовую изменчивость режимов циркуляции атмосферы (Таблица 1) и характеризует смену шести основных режимов циркуляции атмосферы над Арктикой от чисто циклонического типа №5 до антициклонического типа №4,6 и с переходными фазами между ними (типы №1,2,3).

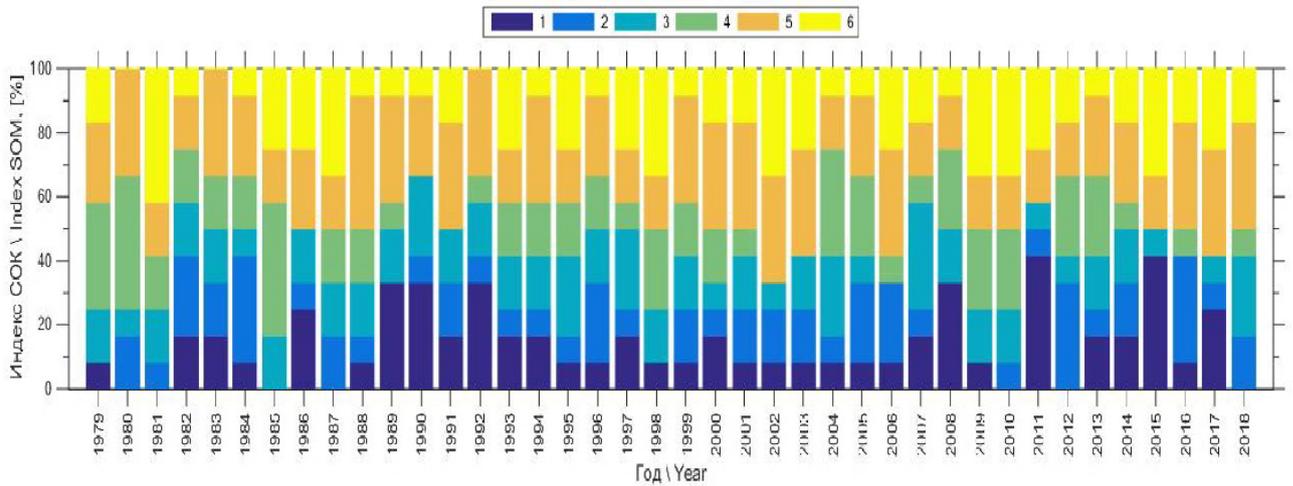


Рисунок 2 – Гистограмма индекса годовой повторяемости $\alpha_i(t)$ самоорганизующихся карт атмосферного давления: типы №1–6 за период 1979–2018 гг.

Для характеристики общей изменчивости приземного атмосферного давления нами предложен суммарный индекс циркуляции атмосферы (индекс суммарной повторяемости типов атмосферной циркуляции), рассчитанный по формуле [1,9]

$$P_{SOM}(t) = -\frac{1}{100} \sum_{i=1}^{N_{SOM}} \alpha_i(t) \cdot P_{SOM}^i, \quad (1)$$

где N_{SOM} – количество типов СОК;

$\alpha_i(t)$ – повторяемость по времени t в % для i -го типа циркуляции;

P_{SOM}^i – среднее значение атмосферного давления для i -го типа циркуляции.

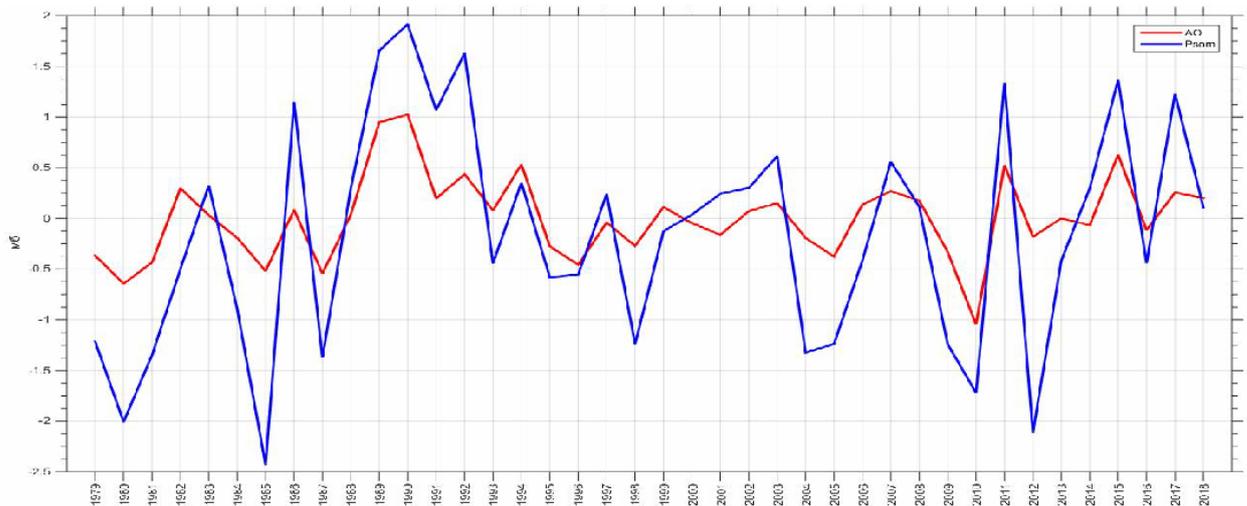


Рисунок 3 – Годовой индекс арктического колебания (красный) и суммарный индекс циркуляции атмосферы P_{SOM} (синий) за 1979–2018 гг.

Суммарный индекс циркуляции атмосферы P_{SOM} и индекс арктического колебания представлены на Рисунке 3, корреляция между ними составляет 0,85

[1,9]. В положительной фазе индексы P_{SOM} и АК описывают циклонические типы циркуляции над Арктикой, в отрицательной фазе – антициклонические типы (Рисунок 3).

Параграф 2.3 посвящен классификации гидрометеорологических полей в зависимости от типа атмосферной циркуляции. Для каждого выделенного типа поля атмосферного давления нами было предложено рассчитывать связанное с ним пространственное распределение заданного метеорологического или гидрофизического параметра, этот подход назвали композитным методом. С его помощью выделены режимы изменчивости площади распространения морского льда, температуры воздуха, температуры поверхности моря в зависимости от типа атмосферной циркуляции за 1979–2018 гг. Композитные карты приведены в Приложении А [4].

В Главе 3 проанализированы особенности изменчивости уровня и поверхностных геострофических течений СЛО по спутниковым данным на различных временных масштабах, рассчитаны оценки тренда уровня и его манометрической и стерической компонент.

В *параграфе 3.1* дано краткое описание используемых массивов аномалий уровня океана за 1992–2018 гг. в зоне $66\text{--}82^\circ\text{с.ш.}$ с разрешением сетки $0,25 \times 0,50$ градусов (Архив ARCTIC SEALEVEL) и абсолютной динамической топографии океана и поверхностных геострофических скоростей в зоне $66\text{--}82^\circ\text{с.ш.}$ за 2003–2014 гг. с разрешением $0,25 \times 0,75$ градусов и в области $66\text{--}89^\circ\text{с.ш.}$ с разрешением 20 км за период 2011–2020 гг. (Архив СПОМ). При обработке сигнала радаров, использующихся на спутниках для дистанционного зондирования уровня океана, применялся ряд геофизических коррекций на прохождение сигнала в ионосфере и тропосфере Земли, удалялись барометрический вклад атмосферы («обратный» барометр) и влияние океанских приливов (Armitage et al., 2016; Rose et al., 2019). В результате при месячном осреднении альтиметрических данных по уровню океана погрешность составила $\pm 1,1$ см, а при осреднении за год достигла $\pm 0,9$ см (Armitage et al., 2016). Описание методики, использованной для расчета уровня моря по данным альтиметрии для покрытых льдом районов океана, приводится в работах (Kwok et al., 2011, 2016; Rose et al., 2019; Doglioni et al., 2021). По результатам валидации уровня (Peacock et al., 2004; Armitage et al., 2016; Carret et al., 2017) и поверхностных геострофических течений (Proshutinsky et al., 2019; Rose et al., 2019; Doglioni et al., 2023) по данным альтиметрии следует, что данные альтиметрии, используемые в работе, адекватно описывают изменчивость уровня и поверхностных геострофических течений СЛО, включая покрытые льдом области океана.

По данным реконструкции уровня береговых и спутниковых наблюдений за 1950–2012 гг. (Svendsen et al., 2016) были рассчитаны карты трендов (Архив ARCTIC SEALEVEL). Полученная нами оценка тренда среднего уровня СЛО по данным реконструкции составила $1,5 \pm 0,3$ мм/год за 1950–2010 гг. с учетом гляциоэвстатической коррекции. Уточнение характеристик межгодовой изменчивости уровня СЛО далее нами производилось по спутниковым альтиметрическим данным за 1992–2018 гг., полученным для всего океана,

включая покрытые льдом области (Архив ARCTIC SEALEVEL 2019). Среднее значение линейного тренда по акватории СЛО за 1992–2018 гг., включая области океана, занятые льдом, составило $2,2 \pm 0,4$ мм/год для 95% уровня значимости [3]. По рассчитанным среднемноголетним значениям абсолютной динамической топографии и поверхностных геострофических течений за 2003–2014 гг. были выделены, а для 2011–2020 гг. уточнены (включая область «слепого» пятна) элементы циркуляции СЛО: Норвежское течение, Западно-Шпицбергенское течение, Восточно-Гренландское течение, Трансарктическое течение, круговорот Бофорта (БК) [1,3] (Рисунок 4).

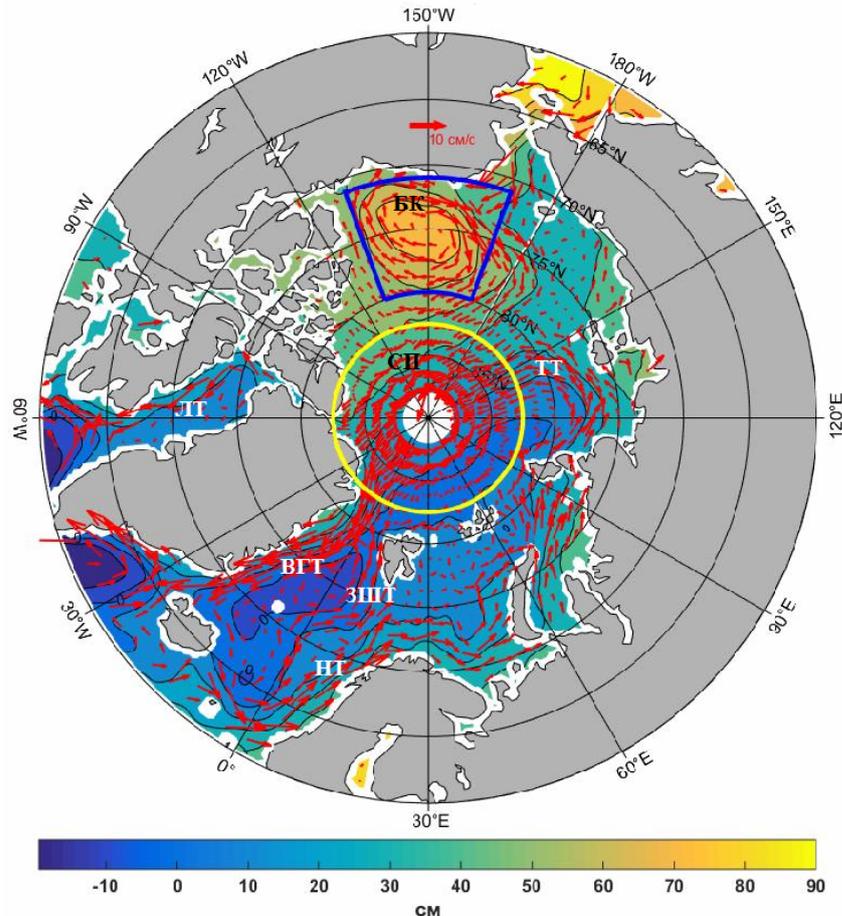


Рисунок 4 – Среднемноголетнее поле абсолютной динамической топографии (см) и геострофических скоростей течений (см/с) за 2011–2020 гг. НТ– Норвежское течение, ЗШТ– Западно-Шпицбергенское течение, ВГТ– Восточно-Гренландское течение, ЛТ – Лабрадорское течение, ТТ–Транс-арктическое течение, БК - Бофорта круговорот. СП – область «слепого» пятна альтиметрии до 2011 года

Проведенный нами пространственный анализ распределения тренда абсолютной динамической топографии по акватории СЛО выявил следующие закономерности. Максимум положительного тренда за 2003–2014 гг. достигал $2 \pm 0,21$ см/год и был локализован в районе моря Бофорта $75\text{--}80^\circ$ с.ш. и $145\text{--}180^\circ$ з.д. За 2011–2020 гг. максимум составил около $2,5$ см/год и был смещен южнее к берегу и западнее $70\text{--}75^\circ$ с.ш. и $130\text{--}150^\circ$ з.д. [1,2,9]. Нами были рассчитаны

карты сезонной изменчивости абсолютной динамической топографии для обоих периодов данных. В целом наблюдается усиление интенсивности течений круговорота Бофорта и других элементов циркуляции СЛО в зимний период с последующим уменьшением градиентов уровня океана и скоростей течений к летнему сезону. Удалось уточнить положение изолиний уровня океана и векторов течений, проходящих через район «слепого» пятна и соответствующих положению Трансарктического течения в различные сезоны.

В *параграфе 3.2* изучался вклад мезомасштабных процессов в оценки тренда уровня, в среднем он составил 30–40%. Оценивался также вклад внутригодовых и межгодовых масштабов в общую дисперсию изменчивости уровня. Изменчивость уровня на шельфе северных морей России имеет в основном внутригодовой характер, ее вклад составляет до 20% в дисперсию исходного поля уровня. Две четко выраженные области с вкладом процессов межгодовой изменчивости до 70–80% в дисперсию локализованы в районе круговорота Бофорта и в секторе 75–80° с.ш. и 150° в.д.–165° з.д.) [3].

В *параграфе 3.3* приведена оценка изменчивости манометрической компоненты уровня океана по гравиметрическим данным спутника GRACE (Архив GRACE), которая обусловлена изменчивостью водных масс океана (Gregory et al., 2019). Для СЛО данные GRACE нами сопоставлялись с данными донного мареографа за период 2005–2014 гг. в районе Северного полюса, в точке с координатами 89,97° с.ш. и 33° з.д. С учетом дрейфа датчика давления коэффициент корреляции составил 0,81, а среднеквадратичное отклонение между ними 3,42 см при 95% доверительном интервале [3]. Валидация GRACE по данным донных мареографов в различных районах Мирового океана показала хорошие результаты: корреляция составила от 0,4 (Северная Атлантика, пролив Дрейка) до 0,84 (в СЛО) при 98% доверительном интервале (Peralta-Ferriz et al., 2017). Нами получены оценки трендов манометрической компоненты уровня, обусловленной распределением водных масс. В Норвежском море выделен положительный тренд около 1 мм/год; в Баренцевом море выделяется отрицательный тренд до –2 мм/год; в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях положительный тренд 1–5 мм/год [3].

В *параграфе 3.4* оценивалась изменчивость стерической компоненты уровня, обусловленная изменениями плотности воды, на основе анализа гидрологической информации в узлах сетки 50×50 км за 1992–2018 гг. (Архив STERIC). Анализ стерической компоненты уровня и ее халостерической и термостерической составляющих показал, что преобладающий вклад халостерической компоненты в тренд стерического уровня в районе круговорота Бофорта и западной области «слепого» пятна до $+5-7 \pm 0,4$ мм/год против вклада термостерической компоненты $+1 \pm 0,4$ мм/год. В районе поступления теплых атлантических вод в Северное, Норвежское и Баренцево моря вклад термостерической компоненты $+2-3 \pm 0,2$ мм/год в тренд стерического уровня превышает вклад халостерической компоненты $-1 \pm 0,2$ мм/год [2].

В Главе 4 рассматривается многолетняя изменчивость уровня и поверхностных геострофических течений и формирование режимов циркуляции вод СЛО в зависимости от типов атмосферной циркуляции.

В параграфе 4.1 рассматривается влияние типов атмосферной циркуляции, выделенных в главе 2, на формирование режимов циркуляции вод СЛО. Во время положительной фазы суммарного индекса циркуляции атмосферы P_{SOM} в Арктике наблюдается циклоническая циркуляция атмосферы, а во время отрицательной фазы индекса над Арктикой находится антициклоническая область давления. В целом наблюдается соответствие режимов циркуляции атмосферы и океана, циклоническая циркуляция океана проявлялась в понижении среднего уровня СЛО с временной задержкой по фазе от индекса P_{SOM} (Рисунок 5) [1,9].

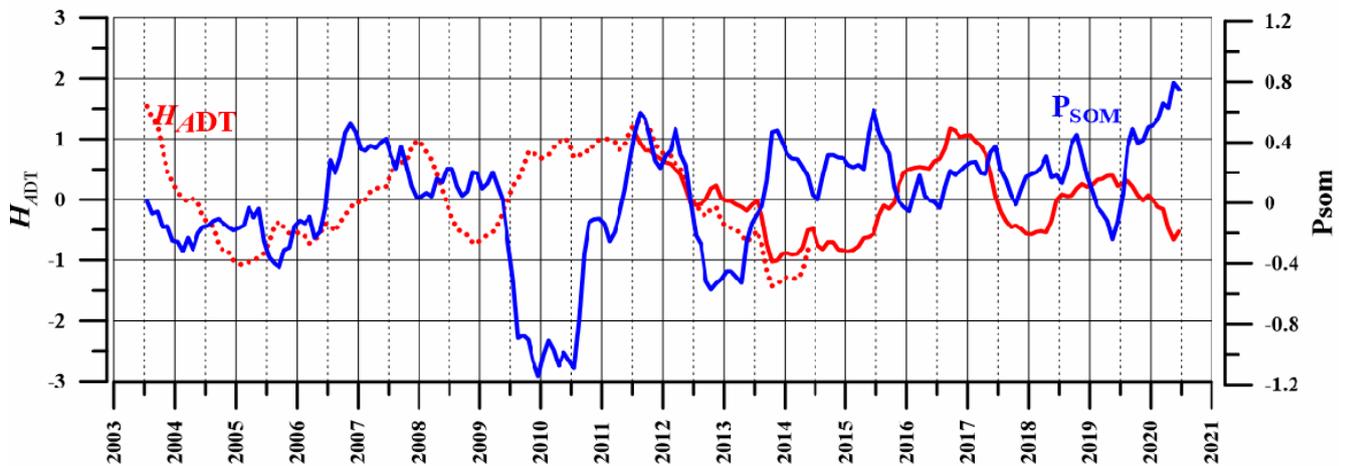


Рисунок 5 – Графики осредненной по СЛО абсолютной динамической топографии по данным альтиметрии (H_{ADT}) за 2003–2014 гг. (красный пунктир), за 2011–2020 гг. (красная линия) и суммарный индекс циркуляции атмосферы (P_{SOM}) после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев

В параграфе 4.2 проводилась оценка количественных закономерностей изменчивости аномалий уровня океана и скорости поверхностных геострофических течений в зависимости от величины суммарного индекса повторяемости типов атмосферной циркуляции с использованием методов линейной регрессии (Малинин, 2003; Сикан, 2007). Сначала такой подход был нами опробован за 2003–2014 гг. для сектора океана ($65\text{--}81.5^\circ$ с.ш., $0\text{--}70^\circ$ в.д.), объединяющего Северное, Норвежское и Баренцево моря [2]. Коэффициенты линейной регрессии для аномалий динамической топографии α_{DT}^i (см/единица P_{SOM}) и аномалий поверхностных геострофических скоростей в виде векторов приведены на (Рисунке 6) для 2003–2014 гг. Коэффициенты детерминации R^2 регрессии для аномалий динамической топографии в среднем по СЛО составили 0,70 для 2003–2014 гг. и 0,72 для 2011–2020 гг.

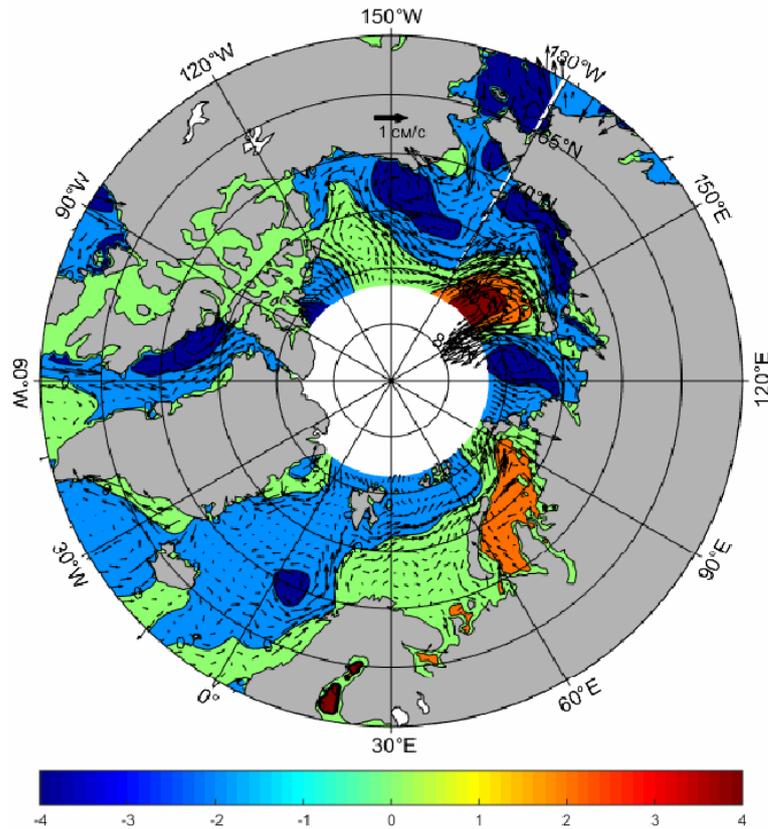


Рисунок 6 – Пространственное распределение коэффициентов линейной регрессии для аномалий динамической топографии (cm/P_{SOM}) и векторов аномалий скорости течений ($\text{cm/s}/P_{\text{SOM}}$) за 2003–2014 гг.

Таким образом, во время положительной фазы индекса P_{SOM} , когда центральная часть Арктики занята циклоническими типами атмосферной циркуляции, наблюдается увеличение аномалий скоростей течений, что способствует увеличению притока теплых атлантических вод в Баренцево море и центральную часть океана и уменьшению притока тихоокеанских вод через Берингов пролив (Рисунок 6). Во время отрицательной фазы P_{SOM} , когда над Арктикой находятся антициклонические типы атмосферной циркуляции, знаки аномалии скоростей течений меняются на противоположные, что уменьшает приток теплых атлантических вод в Северный Ледовитый океан и увеличивает поступление тихоокеанских вод через Берингов пролив (Рисунок 6).

Параграф 4.3 посвящен изучению влияния режимов атмосферной циркуляции на пространственное распределение манометрической и стерической компонент уровня океана, которое изучалось на основе композитного анализа для каждого из шести типов циркуляции. В зависимости от типа происходит изменение манометрического уровня, обусловленного вариациями водных масс из-за адвекции морских течений, дрейфа морского льда, экмановского транспорта распресненных вод от стока рек из районов Сибирского и Канадского шельфа, разницы осадков и испарения над СЛО. Соответствующие карты приведены в параграфе 4.3 и в Приложении А.

Для областей «слепого» пятна и круговорота Бофорта (области СП и БК на Рисунке 4) был реконструирован стерический уровень как разница уровня по данным альтиметрии и манометрической компоненты уровня. На Рисунке 7 приведен реконструированный стерический уровень, осредненный по области СП.

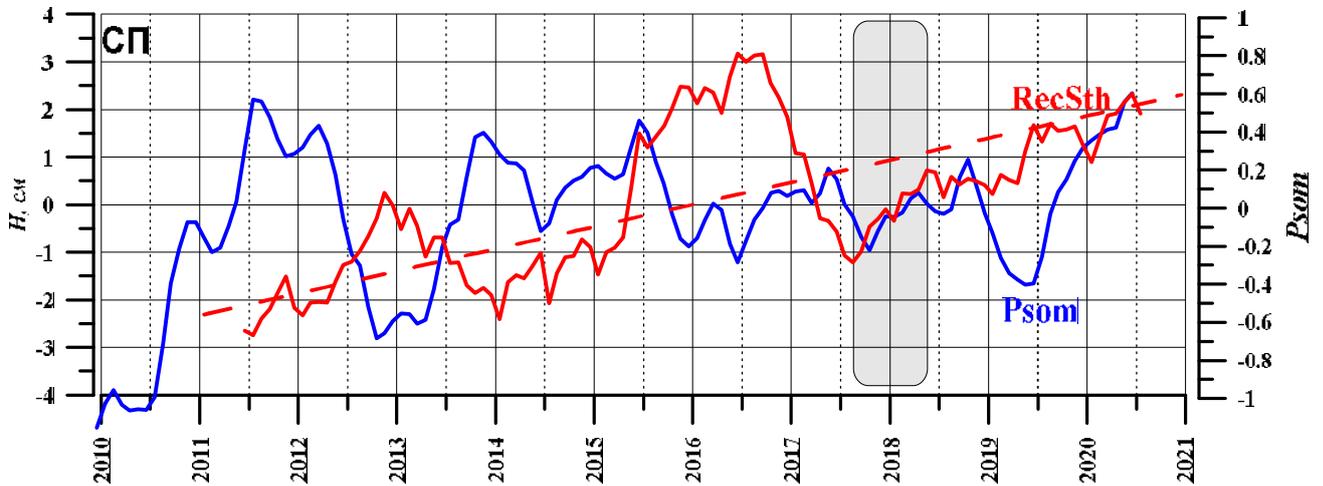


Рисунок 7 – Графики осредненного по области «слепого» пятна реконструированного стерического уровня (см) за 2011–2020 гг. (красная сплошная линия), его тренда (красная штриховая линия) и индекса P_{SOM} (синяя линия) после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев. Данные GRACE за 07.2017–05.2018 проинтерполированы (серая область)

В результате впервые получены характеристики межгодовой изменчивости и оценки трендов стерической компоненты уровня для области «слепого» пятна и района круговорота Бофорта на основе реконструкции по данным альтиметрии и *GRACE* за 2011–2020 гг.: величины 0,3–0,4 см/год для СП и 0,45 см/год для БК соответственно. Значения трендов согласуются с независимыми оценками тренда стерической компоненты уровня, рассчитанной по гидрологическим данным в параграфе 3.4.

В параграфе 3.4 для областей СП и БК было получено, что халостерическая составляющая стерического уровня вносит вклад в тренд стерического уровня примерно в пять раз больше, чем термостерическая. Поэтому для обеих областей стерический уровень является индикатором увеличения распреснения/осолонения водных масс в зависимости от типа атмосферной циркуляции. В периоды положительной фазы P_{SOM} (циклонической) наблюдаются минимумы стерического уровня, что свидетельствует об увеличении солёности в эти периоды времени. Соответственно, в периоды отрицательной фазы P_{SOM} (антициклонической) наблюдаются максимумы стерического уровня, что свидетельствует об уменьшении солёности (Рисунок 7) [1,9].

В итоге была предложена концептуальная схема, которая интегрирует полученные результаты анализа абсолютной динамической топографии, поверхностных геострофических течений по данным альтиметрии и реконструированного стерического уровня в зависимости от смены типов

циркуляции атмосферы, и учитывает возможные пути распространения распresенных вод в СЛО (Рисунок 8) [1,9].

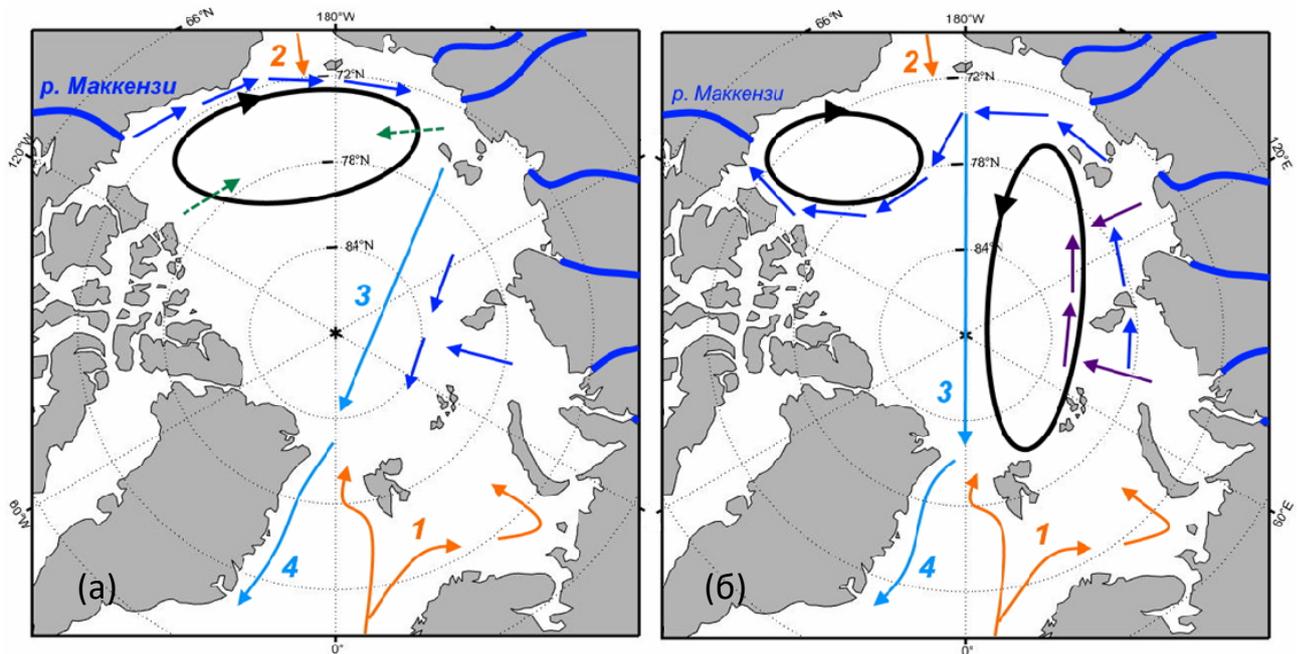


Рисунок 8 – Концептуальная схема циркуляции СЛО: (а) – во время отрицательной фазы P_{SOM} (антициклонические типы); (б) – во время положительной фазы P_{SOM} (циклонические типы). Черные стрелки обозначают поверхностную геострофическую циркуляцию, оранжевые – поступление атлантических (1) и тихоокеанских вод (2); голубые – Трансарктическое (3) и Восточно-Гренландское течение (4). Синие и фиолетовые стрелки показывают распространение пресных вод от реки Маккензи и стока евразийских рек. Зеленые стрелки – экмановский перенос распresенных вод. Жирными синими линиями обозначены впадающие в СЛО реки

В **Заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертации исследована пространственно-временная изменчивость уровня и поверхностных геострофических течений СЛО на основе анализа спутниковых альтиметрических и гравиметрических данных GRACE, включая покрытые льдом области океана. Дополнительно привлекались данные атмосферного реанализа, архивные гидрологические базы и наблюдения уровня океана на уровневых постах и донном мареографе.

Изменение уровня СЛО является важным индикатором изменчивости климата Арктики и в целом климатической системы Земли в силу интегрального характера формирования уровня моря. Для Арктики в последнее десятилетие достигнут прогресс в обработке альтиметрической информации и повышения ее точности, а запуск спутников Envisat и CryoSat-2 позволил увеличить площадь

покрытия в высоких широтах до 89° с.ш. В результате получены данные абсолютной динамической топографии и поверхностных геострофических скоростей для всего СЛО за 2003–2020 гг., которые хорошо согласуются с имеющимися инструментальными наблюдениями. В работе использовался метод построения самоорганизующихся карт на основе нейронной сети, который позволил выделить шесть типов циркуляции атмосферы, ввести сезонный, годовой индексы и индекс суммарной повторяемости типов атмосферной циркуляции P_{SOM} . На основании полученных результатов предложена концептуальная схема режимов поверхностной циркуляции и распространения распресненных вод в зависимости от типов атмосферной циркуляции, которая согласуется с гипотезой, что основной динамической причиной накопления в круговороте Бофорта воды с пониженной соленостью является экмановская накачка в условиях преобладания в атмосфере антициклонических типов циркуляции.

В итоге основные результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Выполнена типизация режимов циркуляции атмосферы в Арктике методом построения самоорганизующихся карт приземного давления на основе нейронной сети. За период 1979–2018 гг. выделено шесть типов: один циклонический, два антициклонических и три смешанных типа.

2. Предложены индексы сезонной, годовой повторяемости и индекс суммарной повторяемости типов атмосферной циркуляции P_{SOM} , позволяющие исследовать временную изменчивость режимов циркуляции атмосферы на сезонных и межгодовых масштабах и предложен композитный метод расчета присоединенных карт гидрометеорологических параметров, пространственное распределение которых обусловлено конкретным типом циркуляции атмосферы. Корреляция суммарного индекса циркуляции атмосферы P_{SOM} и индекса арктического колебания равна 0,85. Индекс P_{SOM} является обобщением индекса арктического колебания и арктического диполя с учетом других типов циркуляции атмосферы.

3. Выделены режимы изменчивости площади распространения морского льда, температуры воздуха, температуры поверхности моря в зависимости от типа атмосферной циркуляции на основе метода построения композитных карт, которые приведены в Приложении А.

4. Изменчивость уровня на шельфе арктических морей России имеет в основном внутригодовой характер, ее вклад составляет до 20% в дисперсию исходного поля уровня. Две четко выраженные области изменчивости уровня на межгодовых масштабах с вкладом 70–80% в дисперсию локализованы в районе круговорота Бофорта и в секторе $75\text{--}80^\circ$ с.ш. и 150° в.д. $\text{--}165^\circ$ з.д. В этих же областях был отмечен положительный рост абсолютной динамической топографии в море Бофорта до 1,5 см/год и отрицательный тренд в указанном секторе до минус 1,5 см/год за 2003–2014 гг. В области «слепого» пятна севернее 82° с.ш. отмечен слабый рост абсолютной динамической топографии 0,10–0,20 см/год за 2011–2020 гг.

5. Получены количественные оценки зависимости аномалий уровня океана и поверхностных геострофических течений на основе регрессионных соотношений от величины индекса P_{SOM} : перепад уровня между шельфом и более глубоководной частью океана составляет до 4 см на 1 единицу индекса P_{SOM} , для аномалий скорости поверхностных геострофических течений до 0,6–0,8 см/с на 1 единицу индекса P_{SOM} за 2003–2014 гг. Этот перепад усиливается в Карском море до ~5 см и до ~8 см на 1 единицу индекса P_{SOM} в секторе 150–180° в.д. (в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море) в 2011–2020 гг. Усиление градиентов уровня приводит к усилению градиентов давления между шельфом и более глубоководной частью океана и, как следствие, к увеличению геострофических скоростей до 1,5 см/с на 1 единицу индекса P_{SOM} . Таким образом, во время положительной фазы индекса P_{SOM} , когда в Арктике преобладают циклонические типы циркуляции атмосферы, наблюдается увеличение скоростей аномалий поверхностных геострофических течений, что способствует увеличению притока теплых атлантических вод в Баренцево море и центральную часть океана, и ослаблению притока тихоокеанских вод через Берингов пролив. Во время отрицательной фазы P_{SOM} , когда над Арктикой преобладают антициклонические типы циркуляции атмосферы, знаки аномалий уровня и скоростей поверхностных геострофических течений меняются на противоположные.

6. Уточнена пространственно-временная изменчивость стерической и манометрической компонент уровня океана, получены оценки их трендов по данным гидрологии, GRACE и альтиметрии, в том числе для «слепого» пятна 82–89° с.ш. – области, недоступной для альтиметрии до 2011 года.

7. Впервые получены характеристики межгодовой изменчивости и оценки трендов стерической компоненты уровня для «слепого» пятна 82–89° с.ш. и района круговорота Бофорта на основе реконструкции по данным альтиметрии и GRACE за 2011–2020 гг.: величины 0,3–0,4 см/год и 0,45 см/год соответственно. Значения трендов согласуются с независимыми оценками тренда стерической компоненты уровня, рассчитанной по гидрологическим данным. Для области «слепого» пятна и круговорота Бофорта стерический уровень является индикатором увеличения распреснения/осолонения водных масс в зависимости от типа атмосферной циркуляции. Соответственно, в периоды положительной фазы индекса P_{SOM} (циклонической) наблюдаются минимумы стерического уровня, что свидетельствует об увеличении солёности в эти периоды времени, а во время отрицательной фазы P_{SOM} (антициклонической) наблюдаются максимумы стерического уровня, что свидетельствует об уменьшении солёности.

8. На основании полученных результатов предложена концептуальная схема режимов поверхностной циркуляции и распространения распресненных вод в зависимости от типов атмосферной циркуляции и суммарного индекса P_{SOM} . Схема согласуется с режимами циркуляции океана на основе анализа поверхностных геострофических течений по данным альтиметрии и межгодовой изменчивостью реконструированной стерической компоненты уровня для полярной области океана и круговорота Бофорта за 2011–2020 гг.

9. Практическая значимость работы заключается в получении количественных оценок изменчивости уровня и скоростей поверхностных геострофических течений океана в зависимости от типа атмосферной циркуляции в Арктике. Полученные соотношения имеют прикладное значение для прогностических систем на основе использования спутниковой информации, в том числе будут способствовать улучшению прогнозов ледовых явлений на трассах Северного морского пути для обеспечения безопасности мореплавания и морехозяйственной деятельности в Арктике. Развитие представлений о динамике поверхностных течений в СЛО необходимо и для решения экологических задач, например, для оценивания трансграничного переноса радиоизотопов и оценки радиэкологического состояния арктических морей.

Благодарности. Автор благодарит своего научного руководителя к.ф.-м.н. С.В. Станичного за руководство и ценные рекомендации; выражает глубокую признательность руководителю научно-квалификационной работы в аспирантуре к.ф.-м.н. В.Л. Дорофееву, а также д.г.н. Ю.Н. Горячкину, д.г.н. В.Н. Белокопытову, д.г.н. Ю.В. Артамонову, к.ф.-м.н. А.А. Кубрякову за консультации и плодотворные обсуждения, что способствовало углублению понимания материала при подготовке диссертации. Автор признателен им за ценные советы в логической организации материала диссертации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах

1. **Лемешко Е. Е.** Межгодовая изменчивость режимов циркуляции вод Северного Ледовитого океана // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 48–64. doi: 10.29039/2413-5577-2023-1-48-64.

2. **Лемешко Е. Е.,** Лемешко Е. М., Новицкая В. П. Влияние арктической осцилляции на формирование режимов циркуляции вод в секторе Северного, Норвежского и Баренцева морей // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 47–64. EDN ULWWQC. doi: 10.22449/2413-5577-2021-2-47-64.

3. **Лемешко Е. Е.,** Лемешко Е. М. Тренды уровня Северного Ледовитого океана // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 28–40. doi: 10.22449/2413-5577-2020-2-28-40.

4. **Лемешко Е. Е.** Самоорганизующиеся карты атмосферной циркуляции и межгодовая изменчивость гидрометеорологических полей в Арктике // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 48–62. doi: 10.22449/2413-5577-2020-3-48-62.

Статьи в сборниках научных трудов

5. Lemeshko E. M., **Lemeshko E. E.** Long-term variability of air temperature in the Arctic region for the period 1979-2017 // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112089I, 2019. doi: 10.1117/12.2540946.

6. **Lemeshko E. E.**, 2019. Inter-annual variability of the sea surface atmosphere dynamics of the Azov-Black Sea region according to the re-analysis for 1979-2017. Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112089H (18 December 2019); doi: 10.1117/12.2540938

7. **Lemeshko E.E.**, Surkova G. V., Lemeshko E. M. Structure and long-term dynamics of surface atmosphere of Azov-Black Sea region on the base of self-organizing map analysis // Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 108337V, 2018. doi: 10.1117/12.2504291

8. **Лемешко Е. Е.**, Полозок А. А., Лемешко Е. М. Анализ изменчивости уровня Азовского моря методом самоорганизующихся карт по данным альтиметрии // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2016.– № 3.– С. 54–60.

9. **Лемешко Е. Е.** Крупномасштабная изменчивость уровня и течений Северного Ледовитого океана на основе спутниковых данных // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы VII Международной научно-практической конференции. Часть 1. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2023. – 306 с. ISBN 978-5-907004-00-9 ISBN 978-5-6049201-8-3– Ч.1, С. 286–295.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук
Лемешко Егора Евгеньевича

Подписано к печати 25.09.2023 г. Формат бумаги 60×84 1/16
Объем 0,9 п.л. Заказ № 20 Тираж 100 экз.

Напечатано в типографии СРОО «Дом Солнца»
299055
г. Севастополь, ул. Хрусталева, 143
Тел.: +7 (8692) 65-60-11
cpdi@rambler.ru