

*На правах рукописи*



**Капустина Мария Владимировна**

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕТНИХ АПВЕЛЛИНГОВ В  
ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО  
МОРЯ В XXI ВЕКЕ**

Специальность 1.6.17 – Океанология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Калининград – 2024

Работа выполнена в Атлантическом отделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель: **Зимин Алексей Вадимович** доктор географических наук, доцент, главный научный сотрудник Лаборатории геофизических пограничных слоев Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Шилин Михаил Борисович**, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры прикладной информатики Института информационных систем и геотехнологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

**Дианский Николай Ардальянович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики моря и вод суши Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_ час. \_\_ мин. на заседании диссертационного совета 24.1.090.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва, 117997

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/disser/> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
Кандидат физико-математических наук

Соловьев Дмитрий Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Под термином «апвеллинг» понимают процесс подъёма вод, наиболее явным признаком возникновения которого в прибрежной зоне является выход вод с пониженной температурой на поверхность [Боуден, 1988; Гилл, 1986; Костяной, 2000; Чубаренко, 2010; Myrberg, Andreev, 2003]. Считается, что прибрежный апвеллинг в акватории Балтийского моря в летний сезон наблюдается достаточно регулярно [Lehmann, Myrberg, 2008]. Он является одним из основных факторов перераспределения загрязняющих веществ и изменчивости биохимических процессов в прибрежной зоне, а также значимым механизмом вертикального водообмена у побережья [Бычкова, Викторов, 1987; Hela, 1976; Kahru et al., 1995; Lehmann et al., 2002].

Апвеллинг вызывается различными гидрометеорологическими факторами, при этом основным механизмом, приводящим к его развитию в Балтийском море, как правило, является ветровое воздействие [Есюкова и др., 2017; Bednorz et al., 2019; Hela, 1976; Krek et al., 2021b; Lehmann, Myrberg, 2008; Myrberg et al., 2010; Myrberg, Andrejev, 2003]. Отметим, что подъем холодных вод возникает как под действием вдольберегового ветра, так и сгонного ветра, направленного с берега в сторону моря [Блатов, Иванов, 1992; Горячкин, 2018; Есюкова и др., 2017; Полонский, Музылёва, 2016; Сильвестрова и др., 2022]. Характеристики ветрового апвеллинга определяются не только направлением ветра относительно береговой черты, его скоростью и продолжительностью [Голенко и др., 2009], но и стратификацией водной толщи [Myrberg et al., 2010] и особенностями топографии дна в прибрежной акватории [Gurova et al., 2013; Masini et al., 2023; Wang et al., 2022].

Результаты исследований, посвященных влиянию изменений климата на ветровой режим в регионе Балтийского моря, противоречивы: тренды скорости ветра отмечаются как положительные, так и отрицательные [Feser et al., 2015; Meier et al., 2022a]; существуют значительные различия в прогнозе будущих

изменений характеристик региональных ветров [Christensen et al., 2022]. Кроме того, наблюдается неравномерный по подрайонам рост поверхностной температуры Балтийского моря [Серых, Костяной, 2019]. Отмечаемый рост температуры поверхности моря (ТПМ) и изменчивость атмосферных переносов над регионом [Meier et al., 2022a; Rutgersson et al., 2015] может отражаться на характеристиках апвеллингов в прибрежных акваториях [Бычкова и др., 1988; Bednorz et al., 2021; Lehmann et al., 2002]. Важно отметить, что для акватории Юго-Восточной Балтики (ЮВБ) систематизированные на многолетних временных интервалах данные о характеристиках апвеллингов неоднозначны [Бычкова и др., 1988; Bednorz et al., 2018, 2019; Dabuleviciene et al., 2018; Lehmann et al., 2012; Nowicki et al., 2019]. Основным препятствием для получения на систематической основе количественных оценок описываемого явления является значительная локальная широтная и меридиональная изменчивость термического режима вод из-за сложной конфигурации береговой черты и топографических особенностей района, что, в свою очередь, делает актуальным совершенствование методики исследования прибрежного апвеллинга с учетом специфики акватории.

В условиях меняющегося климата изучение характеристик прибрежного апвеллинга ЮВБ становится важной научной задачей. Являясь существенным фактором транспорта биогенных элементов из подповерхностного в поверхностный слой, он может оказывать значительное влияние на биопродуктивность ЮВБ [Кудрявцева, Александров, 2019], одним из основных показателей которой является концентрация пигмента фитопланктона — хлорофилла «а» (Хл «а»). Оценка влияния апвеллингов на концентрацию Хл «а» важна для вопросов исследования изменений экологического состояния прибрежной зоны, так как отмечаемый в Балтийском море рост ТПМ может привести к увеличению концентрации фитопланктона, в том числе – биомассы потенциально токсичных цианобактерий [ВАСС Author Team, 2008; Meier et al., 2011]. Кроме того, расположение зон апвеллинга рекомендуется учитывать при подготовке проектов морского пространственного планирования [Iglesias-

Campos et al., 2021], которые на данный момент находятся в процессе разработки в Российской Федерации, а в окружающих регион странах Балтии уже приняты на законодательном уровне.

Отметим, что перечисленные задачи не только актуальны, но и соответствуют целям Морской Доктрины Российской Федерации 2022 года [Указ Президента..., 2022], где приоритет отдается исследованиям, связанным с влиянием Мирового океана на экосистему и климат планеты (в первую очередь, на территории РФ).

**Степень научной проработанности темы.** В летний период при существенном различии температуры воды верхнего прогретого и нижнего более холодного слоя появление на поверхности моря в прибрежной зоне областей вод с пониженной температурой является общепринятым индикатором зон апвеллинга [Михайлова и др., 2011; Bednorz et al., 2013; Lehmann et al., 2012; Sholva et al., 2014; Zhang et al., 2022; Zhu et al., 2023]. Для количественной оценки его характеристик используется методика, основанная на использовании термического индекса апвеллинга (ТИА) [Полонский, Серебренников, 2019, 2021a, 2021b; Benazzouz et al., 2014; Chavez, Messié, 2009; Lamont et al., 2018; Marcello et al., 2011; Nykjær, Camp Van, 1994; Zhu et al., 2023]. ТИА рассчитывается по разнице ТПМ в прибрежной зоне и в удаленной от берега области, располагающейся априори за пределами зоны возможного апвеллинга.

В Балтийском море часто зона апвеллинга определяется по разности ТПМ в прибрежной зоне и осредненной по данной широте [Gröger et al., 2022; Lehmann et al., 2012]. Однако этот метод имеет ограничения в районах, где береговая черта простирается в направлении запад–восток [Lehmann et al., 2012; Zhang et al., 2022]. Температура поверхности Балтийского моря имеет широтный градиент, и в южной части Балтики наблюдается ярко выраженный градиент температуры с запада на восток [Meier et al., 2022a], что следует учитывать при разработке подходов идентификации зон апвеллингов в ЮВБ. В результате использования различных методик, общих для всего Балтийского

моря, оценки повторяемости этих событий в районе исследования различаются в разы: от 2% [Lehmann et al., 2012; Nowicki et al., 2019], 5–12% [Бычкова и др., 1988; Bednorz et al., 2018, 2019], и до 16% дней в теплый период года [Dabuleviciene et al., 2018]. Наличие столь значимых различий приводит к постановке задачи разработки простого адаптированного для ЮВБ подхода к обнаружению зон апвеллинга.

Другая возможная причина таких разных оценок, вероятно, связана с изменением климата, выражающимся в колебаниях глобальной атмосферной циркуляции. Следует признать, что для ЮВБ отсутствуют не только однозначные сведения о характеристиках апвеллинга, но и о роли атмосферных процессов в его повторяемости на многолетнем интервале изменчивости даже для летнего сезона. Так, ранее была показана слабая, но статистически значимая связь повторяемости событий подъема вод у побережья Польши с индексом атмосферной циркуляции SCAND для апреля–сентября 1982–2010 гг. [Bednorz et al., 2013]. По данным же для июня–августа 1982–2017 гг. было показано, что скандинавское колебание оказывает наибольшее влияние на апвеллинги в Южной Балтике [Bednorz et al., 2019], а связь индекса атмосферной циркуляции EA/WR с этим явлением была слабой [Bednorz et al., 2019]. Также было отмечено на основе модельных расчетов, что во время положительной фазы атмосферной циркуляции NAO наблюдается увеличение вертикального обмена в прибрежных областях [Lehmann et al., 2002]. Разница в оценке связи индексов атмосферной циркуляции с характеристиками апвеллингов в южной части Балтийского моря может свидетельствовать об изменении влияния климатических колебаний на интенсивность событий подъема вод в ЮВБ.

С изменением климата также может быть связан отмечаемый в Балтийском море рост ТПМ [Karustina et al., 2016; Meier et al., 2022a], который может влиять на состояние морских экосистем. Известно, что на экологическое состояние прибрежных зон моря также может оказывать влияние апвеллинг, изменяющий гидрологические и гидрохимические характеристики вод за счет

увеличения вертикального перемешивания, охлаждения поверхности моря и стимулирования поступления биогенных элементов в поверхностный слой [Burska, Szymelfenig, 2005; Dabuleviciene et al., 2023; Gromisz, Szymelfenig, 2005; Kahru et al., 1995; Kowalewski, 2005; Krek et al., 2021b; Lips et al., 2009; Svansson, 1975]. При этом в Балтийском море из-за отмечающегося влияния апвеллингов на соотношение Редфилда может изменяться также и состав фитопланктонных сообществ [Vahtera et al., 2005; Zhurbas et al., 2008].

Вследствие сгона поверхностных вод и подъема нижележащих наблюдается понижение температуры фотического слоя и снижение измеряемых величин первичной продукции в первые дни апвеллинга [Vahtera et al., 2005; Zalewski et al., 2005]. После прекращения подъема холодных вод интенсивность фотосинтеза снова увеличивается вследствие увеличения температуры воды и концентрации биогенных элементов в фотическом слое [Кудрявцева, Александров, 2019; Wasmund et al., 2011]. При этом характер изменения концентрации биогенных элементов в поверхностном слое вследствие апвеллинга имеет как сезонную изменчивость, связанную с изменением положения термоклина и нутриклина [Janssen et al., 2004; Kowalewski, 2005; Siegel et al., 1999b], так и региональную, связанную с особенностями топографии дна, поступлением вод рек или заливов, с частотой апвеллингов в данной акватории [Huntsman, Barber, 1977; Kowalewski, 2005; Krężel et al., 2005a; Laanemets et al., 2009; Siegel et al., 1999b]. При этом весьма редкие и отрывочные натурные исследования не позволяют получить статистически обеспеченные оценки влияния апвеллинга на концентрацию хлорофилла «а» в прибрежной зоне ЮВБ [Krek et al., 2021b; Krężel et al., 2005a].

При том, что работ, посвящённых исследованию апвеллингов в Балтийском море, достаточно много, существуют значительные различия в оценке их повторяемости в районе исследования, связи с атмосферными процессами, а также влияния на экологическое состояние акватории.

**Предмет и объект исследования.** Предметом исследования в данной работе являются характеристики летних прибрежных апвеллингов. **Объектом**

— гидрологический режим прибрежных вод юго-восточной части Балтийского моря.

**Цель и задачи диссертации.** Цель — получение характеристик апвеллингов в прибрежных районах Юго-Восточной Балтики в первые два десятилетия XXI века в условиях климатических изменений во взаимосвязи с гидрометеорологическими процессами разного масштаба.

**Задачи:**

- адаптация методики идентификации проявлений апвеллингов по данным о температуре поверхности моря с учетом региональных особенностей;
- выделение событий поверхностных проявлений апвеллингов на акватории Юго-Восточной Балтики и оценка их пространственно-временной изменчивости за период июнь–август 2000–2019 гг.;
- оценка изменчивости характеристик апвеллингов в Юго-Восточной Балтике под влиянием атмосферных процессов;
- оценка влияния апвеллингов на концентрацию хлорофилла «а» в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики.

**Материалы и методы.** Исследование было выполнено с использованием следующих массивов данных:

- данные по температуре воды, направлению и скорости течения и ветра за июнь–август 2000–2019 гг. (физический реанализ CMEMS Baltic Sea Physical Reanalysis product [Baltic Sea Physics Reanalysis..., 2022; Liu et al., 2019], данные спектрорадиометров MODIS Terra/Aqua (NASA, 2024) и атмосферный реанализ ECMWF ERA5 [Hersbach et al., 2018]);
- данные мультисенсорных спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла «а» ( $\text{мг/м}^3$ ) в поверхностном слое за июнь–август 2000–2019 гг. [Baltic Sea Reprocessed Surface Chlorophyll Concentration..., 2020; D'Alimonte et al., 2012];
- натурные данные (CTD-данные судовых измерений в ходе 127-го рейса НИС «Профессор Штокман» (июль 2014 г.); данные гирлянды

термодатчиков, расположенной на морской ледостойкой стационарной платформе (МЛСП) D6 в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики (август 2015 – август 2019 гг.); данные *in situ* измерений концентрации хлорофилла «а» 10 июля 2014 г. и 14 августа 2015 г.);

- среднемесячные значения индексов крупномасштабной атмосферной циркуляции внетропической зоны Северного полушария (NAO, SCAND, EA, EA/WR) за май–август 2000–2019 гг. [Northern Hemisphere Teleconnection Patterns..., 2022].

Методика определения апвеллинга в прибрежной зоне по термическому индексу, основанная на расчете разницы температуры поверхности моря в зоне подъема вод и в окружающих водах, была адаптирована для Юго-Восточной Балтики. Полученные зоны апвеллингов были картированы, в результате были определены среднесезонные и среднемноголетние (в т.ч., декадные) значения повторяемости апвеллингов для разных районов Юго-Восточной Балтики и получены количественные характеристики их изменчивости на масштабах двух первых десятилетий XXI века. Дополнительно были получены оценки связи характеристик апвеллингов с характеристиками ветра и индексами крупномасштабной циркуляции, а также с концентрацией хлорофилла «а» в прибрежной зоне.

#### **Научная новизна работы:**

- адаптирована методика идентификации летних апвеллингов на основе термического индекса для юго-восточной части Балтийского моря;
- получены количественные оценки внутрисезонной и межгодовой изменчивости характеристик летних апвеллингов в районе исследования;
- показано влияние локальных метеоусловий и крупномасштабной атмосферной циркуляции на характеристики летних апвеллингов в прибрежных районах Юго-Восточной Балтики;
- получены оценки влияния прибрежного апвеллинга на краткосрочную изменчивость концентрации хлорофилла «а» в летний период.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- Разработан метод определения зон прибрежного апвеллинга в юго-восточной части Балтийского моря, основанный на расчете разности температуры поверхности моря в глубоководной части акватории и в прибрежной зоне;
- Наибольшая повторяемость событий летнего апвеллинга в XXI веке наблюдалась вдоль северной части Куршской косы и западного побережья Калининградского полуострова. Количество дней с апвеллингом в летние сезоны уменьшилось в 2010–2019 гг. по сравнению с 2000–2009 гг. на 33%. Наиболее значительное сокращение обнаружено в августе, что обуславливается ослаблением скандинавского антициклона и связанным с этим изменением интенсивности зонального переноса в атмосфере в исследуемом регионе;
- Прибрежный летний апвеллинг в юго-восточной части Балтийского моря приводит к уменьшению концентрации хлорофилла «а» на поверхности в прибрежной зоне в среднем более чем на  $1 \text{ мг/м}^3$ ; при этом, независимо от продолжительности апвеллинга, пониженные концентрации сохраняются в недельный период после его завершения.

### **Практическая и теоретическая значимость работы:**

- Адаптированная методика идентификации апвеллингов, основанная на термическом индексе, может быть использована для получения временных и пространственных характеристик событий подъема вод в юго-восточной части Балтийского моря в летний период на более длительных интервалах многолетней изменчивости.
- Информация о повторяемости апвеллингов в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики может быть использована при изучении локальной динамики вод прибрежной зоны и прогнозировании распределения и концентрации фитопланктона после событий апвеллинга.

- Сведения о районах частой встречаемости апвеллинга могут быть включены в планы мониторинга окружающей среды и учтены в рамках проведения мероприятий по морскому пространственному планированию.

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием большого массива баз данных физического и атмосферного реанализов и данных дистанционного зондирования Земли, дополненных данными контактных измерений с проведением сравнительного анализа результатов. Достоверность результатов дополнительно подтверждается прохождением процедуры рецензирования при публикации материалов диссертации в ведущих профильных журналах.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты доложены на конференциях: Морские исследования и образование (MARESEDU) в 2017, 2021, 2023 гг.; Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере МСП-2018 в 2018 г.; Комплексные исследования Мирового океана (КИМО) в 2021 г., на семинарах Лаборатории геоэкологии АО ИО РАН в 2022 и 2023 гг., на семинаре Лаборатории прикладной океанологии АО ИО РАН в 2023 г., на Ученом совете СПбФ ИО РАН в 2023 г., на заседании кафедры океанологии СПбГУ в 2023 г., на Ученом совете Физического направления ИО РАН в 2024 г.

**Личный вклад автора работы** заключается в адаптации методики определения зон прибрежного апвеллинга к району исследования, получении статистических результатов применения этой методики. Соискателем проведен анализ пространственно-временной изменчивости характеристик прибрежных летних апвеллингов в Юго-Восточной Балтике и особенностей их формирования при различных ветрах. Соискателем осуществлено табличное и графическое представление результатов и подготовка результатов к публикации в статьях, а также к представлению на семинарах и конференциях.

**Публикации.** Основные положения диссертации представлены в 11 публикациях, из них 6 — статьи в журналах, включенных в список ВАК, и 5

тезисов и материалов докладов на всероссийских и международных конференциях.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. В работе содержится 42 иллюстрации и 10 таблиц. Список цитированной литературы насчитывает 238 источников. Общий объем диссертации — 127 страниц.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю д.г.н. Зимину А.В. за помощь в подготовке работы, внимание и поддержку. Автор благодарит коллег из АО ИО РАН и ИО РАН за помощь в сборе данных и ценные замечания при подготовке диссертации, в частности, к.б.н. Александрова С.В., к.г.-м.н. Баширову Л.Д., к.г.н. Бубнову Е.С., д.ф.-м.н. Гриценко В.А., к.г.н. Данченкова А.Р., д.г.н. Дубравина В.Ф., к.г.н. Крека А.В., Крек Е.В., Кречика В.А., к.б.н. Маркиянову М.Ф., Пономаренко Е.П., к.г.-м.н. Сивкова В.В., к.г.н. Стонт Ж.И., к.г.н. Ульянову М.О., д.ф.-м.н. Чубаренко И.П., Чурина Д.А., а также к.ф.-м.н. Мысленкова С.А., к.г.н. Сильвестрову К.С. За предоставленные материалы автор благодарит ООО «ЛУКОЙЛ-КМН», ООО «МВБ», CMEMS, ECMWF, NOAA Center for Weather and Climate Prediction.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи, содержится общая характеристика работы: степень научной проработанности темы, материалы и методы, научная новизна работы, положения, выносимые на защиту, практическая и теоретическая значимость работы, достоверность результатов, апробация, личный вклад автора, список публикаций.

**Глава 1** посвящена описанию предмета исследования — прибрежных апвеллингов юго-восточной части Балтийского моря. В **разделе 1.1** представлена физико-географическая характеристика района исследования, описываются гидрологическая структура моря и особенности экологического

состояния вод Юго-Восточной Балтики. В **разделе 1.2** описаны основные характеристики апвеллингов Балтийского моря, методы их идентификации в Балтике и ограничения этих методов. В **разделе 1.3** представлены результаты исследований, посвящённых вопросу влияния апвеллингов Балтийского моря на гидрохимические характеристики вод, в частности, на концентрацию биогенных элементов и основного пигмента фитопланктона — хлорофилла «а».

В **Главе 2** описаны материалы и методы исследования. В **разделе 2.1** перечислены исходные данные, использованные в исследовании, их географическая привязка представлена на рис. 1.

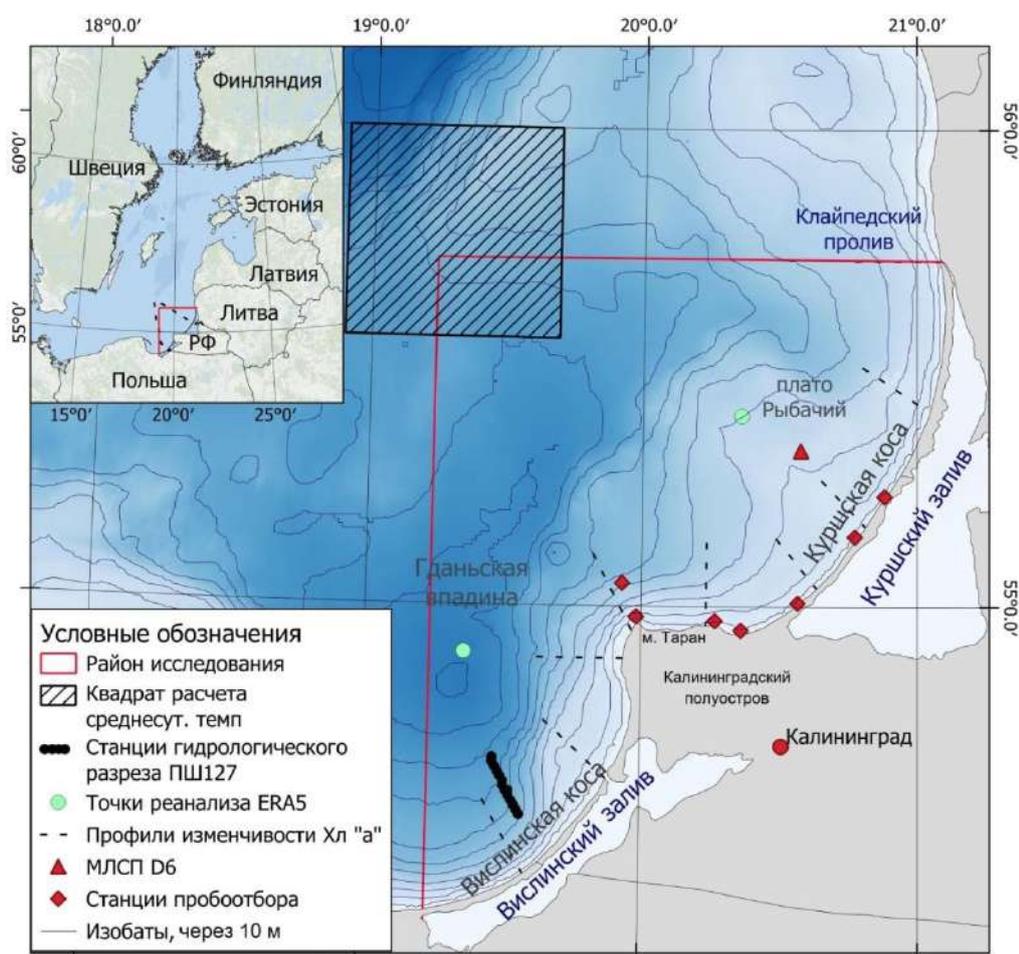


Рисунок 1 – Виды и расположение источников использованных данных в районе исследования. ПШ127 — 127-й рейс НИС «Профессор Штокман». На врезке — район исследования на карте Балтийского моря.

В **разделе 2.2** описан выбор методики идентификации поверхностных проявлений апвеллингов в ЮВБ. Выбранная методика основана на подходах, используемых при оценке термического индекса апвеллинга [Полонский,

Серебренников, 2019, 2021a, 2021b; Benazzouz et al., 2014; Chavez, Messié, 2009; Lamont et al., 2018; Marcello et al., 2011; Nykjær, Camp Van, 1994; Zhu et al., 2023], и состоит в следующем: каждые сутки для всех летних месяцев (июнь–август) за 2000–2019 гг. в удаленном от берега районе, расположенном к северо-западу от побережья Калининградской области, рассчитывалась фоновая ТПМ (заштрихованный квадрат на рис. 1). Полученное значение сравнивалось с ТПМ в каждой ячейке данных реанализа. Ячейки, температура в которых была ниже фоновой на пороговое значение, отмечались как зона апвеллинга в случае, если примыкали к побережью. Если подобных ячеек не было, апвеллинг не детектировался.

Путем сравнения полученных дат апвеллингов с опубликованными в [Krek et al., 2021b] было показано, что лучше всего апвеллинги воспроизводятся с использованием порогового значения в 1 °С. Дополнительно было проведено сравнение полученных результатов с опубликованными данными о датах апвеллингов в ЮВБ [Myslenkov et al., 2023] и сравнение с картами ТПМ, данными гирлянды термодатчиков и судовыми данными.

В **разделе 2.3** описаны использованные подходы к оценке пространственно-временной изменчивости поверхностных проявлений апвеллингов и их связи с разномасштабными явлениями. Даты и области апвеллингов для акватории ЮВБ в летний сезон определялись по двум подрайонам: западному, включающему западное побережье Калининградской области до м. Таран и побережье Балтийской косы, и северному (северное побережье Калининградской области от м. Таран и побережье Куршской косы). Повторяемость апвеллингов для каждого района рассчитывалась в днях и в событиях. Оценивались средние площади апвеллингов, расположения областей минимальной температуры (ядер апвеллингов), скорости подъема вод в ядре (в м/сут), разница температуры, отмеченной в зоне апвеллинга, с фоновыми значениями ТПМ ( $\Delta$ ТПМ). Для каждого выделенного случая анализировалось вертикальное распределение температуры вод на разрезе от берега в мористую часть через ядро апвеллинга с проверкой наличия признаков подъёма изотерм.

Связь характеристик апвеллингов с локальными ветровыми условиями оценивалась для каждого события продолжительностью более двух дней. Средние направления ветра рассчитывались за три дня до начала события. Выделенные ветры разделялись на типы относительно направления берега: сгонные ветры, вдольбереговые ветры. Дополнительно выделялись попеременное воздействие сгонного и вдольберегового ветров и неблагоприятные для развития апвеллинга ветры.

Анализ влияния параметров атмосферной циркуляции на характеристики апвеллинга проводился путем расчёта коэффициентов корреляции Пирсона между аномалией количества дней с апвеллингом в месяц со среднемесячными значениями индексов крупномасштабной атмосферной циркуляции. Были рассчитаны корреляции с индексами NAO, SCAND, EA/WR и EA.

Оценка влияния апвеллингов на концентрацию хлорофилла «а» в прибрежной зоне ЮВБ проводилась по данным натурных (в июле 2014 г. и в августе 2015 г.) и мультисенсорных спутниковых наблюдений. Были построены 9 профилей изменчивости Хл «а» длиной около 20 км, расположенных по нормали к берегу. Для каждого события апвеллинга отбирался для анализа один из профилей, наиболее обеспеченный данными по Хл «а» в течение рассматриваемого периода. На каждом профиле были получены среднесуточные значения Хл «а» по данным мультисенсорных спутниковых наблюдений за семь дней до апвеллинга, за период апвеллинга и семь дней после апвеллинга. Средняя концентрация Хл «а» на профиле рассчитывалась за меньшее количество дней в случае отсутствия данных. Всего был исследован 31 период с апвеллингом.

**Глава 3** содержит результаты проведенных в работе исследований. В **разделе 3.1** дается описание основных характеристик апвеллингов в районе исследования и их изменчивости. Всего в ЮВБ за летний период 2000–2019 гг. было выделено 82 апвеллинга общей продолжительностью 546 дней: от 1 дня в 2017 г. до 60 дней в 2006 г. Наиболее часто (около 70%) апвеллинги длятся до 5 дней, при этом короткие апвеллинги чаще наблюдаются в июне и июле. В

среднем за летний период на акватории четко выделяется район с глубинами менее 30 м, где отрицательные аномалии температуры встречаются не менее трех дней в месяц (рис. 2).

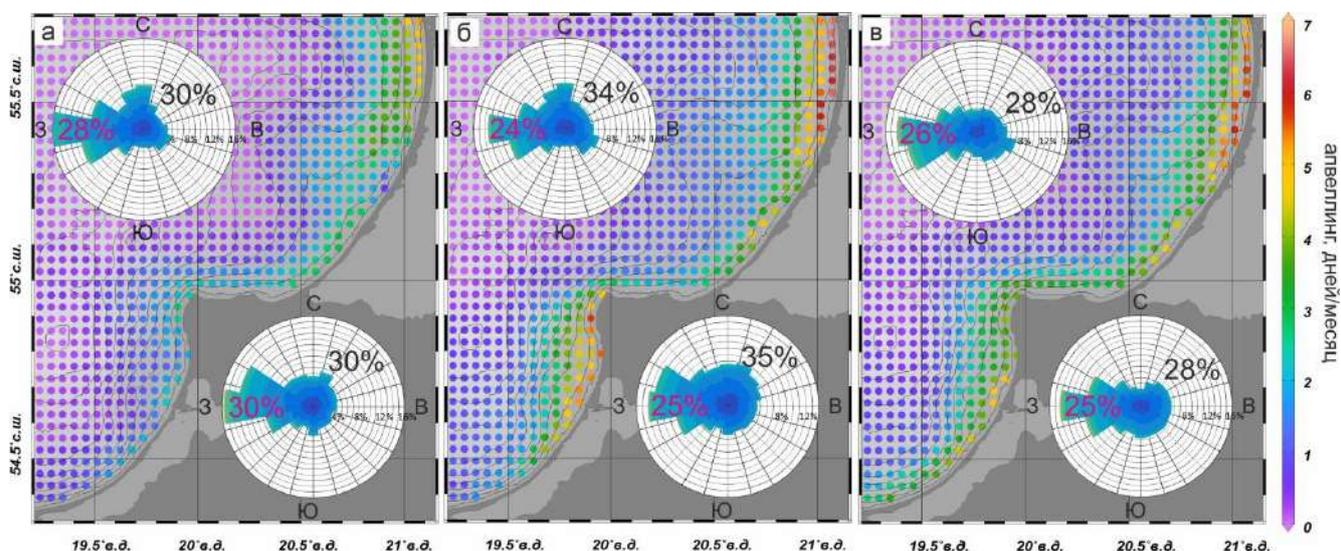


Рисунок 2 – Внутрисезонная изменчивость повторяемости апвеллингов в днях/месяц и розы ветров в северном и западном подрайонах в июне (а), июле (б) и августе (в). Красными цифрами обозначена повторяемость неблагоприятных для развития апвеллинга западных ветров, черными — благоприятных ветров в секторе север–восток.

Чаще всего апвеллинг наблюдается вдоль северной части Куршской косы. В целом по повторяемости апвеллингов в летний период прибрежная акватория может быть разделена на несколько районов: к первому району можно отнести северное побережье Калининградского п-ова и западную часть Вислинской косы (2 и менее дней апвеллинга в месяц), ко второму — район у м. Таран и южную часть Куршской косы (3–4 дня апвеллинга в месяц), к третьему — западное побережье Калининградской области и северную часть Куршской косы (апвеллинг наблюдается более 4 дней в месяц). Наблюдается рост повторяемости апвеллингов от июня к июлю, в августе повторяемость несколько снижается, что может быть связано как с внутрисезонной изменчивостью повторяемости благоприятных для развития апвеллинга ветров, так и с изменением глубины залегания термоклина.

Наибольшие отрицательные аномалии ТПМ наблюдались в ходе апвеллингов июня 2002 г. (около 7,4 °С), июля 2018 г. (около 7 °С) и июля –

августа 2006 г. (около  $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (см. пример распределения температуры вод в области ядра апвеллинга на рис. 3). В среднем за июнь отрицательная аномалия ТПМ в ядре апвеллинга составляла  $3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в июле —  $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в августе —  $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что примерно соответствует поднятию изотерм с глубин около 13–18 м.

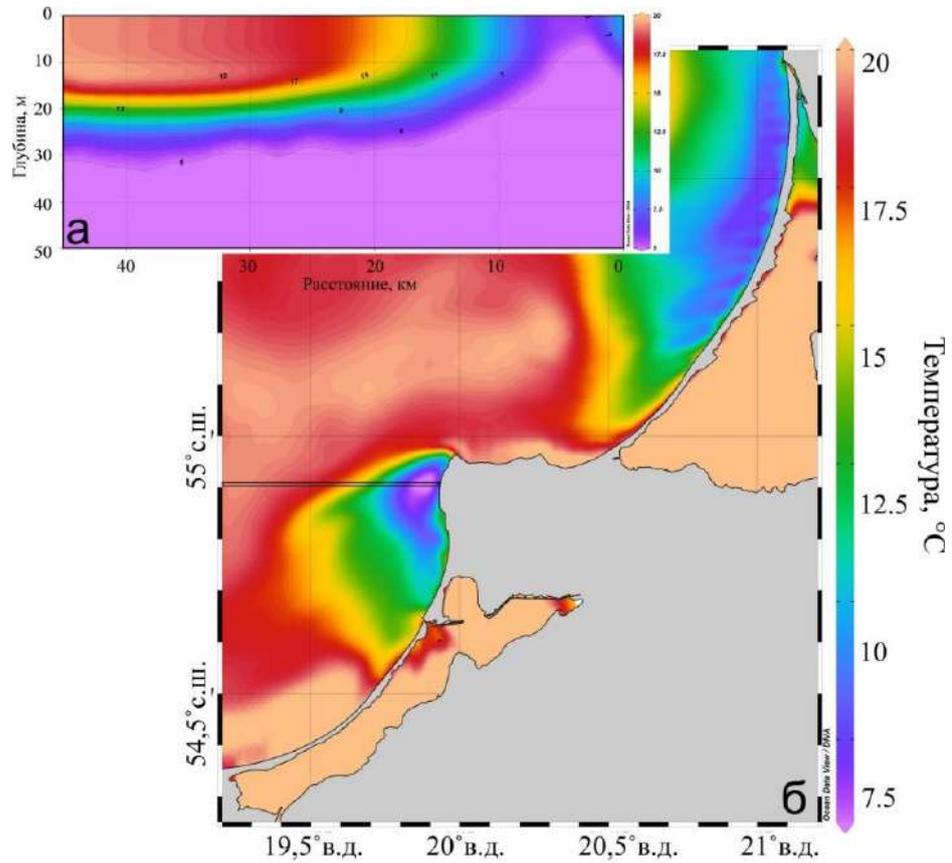


Рисунок 3 – Профиль температуры на разрезе (а) и ТПМ (б) 16 июля 2006 г. в ходе апвеллинга 2 июля — 30 августа 2006 г. Полосой на (б) обозначено положение разреза.

Чаще всего ядро апвеллинга отмечалось, как и наибольшее количество апвеллингов, в районе Куршской косы: в северной и центральной ее частях. Среднее на разрезе положение изотермы, на которой отмечалась наблюдаемая минимальная ТПМ в ходе апвеллинга, могло достигать 25–30 м, в среднем находясь в пределах 10–20 м. Наибольшее количество дней с апвеллингом отмечалось в июле и августе 2000–2009 гг. Во втором десятилетии было отмечено значительное уменьшение как продолжительности, так и площади апвеллингов, наибольшее — в августе.

В разделе 3.2 описывается связь ветрового воздействия и характеристик апвеллингов. Благоприятные для развития апвеллинга направления ветра, полученные по результатам анализа ветровых условий за три дня до начала каждого апвеллинга, находятся в секторе север — восток для западного подрайона и в секторе северо-северо-запад — восток — для северного. Отмечается внутрисезонная изменчивость повторяемости направлений ветров, которая влияет и на повторяемость апвеллингов. Большие повторяемости благоприятных ветров в июле и уменьшение повторяемости западных отражается на увеличении количества апвеллингов в северной части Куршской косы и у западного побережья Калининградского п-ова (см. рис. 2). Увеличение количества южных ветров в августе приводит к увеличению повторяемости количества апвеллингов на северном побережье Калининградского п-ова. Значительная межгодовая изменчивость и невысокая повторяемость летних апвеллингов в ЮВБ связана с изменчивостью благоприятных для их развития ветров (рис. 4).

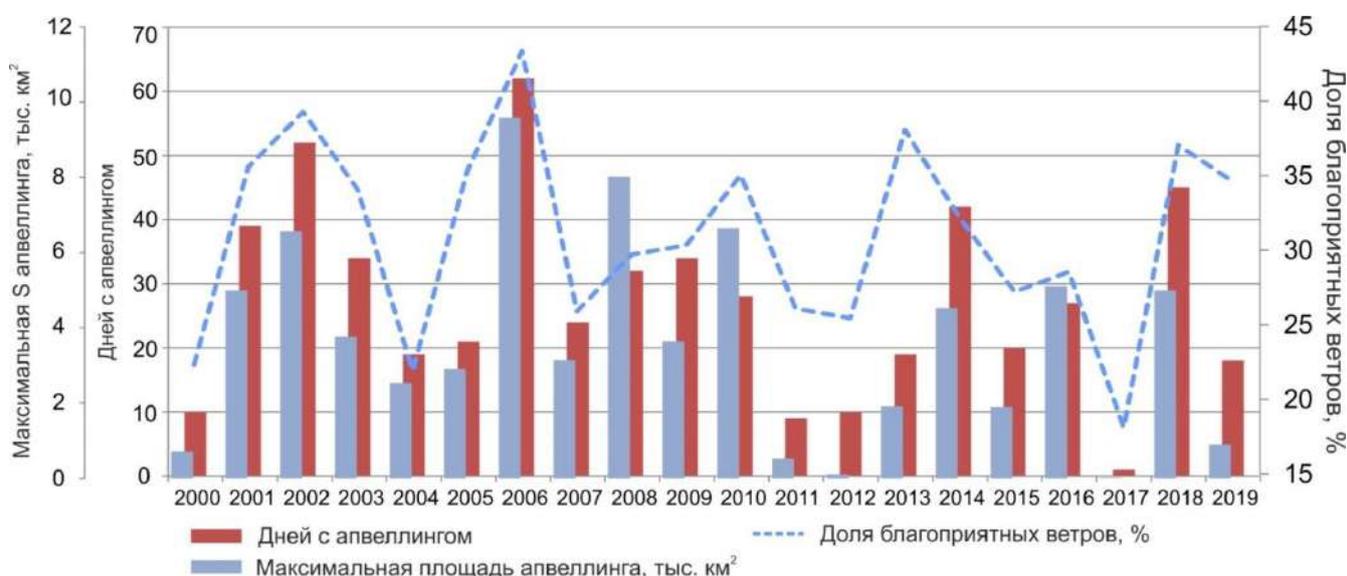


Рисунок 4 – Межгодовая изменчивость частоты и площади (S) апвеллингов и доли благоприятных ветров летом 2000–2019 гг.

В западном подрайоне апвеллингам в 70% случаев предшествуют ветры сгонных направлений, а в северном чаще наблюдаются вдольбереговые ветры. Наибольшая средняя площадь отмечается для апвеллингов, связанных с

вдольбереговыми ветрами, в северном подрайоне. Отмечено снижение повторяемости благоприятных ветров во втором десятилетии XXI века. В 2000–2009 гг. доля благоприятных ветров составила в среднем 26,6% для западного подрайона и 31,8% — для северного, во втором десятилетии уменьшилась до 25,6% и 30,2% соответственно.

В разделе 3.3 анализируется связь характеристик апвеллингов и ежемесячных значений индексов крупномасштабной циркуляции внетропической зоны Северного полушария: NAO, SCAND, EA, EA/WR. Показано, что наибольшая связь с событиями понижения ТПМ, связанными с подъемом вод, наблюдается в августе для индекса SCAND (рисунок 5).

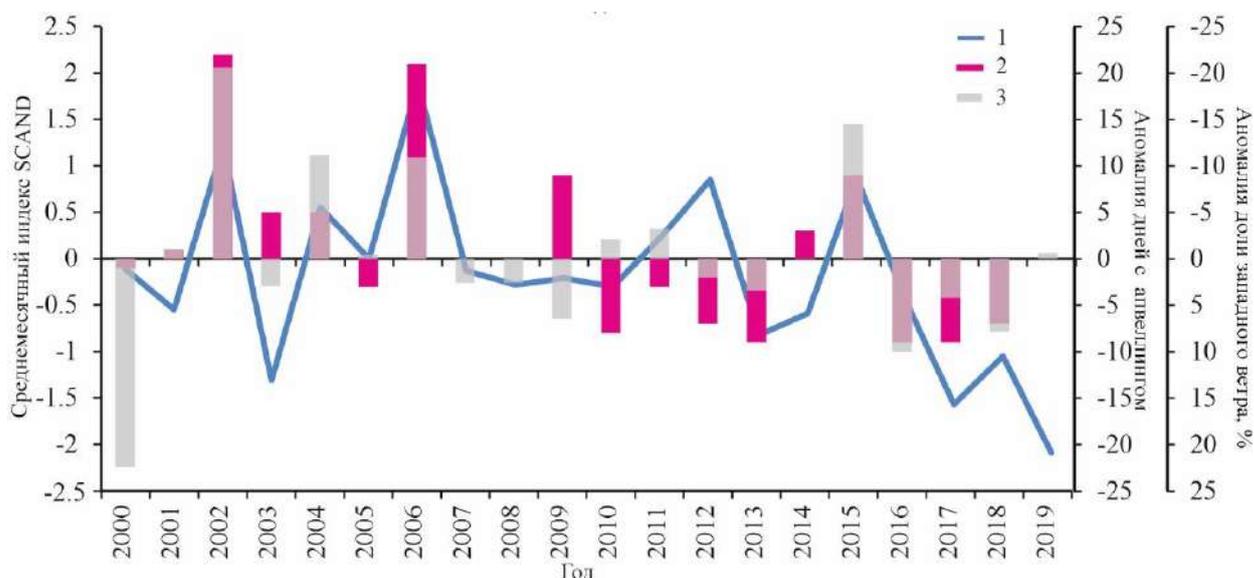


Рисунок 5 – Временная изменчивость значений индекса SCAND (1), аномалии дней с апвеллингом (2) и аномалии доли западных ветров (3) в августе 2000–2019 гг.

В разделе 3.4 оценивается влияние апвеллингов на концентрацию Хл «а» в поверхностном слое в прибрежной зоне ЮВБ. Показано, что снижение концентрации Хл «а» по данным мультисенсорных спутниковых наблюдений отмечается после апвеллингов любой продолжительности и во все месяцы, в среднем после апвеллинга концентрация падает более чем на  $1 \text{ мг/м}^3$ . В среднем за весь период исследования после окончания апвеллинга концентрация Хл «а» падает на  $1,50 \text{ мг/м}^3$  (рис. 6). Эта оценка сопоставима с полученной по данным

натурных измерений. Стоит учитывать, что измерения натурных данных проводились в один день, в который наблюдался апвеллинг, а спутниковые данные включали в себя измерения, полученные за недельный период до и после апвеллинга.

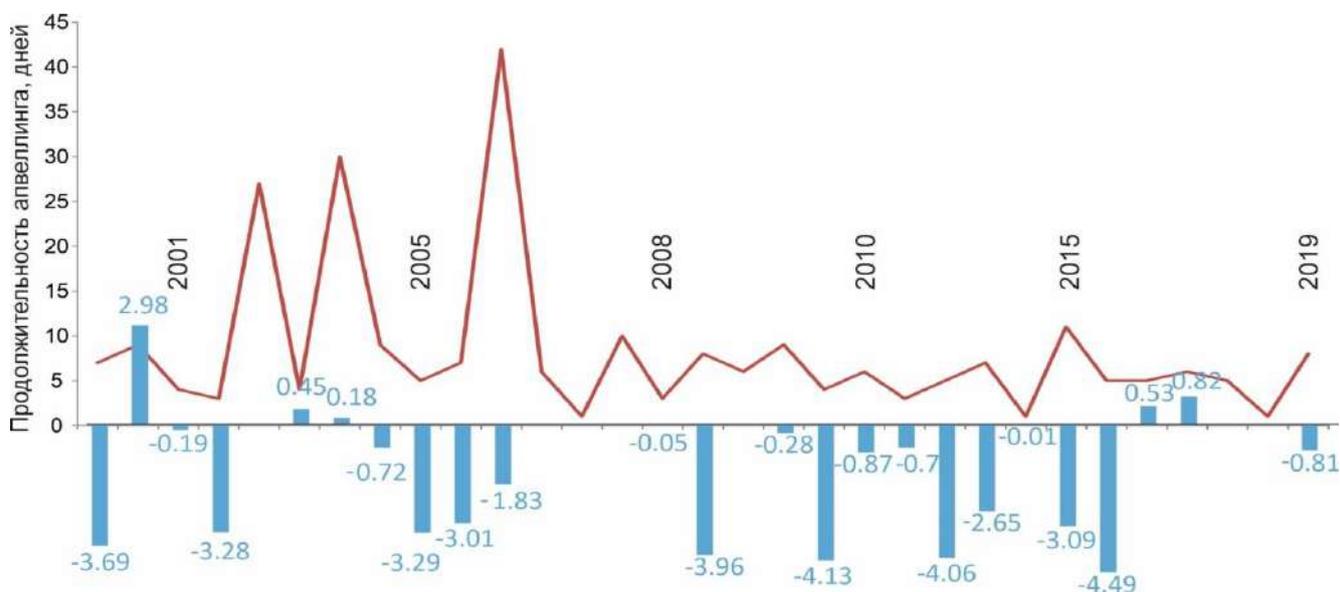


Рисунок 6 – Изменение концентрации Хл «а» ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) в прибрежной зоне в результате апвеллингов

После коротких апвеллингов (продолжительностью менее 5 дней) концентрация Хл «а» в среднем ниже значений до апвеллинга на  $1,24 \text{ мг}/\text{м}^3$ , после более длительных — на  $1,89 \text{ мг}/\text{м}^3$ . В среднем в июне–августе концентрация после апвеллинга ниже примерно на  $1,4\text{--}1,8 \text{ мг}/\text{м}^3$ , наибольшее количество раз значительное снижение Хл «а» наблюдалось в июле.

Отмечается наличие внутрисезонного хода влияния апвеллингов на концентрацию Хл «а» на рассматриваемой акватории, который накладывается на изменчивость концентрации Хл «а», связанную с абиотическими факторами и сукцессией фитопланктонного сообщества.

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

На основе данных по температуре воды и характеристик поверхностных течений и ветра за июнь–август 2000–2019 гг. по данным физического реанализа CMEMS Baltic Sea Physical Reanalysis product и атмосферного

реанализа ECMWF ERA5 получены основные параметры летних апвеллингов в юго-восточной части Балтийского моря и установлена их связь с ветровым воздействием. Дополнительно по данным среднемесячных значений индексов крупномасштабной атмосферной циркуляции внетропической зоны Северного полушария (NAO, SCAND, EA, EA/WR) за май–август 2000–2019 гг. получены оценки связи характеристик апвеллингов Юго-Восточной Балтики с параметрами крупномасштабной циркуляции атмосферы. Для оценки влияния прибрежных апвеллингов на концентрацию хлорофилла «а» ( $\text{мг/м}^3$ ) использованы данные мультисенсорных спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое за июнь–август 2000–2019 гг. В работе также использованы данные натуральных измерений температуры воды и концентрации хлорофилла «а».

Адаптированная методика определения поверхностных проявлений апвеллингов, основанная на термическом индексе апвеллинга и примененная к данным реанализа CMEMS Baltic Sea Physical Reanalysis product, выполненная на основе расчета разности ТПМ между районом в глубоководной части акватории и прибрежной зоной, позволяет получать сведения о наличии явления полного апвеллинга в летний период, в результате которого наблюдается выход вод пониженной температуры к поверхности, в ЮВБ. Наиболее достоверно зона апвеллинга определяется с использованием порогового значения  $1\text{ }^\circ\text{C}$ , что подтверждено сравнением с опубликованными датами апвеллингов в ЮВБ, полученными по данным натуральных и спутниковых наблюдений, и сравнением с картами ТПМ, данными гирлянды термодатчиков, и данными STD-зондирований.

Наибольшая повторяемость полных апвеллингов летом 2000–2019 гг. отмечается вдоль северной части Куршской косы и западного побережья Калининградского п-ова. Чаще всего ядра апвеллингов располагались в северной и центральной частях Куршской косы. Наиболее значительное среднее понижение температуры воды в ходе апвеллинга в прибрежной зоне наблюдалось в отдельные годы и достигало  $7\text{ }^\circ\text{C}$ . Во время этих апвеллингов

скорость подъема вод достигала 10 м/сут, максимальная разница между температурой в области ядра апвеллинга и фоновой составляла около 14 °С.

Наибольшую площадь апвеллинг достигал в июне в районе плато Рыбачий из-за относительного мелководья, в июле и августе повторяемость была выше на западном побережье области, что может быть связано с сезонным изменением ветрового режима: доля неблагоприятных западных ветров в июне значительно выше, чем в июле и августе. Отмечена значительная межгодовая изменчивость характеристик апвеллингов и снижение повторяемости и этих событий, и благоприятных ветров во втором исследованном десятилетии.

Выраженное снижение повторяемости апвеллингов в августе 2010–2019 гг., вероятно, обуславливается изменением интенсивности зонального переноса в атмосфере: показано, что в августе коэффициент корреляции между аномалией дней с апвеллингом и индексом SCAND, который отражает интенсивность развития антициклонической деятельности над Скандинавским п-овом, блокирующей зональный перенос, составил 0,6–0,7.

Отмечается влияние прибрежных апвеллингов на краткосрочную (в течение недельного периода) изменчивость концентрации Хл «а» в прибрежной зоне. Снижение концентрации Хл «а» отмечается после апвеллингов любой продолжительности и во все месяцы, в среднем составляя более 1 мг/м<sup>3</sup>. Отмеченное уменьшение повторяемости апвеллингов может приводить к более высоким концентрациям Хл «а» в поверхностном слое прибрежной зоны юго-восточной части Балтийского моря, и это следует учитывать для решения прикладных задач, связанных с рациональным использованием прибрежной акватории Калининградской области.

### Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Krechik V., Myslenkov S., **Kapustina M.** New possibilities in the study of coastal upwellings in the Southeastern Baltic Sea with using thermistor chain // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019. V. 12. №. 2. P. 44–61.

2. **Капустина М.В.**, Зимин А.В. Пространственно-временные характеристики апвеллингов в Юго-Восточной Балтике в 2010–2019 гг. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14. №. 4. С. 52–63.

3. Krek A.V., Krek E.V., Danchenkov A.R., Krechik V.A., **Капустина М.В.** The role of upwellings in the coastal ecosystem of the Southeastern Baltic Sea // *Regional Studies in Marine Science*. 2021. V. 44. 101707.

4. Myslenkov S., Silvestrova K., Krechik V., **Капустина М.** Verification of the ekman upwelling criterion with in situ temperature measurements in the Southeastern Baltic Sea // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. V. 11. № 1. 179.

5. **Капустина М.В.**, Зимин А.В. Изменчивость характеристик апвеллинга в юго-восточной части Балтийского моря в первые два десятилетия XXI века // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. № 6. С. 797–813.

6. **Капустина М.В.**, Зимин А.В. Влияние апвеллинга на распределение хлорофилла «а» в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики в летний период 2000-2019 гг. // *Морской гидрофизический журнал*. 2024. № 2. С. 255–270.

Также автором опубликовано 5 материалов докладов на всероссийских и международных научных конференциях.