

УДК 551.461.25

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Ангудович Яромир Игоревич

**КРУПНОМАСШТАБНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ В СЕВЕРНОЙ
АТЛАНТИКЕ И ЕГО СВЯЗЬ С ИЗМЕНЕНИЯМИ КЛИМАТА**

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург
2026 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный руководитель:

Малинин Валерий Николаевич,
доктор географических наук,
профессор, профессор кафедры
прикладной океанографии и
комплексного управления
прибрежными зонами ФГБОУ ВО
«РГГМУ»

Официальные оппоненты:

Репина Ирина Анатольевна, доктор
физико-математических наук,
профессор РАН, главный научный
сотрудник, заведующая лабораторией
взаимодействия атмосферы и океана
ФГБУН ИФА РАН

Захарчук Евгений Александрович,
доктор географических наук,
профессор, заведующий кафедрой
океанологии ФГБОУ СПбГУ

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«**Московский государственный
университет имени М. В.
Ломоносова**»

Защита диссертации состоится **17 декабря 2026 года в 15:00** на заседании диссертационного совета РГГМУ 24.2.365.03 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «РГГМУ» <https://rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экз. (с указанием даты, полностью ФИО составителя, ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 192007, г. СанктПетербург, ул. Воронежская, д.79, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.365.03 Ершовой А. А., а также в формате pdf на e-mail: ds@rshu.ru

Учёный секретарь диссертационного совета
24.2.365.03, к.г.н

А.А. Ершова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Глобальное потепление климата и связанное с ним повышение уровня Мирового океана (УМО) делают практически неизбежным затопление обширных равнинных прибрежных территорий, создавая катастрофические риски для инфраструктуры и усиливая штормовые нагоны. Все крупнейшие мегаполисы США, Европы и Азии, включая Санкт-Петербург, потенциально попадают в зону затопления и подтопления. По многим оценкам, уже в 30-е гг. текущего столетия в этой зоне может оказаться от 700 млн до 1 млрд человек, что потребует переселения десятков миллионов людей [Малинин, 2012]. В связи с этим во многих странах, особенно в США, на исследование данной проблемы тратятся огромные ресурсы. В России цикл аналогичных работ выполнен в РГГМУ [Малинин, 2012; Малинин и др., 2010—2019; Малинин, Ангулович, 2021—2025 и др.]. Очевидно, что УМО является важнейшим параметром климатической системы [Фукс, 2005; Climate..., 2013]. На основе современных альтиметрических данных он растет со скоростью 3,4 мм/год и на сегодняшний день данный тренд только повышается.

Особого внимания заслуживает Северная Атлантика (СА), расположенная в окружении ведущих стран мира, где изменения уровня и циркуляции вод имеют критическое значение. Именно здесь протекает так называемая «печка» Европы – течение Гольфстрим, влияющее на климат огромного региона и обеспечивающее экономическое благосостояние. Известно, что изменения морского уровня и циркуляция океана тесно связаны друг с другом. С ростом пространственного градиента уровня интенсивность течений, как правило, возрастает, но одновременно с этим течения формируют пространственные перепады в уровне океана [Смирнов и др., 2010; Chafik et al., 2019; Ezer, 2015; Ivchenko et al., 2011; Volkov, 2004 и др.]. Крупномасштабная циркуляция в Северной Атлантике (СА) представлена двумя мощными круговоротами вод: субтропический антициклонический круговорот вод (САКВ) и субполярный циклонический круговорот вод (СЦКВ). Данная система циркуляции имеет огромное влияние не только на климат СА, но и способствует формированию глобального климата, определяя перенос и пространственное распределение тепла, солёности и других важнейших океанологических характеристик.

Крупномасштабной изменчивости уровня в Северной Атлантике и её связи с изменениями климата посвящено много значимых работ как отечественных, так и зарубежных учёных. В частности, в работе [Volkov, van Aken, 2003] на основе данных спутниковой альтиметрии TOPEX/Poseidon и ERS-1/2 за 1992—2000 гг. был выполнен анализ годовой и межгодовой изменчивости уровня в северной части Северной Атлантики. Авторами установлено, что за пределами субтропического антициклонического круговорота межгодовая изменчивость уровня моря составляет около 2/3 общей дисперсии во всей Северной Атлантике. В работе [Chafik L. et al., 2019] по данным спутниковой альтиметрии, авторы установили четкую зависимость изменчивости уровня в субполярном круговороте с декадными изменениями крупномасштабной океанической циркуляции. На основе минимальных значений аномалий стериических колебаний уровня, авторы работы [Белоненко, Федоров, 2017] предложили новый метод определения районов глубокой конвекции в Лабрадорском море и море Ирмингера. Интенсивная зимняя конвекция в данном регионе, как известно, формирует североатлантическую глубинную водную массу — важнейшую компоненту глобальной термохалинной циркуляции Брокера. Существует множество работ, направленных на исследование водных масс Северной Атлантики и локализации глубокой конвекции, здесь отметим лишь наиболее значимые [Башмачников и др., 2018, 2023; Крашенинникова, 2019; Федоров и др., 2018; Bailey et al., 2005; Centurioni, Gould, 2004; Dickson, Brown, 1994; Rhein et al., 2015 и др.]. Фундаментальное исследование [Häkkinen, 2001] позволило установить, что изменчивость

уровня моря в области Гольфстрима, Северо-Атлантического течения, субполярного круговорота и вдоль восточного побережья США характеризует мощность одного из ключевых климатических параметров Северной Атлантики — атлантической меридиональной опрокидывающей циркуляции (АМОЦ) [McCarthy et. al., 2015]. Важно отметить, что крупномасштабная адвекция теплой и соленой воды в системе АМОЦ на север является основным внешним источником тепла и соли для Северного ледовитого океана (СЛО) [Аксенов, Иванов, 2018; Иванов, 2021; McCarthy, 2015]. Единственной на сегодняшний день количественной оценкой притока теплых атлантических вод в полярные широты служит разрез «Кольский меридиан», на котором уже более 120 лет измеряется температура в поверхностном слое океана [Корсаков, 2022].

Таким образом, можно полагать, что крупномасштабная изменчивость уровня в Северной Атлантике является интегральным показателем термодинамических процессов в океане и может служить надежным индикатором мониторинга состояния всей климатической системы, чему и посвящено настоящее исследование. Однако многие вопросы крупномасштабной изменчивости уровня в СА изучены явно недостаточно, в частности их взаимосвязь с циркуляционными системами САКВ и СЦКВ, а также с основными параметрами климатической системы СА.

Цель исследования. Изучить закономерности межгодовых колебаний уровня в Северной Атлантике (СА) и оценить их взаимосвязь с системой субтропического антициклонического и субполярного циклонического круговоротов вод, а также выявить взаимосвязь колебаний уровня с основными параметрами климатической системы СА.

Задачи, решаемые для достижения цели.

Для достижения поставленной цели в работе сформированы следующие задачи:

1. Осуществить анализ межгодовой изменчивости морского уровня и крупномасштабной циркуляции вод в пределах антициклонического и циклонического круговоротов вод на широтных разрезах 26° и 56° с.ш. по данным спутниковой альтиметрии;
2. Выполнить статистическую параметризацию Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОЦ) и обратного потока вод за счет рециркуляции субтропического круговорота ($Q_{\text{умо}}$) по альтиметрическим данным об уровне моря на широтном разрезе 26° и 56° с.ш. СА;
3. Обосновать интегральный индекс Североатлантической циркуляции (ИСЦ), характеризующий совместную динамику субтропического и субполярного круговоротов, выявить его межгодовую изменчивость и связь с другими климатическими индексами СА;
4. Показать, что градиент уровня между станциями Ки-Вест и Портленд на восточном побережье Северной Америки может служить индикатором взаимодействия антициклонического и циклонического круговоротов вод;
5. Оценить влияние уровня индекса между станциями Ки-Вест и Портленд на изменчивость характеристик теплового режима Баренцева моря.

Методы научного исследования основаны на комплексном применении современных методов одномерного и многомерного статистического анализа. В работе используются корреляционный анализ для количественной оценки связей между переменными, пошаговый множественный линейный регрессионный анализ для параметризации сложных зависимостей и построения моделей, а также метод факторного анализа для выявления скрытых закономерностей в многолетних рядах. Для классификации и выделения однородных групп применяется иерархический кластерный анализ по методу Уорда. Обработка исходной информации включает процедуры сглаживания временных рядов с помощью скользящего среднего для подавления высокочастотных флуктуаций и выделения долгопериодных составляющих. Статистическая значимость полученных результатов оценивалась с использованием критериев Стьюдента и Фишера.

Научная новизна выполненного исследования.

1. **Впервые** на основе данных спутниковой альтиметрии за период 1993–2024 гг. выполнено детальное исследование изменчивости градиентов (Δh) и средних значений уровня ($h_{\text{ср}}$) на широтных разрезах 26° и 56° с.ш. Разрез на широте 26° является реперным для САКВ, а на широте 56° — для СЦКВ. Выявлено, что Δh и $h_{\text{ср}}$ на локальных разрезах 26° и 56° с.ш. имеют значимую корреляцию с климатическими индексами. В пределах 26° с.ш. наиболее репрезентативными являются разрезы в центральной части Североатлантического океана 70° — 25° з.д. и в пределах 80° — 70° з.д., характеризующий расход Флоридского течения. В пределах 56° с.ш. — разрез 10° — 28° з.д., который косвенно характеризует приток вод в полярные широты Североатлантическим течением.
2. **Впервые** дается обоснование интегрального индекса Североатлантической циркуляции, представляющий собой разность уровня океана на широтах 26° и 56° с.ш., который является характеристикой взаимодействия субтропического и субполярного круговоротов. Данный индекс имеет высокую линейную связь с климатическими индексами СА и с ТПО северных морей. Самая высокая корреляция отмечается с индексом САК ($r = 0,82$) и АО ($r = 0,86$), которые в значительной степени контролируют атмосферную циркуляцию и изменения климата не только в СА, но и далеко за её пределами.
3. **Впервые** разработана статистическая модель, состоящая из четырех уравнений, Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОЦ) и обратного потока вод за счет рециркуляции субтропического круговорота ($Q_{\text{УМО}}$) по альтиметрическим данным об уровне моря на широтных разрезах 26° и 56° СА. Модели демонстрируют высокую точность: коэффициент детерминации для АМОЦ на разрезе 26° с.ш. составляет 0,89 (ошибка 0,38 в долях СКО), для $Q_{\text{УМО}}$ 0,92 (ошибка 0,32 в долях СКО); на разрезе 56° с.ш. — 0,96 (ошибка 0,22 СКО) и 0,90 (ошибка 0,34 СКО) соответственно. Это позволяет рассчитывать АМОЦ и $Q_{\text{УМО}}$ по легко определяемым альтиметрическим значениям уровня моря, не прибегая к трудоёмкой процедуре определения гидрофизических параметров в толще океана.
4. **Впервые** дается обоснование нового индекса $\Delta KW-P$, который рассчитывается как градиент межгодовых значений уровня между станциями Ки-Вест и Портленд на восточном побережье Северной Америки. Факторный анализ уровня моря по данным 23 береговых станций за период 1948–2024 гг. позволил установить, что самыми репрезентативными станциями, наилучшим образом отражающими корреляцию с уровнем других станций, являются Key West (Ки-Вест) и Portland (Портленд). Выявлено, что градиент межгодовых колебаний уровня на этих станциях $\Delta KW-P$ характеризует динамику САКВ и СЦКВ. Корреляция $\Delta KW-P$ с интегральным индексом ИСЦ за период 1993–2024 гг. составляет $r = 0,82$, с индексом АО $r = 0,81$, с индексом САК в зимний период $r = 0,87$.
5. **Впервые** установлено, что индекс $\Delta KW-P$ представляет собой репрезентативный индикатор изменчивости характеристик теплового режима Баренцева моря. С помощью пошагового регрессионного анализа показано, что индекс $\Delta KW-P$ значительно превосходит по вкладу в дисперсию климатических параметров БМ другие индексы СА (АО, САК, АМО, TNA, EA/WR). Так, вклад $\Delta KW-P$ в температуру воздуха составляет 44 %, в температуру воды на Кольском меридиане — 37 %, в площадь ледового покрова моря — около 11 %.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности межгодовых колебаний морского уровня на широтных разрезах 26° и 56° с.ш. по данным спутниковой альтиметрии, их связь с циркуляцией вод Северной Атлантики, климатическими индексами (САК, АО, АМО, GSNW, EA/WR) и температурой поверхности океана в районах глубокой конвекции (море Лабрадор, море Ирмингера, Гренландская котловина).
2. Интегральный индекс Североатлантической циркуляции вод, рассчитанный как разность морских уровней между широтными разрезами 26° и 56° с.ш., оценка его связи с

ведущими климатическими индексами и с температурой поверхности океана в высоких широтах.

3. Статистическая модель, состоящая из четырех уравнений, Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции и обратного потока вод за счет рециркуляции субтропического круговорота по альтиметрическим данным уровня на широтных разрезах 26° и 56° без использования трудоёмкой процедуры определения гидрофизических параметров в толще океана;

4. Индекс $\Delta KW-P$ (градиент межгодовых значений морского уровня береговых станций Ки-Вест — Портленд) представляет собой репрезентативный индикатор долгопериодной изменчивости циркуляции вод Северной Атлантики и межгодовой изменчивости характеристик теплового режима Баренцева моря.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в углублении понимания механизмов взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике и их роли в формировании климата. Разработанные в диссертации статистические модели и индексы расширяют теоретическую базу океанологии и климатологии, предлагая новые инструменты для диагностики состояния крупномасштабной циркуляции. Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов в оперативной практике прогнозирования гидрометеорологических условий. Предложенный индекс $\Delta KW-P$, рассчитываемый по данным стандартных береговых наблюдений, может быть использован в качестве дополнительного предиктора при разработке методов долгосрочного прогноза температуры воздуха, температуры воды и ледовитости в Баренцевом море, что имеет важное значение для обеспечения безопасности мореплавания и хозяйственной деятельности в Арктическом регионе.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертационной работы обеспечивается использованием репрезентативных массивов исходных данных, включающих спутниковые альтиметрические измерения ведущих мировых центров, многолетние ряды береговых наблюдений, данные реанализов и прямых инструментальных наблюдений. Применение современных, статистически обоснованных методов анализа, включающих корреляционный, регрессионный, факторный и кластерный анализы, а также оценка значимости полученных результатов на основе строгих статистических критериев, подтверждают надежность и объективность выводов. Сформулированные в работе положения не противоречат известным фундаментальным представлениям о физике океана и согласуются с результатами исследований других авторов.

Соответствие диссертации паспорту специальности 1.6.17 — Океанология.

Диссертация соответствует следующим пунктам специальности:

1. Динамические процессы (волны, вихри, течения, пограничные слои) в океане;
2. Процессы формирования водных масс, их пространственно-временной структуры, гидрофизические поля Мирового океана;
3. Закономерности переноса вещества и энергии в океане;
4. Взаимодействие в системе литосфера — гидросфера — атмосфера.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии на всех этапах выполнения диссертационного исследования. Автором самостоятельно проведен анализ отечественной и зарубежной научной литературы по теме диссертации, сформулированы цель и задачи работы, обоснована ее актуальность. Выполнены сбор, обработка и систематизация обширных массивов спутниковых альтиметрических данных, данных береговых наблюдений за уровнем моря и климатических индексов. Автором проведены все статистические расчеты, включая корреляционный, регрессионный, факторный и кластерный анализ, построены статистические модели и графические материалы. Проведена интерпретация полученных результатов, сформулированы научные положения и выводы, выносимые на защиту, а также подготовлены тексты научных публикаций и докладов по теме диссертации.

Апробация диссертационной работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях, среди них всероссийская конференция молодых ученых КИМО-2024, II международная научно-практическая конференция «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные тенденции в гидрометеорологии», XII Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Доклады получили положительную оценку научной общественности.

Кроме того, результаты исследования частично были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки № FSZU–2023–0002 в ФГБОУ «РГГМУ».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ. 6 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для опубликования основных результатов диссертационных исследований. Из них 2 статьи переведены на английский язык и опубликованы в английской версии российского журнала «Космические исследования» (англ. *Cosmic Research*). 3 публикации, связанные с темой диссертации опубликованы в зарубежных рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных (Scopus, Web of Science) и относящихся к первому и второму квартилям (Q1—Q2).

Структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, обзора крупномасштабной циркуляции вод Северной Атлантики и её индикаторов, описания материалов и методов исследования, результатов собственных исследований (2 главы) и заключения. Полный объем диссертации составляет 141 страница, включает 38 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 138 источников, подавляющее большинство из которых представлено зарубежными публикациями.

Благодарности.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю — профессору Валерию Николаевичу Малинину — за неоценимую помощь в работе и всестороннюю поддержку. Автор также искренне благодарит преподавательский состав кафедры прикладной океанографии и КУПЗ РГГМУ за ценные советы, мудрые замечания и внимание к исследованию.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Крупномасштабная циркуляция океана в Северной Атлантике.

Глава 1 посвящена описанию двух главных циркуляционных систем Северной Атлантики — субтропический антициклонический круговорот (САКВ) и субполярный циклонический круговорот (СЦКВ). Описаны основные течения данных круговоротов, такие как Гольфстрим, Северо-Атлантическое, Флоридское, Лабрадор, Ирмингера, а также проведен анализ расхода вод через Фареро-Шотландский пролив по данным долгосрочных инструментальных измерений при помощи акустических профилографов течений (ADCP) и комплексов гидрографических датчиков. В главе исследована роль основных течений в меридиональном переносе тепла и формировании Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОЦ). Рассмотрены очаги глубокой конвекции в морях Лабрадор, Ирмингера и в районе Гренландской котловины. Интенсивность конвективных процессов играет важную роль в образовании Североатлантической глубинной водной массы — ключевой компоненты глобального океанического конвейера Брокера. В главе также описаны основные климатические индексы Северной Атлантики (САК, АО, АМО, GSNW, EA/WR, TNA) и энергоактивные зоны океана. Показано, что уровень океана является индикатором динамических процессов, а его колебания тесно связаны с

интенсивностью циркуляции и могут служить основой для мониторинга климатической системы Северной Атлантики.

Глава 2. Материалы и методы.

2.1. Данные по уровню моря.

Основой расчетов послужил обширный массив спутниковой информации и натуральных гидрологических наблюдений:

- Среднегодовые значения уровня из архива реанализа Copernicus Marine Service (продукт SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047) за период 1993—2024 гг. Аномалии уровня моря (SLA) рассчитаны относительно среднего значения за 1993—2012 гг. Пространственное разрешение составляет $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. В продукте ассимилированы альтиметрические наблюдения спутников Jason- 1, - 2, - 3, Sentinel- 3A, Cryosat- 2, Envisat, ERS- 1/2, Saral/AltiKa, HY- 2A, GFO и T/P.
- Среднегодовые натурные альтиметрические данные Лаборатории спутниковой альтиметрии США (Laboratory for Satellite Altimetry/Sea Level Rise) за тот же период. Пространственное разрешение — $0,33^\circ$ в проекции UTM. Учтены данные спутников T/P, Jason- 1, - 2, - 3, ERS- 2, GFO и Envisat.
- Среднегодовые и среднемесячные ряды уровня на береговых станциях вдоль восточного побережья Северной Америки за 1948—2024 гг. из архива Постоянной службы среднего уровня моря (PSMSL). Всего было отобрано 23 станции с наилучшей наполняемостью ряда и соответствующей длиной выборки данных.

2.2. Характеристики климата.

Для оценки влияния межгодовых колебаний уровня в Северной Атлантике на климат, использовался набор известных индексов Северного полушария за период 1948—2024 гг.:

- Среднегодовые и среднемесячные значения индексов Северного полушария за 1948—2024 гг. с портала Physical Sciences Laboratory (PSL) NOAA: Североатлантическое колебание (CAK), Арктическая осцилляция (АО), индекс «северной стены» Гольфстрима (GSNW), температура поверхности океана в тропической Северной Атлантике (TNA), Атлантическая мультideкадная осцилляция (AMO), Восточно-Атлантический/Западно—Российский паттерн (EA/WR);
- Среднегодовые значения площади морского льда в Баренцевом море за 1979—2024 гг. из архива Национального центра данных по снегу и льду (NSIDC, продукт Sea Ice Index, Version 4);
- Среднегодовые значения приземной температуры воздуха (ПТВ) на высоте 2 м над акваторией Баренцева моря ($70—80^\circ$ с.ш., $20—50^\circ$ в.д.) за 1948—2024 гг. из глобального атмосферного реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF);
- Среднегодовые значения температуры воды в слое 0—200 м на стандартном гидрологическом разрезе «Кольский меридиан» (станции 3—7) за 1951—2020 гг., предоставленные Полярным филиалом ВНИРО им. Н.М. Книповича;
- Среднегодовые оценки суммарной теплоотдачи в атмосферу $P + LE$ (сумма турбулентного потока тепла P и затрат тепла на испарение LE) в Бермудской, Норвежской и Лабрадорской энергоактивных зонах океана (ЭАЗО) за 1993—2024 гг. по данным реанализа NCEP/DOE AMIP- II (Reanalysis- 2) (Columbia Climate School);
- Среднегодовые значения расхода Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОЦ) и её составляющих – экмановского переноса ($Q_{ЕК}$), переноса за счёт Флоридского течения (Q_{GS}) и обратного потока за счёт

рециркуляции антициклонического круговорота (Q_{UMO}) — за 2004—2024 гг. по данным программы RAPID;

– Среднегодовые значения температуры поверхности океана (ТПО) и её распределение по глубине в слое до 1000 м за 1993—2024 гг. из реанализа Copernicus (ARCTIC_MULTIYEAR_PHY_002_003).

2.3. Методы анализа.

В основе исследования лежит комплексный статистический анализ, направленный на установление связей между пространственно-временной изменчивостью уровня моря, интенсивностью крупномасштабной циркуляции вод в Северной Атлантике и климатическими индексами. Для подавления высокочастотных межгодовых флуктуаций и выделения долгопериодных составляющих исходные ряды подвергались сглаживанию с использованием скользящего среднего. Количественная оценка связей между переменными выполнялась с помощью коэффициента линейной корреляции Пирсона. Для параметризации сложных зависимостей применялся пошаговый множественный линейный регрессионный анализ (МЛР) методом включения переменных. Для выявления скрытых закономерностей использовались факторный анализ и иерархический кластерный анализ по методу Уорда с евклидовой метрикой.

Глава 3. Связь морского уровня с океанической циркуляцией в СА на основе спутниковой альтиметрии

3.1. Уровенные разрезы и их связь с климатическими индексами СА

Выполнен анализ взаимосвязи межгодовой изменчивости характеристик уровня океана, циркуляции вод и различных климатических индексов в Северной Атлантике. По альтиметрическим данным с 1993 г. на широтных разрезах 26° (80° — 15° з.д.) и 56° (57° — 10° з.д.) рассчитывались градиенты уровня (Δh) на концах локальных разрезов, характеризующие геострофические составляющие течения, а также среднее значение уровня на этих разрезах (h_{cp}) за период 1993 — 2024 гг. (рис. 1). Разрез на широте 26° является реперным для САКВ, а на широте 56° — для СЦКВ. На широте 26° выделены разрезы 80° — 70° , 70° — 25° , 25° — 15° з. д. Уровень между 80 и 70° з. д. характеризует интенсивность Флоридского и Антильского течений, уровень между 25 — 15° з. д. — Канарское течение, а уровень на разрезе через всю Атлантику характеризует АМОЦ, измерения которой производятся с 2004 года на той же широте. На широте 56° выделены разрезы 57° — 38° , 38° — 28° и 28° — 10° з.д. Первый разрез характеризует Лабрадорское течение и очаг глубокой конвекции моря Лабрадор, второй — течение Ирмингера, третий — наиболее мощное на данной широте Североатлантическое течение.

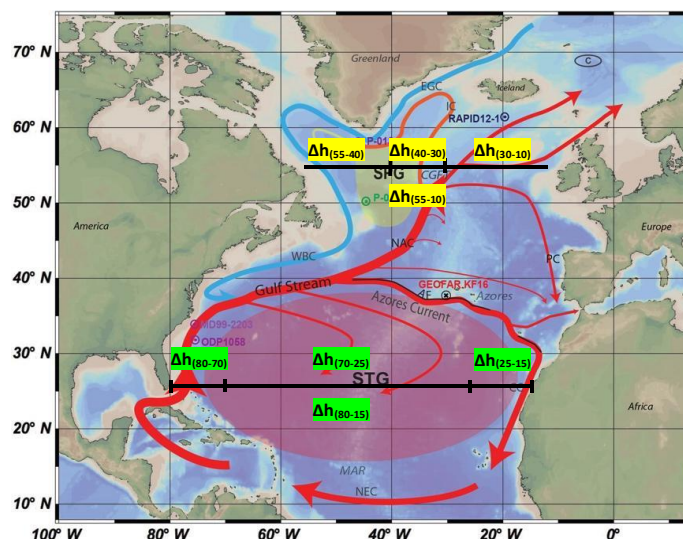


Рис. 1. Схема циркуляции вод в Северной Атлантике [Repschläger et al., 2017]. STG (англ. subtropical gyre) — САКВ; SPG (англ. subpolar gyre) — СЦКВ. Красные стрелки — тёплые поверхностные течения; синие стрелки — холодные глубинные течения. Знаком «©» обозначены регионы формирования интенсивной конвекции. Чёрные линии — уровенные разрезы на широтах 26° и 56° с.ш. Δh — градиент уровня на концах локальных разрезов. [Малинин, Ангулович, 2024].

Выявлено, что Δh и h_{cp} на локальных разрезах 26° и 56° с.ш. имеют значимые коэффициенты корреляции с климатическими индексами. В пределах 26° с.ш. наиболее репрезентативным является разрез в центральной части Североатлантического океана 70° — 25° з.д. Градиент уровня на данном разрезе имеет высокий коэффициент корреляции с САК ($r = 0,84$) и АО ($r = 0,61$), а также с расходом Флоридского течения ($r = 0,73$). Средний уровень (h_{cp}) на этом же разрезе лучше всего коррелирует с АО ($r = 0,80$), GSNW ($r = 0,61$) и EA/WR ($r = -0,74$). Разрез 80 — 70° з. д. характеризует расход Флоридского течения ($r = 0,63$). Аналогичная высокая связь с САК ($r = 0,66$), АО ($r = 0,85$), GSNW ($r = 0,65$) и EA/WR ($r = -0,64$) наблюдается в основном для среднего значения уровня на данном разрезе. Значения коэффициентов корреляции представлены в табл. 1.

Таблица 1. Оценки коэффициентов корреляции сглаженных по пятилетиям значений Δh и h_{cp} на разрезе 26° с.ш. с основными климатическими индексами. Значимые коэффициенты корреляции при уровне значимости 0,05 по критерию Стьюдента больше $r_{кр} = 0,37$ выделены полужирным шрифтом.

Климатические характеристики СА	80 — 70° з. д.		70 — 25° з. д.		25 — 15° з. д.	
	Δh	h_{cp}	Δh	h_{cp}	Δh	h_{cp}
САК	-0,37	0,66	0,84	0,49	0,50	0,23
АМО	0,65	0,61	0,04	0,65	-0,07	0,74
АО	0,18	0,85	0,61	0,80	0,34	0,67
GSNW	-0,09	0,65	0,48	0,61	0,68	0,47
EA WR	-0,51	-0,64	-0,20	-0,74	0,01	-0,76
TNA	0,71	0,20	-0,42	0,33	-0,30	0,57
Расход ФТ	-0,41	0,63	0,73	0,53	0,39	0,41

В пределах 56° с.ш. наиболее репрезентативным является разрез 10° — 28° з.д., который косвенно характеризует приток вод в полярные широты Североатлантическим течением (табл. 2). Кроме того, для разрезов в пределах 56° с.ш. высокая статистическая связь отмечается между изменениями уровня на разрезах и ТПО в морях Лабрадор, Ирмингера и в районе Гренландской котловины. В свою очередь показано, что изменения

поверхностной температуры контролируют среднюю температуру в слое 0 — 1000 м и, следовательно, изменения глубокой конвекции, формирующей Североатлантическую глубинную водную массу и дающей начало глобальному океанскому конвейеру Брокера. Таким образом, при повышении уровня на разрезе 56° с.ш. происходит ослабление глубокой конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера, а также в Гренландской котловине за счет меридионального притока тепла в пределах СЦКВ.

Таблица 2. Оценки коэффициентов корреляции x сглаженных по пятилетиям значений Δh и h_{cp} на разрезе 56° с.ш. с основными климатическими индексами. Значимые коэффициенты корреляции при уровне значимости 0,05 по критерию Стьюдента больше $r_{кр} = 0,37$ выделены полужирным шрифтом.

Климатические характеристики СА	57–38° з. д.		28–38° з. д.		10–28° з. д.	
	Δh	h_{cp}	Δh	h_{cp}	Δh	h_{cp}
АМО	0,33	0,74	0,16	0,57	0,59	0,87
АО	0,55	0,13	0,45	-0,08	0,75	0,49
ЕА WR	-0,79	-0,73	-0,53	-0,06	-0,61	-0,66
TNA	0,27	0,80	0,12	0,69	0,13	0,70
ТПО _{мл}	-0,03	0,84	-0,14	0,79	0,08	0,67
ТПО _{ми}	-0,28	0,71	-0,38	0,67	-0,15	0,38
ТПО _{гк}	0,70	0,65	0,49	0,16	0,79	0,80

3.2. Статистическая модель АМОЦ

Рассмотрена возможность статистической параметризации среднегодовых значений переноса воды на широтных разрезах 56° и 26° с.ш. на север и юг (АМОЦ и Q_{UMO}) по данным об уровне океана. С учётом значительной пространственной изменчивости предварительно определялись значения Δh и h_{cp} на разрезах шириной от 7° до 10° (57 — 50, 50 — 40... 20 — 10° з.д.) для 56° с.ш. и от 5 до 10° (80 — 70, 70 — 60... 20 — 15° з.д.) для 26°. В результате расчёта пошаговых регрессий методом включения переменных [Малинин, 2008] были получены оптимальные модели для АМОЦ и Q_{UMO} . Отметим, что модели, рассчитанные на основе средних значений уровня (h_{cp}), показывают более точные результаты. Очевидно, это связано с более высокой точностью определения h_{cp} по сравнению с Δh . Таким образом, для широты 26° с.ш. оптимальные модели имеют вид:

$$\text{АМОЦ} = -0,023 \cdot h_{cp(20-15)} + 0,070 \cdot h_{cp(80-70)} - 0,069 \cdot h_{cp(70-60)} + 18,425 \quad (1)$$

$$Q_{UMO} = 0,071 \cdot h_{cp(60-50)} - 0,051 \cdot h_{cp(80-70)} + 0,013 \cdot h_{cp(50-40)} + 16,678 \quad (2)$$

Для широты 56° с.ш. модели имеют вид:

$$\text{АМОЦ} = -0,136 \cdot h_{cp(57-50)} + 0,124 \cdot h_{cp(50-40)} + 0,045 \cdot h_{cp(20-10)} - 0,016 \cdot h_{cp(30-20)} + 16,974 \quad (3)$$

$$Q_{UMO} = -0,059 \cdot h_{cp(40-30)} + 0,095 \cdot h_{cp(57-50)} - 0,060 \cdot h_{cp(50-40)} + 0,025 \cdot h_{cp(30-20)} + 34,299 \quad (4)$$

Результаты статистической оценки регрессионных моделей приводятся в табл. 3. Нетрудно видеть очень высокую точность моделей при использовании средних значений уровня h_{cp} . Отметим, что модели, полученные по градиентам уровня Δh имеют несколько более низкие показатели ($R^2 = 0,77—0,79$). При этом модель АМОЦ, рассчитанной по данным уровня на широте 56° с.ш. имеет более высокую точность чем на широте прямых измерений опрокидывающейся циркуляции. Таким образом, видно, что меридиональный

перенос вод на север АМОЦ и обратный перенос Q_{UMO} на юг практически в равной степени репрезентативны, как для САКВ, так и для СЦКВ.

Таблица 3. Статистические оценки регрессионных моделей (1) — (4) за период 2004 — 2024 гг.

	Коэффициент детерминации		Ошибка модели в долях СКО	
	h_{cp} (26° с.ш.)	h_{cp} (56° с.ш.)	h_{cp} (26° с.ш.)	h_{cp} (56° с.ш.)
АМОЦ	0,89	0,96	0,38	0,22
Q_{UMO}	0,92	0,90	0,32	0,34

3.3. Интегральный индекс Североатлантической циркуляции

Полученные результаты свидетельствуют, что уровень океана на обоих разрезах (26° и 56° с.ш.) достаточно надежно характеризует циркуляцию в системе циклонического и антициклонического круговоротов вод, а также имеет значимые корреляционные связи с основными климатическими индексами Северной Атлантики. Это означает возможность введения интегрального уровня индекса Североатлантической циркуляции (ИСЦ, North Atlantic Circulation index), который представляет собой разность морского уровня на широтных разрезах 26° (80° — 15° з.д.) и 56° (57° — 10° з.д.). (рис. 1).

Данный индекс имеет высокую линейную связь с климатическими индексами СА и с ТПО северных морей (табл. 4). Самая высокая корреляция отмечается с индексом САК ($r = 0,82$) и АО ($r = 0,86$), которые в значительной степени контролируют атмосферную циркуляцию северного полушария. Положительная фаза САК и повышение индекса ИСЦ означают усиление западного геострофического переноса воздушных масс в умеренных широтах, ослабление меридиональной циркуляции в атмосфере, усиление северных ветров на море Лабрадор и смещение траекторий циклонов на север. Это, в конечном счёте, вызывает формирование отрицательных аномалий температуры воды в умеренных и субполярных широтах, в частности в морях Лабрадор и Ирмингера, вследствие чего усиливается глубокая конвекция, что видно из отрицательных корреляций с ТПО в этих регионах ($r = -0,67$ и $r = -0,39$). В тоже время увеличивается мощность циркуляции в пределах САКВ. Повышение расхода течения Гольфстрим, а также северной ветви Северо-Атлантического течения, усиливает приток теплых вод в полярные широты через Фареро-Шотландский пролив ($r = 0,76$ для ИСЦ_{Δh}). ТПО в области Гренландской котловины также растёт ($r = 0,60$ и $0,70$).

Таблица 4. Оценки коэффициентов корреляции индекса ИСЦ с основными климатическими индексами СА за период 1993—2024 гг.

Климатические характеристики СА	ИСЦ _{hcr}	ИСЦ _{Δh}
САК	0,75	0,82
АО	0,78	0,86
GSNW	0,73	0,63
Расход ФТ	0,80	0,48
Расход ФШ. пр.	0,44	0,76
ЭАЗО _{Бер}	0,52	0,67
ЭАЗО _{Ньюфаунд}	0,61	0,71
ТПО _{МЛ}	-0,39	-0,06
ТПО _{МИ}	-0,67	-0,33
ТПО _{ГК}	0,60	0,70
АМОЦ (с 2004)	-0,16	0,23
QUMO (с 2004)	0,72	0,38

В межгодовом ходе ИСЦ_{Δh} и САК отмечаются близкие по величине локальные линейные тренды (Рис. 2). Принципиально важно, что положительная и отрицательная фазы САК и ИСЦ_{Δh} почти совпадают. Переход к положительной фазе в САК произошел в 2013 г., а в ИСЦ_{hcr} на 1 год раньше, в 2012 г. Отрицательный экстремум в ИСЦ_{Δh} совпадает с САК. Очевидно, что интегральный индекс Североатлантической циркуляции может служить важным показателем межгодовой изменчивости циркуляции вод и климата в Северной Атлантике. Важно отметить, что рассматриваемый межгодовой ход ИСЦ и САК имеет ярко выраженный нелинейный характер. Линейные тренды приведены лишь для качественной оценки общей тенденции временных рядов.

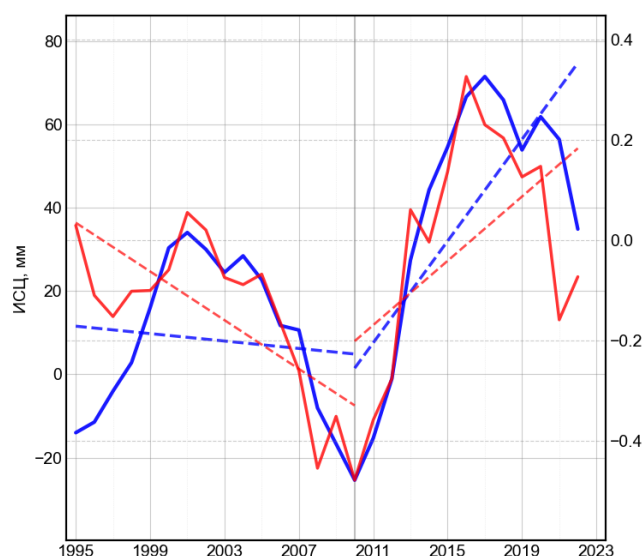


Рис. 2. Сопоставление сглаженного по пятилетиям индекса ИСЦ_{Δh}, рассчитанного по градиенту уровня Δh (1), с индексом САК (2). Штриховыми линиями обозначены линейные тренды.

Глава 4. Долгопериодные колебания уровня в Северной Атлантике и их связь с климатом Арктики

4.1 Факторный анализ стационарных наблюдений

Наличие сравнительно небольшого периода альтиметрических наблюдений с 1993 года позволяет анализировать лишь короткопериодные колебания климата. Очевидно, более длительные изменения климата в СА также должны быть связаны с изменениями уровня океана. Поэтому возникает необходимость нахождения такого индекса циркуляции по данным о морском уровне на стационарных береговых станциях, имеющих длительный период наблюдений, который был бы максимально связан с ИСЦ и отражал особенности изменения климата в СА. Наиболее развитая сеть стационарных береговых станций расположена в Америке от северного побережья Мексиканского залива до южной части канадской провинции Онтарио (рис. 3). Было выделено 23 станции за период 1948 — 2024 гг. (76 лет). Уровень на южных станциях до м. Хаттерас характеризует меридиональный перенос тепла на север Гольфстримом, который далее отходит от побережья в открытый океан. Северные станции находятся в основном в зоне влияния холодного Мэнского течения, образующегося из ветви Лабрадорского течения, которое огибает Ньюфаундленд и движется на юг. Южнее залива Мэн оно вливается в холодное Восточно-Американское прибрежное течение.

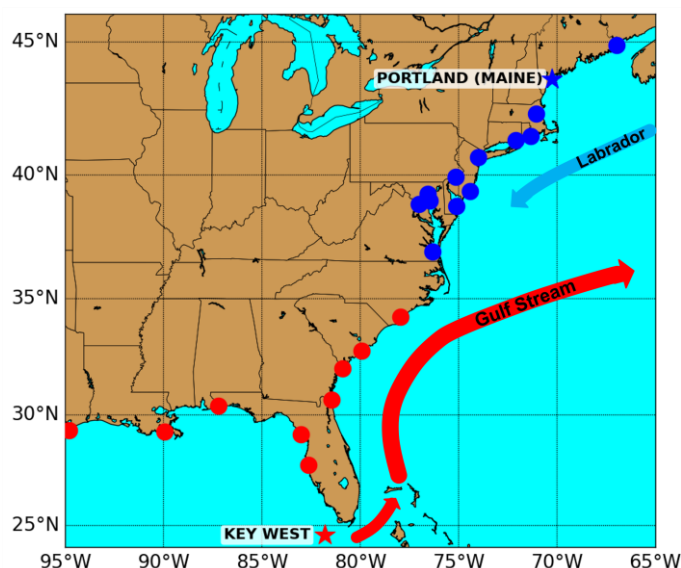


Рис. 3. Схема расположения уровенных станций на восточном побережье Америки. Красным цветом отмечены станции южной группы, синим цветом — станции северной группы. Звездочками выделены реперные станции Key West и Portland (Maine).

Матрица среднегодовых значений морского уровня размером 23×76 была подвергнута разложению методом главных факторов. В результате второго вращения методом Кайзера получено, что первые три главных фактора описывают 79 % дисперсии, из них на первый приходится 56 %, на второй — 18 %. Нагрузки третьего фактора малы, поэтому они могут не учитываться. На рис. 4(а) приводится распределение факторных нагрузок первых трех главных факторов. Видно, что максимальные нагрузки первого фактора описывают межгодовую изменчивость уровня моря северных станций (11—23), в то время как для группы южных станций (1—10) факторные нагрузки малы. Для второго фактора имеем обратную картину.

Наиболее репрезентативными станциями, наилучшим образом отражающими корреляцию с уровнем других станций в южной группе являются станции Key West ($24,5^\circ$ с.ш. $81,8^\circ$ з.д.), а в северной группе — станция Portland ($43,7^\circ$ с.ш. $70,3^\circ$ з.д.). Сопоставление годовых значений уровня на этих станциях показало наличие хорошо выраженных линейных трендов, обусловленных влиянием на них тренда уровня Мирового океана. После

исключения линейных трендов коэффициент корреляции годовых значений уровня на станциях Key West (Ки-Вест) и Portland (Портленд) оказался равным $r = 0,14$. Отсюда видно, что межгодовая изменчивость уровня на этих станциях не повторяет друг друга и, очевидно, определяется разными причинами. Также из дендрограммы факторных нагрузок, рассчитанной методом Уорда (рис. 4(б)) видно, что есть четкое разделение на 2 класса, в которых станции полностью соответствуют южной и северной группам точек.

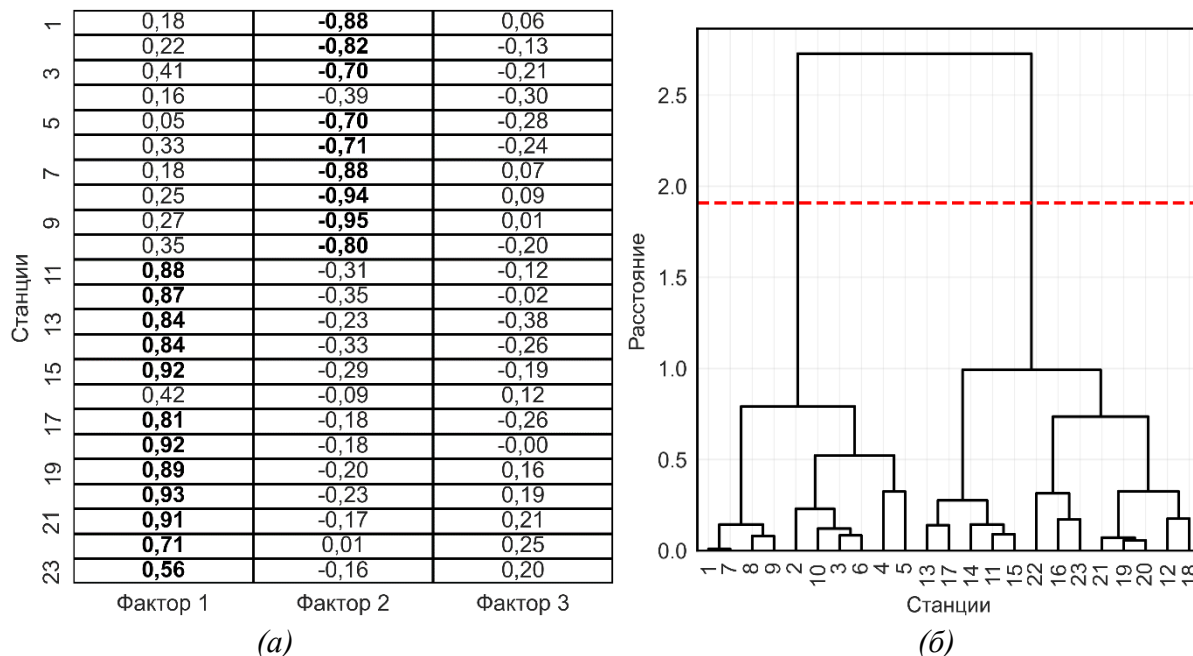


Рис. 4. Распределение факторных нагрузок первых трех главных факторов уровня моря на 23 станциях восточного побережья Америки (а) и дендрограмма факторных нагрузок методом Уорда (б).

Распределение уровневых станций на 2 группы имеет достаточно четкое обоснование. Десять южных станций, формирующие второй кластер, связаны с субтропическим антициклоническим круговоротом (САКВ), динамика которого в значительной степени зависит от Гольфстрима. Уровень на ст. Key West (Ки-Вест) имеет высокую корреляцию ($r = 0,89$) со средним уровнем на широтном разрезе 26° с.ш. между 80° — 70° з.д. и со средним уровнем на меридиональном разрезе по 80° з.д. между $25,5^\circ$ — 23° с.ш. ($r = 0,94$), характеризующим Флоридское течение.

Входящие в первый кластер северные станции находятся севернее разворота Гольфстрима в открытый океан, поэтому межгодовая изменчивость их уровня должна преимущественно отражать динамику СЦКВ, в значительной степени зависящего от холодного Лабрадорского течения. Его продолжение в виде вдольберегового холодного течения проникает в з. Мэн, влияя на гидрологию залива и колебания уровня на ст. Portland (Портленд). Отражением связи колебаний уровня на станции Портленд с СЦКВ является значимая корреляция с ТПО в зоне глубокой конвекции Лабрадорского моря [Белоненко, Федоров, 2018] за период 1993—2024 гг., равная $r = 0,47$, а также со средним уровнем на широтном разрезе 56° между 57° — 38° з.д., отражающим интенсивность Лабрадорского течения ($r = 0,42$).

4.2. Связь градиента уровня между станциями Key West и Portland с климатическими индексами СА

Принимая во внимание важное значение межгодовых колебаний уровня на станциях Key West (Ки-Вест) и Portland (Портленд) для крупномасштабной циркуляции океана

можно предположить, что градиент уровня этих станций $\Delta KW-P$ будет являться репрезентативным индикатором взаимодействия двух ключевых круговоротов САКВ и СЦКВ в климатической системе Северной Атлантики. Таким образом, установлено, что индекс $\Delta KW-P$ демонстрирует высокую степень согласованности с интегральным индексом североатлантической циркуляции (ИСЦ), ранее рассчитанным по альтиметрическим данным. Для сглаженных по трехлетиям значений корреляция за период с 1993—2024 гг. между $\Delta KW-P$ и ИСЦ составила $r = 0,82$ для среднегодовых значений (рис. 5).

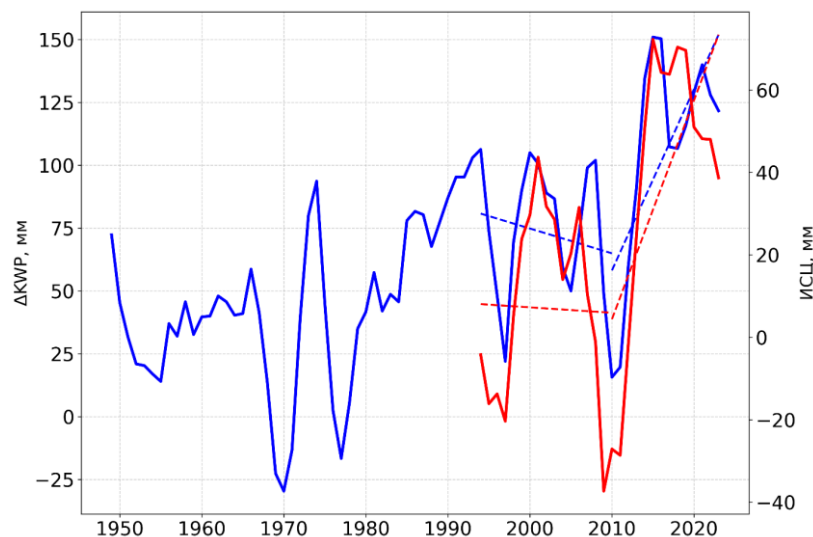


Рис. 5. График сглаженных за 3 года среднегодовых значений градиента уровня $\Delta KW-P$ с 1948 по 2024 год (1) и интегрального индекса $ИСЦ_{\Delta h}$ с 1993 по 2024 год (2).

Выявлены устойчивые статистически значимые связи индекса $\Delta KW-P$ с ведущими климатическими индексами СА (табл. 5). Наибольшие коэффициенты корреляции наблюдаются с индексом Арктической осцилляции (АО): $r = 0,81$ за период 1993—2024 гг. для среднегодовых значений и $r = 0,64$ за период с 1948—2023 гг. Связь с Североатлантическим колебанием (САК) носит ярко выраженный сезонный характер: для зимнего сезона корреляция исключительно высока и устойчива ($r = 0,87$ за 1993—2024 гг. и $r = 0,77$ за 1948—2024 гг.), тогда как для летнего сезона связь статистически незначима. Кроме того, отмечается высокая положительная корреляция $\Delta KW-P$ с индексом GSNW ($r = 0,62$ — $0,67$ для среднегодовых значений), которая свидетельствует о том, что градиент $\Delta KW-P$ физически правильно отражает интенсивность переноса тепла Гольфстримом на север.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между трёхлетними скользящими средними индекса $\Delta KW-P$ и климатическими индексами Северной Атлантики за 1993—2024 гг. и за 1948—2024 гг. для различных сезонов и в целом за год. Полужирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции

Индекс	$\Delta KW-P_{год}$		$\Delta KW-P_{зима}$		$\Delta KW-P_{лето}$	
	1993—2024	1948—2024	1993—2024	1948—2024	1993—2024	1948—2024
САК	0,60	0,48	0,87	0,77	0,16	-0,27
GSNW	0,62	0,67	0,48	0,47	0,62	0,66
EA/WR	-0,21	-0,32	0,03	0,17	-0,15	-0,42
АО	0,81	0,64	0,70	0,58	0,32	0,16
TNA	-0,24	0,21	-0,30	-0,06	-0,40	0,32
АМО	0,07	0,30	0,15	0,06	-0,15	0,43

Сравнение корреляций индексов $\Delta KW-P$ и ИСЦ показывает, что оба индекса имеют сходную структуру связей с климатическими индексами, демонстрируя наибольшее соответствие с САК и АО. Кроме того, между $\Delta KW-P$ и GSNW отмечается устойчивая связь в течение всего года. Итак, при повышении $\Delta KW-P$ происходит усиление Гольфстрима с Северо-Атлантическим течением и циклонического переноса теплых воздушных масс над системой Гольфстрим [Малинин, 2012] из СА в Западную Арктику, что способствует повышению температуры воздуха и уменьшению ледовитости, прежде всего, в Баренцевом море (БМ). Отметим, что коэффициент корреляции между индексом АО и приземной температурой воздуха в БМ составил $r = 0,53$. Можно полагать, что повышение давления в южных широтах и соответствующее его понижение в Арктике во время положительной фазы АО, способствует переносу теплых воздушных масс из Норвежского моря на север в Арктику.

Таким образом, проведенный анализ подтверждает, что градиент уровня моря $\Delta KW-P$, рассчитанный по данным долговременных береговых наблюдений, является репрезентативным индикатором системы круговоротов Северной Атлантики. Его синхронная изменчивость с интегральным индексом ИСЦ, а также идентичный характер корреляций с ведущими климатическими индексами, особенно в зимний сезон, позволяет использовать индекс для дальнейшего анализа на многодекадных временных масштабах, выходящих за пределы спутниковой эры.

4.3. Связь градиента уровня $KW-P$ с климатом западного сектора Арктики.

Можно полагать, что предложенный индекс $\Delta KW-P$ является предиктором изменчивости климатических параметров в Баренцевом море (БМ). Для проверки данного предположения использовались 3 временных ряда:

- среднегодовые значения температуры воздуха, осредненные для БМ в пределах 70° — 80° с.ш. и 20° — 50° в.д. за период 1948—2024 гг. (T_{BS});
- среднегодовые значения площади морского льда в БМ за период 1979—2024 гг. (SBSIce);
- средняя годовая температура воды в слое 0—200 м на стандартном гидрологическом разрезе (станции 3—7) «Кольский меридиан» (SST_{MC}) за 1951—2020 гг.

Корреляция $\Delta KW-P$ с приземной температурой воздуха в БМ (T_{BS}) составила $r = 0,66$, с температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» $r = 0,61$, с площадью морского льда в БМ $r = -0,52$, т. е. она физически правильно отражает характер связи между ними.

В табл. 6 приводятся результаты пошаговой регрессии температуры воздуха Баренцева моря (T_{BS}) с климатическими индексами СА. При этом итоговое уравнение регрессии имеет вид:

$$T_{BS} = 0,01 \cdot \Delta KW-P - 2,00 \cdot EA/WR + 1,54 \cdot AO + 1,49 \cdot TNA - 4,00 + \varepsilon \quad (5)$$

В качестве оптимальной можно принять модель на 4 шаге ($R^2 = 0,714$). На первом шаге в модель был включен индекс $\Delta KW-P$ ($R^2 = 0,437$), что объясняется его важной ролью в регулировании переноса тепла океаном и адвекции воздушных масс над теплым Норвежским течением в Европейский сектор Арктики. Включение на втором шаге индекса EA/WR позволило существенно увеличить коэффициент детерминации до 0,661. На последующих шагах вклад АО и TNA в дисперсию T_{BS} резко сокращается, но переменные остаются значимыми по критерию Стьюдента. В последнем столбце табл. 6 представлены коэффициенты парной корреляции температуры воздуха с климатическими индексами. Их величина плавно уменьшается для каждого нового включенного в модель предиктора. Это подтверждает иерархию вхождения предикторов в модель (5) с точки зрения их вклада в описание дисперсии функции отклика (T_{BS}).

Из табл. 6 видно, что индекс EA/WR имеет отрицательный коэффициент корреляции с температурой воздуха в БМ ($r = -0,65$). Во время отрицательной фазы EA/WR формируется аномалия циклонической циркуляции над северо-восточной Атлантикой и Скандинавией [Lim, 2015]. На восточной периферии этого циклона устанавливаются устойчивые южные и юго-западные ветра, которые осуществляют адвекцию теплых воздушных масс с субтропических широт Атлантики и европейского континента в высокие широты, включая регион БМ.

Таблица 6. Статистические оценки параметров пошаговой модели МЛР методом включения переменных температуры приземного воздуха в Баренцевом море в зависимости от климатических индексов Северной Атлантики за 1950—2024 гг.

Шаг	Включенный параметр	R^2	Стандартная ошибка в долях СКО	F-критерий	$p\text{-level}_{max}$	r
1	$\Delta KW\text{-}P$	0,437	1,21	55,1	0,0000	0,660
2	EA/WR	0,661	0,94	68,2	0,0000	-0,650
3	АО	0,680	0,92	48,9	0,0464	0,531
4	TNA	0,714	0,88	42,4	0,0060	0,468
5	АМО	0,716	0,88	33,8	0,5013	0,466

Обратимся теперь к табл. 7, в которой представлены результаты пошаговой регрессии температуры воды на ст. 3—7 разреза «Кольский меридиан» с комплексом климатических параметров СА. На первом шаге в модель входит $\Delta KW\text{-}P$, который описывает 37 % дисперсии ряда SST_{MC} . В качестве оптимальной можно принять модель на 3 шаге ($R^2 = 0,66$), т. к. на 4 шаге вклад EA/WR в дисперсию ряда SST_{MC} равен всего 0,02. Отметим, что все три переменные в формулу (6) входят с положительными знаками, что полностью отвечает физической сущности их связей с SST_{MC} . Итоговое уравнение регрессии имеет вид:

$$SST_{MC} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta KW\text{-}P + 1,14 \cdot АМО + 1,04 \cdot АО - 0,40 \cdot EA/WR - 0,50 \cdot САК + 4,12 + \varepsilon \quad (6)$$

Таблица 7. Статистические оценки параметров пошаговой модели МЛР методом включения переменных средней температуры воды основной ветви Мурманского течения на разрезе «Кольский меридиан» (ст. 3—7) в слое 0—200 м в зависимости от климатических индексов Северной Атлантики за 1951—2020 гг.

Шаг	Включенный параметр	R^2	Стандартная ошибка в долях СКО	F-критерий	$p\text{-level}_{max}$	r
1	$\Delta KW\text{-}P$	0,373	0,80	42,3	0,000	0,611
2	АМО	0,565	0,68	45,4	0,000	0,563
3	АО	0,660	0,60	44,6	0,115	0,506
4	EA/WR	0,684	0,59	36,9	0,092	-0,558
5	САК	0,704	0,56	31,8	0,040	0,243

Основным следствием усиления адвекции тепла в Арктику является сокращение площади морского льда. Как было указано выше, между индексом $\Delta KW\text{-}P$ и площадью ледяного покрова в БМ отмечается отрицательная корреляция ($r = -0,52$). Из результатов пошаговой регрессии (табл. 8) видно, что на первых двух шагах в модель входят с отрицательными знаками АМО и $\Delta KW\text{-}P$, вклад которых в дисперсию SBS_{Ice} составляет 48 % и 11 % соответственно, т. е. с физической точки зрения влияние АМО и $\Delta KW\text{-}P$ на изменчивость площади морского льда очевидно. Оптимальное уравнение регрессии можно представить как:

$$S_{BSIce} = -2,59 \cdot 10^5 \cdot AMO - 1,17 \cdot 10^3 \cdot \Delta KW-P + 1,35 \cdot 10^5 \cdot EA/WR + 4,22 \cdot 10^5 + \varepsilon \quad (7)$$

Таблица 8. Статистические оценки параметров пошаговой модели МЛР методом включения переменных площади морского льда в Баренцевом море в зависимости от климатических индексов Северной Атлантики за 1979—2024 гг.

Шаг	Включенный параметр	R^2	Стандартная ошибка в долях СКО	F-критерий	$p\text{-level}_{max}$	r
1	АМО	0,478	0,74	39,4	0,000	-0,673
2	$\Delta KW-P$	0,586	0,67	29,7	0,002	-0,518
3	EA/WR	0,624	0,64	22,7	0,049	0,568
4	АО	0,646	0,63	18,2	0,127	-0,291

Итак, несмотря на формальный подход метода пошаговой регрессии к подбору переменных, который, начиная со второго шага, выбирает следующую переменную по наибольшему приращению коэффициента детерминации, можно отметить, что все три модели, с физической точки зрения соответствуют характеру связей главных переменных, входящих в модель, с функцией отклика. Это важнейшее условие работоспособности моделей, так как они достоверно описывают изменчивость определяемых характеристик.

В табл. 9 представлены оценки вкладов отдельных предикторов в описание дисперсии трех климатических характеристик, а также их суммарный вклад в температурный режим Баренцева моря. Из полученных результатов следует, что индекс $\Delta KW-P$ является ведущим предиктором для температуры воздуха (объясняет 43,7% дисперсии) и температуры воды (37,3%), в то время как в изменчивость площади морского льда наибольший вклад вносит индекс АМО (47,8%).

Таблица 9. Оценки вкладов отдельных предикторов в описание дисперсии трех климатических характеристик Баренцева моря.

Индекс	T_{BS} , модель 1	SST_{MC} , модель 2	S_{BSIce} , модель 3	Сумма
$\Delta KW-P$	43,7	37,3	10,8	91,8
АМО	—	19,2	47,8	67,0
EA/WR	22,4	2,4	3,8	28,6

Итак, индекс $\Delta KW-P$ можно рассматривать как показатель крупномасштабной изменчивости характеристик климата БМ. Очевидно, изложенная выше аргументация является приближенной и требует дальнейшего уточнения. Однако важно, что использование индекса $\Delta KW-P$, основанного на многолетних рядах береговых наблюдений за уровнем моря, открывает новые возможности для исследования долгопериодных изменений климата и циркуляции вод не только в Северной Атлантике, но и в сопредельных регионах Арктического бассейна.

Заключение

В результате выполненных в работе исследований были сделаны следующие выводы.

1. **Впервые** на основе данных спутниковой альтиметрии за период 1993–2024 гг. выполнено детальное исследование изменчивости градиентов (Δh) и средних значений уровня (h_{cp}) на широтных разрезах 26° и 56° с.ш. Разрез на широте 26° является реперным для САКВ, а на широте 56° — для СЦКВ. Выявлено, что Δh и h_{cp} на локальных разрезах 26° и 56° с.ш. имеют значимую корреляцию с климатическими индексами. В пределах 26° с.ш. наиболее репрезентативным является разрез в центральной части Североатлантического океана 70° — 25° з.д. В пределах 56° с.ш. — разрез 10° — 28°

з.д., который косвенно характеризует приток вод в полярные широты Североатлантическим течением.

2. **Впервые** обоснован интегральный индекс Североатлантической циркуляции, представляющий собой разность уровней на широтах 26° и 56° с.ш., который является характеристикой взаимодействия субтропического и субполярного круговоротов. Данный индекс имеет высокую линейную связь с климатическими индексами СА и с ТПО северных морей. Самая высокая корреляция отмечается с индексом САК ($r = 0,82$) и АО ($r = 0,86$), которые в значительной степени контролируют атмосферную циркуляцию и изменения климата не только в СА, но и далеко за её пределами.

3. **Впервые** разработана статистическая модель Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОЦ) и обратного потока вод за счет рециркуляции субтропического круговорота (Q_{UMO}) по альтиметрическим данным об уровне моря на широтных разрезах 26° и 56° СА. Модели демонстрируют высокую точность: коэффициент детерминации для АМОЦ на разрезе 26° с.ш. составляет 0,89 (ошибка 0,38 в долях СКО), для Q_{UMO} 0,92 (ошибка 0,32 в долях СКО); на разрезе 56° с.ш. — 0,96 (ошибка 0,22 СКО) и 0,90 (ошибка 0,34 СКО) соответственно. Это позволяет рассчитывать АМОЦ и Q_{UMO} по легко определяемым значениям уровня, не прибегая к трудоёмкой процедуре определения гидрофизических параметров в толще океана.

4. **Впервые** дается обоснование нового индекса $\Delta KW-P$, который рассчитывается как градиент межгодовых значений уровня между станциями Ки-Вест и Портленд на восточном побережье Северной Америки. Факторный анализ и иерархическая классификация годовых значений уровня моря по данным 23 береговых станций за период 1948–2024 гг. позволили разделить всю совокупность станций на 2 группы. Южная находится под влиянием САКВ, а северная под воздействием СЦКВ. Показано, что самыми репрезентативными станциями, наилучшим образом отражающими корреляцию с уровнем других станций, являются Key West (Ки-Вест) и Portland (Портленд). Выявлено, что градиент межгодовых колебаний уровня на этих станциях $\Delta KW-P$ характеризует динамику САКВ и СЦКВ. Корреляция $\Delta KW-P$ с интегральным индексом ИСЦ за период 1993–2024 гг. составляет $r = 0,82$, с индексом АО $r = 0,81$, с индексом САК в зимний период $r = 0,87$. Очевидно, индекс $\Delta KW-P$ является репрезентативным индикатором долгопериодной изменчивости циркуляции вод Северной Атлантики с 1948 года по настоящее время.

5. **Впервые** установлено, что индекс $\Delta KW-P$ представляет собой репрезентативный индикатор изменчивости характеристик теплового режима Баренцева моря. С помощью пошагового регрессионного анализа выявлено, что индекс $\Delta KW-P$ с большим преимуществом опережает вклады других индексов СА (АО, САК, АМО, ТНА, ЕА/WR) в дисперсию климатических параметров БМ. Так, вклад $\Delta KW-P$ в температуру воздуха составляет 44 %, в температуру воды на разрезе «Кольский меридиан» — 37 %, в площадь ледового покрова моря — около 11 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах и периодических изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. *Малинин В.Н., Ангудович Я.И.*, Изменчивость уровня морей Северной Атлантики по альтиметрическим данным // Общество. Среда. Развитие. 2021. №4. С. 79—83. DOI: 10.53115/19975996_2021_04_079-083.
2. *Малинин В.Н., Ангудович Я.И.*, Изменчивость уровня и циркуляции океана в Северной Атлантике по спутниковой альтиметрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. №3. Т. 19. С. 281—294. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-281-294.
3. *Малинин В.Н., Ангудович Я.И.*, Уровень океана как показатель межгодовой изменчивости циркуляции вод и климата в Северной Атлантике // Современные проблемы

дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. №5. С. 335—353. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-335-353.

4. **Ангудович Я.И., Малинин В.Н.**, Межгодовая изменчивость уровня океана в Северной Атлантике и его влияние на характеристики климата в Баренцевом море // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса 2026. Т. 23. №4. С. 9—26. DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-9-26.

5. **Malinin V.N., Angudovich Ya.I.**, Variability of Sea Level and Circulation in the North Atlantic Based on Satellite Altimetry Data // Cosmic Research. 2023. V. 60. P. S18—S26.

6. **Malinin V.N., Angudovich Ya.I.**, Sea level as an indicator of interannual Variability of water circulation and climate in the North Atlantic // Cosmic research. 2026. V. 63. P. S139 — S150. DOI: 10.1134/S0010952525601999.

Публикации в научных изданиях Scopus и Web of Science

7. **Soldatenko S., Alekseev G., Angudovich Y.**, On the Links Between Tropical Sea Level and Surface Air Temperature in Middle and High Latitudes // Atmosphere. 2025. V 16. P. 913. DOI:10.3390/atmos16080913.

8. **Soldatenko S., Alekseev G., Loginov V., Angudovich Y., Danilovich, I.**, Climate Indices as Potential Predictors in Empirical Long-Range Meteorological Forecasting Models // Forecasting. 2026. V 8. P 9. DOI: 10.3390/forecast8010009

9. **Alekseev G., Soldatenko S., Glok N., Kharlanenkova N., Angudovich Y., Smirnov M.**, Tropical Sea Surface Temperature and Sea Level as Candidate Predictors for Long-Range Weather and Climate Forecasting in Mid-to-High Latitudes // Climate. 2025. V 13. P. 84. DOI: 10.3390/cli13050084.

Другие научные публикации

10. **Солдатенко С.А., Ангудович Я.И.**, Методология суррогатного моделирования нелинейной динамики атмосферы: от концептуальной модели к нейронным сетям // Метеорология и гидрология. 2025. №2. с. 5 – 20. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-2-5-20.

11. **Soldatenko S., Angudovich Y.**, Using Machine Learning for Climate Modelling: Application of Neural Networks to a Slow-Fast Chaotic Dynamical System as a Case Study Climate // Climate. 2024. Vol. 12. DOI:10.3390/cli12110189.

12. **Ангудович Я.И., Татаренко Ю.А.**, О применении нейронных сетей в задачах оперативного прогнозирования уровня воды в акватории Обской губы // Гидрометеорология и экология. 2025. №78. С. 42-65. DOI: 10.33933/2713-3001-2025-78-42-65.