

На правах рукописи

Виз.

ВАЛЛЕ АЛЕКСАНДРА АНДРЕЕВНА

**ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ЧЕРНОГО МОРЯ
КАК ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ИНДИКАТОР ИЗМЕНЕНИЙ
МОРСКОЙ СРЕДЫ**

Специальность 1.6.21 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Севастополь – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Институт природно-технических систем», в лаборатории морских климатических исследований

Научный руководитель:

Полонский Александр Борисович

член-корреспондент Российской академии наук, доктор географических наук, профессор, научный руководитель Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт природно-технических систем»

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН).

Защита диссертации

С диссертацией можно ознакомиться

Автореферат разослан «____» 202 г.

Учёный секретарь Диссертационного совета, кандидат наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Для России, как государства, имеющего выход к внутренним морям, мониторинг геоэкологического состояния морской среды является одним из важнейших направлений научных исследований.

Черное море – это крупнейшее в мире внутреннее море, не имеющее прямого выхода к океану, в которое поступает поверхностный сток почти с трети всей площади континентальной Европы. В результате Черное море подвергается постоянному интенсивному антропогенному воздействию. В течение последних нескольких десятилетий 20-го столетия возрастающее количество промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов, непосредственно сбрасываемых 17-ю европейскими странами в реки, впадающие в Черное море, и другие виды антропогенной нагрузки привели к катастрофической деградации черноморской экосистемы. Это проявилось, в частности, в значительном изменении концентрации растворенного кислорода в Черном море [Зайцев Ю.П. и др., 1989; Mee L., 1992; Zaitsev Y., 1994; Nixon S., 1995; Zaitsev Y. et al., 1997; Vinogradov M. et al., 1999]. Поэтому, можно сказать, что одним из индикаторов ухудшения экологического состояния вод Черного моря является изменения гидрохимических характеристиках вод, в частности изменение концентрации растворенного кислорода. Но, вместе с тем, концентрация растворенного кислорода непосредственно зависит от гидрологических характеристик морской среды (температуры, солености и плотности воды), которые меняются в достаточно больших пределах в результате региональных климатических изменений.

Достоверность результатов о роли кислородного режима как индикатора геоэкологического состояния морской среды напрямую зависит от качества исходных данных и корректности методов их обработки. Именно комплексный анализ пространственно-временной изменчивости концентрации растворенного кислорода с учетом климатических и антропогенных факторов позволяет выявить ключевые механизмы трансформации экосистемы Черного моря. Таким образом, разработка надежных подходов к анализу гидролого-гидрохимических

характеристик является важным условием для обеспечения достоверности оценки геоэкологического состояния морской среды.

Степень разработанности проблемы.

Теоретическую основу диссертационной работы составляют труды как отечественных, так и зарубежных исследователей в области изучения регионального мониторинга гидролого-гидрохимических характеристик вод Черного моря, как основных индикаторов геоэкологического состояния морской среды: Андрусова Н.И., Шпиндлера И.Б., Книповича Н.М., Чигирина Н.И., Леонова А.К., Филиппова Д.М., Тужилкина В.С., Косарева А.Н., Новицкого В.П., Белокопытова В.Н. Добржанской М.А., Богдановой А.К., Шульгиной Е.Ф., Oguz T., Stanev E.V., Capet A., Murray J.W. и др.

По результатам проведенного литературного анализа выявлено, что представления о долгопериодных изменениях гидролого-гидрохимических характеристик в Черном море с характерным масштабом приблизительно сто лет до начала данной работы были фрагментарны.

Цель диссертационной работы: изучение пространственно-временной изменчивости гидролого-гидрохимического режима как основного показателя геоэкологического состояния вод Черного моря под воздействием климатических и антропогенных процессов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **научные задачи:**

1. Проанализировать современное состояние проблем регионального климатического мониторинга гидролого-гидрохимических характеристик вод Черного моря как основных индикаторов геоэкологического состояния морской среды.

2. Собрать и систематизировать все доступные первичные материалы гидролого-гидрохимических наблюдений в Черном море за приблизительно столетний период. Создать комплекс программ для обработки этих данных.

3. Выполнить анализ статистической структуры гидролого-гидрохимических характеристик вод в глубоководной и северо-западной частях Черного моря.

4. Определить степень опасности экологического состояния вод Черного моря на основе анализа сезонной и междесятилетней изменчивости их гидролого-гидрохимических характеристик.

Объект исследования – гидролого-гидрохимические характеристики вод Черного моря.

Предмет исследования – долгопериодная изменчивость гидролого-гидрохимических характеристик как индикатор геоэкологического состояния вод Черного моря.

Методы исследования.

Для достижения поставленных в работе целей, был собран большой объем гидролого-гидрохимических данных, характеризующих климатическое и экологическое состояние вод Черного моря, а также его изменчивость за приблизительно столетний период. Основной массив данных включает в себя температуру и соленость морской воды, концентрацию растворенного кислорода, глубину видимости белого диска Секки, а также расход рек, впадающих в северо-западную часть моря. Автором создан взаимосвязанный комплекс авторских программ, с помощью которого проводится обработка и визуализация данных. Этот комплекс программ включает современные методы статистического анализа, обеспечивающие оценку точности результатов с заданным уровнем точности.

Научная новизна:

1. Создано современное авторское программное обеспечение с использованием одной из наиболее полных региональных баз данных, с удобным интерфейсом, позволяющее проводить выборку необходимых данных, обрабатывать их современными статистическими методами, включая проверку достоверности и визуализацию полученных результатов.

2. Получены новые количественные данные, описывающие гидролого-гидрохимические изменения в Черном море за последние 100 лет.

3. Показана степень влияния природных и антропогенных факторов на долговременные изменения гидрологических и гидрохимических характеристик вод Черного моря.

Практическая значимость результатов. Полученные результаты используются для усовершенствования учебных и рабочих программ по специальностям «Экология» и «Гидрометеорология» на базовой кафедре ИПТС «Мониторинг и теория климата» в Севастопольском государственном университете, а также успешно апробированы и интегрированы в учебный процесс на кафедре «Геоэкология и природопользование» Севастопольского филиала МГУ имени М.В. Ломоносова (при чтении курса лекций и практических занятиях по дисциплине «Региональная океанография»). Полученные результаты могут

быть использованы лицами, принимающими региональные управленческие решения. Они неоднократно обсуждались на различных общественно-политических мероприятиях и научно-популярных передачах Севастопольских телевизионных каналов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Авторское программное обеспечение с удобным интерфейсом, позволяющее проводить анализ долгопериодной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик вод Черного моря за почти столетний период с оценкой достоверности результатов с заданным уровнем точности.

2. Новые количественные характеристики долгопериодных вариаций гидролого-гидрохимического режима вод Черного моря как показателя геоэкологического состояния морской среды (за столетний период).

3. Вклад естественных и антропогенных факторов, определяющих долгопериодную изменчивость гидролого-гидрохимических характеристик в различных частях Черного моря.

Соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности 1.6.21 «Геоэкология» по пунктам:

1. Изучение состава, строения, свойств, процессов, физических и геохимических полей геосфер Земли как среды обитания человека и других организмов;

4. Глобальные и региональные экологические кризисы комплексные изменения окружающей среды и ее компонентов, приводящие к резкому ухудшению условий жизни и хозяйственной деятельности;

12. Оценка состояния водного режима территорий и геоэкологические последствия его изменения в связи с изменениями климатических параметров. Геоэкологический анализ влияния регулирования речного стока на водные, прибрежно-водные и наземные экосистемы и обоснование путей сохранения и восстановления водных и наземных экосистем;

14. Научные основы организации геоэкологического мониторинга природно-технических систем и обеспечение их экологической безопасности, разработка средств контроля состояния окружающей среды.

Достоверность результатов исследований обеспечивается:

– использованием не только современных судовых данных и данных с свободно-дрейфующих буев из банка океанографических данных

Института природно-технических систем, но и большого количества исторических данных, которые ранее практически не анализировались;

- применением авторского программного обеспечения, которое использует современные, многократно апробированные методы статистического анализа. Большинство результатов имеют 90–95% уровень статистической значимости;

- практической реализацией полученных результатов, подтвержденной свидетельствами об официальной регистрации программ для ЭВМ.

- результаты исследования успешно апробированы и интегрированы в учебный процесс кафедры «Геоэкологии и природопользования» Севастопольского филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в курс лекций «Океанология» и «Региональная океанография».

Апробация работы.

Результаты работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на следующих национальных и международных конференциях и семинарах: «Изменения климата и окружающей среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация» (Кисловодск, 2014), «Экобиологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление биологическими ресурсами», (Севастополь, 2015, 2016), «Системы контроля окружающей среды», (Севастополь, 2016, 2020, 2021, 2023, 2024, 2025), «Моря России», (Севастополь, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024), «Морские исследования и образование: Maresedu», (Москва, 2022, 2023, 2024), «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования», (Москва, 2023), «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий», (Майкоп, 2025), Workshop on Detecting Ocean Oxygen Change Trend in a Warming Climate(Beijing, China, 2025).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 17 статьях. Из них 17 публикаций входят в «Белый список» и наукометрическую базу Web of Science, 18 научных публикаций входят в сборники материалов и тезисов конференций различного уровня. Получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора.

Постановка задач исследования диссертационной работы проводилась совместно с научным руководителем, членом-

корреспондентом РАН, д. г. н., профессором А. Б. Полонским. Выбор методов исследования, анализ результатов и обсуждение выводов исследований, осуществлялись совместно с научным руководителем. Соискателем лично разработано программное обеспечение, проведены все численные расчеты, построены рисунки, графики, схемы и таблицы. Результаты, представленные в диссертации, автор лично докладывал на многочисленных всероссийских и международных научных конференциях.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников. Объем работы составляет 160 страниц машинописного текста, 52 рисунка и 10 таблиц. Список использованных источников включает в себя 230 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи, методы исследования, представлены научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, апробация полученных результатов и публикации по теме диссертации.

Глава 1 посвящена обзору современного состояния проблемы, анализу литературных источников, описывающих основные методы развития мониторинга гидролого-гидрохимического состояния вод Черного моря начиная с античных времен и заканчивая современностью, представленной в хронологическом порядке. Представлено физико-географическое описание Черного моря, рассмотрены характеристики его гидролого-гидрохимической структуры.

Глава посвящена описанию эволюции методов и подходов к исследованию Черного моря от Античности до середины XX века. В ней показано, что в древности научные исследования основывались исключительно на визуальных методах – прямом наблюдении и географическом описании местности. С конца XVIII – начала XIX века, благодаря развитию мореплавания, началось активное изучение Мирового

океана, а появление первых инструментов для измерения температуры и солёности воды стало важным шагом в развитии гидрологических наблюдений. В этот же период начали работу многочисленные береговые гидрометеорологические станции, что позволило перейти к систематическому сбору данных в акватории Черного моря. В главе отмечается, что в XX веке, в связи с прогрессом науки, техники и рыбопромысловой отрасли, возникла необходимость в более детальном исследовании отдельных частей Мирового океана, включая Чёрное море. Начиная с середины 1950-х годов, были организованы регулярные наблюдения за гидролого-гидрохимическим режимом вод Чёрного и Азовского морей, что положило начало развитию целостной системы геоэкологического мониторинга состояния морской среды.

Глава 2 посвящена анализу материалов и методов обработки данных. Ниже представлена характеристика собранного материала в Институте природно-технических систем с участием автора.

1. Общая характеристика используемых данных. Для более корректного выявления региональных особенностей распределения исследуемых характеристик вся акватория Черного моря была условно разделена на два района. Отдельно рассматривается северо-западная часть Черного моря (в качестве границы выбраны береговая черта от м. Калиакра до м. Сарыч (43°23'с.ш., 28°в.д. и изобата 100 м)) и глубоководная часть (ограниченную изобатой 1000 м). Разделение акватории Черного моря обусловлено тем, что влияние речного стока и его межгодовых, междесятилетних колебаний на изменчивость гидролого-гидрохимических характеристик существенно слабее в глубоководной части и сильнее в северо-западной части. Как известно в северо-западную шельфовую зону Черного моря впадают четыре крупные реки, обеспечивающие около 80% всего речного стока, поступающего в море. Принятое районирование акватории иллюстрирует рисунок 1, где приведено распределение содержания растворённого кислорода на поверхности в январе–марте; жирной линией показана изобата 1000 м.

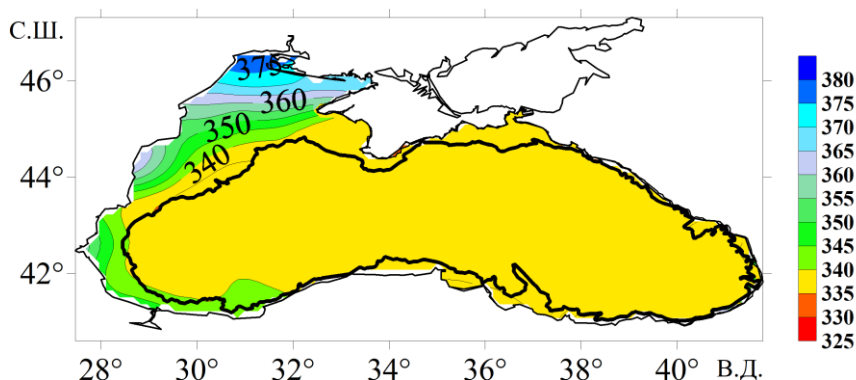


Рисунок 1 – Распределение содержания растворенного кислорода на поверхности в январе-марте (жирная линия–изобата 1000 м)

Для более точного анализа данные необходимо разделять по сезонам в верхнем 50-метровом слое. Ниже 50 м разделение по сезонам не проводится, т.к. сезонный ход на этих глубинах практически отсутствует.

2. Технические средства и методы сбора данных. Рассмотрены исторические и современные приборы и методы измерения температуры воды, солёности, концентрации растворенного кислорода. После тщательного изучения данных по температуре морской воды и солёности, полученных с помощью различных приборов и разными методами многими авторами сделан следующий вывод:

1. После введения необходимых поправок систематическая погрешность в объединённых массивах данных измерений сведена к минимуму;

2. Привлечение большого количества данных, полученных независимо и разными приборами, позволяют уменьшить случайную погрешность, что повышает точность и надёжность результатов.

3. Банк океанологических данных. При непосредственном участии автора в Институте природно-технических систем (ИПТС) создана база океанологических данных, которая систематически пополняется гидролого-гидрохимическими данными, полученными в экспедициях на научно-исследовательских судах, а также с буев Argo ежеквартально.

Банк состоит из:

1. База судовых гидрологических данных. Она включает в себя данные по температуре воды и солёности, которые были получены при помощи следующей аппаратуры: батометры, МБТ (механические батитермографы), ХВТ (одноразовые батитермографы), STD-зонды («Проводимость – Температура – Глубина») (таблица 1, рисунок 2).

2. База судовых данных по концентрации растворенного кислорода. Они были получены следующими способами: титрованием проб, отобранных с помощью батометров; измерениями с помощью CTD-зондов, оснащенных датчиками кислорода (таблица 1, рисунок 2).

3. База данных автономных буев-профилографов Argo. В банке океанологических данных Института природно-технических систем собраны данные по температуре воды, солености и концентрации растворенного кислорода за период с 2005 по 2024 гг. Эти данные находятся в открытом доступе на сайте (<http://www.argodatamgt.org/Access-to-data/Argo-data-selection> (дата обращения 01.12.2024.)). Свободно дрейфующие буи в Черном море проводят зондирование до глубины 1550 м (таблица 2, рисунок 2).

4. База морских гидрометеорологических данных (таблица 3, рисунок 2). Массив содержит данные со станций Одесса, Хорлы, Черноморское, Евпатория с рассчитанными среднемесячными, среднесуточными параметрами, срочными измерениями и данные по ежемесячному расходу реки Дунай.

Таблица 1. Количество гидролого-гидрохимических измерений с 1884 по 2024 гг.

Параметр, ед. измерения	Количество измерений	Количество станций	Период наблюдений
Температура воды, °C	6 154 889	207 755	1884–2024
Соленость, ‰	5 967 611	173 207	1884–2024
Концентрация растворенного кислорода, µM	343 100	42 253	1923–2024

Таблица 2. Количество гидролого-гидрохимических профилей автономных буев-профилографов Argo

Параметр, ед. измерения	Количество профилей	Период наблюдений
Температура воды, °C	10 173	2005–2024
Соленость, ‰	10 173	2005–2024
Концентрация растворенного кислорода, µM	3 488	2010–2024

Таблица 3. Количество гидрометеорологических измерений на морских станциях и стационарной платформе

Название станций	Количество измерений	Период наблюдений
Хорлы	80 127	1950–2008
Черноморское	84 960	1950–2008
Одесса	32 400	1915–2006
Евпатория	79 829	1950–2008
Ежемесячный расход р. Дунай, м ³ /с.	1008	1921–2004



Рисунок 2 – Структурные схемы баз данных по Черному морю

4. Контроль качества и обработка данных. Первичные данные подвергаются предварительной обработке, которая проводится в несколько этапов.

Первый этап – отбраковка грубых выбросов. Задавались границы для отсеечения нереально высоких и явно заниженных значений измеряемых параметров. Значениям, которые выходили за указанные границы, присваивался флаг брака.

Второй этап – приведение данных по глубине к стандартным горизонтам (для гидрологических станций) и регулярной сетке (для STD - зондирований), а также удаление дублирующих измерений.

Третий этап – проверка корректности географических координат станций (попадание на сушу, нереальная скорость судна между станциями), а также соответствия глубин измерения максимально возможной глубине в окрестности данной точки.

В результате применения описанной процедуры было отбраковано ~1% общего количества измерений.

Разработан комплекс авторских программ (рисунок 3, 4), позволяющий проводить статистическую обработку данных, вторичную обработку данных, визуализацию и анализ данных.

Описание работы программного обеспечения:

1. Выборка данных по годам, месяцу, горизонту.

2. Статистический контроль качества данных. Проводится в несколько этапов. В начале проверяются подчиняются выбранные данные нормальному закону распределения (распределение Гаусса). Для этого строились:

– гистограмма распределения,

– графики Q-Q (квантиль-квантиль);

– статистические тесты на нормальность по следующим критериям Шапиро-Уилка и Колмогорова-Сморнова.

Если на всех этапах выборки тесты показывают нормальное распределение, то применяем правило $\pm 3\sigma$ (трех сигм), если хотя бы на одном этапе ненормальное распределение, то применяем процентильный метод устранения случайных погрешностей.

При использовании процентильного метода из выборки удаляются самые низкие значения временного ряда, попадающие в первые 1–10% ранжированного ряда, и самые высокие значения превышающие 90–99-процентный порог. Величина порога выбирается оператором в зависимости от специфики решаемой задачи.

3. Расчет и визуализация данных.

Пространственно-временное осреднение данных проводилось двумя способами:

1. Простым среднеарифметическим усреднением данных по каждой субакватории, по каждому месяцу и по каждому году с последующим усреднением данных в зависимости от поставленных задач.

2. Оптимальная интерполяция данных за каждый месяц в узлы регулярной сетки и последующее среднеарифметическое усреднение этих данных.

Оптимальная интерполяция использовалась в виде метода «Кригинг», при этом для сравнения использовались и другие типы интерполяции как интерполяция по ближайшим точкам, линейная интерполяция, кубическая сплайн-интерполяция.

После проведенного сравнительного анализа сделан вывод, что оба описанных способа осреднения данных дают близкие результаты.

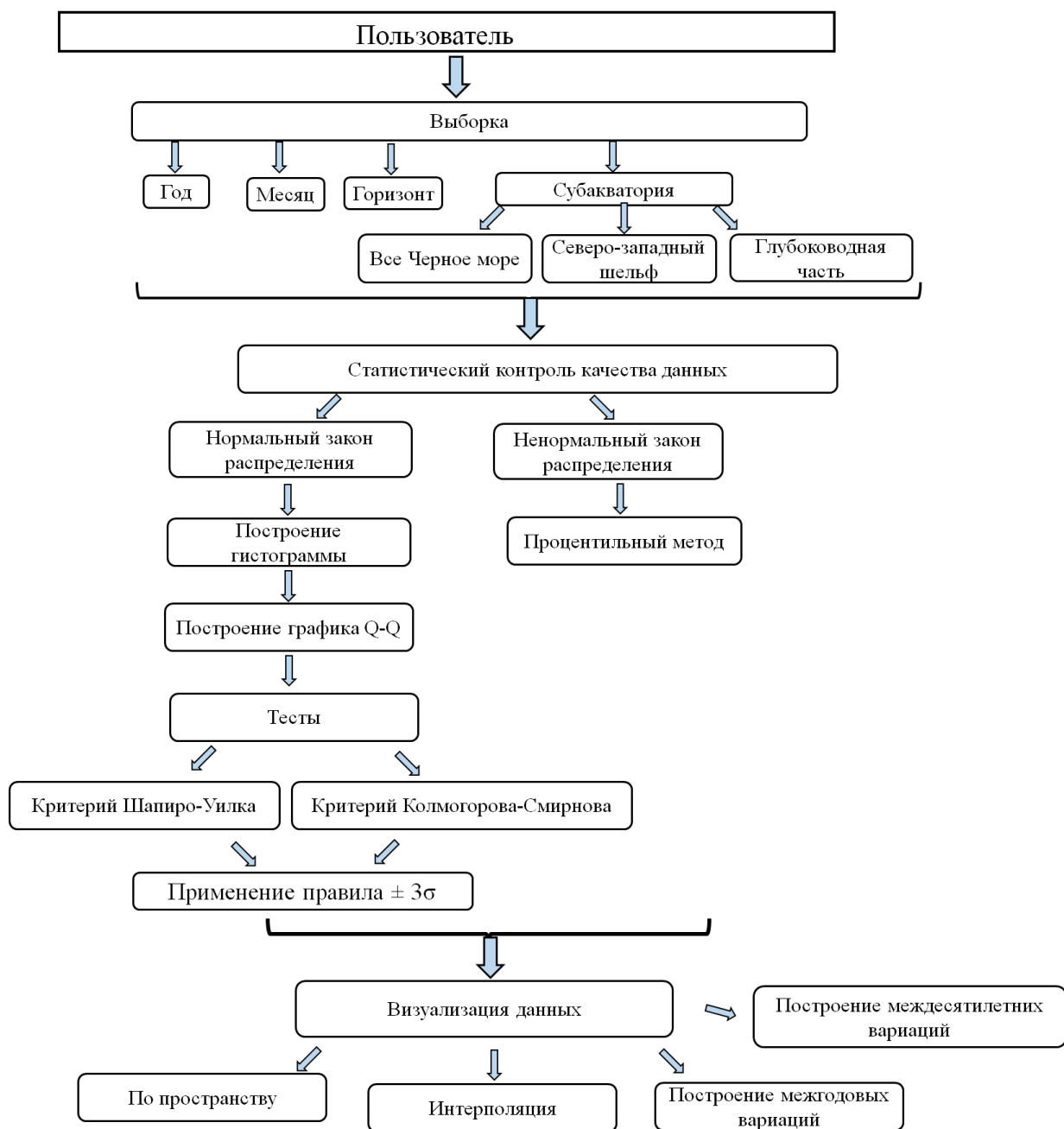


Рисунок 3 – Структурная схема работы с авторским программным обеспечением.



Рисунок 4 – Визуализация авторских программных продуктов для обработки данных

Глава 3 демонстрирует новые результаты по изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик вод Черного моря, полученные с помощью результатов обработки одной из наиболее полных в мире региональной базы данных, в том числе, с использованием авторского программного обеспечения. Рассматривается сезонная, междесятилетняя и долговременные тенденции в изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик вод Черного моря.

Получен осреднённый за почти столетний период сезонный ход концентрации растворенного кислорода и температуры в глубоководной

части Черного моря. В среднем наблюдается максимум в содержании кислорода в марте-апреле и минимум в августе. Впервые показано, что в отдельные периоды сезонный ход концентрации кислорода может существенно трансформироваться (рисунок 5).

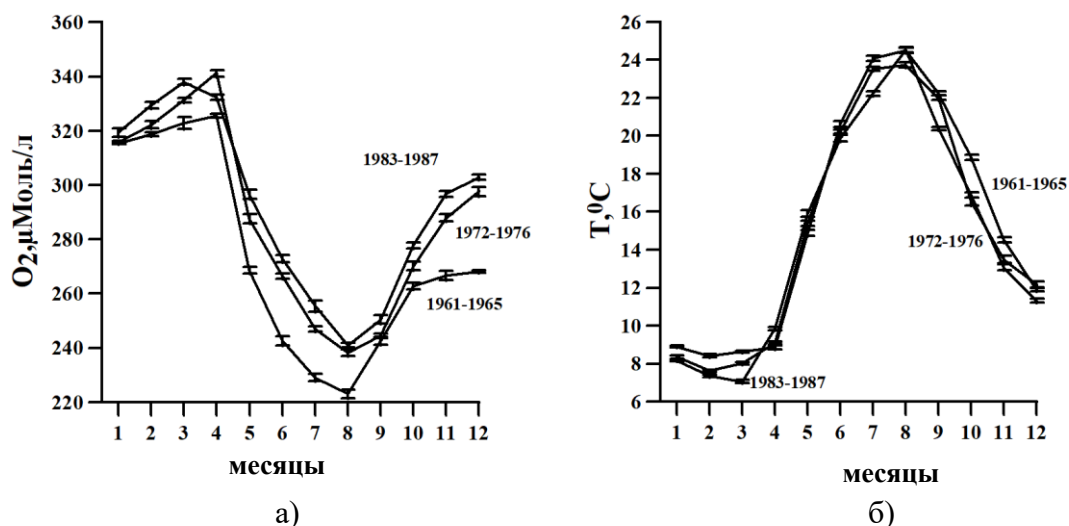


Рисунок 5 – Сезонный ход среднемесячных значений концентрации растворенного кислорода (а) и температуры (б) на поверхности Черного моря в глубоководной части за разные периоды времени

Проанализирована внутригодовая изменчивость температуры, солености, растворенного кислорода в поверхностном слое вод северо-западного шельфа Черного моря, включая приустьевую область Дуная. Подтверждено абсолютное преобладание годовой гармоники в сезонной изменчивости большинства анализируемых гидролого-гидрохимических характеристик на большей части рассмотренной акватории шельфа (рисунок 6). Исключение составляет соленость в приустьевой области Дуная. Здесь полугодовая гармоника описывает более 60% общей дисперсии, обусловленной сезонной изменчивостью солености, что связано с особенностями ветрового режима в регионе.

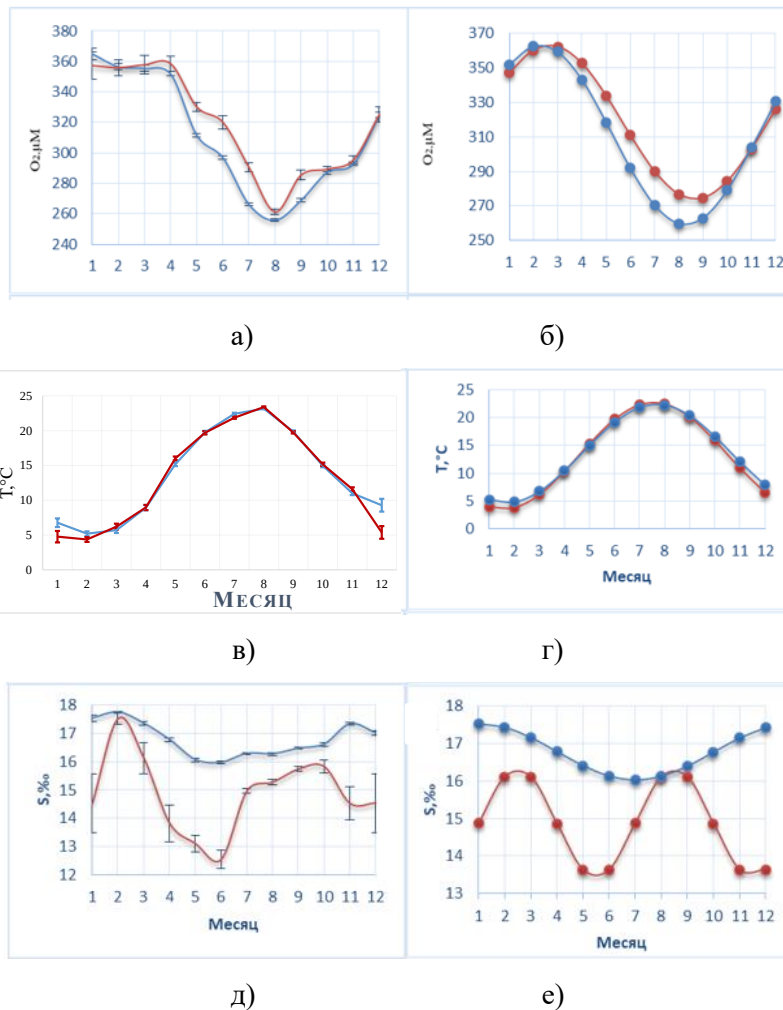


Рисунок 6 – Сезонный ход кислорода (а), температуры (в) и солености (д) в северо–западной части Черного моря (синим цветом) и в устье р. Дунай (красным цветом) в поверхностном слое моря (вертикальные отрезки – доверительный интервал с вероятностью 99%).

Осредненный сезонный ход кислорода (б), температуры (г) и солености (е), аппроксимированный гармоникой с периодом 12 месяцев для кислорода, температуры и с периодом 6 месяцев для солености

Впервые обнаружено, что и в северо-западной, и в открытой частях моря в период с 1923 по 1932 гг. наблюдались самые низкие за последние сто лет концентрации кислорода, растворенного в поверхностном слое вод (рисунок 7). В северо-западном шельфе такое понижение наблюдается в поверхностном 10-метровом слое вод, глубже такой тенденции не наблюдается. Это было вызвано не только аномальным повышением температуры вод (рисунок 8), но и пониженным речным стоком реки Дунай, который привел к повышению прозрачности вод северо-западного шельфа (рисунок 9), а также к нехватке растворенного кислорода. Второй, наиболее хорошо изученный минимум концентрации растворенного

кислорода, наблюдавшийся в последние десятилетия 20-го века, также является следствием действия комплекса факторов – эвтрофикации вод северо-западного шельфа Черного моря, уменьшения стока Дунай, повышения температуры воды поверхностного слоя. В отличие от 1923–1932 гг., эвтрофикация играла значительно более важную роль в уменьшении концентрации растворенного кислорода в этот период. На это указывает, в частности, резкое падение абсолютных величин коэффициента корреляции между изменениями температуры воды и концентрации растворенного в ней кислорода в последние десятилетия 20-го века. Процесс распространения эвтрофикации на открытую часть акватории был сглажен наблюдавшимся в 1980-е гг. похолоданием верхнего слоя черноморских вод.

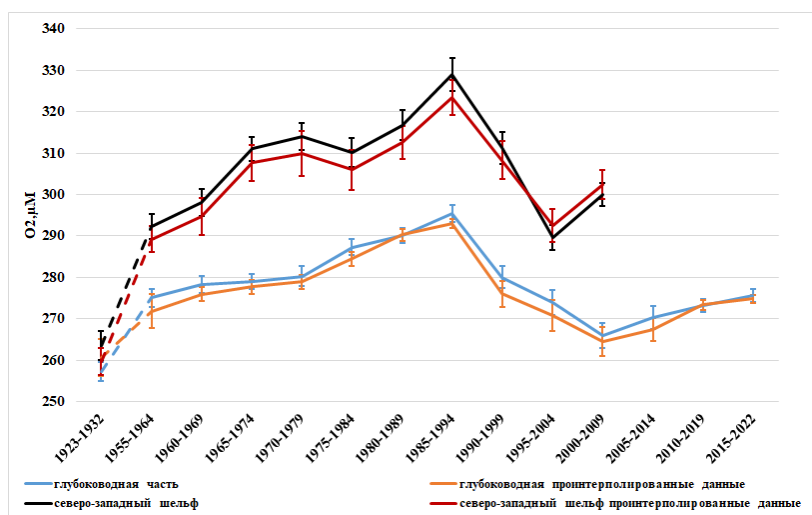


Рисунок 7 – Междесятилетняя изменчивость концентрации растворенного кислорода в глубоководной части моря (показано: синим цветом – осредненные первичные данные; оранжевым цветом – осредненные проинтерполированные данные) и на северо-западном шельфе (показано: черным цветом – осредненные первичные данные; красным цветом – осредненные проинтерполированные данные) с 1923 по 2022 гг. в поверхностном слое в мае – июне. Вертикальные отрезки – 95% доверительный интервал

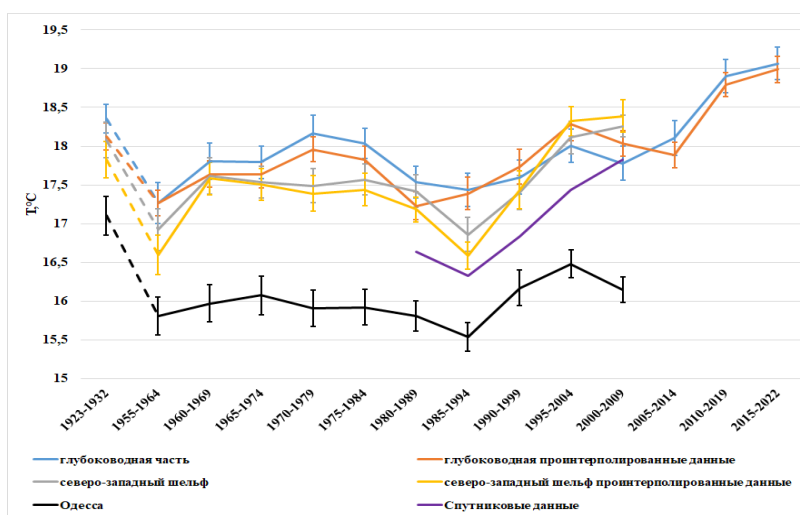
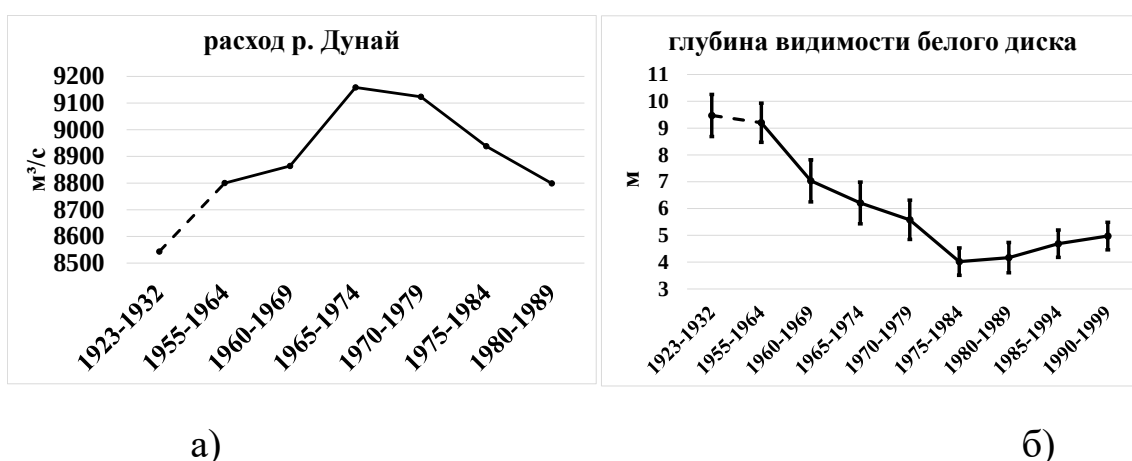


Рисунок 8 – Междесятилетняя изменчивость температуры поверхностного слоя в мае–июне в глубоководной части Черного моря (показано: синим цветом – первичные данные; оранжевым цветом – проинтерполированные данные), на северо-западном шельфе (дано: серым цветом – по первичным данным контактных измерений; желтым цветом – проинтерполированные данные), ТПИМ на северо-западном шельфе (по спутниковым данным показано фиолетовым цветом) и на станции в Одессе (дано черным цветом). Вертикальные отрезки – 95%-ый доверительный интервал



а)

б)

Рисунок 9 – Междесятилетняя изменчивость среднедекадных расходов р. Дунай (а) и глубины видимости белого диска (б) на СЗШ Черного моря в мае – июне соответственно 1923-1989 и 1923-1999 гг.

Впервые показано, что на междесятилетнем масштабе, и в зимний (рисунок 10), и в летний сезон (рисунок 11), концентрация растворенного кислорода характеризуется выраженной квазипериодической изменчивостью с типичным временным масштабом в несколько десятков лет. В зимний период эта изменчивость в основном связана с региональными изменениями температуры морской воды. Летом (особенно, на северо-западном шельфе) важны и другие факторы (вариации стока рек, температуры речных вод, фотосинтез и др.). Вследствие этого, в

1990-е и начале 2000-х гг. в летний период температура поверхностного слоя вод северо-западного шельфа превысила температуру поверхности в открытой части моря и одновременно уменьшилась концентрация растворенного кислорода.

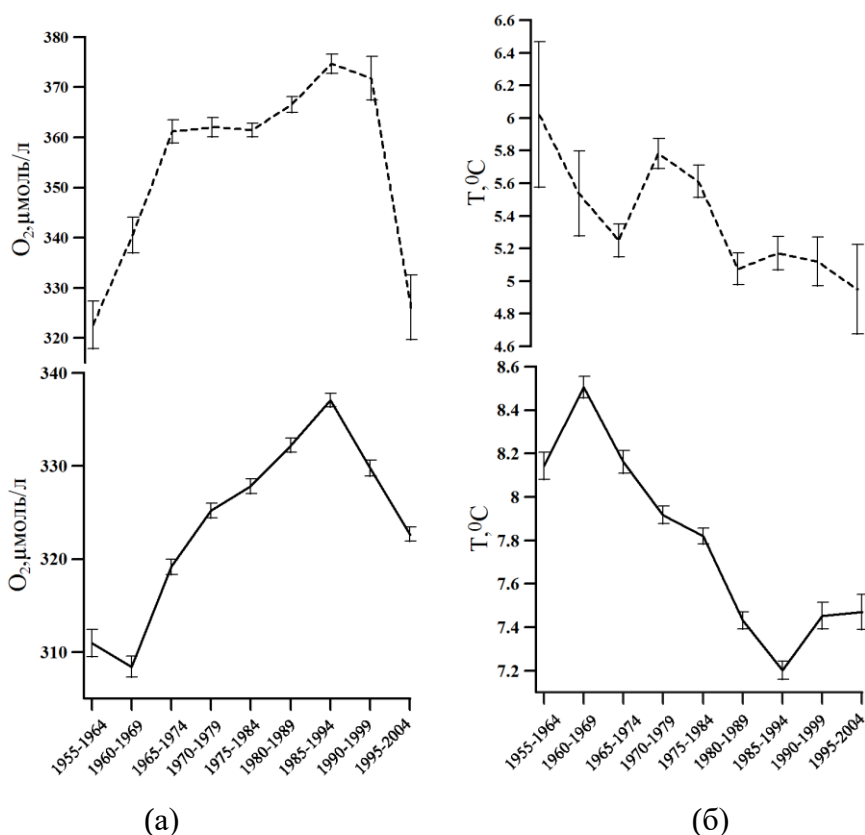


Рисунок 10 – Междесятилетняя изменчивость средне-декадных значений кислорода (а) и температуры (б) на поверхности в глубоководной (показано сплошными кривыми) и северо-западной (показано пунктиром) частях Черного моря для января-марта (вертикальные отрезки – 95% доверит. интервал).

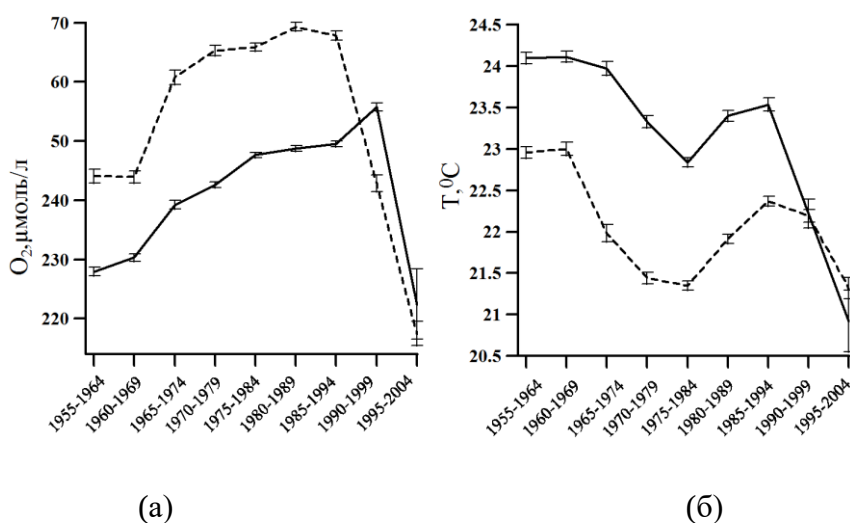


Рисунок 11 – Междесятилетняя изменчивость средние-декадных значений кислорода (а) и температуры (б) на поверхности в глубоководной (показано сплошными кривыми) и северо-западной (показано пунктиром) частях Черного моря для июля-сентября (вертикальные отрезки – 95% доверит. интервал).

Получено, что глубже ВПС содержание кислорода в целом уменьшается со временем. Так, на горизонте 100 м концентрация растворённого кислорода уменьшилась с середины XX века к 2024 г. на 83%. Причём эти тенденции не сопровождаются выраженным трендом в поле температуры (рисунок 12).

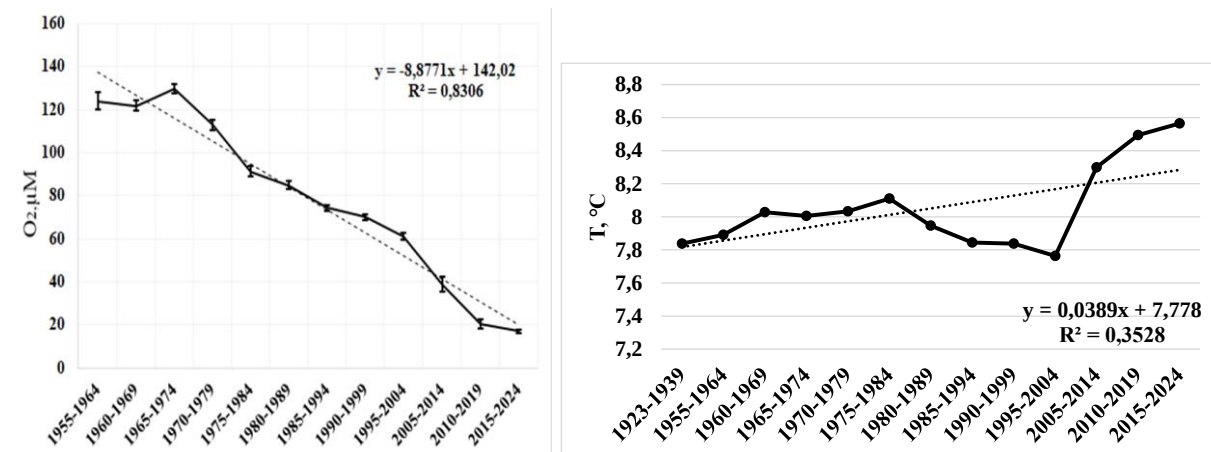


Рисунок 12 – Междесятилетняя изменчивость среднедекадных значений концентрации растворенного кислорода на горизонте 100 м в глубоководной части Черного моря (вертикальные отрезки – 95% доверит. интервал)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена исследованию долгопериодной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик как индикатора геоэкологического состояния вод Черного моря.

Были впервые достигнуты следующие значимые результаты:

1. Собраны и систематизированы гидролого-гидрохимические характеристики вод Черного моря за примерно столетний период.

2. Разработано авторское программное обеспечение с удобным интерфейсом, позволяющее проводить выборку необходимых данных, обрабатывать их современными статистическими методами, включая проверку достоверности результатов.

3. Проанализирована внутригодовая изменчивость растворенного кислорода и температуры в слое 0–150 м глубоководной части Черного моря. Подтверждено, что в верхнем перемешанном слое концентрация растворенного кислорода достигает максимума в марте-апреле, а минимума в августе. Амплитуда сезонного хода с глубиной уменьшается и

на горизонте 150 м она падает практически до уровня шумов. Сезонный ход кислорода, согласованный с внутригодовыми изменениями температуры, принципиально не изменился за почти столетний период наблюдений. Вместе с тем, его амплитудно-фазовые характеристики значительно изменяются под действием климатических вариаций. Промежуточный слой на масштабах нескольких десятилетий характеризуется понижением кислорода и ростом температуры, которые продолжаются и в последние годы.

4. Уточнены количественные характеристики сезонной изменчивости растворенного кислорода, температуры, солености вод северо-западного шельфа Черного моря и приустьевой зоны Дуная по данным наблюдений с 1955 по 2015 гг. Подтверждено, что амплитуды внутригодовых колебаний температуры, солености и концентрации растворенного кислорода поверхностного слоя вод северо-западного шельфа Черного моря значительно превышают соответствующие амплитуды в глубоководной части Черного моря. При этом сезонная изменчивость величины солености на участке акватории прилегающей к устью Дуная более чем в 2 раза превышает по амплитуде соответствующую сезонную изменчивость в северо-западном шельфе Черного моря. Сезонная изменчивость описанных характеристик формируется под действием комплекса факторов. В частности, значительное влияние на распределение солености и растворенного кислорода в приустьевой части Дуная оказывает ветровой режим, который характеризуется полугодовой периодичностью.

5. Впервые обнаружено, что аномально низкий расход Дуная в 1920-х – начале 1930-х гг. оказал существенное влияние на гидролого-гидрохимический режим вод северо-западной и открытой частях Черного моря. Такое падение водности главной черноморской реки явилось одной из причин экстремально низких концентраций растворенного кислорода в верхнем 10-метровом слое вод, сопровождающихся повышением солености. Эвтрофикация (активная фаза которой началась с 1970-х – начала 1980-х гг.) стала основной причиной повторного понижения концентрации кислорода, которое было менее выражено из-за последовавшего за этим похолодания. В период с конца 20-го – начала 21-го века в поверхностном слое наблюдается рост температуры и солености, который привел к снижению концентрации растворенного кислорода.

6. Показано, что на междесятилетнем масштабе концентрация растворенного кислорода в Черноморском верхнем перемешанном слое характеризуется выраженной квазипериодической изменчивостью с типичным временным масштабом в несколько десятков лет. Ее амплитуда примерно вдвое меньшей амплитуды внутригодового хода, которая составляет ~ 50 $\mu\text{Моль/л}$ в открытой части моря и ~ 75 $\mu\text{Моль/л}$ – на северо-западном шельфе. В зимний период эта изменчивость в значительной степени связана с долгопериодными изменениями температуры воды. Летом важны и другие факторы (вариации стока рек, выносящих в море биогенные элементы, сопутствующая эвтрофикация вод и др.). В отличие от верхнего перемешанного слоя, в холодном промежуточном слое и прилегающем термоклине наблюдается долговременное уменьшение содержания растворенного кислорода.

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для оценки геоэкологического и климатического состояния вод Черного моря и разработки эффективной системы мониторинга.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В дальнейшем планируется расширить данную тему используя апробированную методику. Применение данной методики позволит осуществлять наблюдения за другими регионами Мирового океана с целью экологического и климатического контроля.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в «Белый список»:

1. Полонский А.Б., Огородова А.А. Временная изменчивость содержания кислорода в верхнем слое глубоководной части Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2014. №. 20. С. 149–152.
2. Полонский А.Б., Огородова А.А. Пространственно-временная изменчивость поля кислорода в глубоководной части Черного моря в зимний период // Системы контроля окружающей среды. 2015. №. 2 (21). С. 74–79.
3. Мельников, В.В., Полонский, А.Б., Котолупова А.А. и др. GIS Института природно-технических систем // Системы контроля окружающей среды. 2016. №. 4 (26). С. 49–55.
4. Новикова А.М., Котолупова А.А. Об опыте использования метода кригинга в программах Surfer и QGIS для морских климатических

исследований // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2016. №. 4 (26). С. 59–67.

5. Полонский А.Б., Валле А.А. Определение сезонного хода и тенденции изменений концентрации растворенного кислорода и температуры в верхнем слое глубоководной части Черного моря по современным данным // Системы контроля окружающей среды. 2020. №. 2 (40). С. 134–143.

6. Валле А.А., Гребнева Е.А., Полонский А.Б. Анализ сезонной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик поверхностных вод северо-западной части Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2020. №. 3 (41). С. 39–48.

7. Валле А.А., Полонский А.Б. Особенности сезонной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик подповерхностных вод северо-западной части Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2021. №. 2 (44). С. 7–15.

8. Валле А.А. О мониторинге гидролого-гидрохимического режима вод Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4 (46). С. 5–13. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-5-13

9. Валле А.А. Особенности междесятилетней изменчивости кислородного режима в весенний сезон в Черном море // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 3 (49). С. 5–11. DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-5-11

10. Валле А.А., Полонский А.Б. О причинах долговременных тенденций в изменчивости концентрации растворенного кислорода и солёности в области холодного промежуточного слоя Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2023. № 2 (52). С. 7–17 . DOI: 10.33075/2220-5861-2023-2-07-17

11. Валле А.А. Долговременные тенденции в изменчивости концентрации растворенного кислорода и солёности под холодным промежуточным слоем вод Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2023. № 4 (54). С. 71–77 . DOI: 10.33075/2220-5861-2023-4-71-77

12. Валле А. А., Губарев А.В., Полонский А.Б. Современное состояние банка океанологических данных Института природно-технических систем // Системы контроля окружающей среды. 2024. № 3 (57). С. 88–98. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-3-88-98

13. Polonsky A.B., **Kotolypova A. A.** Long-period variability of oxygen dissolved in Black Sea waters // Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 476. No. 1. P. 1084–1088. DOI 10.1134/S1028334X1709015X.

14. Polonsky A. B., **Kotolupova A.A.** Long-term variability of the dissolved oxygen content and water temperatures in the upper layer of the Black Sea // Oceanology. 2019. Vol. 59. No.1. P. 17–26. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030-157459122-32>

15. Polonsky A. B., **Valle A. A.** Reasons for the Long-Term Variability of the Dissolved Oxygen Concentration in the Upper Layer of the Black Sea // Doklady Earth Sciences. Moscow: Pleiades Publishing, 2024. Vol. 516. No.1. P. 768–773. DOI: 10.1134/S1028334X24600853

16. Polonskii A. B., **Valle A. A.** Centennial Variability of Dissolved Oxygen in the Upper Layer of the Black Sea // Russian Meteorology and Hydrology. 2024. Vol. 49. No.12. P. 1110-1117. DOI: 10.3103/S1068373924120100

17. Polonsky A. B., **Valle A. A.** Causes of Abnormally Low Concentrations of Dissolved Oxygen On Decadal Time Scales in the Northwestern Black Sea // Atmospheric and Oceanic Optics. 2025. Vol. 38. Suppl. 1. pp. S17–S24. DOI: 10.1134/S1024856025700721

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024669874. Программа для расчета столетней изменчивости концентрации растворенного кислорода, температуры и солености в Черном море для оценки климатических изменений / **А.А. Валле**. Правообладатель Валле А.А. № 2024668409; дата поступления 05.08.2024 г., зарегистрировано 22.08.2024 г.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023685280. Программа визуализации полей концентрации растворенного кислорода для оценки климатических изменений / **А.А. Валле**. Правообладатель Валле А.А. № 2023684746; дата поступления 15.11.2023 г., зарегистрировано 24.11.2023 г.

Внедрении результатов

Успешно апробированы и интегрированы в учебный процесс на кафедре «Геоэкология и природопользование» Севастопольского филиала МГУ имени М.В. Ломоносова при чтении курса лекций и практических занятиях по дисциплине «Региональная океанография».