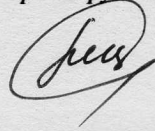


*На правах рукописи*

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Лиса', written in a cursive style.

**Нецветаева Ольга Петровна**

**КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ БЕЛОГО МОРЯ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Архангельск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

**Научный руководитель:** доктор географических наук  
**Коробов Владимир Борисович**

**Официальные оппоненты:** **Коновалов Сергей Карпович**,  
доктор географических наук, член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН»

**Коршенко Александр Николаевич**,  
кандидат биологических наук, заведующий Лабораторией мониторинга загрязнения морской среды Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет"

Защита состоится «12» мая 2021 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.239.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский просп., д. 36, г. Москва, 117997.

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

Автореферат разослан «19» марта 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Кандидат физико-математических наук **Соловьев Дмитрий Александрович**



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Белое море административно включено в Арктическую зону Российской Федерации (АЗРФ), относится к бассейну Северного Ледовитого океана и по ряду причин представляет собой уникальный водоем (Пантюлин, 2015). В настоящее время на водосборе Белого моря преобладают условно-фоновые участки (Толстикова и Чернов, 2014), сохранившие свои первоначальные природные характеристики. Однако, при сохранении существующих тенденций, экологическая ситуация здесь в ближайшее время может заметно ухудшиться, поэтому проведение постоянного мониторинга качества вод с оценкой кислородных условий, являющихся косвенной характеристикой их качества, представляется объективной необходимостью.

Это тем более необходимо, что в новом тысячелетии в различных морских бассейнах наметилась тенденция к активизации заморных явлений, зоны с гипоксическими и аноксическими условиями расширяются и появляются в несвойственных для этих явлений районах. Рост числа прибрежных акваторий, подверженных гипоксии, в последние десятилетия рассматривают как глобальный вызов человечеству (Diaz and Rosenberg, 2008; Breitburg et al., 2009; Zhang et al., 2010) и связывают с глобальным изменением климата (Gewin, 2010).

Хотя в Белом море дефицит кислорода не обнаруживался в предыдущих исследованиях, за исключением небольших локальных участков, где наблюдаются застойные явления (например, губа Канда в вершине Кандакшского залива), теоретически в придонных слоях и в углублениях дна может наблюдаться недостаток или полное отсутствие кислорода (Зенкевич, 1947, 1956), например, в глубоководной впадине Бассейна Белого моря, где отмечаются глубины до 350 м.

Наряду с глобальным изменением климата, важнейшим фактором в ухудшении кислородного режима выступает антропогенное эвтрофирование водоемов (Diaz and Rosenberg, 2008; Levin et al., 2009). Для Белого моря в этом

случае угрозу представляет развитие нефтегазовой отрасли и военное присутствие в северных широтах, а также усиление интенсивности морских грузоперевозок. Учитывая важность приведенных аспектов для развития экономики Российской Федерации, рост антропогенной нагрузки в АЗРФ в целом и Белом море как её составляющей неизбежен. При всем при этом именно Белое море может стать одним из наиболее загрязнённых морей российской Арктики ввиду того, что оно является важнейшей транспортной артерией для перевозки нефтяных углеводородов танкерами, объём которых уже измеряется миллионами тонн в год. С увеличением грузоперевозок возрастает и риск возникновения аварийных ситуаций, в том числе и нефтяных разливов, от которых естественная очистка в Арктике, в отличие от районов с умеренным климатом, может длиться десятилетия (АМАР Assessment 2002..., 2004; Диагностический анализ..., 2011), а ликвидация последствий сопряжена с большими трудностями (Губайдуллин и др., 2016).

Важнейшим фактором при рассмотрении кислородного режима Белого моря является речной сток, составляющий ежегодно около 4 % от всего объема вод моря (Гидрометеорология...Вып. 1..., 1991), хотя расчёты суммарного речного стока в абсолютном выражении варьируются в диапазоне от 227,25 км<sup>3</sup>/год до 463 км<sup>3</sup>/год (Гидрометеорология...Вып. 1..., 1991; Гордеев, 2004; Белое море и его водосбор..., 2007; Булавина, 2017). Наибольшее влияние оказывает сток Северной Двины со среднегодовым значением 101 км<sup>3</sup> (Гордеев, 2004). Поэтому при рассмотрении кислородного режима Белого моря представляется важным рассмотрение и кислородного режима устьевой области Северной Двины, особенно учитывая тот факт, что эта область относится к числу наиболее урбанизированных, промышленно и транспортно освоенных на Севере России.

Имеющиеся сведения о кислородном режиме Белого моря на данный момент устарели: последнее наиболее широкое его исследование приведено в монографии «Система Белого моря. Том II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера», изданной в 2012 г.,

охватывающее эпизодически временной период 1991–2004 гг., а до этого в монографии «Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. II. Белое море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биопродуктивности», изданной в рамках проекта «Моря СССР» в 1991 г., где были обобщены данные за период 1958–1984 гг. В то же время за последующий период накоплены большие массивы новых данных, позволяющие получить новые сведения о кислородном режиме Белого моря и устьевой области Северной Двины как объекта, оказывающего заметное влияние на все без исключения процессы в море.

**Цель работы:** исследовать кислородный режим Белого моря и устьевой области Северной Двины по современным натурным данным. В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Изучить условия формирования кислородного режима в Белом море и устьевой области Северной Двины.
2. Сформировать массив исходных данных о содержании растворенного кислорода в водах Белого моря и устьевой области Северной Двины из открытых источников, а также при личном участии в экспедициях.
3. Выявить тенденции пространственно-временной изменчивости концентрации растворенного кислорода и степени насыщения кислородом в водах Белого моря и устьевой области Северной Двины.
4. Исследовать связи степени насыщения кислородом с температурой, соленостью и содержанием хлорофилла «а» в водах Белого моря.
5. Районировать акваторию Белого моря по показателю степени насыщения вод кислородом и уточнить сеть экологического мониторинга.

**Научную новизну исследования составляют основные положения, выносимые на защиту:**

1. Установлено, что для внутригодового хода степени насыщения кислородом характерно ее неуклонное снижение с мая по ноябрь (на 10,53 % в поверхностном слое и на 2,18 % в придонном), в то время как концентрация растворенного кислорода меняется синхронно с изменениями температуры: с мая

по август при нагревании вод концентрация кислорода снижается, а осенью охлаждение вод приводит к ее росту. В районах с однородной структурой вод сезонная изменчивость кислородных показателей проявляется во всей толще вод, а в глубоководных районах со стратифицированной структурой она ограничивается глубиной в 100–120 м.

2. В результате рассмотрения межгодовой динамики концентрации растворенного кислорода в водах Белого моря за 36 лет (1979–2014 гг.) выделено три периода с различной направленностью трендов: 1979–1982 (рост), 1982–2005 (спад) и 2005–2014 (рост). При этом увеличение концентрации кислорода имело место в периоды похолодания вод моря, а снижение – в период потепления. Смена трендов степени насыщения кислородом запаздывала на три года и происходила в 1985 и 2008 гг.

3. Впервые показана связь степени насыщения кислородом в водах Белого моря с температурой, соленостью и содержанием хлорофилла «а» без учета взаимного влияния множества факторов друг на друга. Рост температуры приводит к росту насыщенности ( $r = 0,85$ ): в более теплых водах активнее идет продуцирование кислорода. Но параллельно активизируются и процессы окисления мертвой органики. Поэтому после рассмотрения соотношения продукционных и деструкционных процессов стало ясно, что в Белом море главенствующую роль в изменчивости степени насыщения кислородом играет не температура, а соотношение этих процессов. Сильная связь насыщения кислородом с хлорофиллом «а» ( $r = 0,82$ ) определяется тем фактом, что они изменяются в результате одного и того же процесса – фотосинтетической активности. Между насыщенностью кислородом и соленостью получена слабая корреляция ( $r = 0,42$ ), однако по графику изменения насыщенности в зависимости от солености прослеживается влияние на кислородный режим моря стоковой фронтальной зоны в Двинском заливе и различия в степени насыщения кислородом беломорских и баренцевоморских вод.

4. Впервые исследован кислородный режим устьевой области Северной Двины в осенний и зимний сезоны (ранее такие исследования проводились

только для теплого времени года). Установлено, что зимой степень насыщения вод кислородом снижается более чем в два раза по сравнению с осенними показателями, но в оба сезона воды хорошо перемешаны, отсутствуют значительные колебания насыщенности кислородом вдоль русла и в течение приливного цикла. На картах показано, что приток этих вод в Двинский залив проявляется в виде областей с пониженной насыщенностью кислородом.

**Научная и практическая значимость работы.** Полученные результаты диссертационного исследования дополняют уже существующие сведения о кислородном режиме Белого моря, не противоречат им и могут быть использованы в составлении прогнозов для рыбохозяйственных организаций и учреждений, для экологического обоснования проектных решений различных отраслей экономики, для написания учебных пособий, при обучении студентов естественнонаучных специальностей. Для построения карт распределения степени насыщения кислородом вод по акватории Белого моря совместно с А.С. Лоховым разработано специальное приложение «oxygen\_interp\_build», которое может быть использовано в дальнейшем при построении карт распределения по акватории моря других показателей. В результате проведенного районирования акватории Белого моря по степени насыщения кислородом его вод предложена новая сеть мониторинга для трех сезонов – весны, лета и осени, которая позволяет оптимизировать материальные и временные затраты при проведении экспедиционных работ без потери информативности.

**Методология и методы исследования.** Исходные данные о содержании растворенного кислорода в водах получены методом Винклера (Сапожников, 1988; РД 52.10.243–92; Руководство по химическому анализу..., 2009; РД 52.10.736–2010). Расчет степени насыщения кислородом проводился с использованием стандартного соотношения (Weiss, 1970). Исходные данные о содержании в водах хлорофилла «а» получены методом спектрофотометрирования экстракта пигментов (ГОСТ 17.1.4.02–90).

При обработке исходных данных использовались статистические, математические (интерполяция) и аналитические методы, а также программное обеспечение: Microsoft Office Word и Excel, IBM SPSS Statistics, Grapher, Surfer, MapInfo, QGIS, Photoshop и специально разработанное приложение «oxugen\_interp\_build». В основе построения карт заложен метод RBF-ML (вариация интерполяционного алгоритма RBF (Radial Basis Function) с поддержкой многослойности), профилей – метод Кригинга (Kriging). Градуировка шкалы для районирования акватории проведена посредством теории нечетких множеств, согласно которой интервалы шкалы устанавливаются при помощи функции принадлежности экспертным путём (Коробов, 2005, 2008). Кратчайший маршрут по уточненной сети мониторинга разработан с помощью метода ближайшего соседа.

**Степень достоверности.** Диссертационная работа основана на натуральных данных, полученных стандартными общепринятыми в океанологической практике методами с применением современного оборудования.

**Апробация.** Основные положения диссертационного исследования представлялись на XXI, XXII и XXIII Международных научных конференциях (Школах) по морской геологии (Москва, 2015, 2017 и 2019), конференции «Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2016» (Архангельск, 2016), Всероссийской научной конференции с международным участием и XXXI пленарном межвузовском координационном совещании «Современные проблемы эрозионных, русловых и устьевых процессов» (Архангельск, 2016), заседании Ученого совета Физического направления ИО РАН (Москва, 2019), Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование MARESEDU–2020» (Zoom, 2020).

**Личный вклад автора** заключается в непосредственном участии во всех этапах диссертационного исследования, начиная от получения натуральных данных и сбора их из открытых источников, заканчивая написанием текста диссертации, подготовкой публикаций в научные журналы и представлением результатов



исследования на всероссийских и международных конференциях. Лично автором проведено определение содержания растворенного кислорода в пробах воды из устьевого области Северной Двины, отобранных сотрудниками СЗО ИО РАН в 2014 и 2015 гг., отбор проб воды Белого моря с определением в них содержания растворенного кислорода в 4 экспедициях Северного УГМС (2012, дважды в 2013, 2014 гг.). Статистическая обработка исходных данных, а также построение графического материала выполнено лично автором.

**Публикации соискателя по теме диссертации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 12 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК (на момент публикации), одна из которых – в научном журнале, входящем также в базу Web of Science, 1 статья в научном журнале, входящем в базу РИНЦ и 6 в материалах конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 203 наименования, и двух Приложений. Общий объем диссертации составляет 131 страницу и включает 40 рисунков и 8 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность и глубокую признательность за постановку научной проблемы и всестороннюю помощь научному руководителю д.г.н. В.Б. Коробову. Автор благодарит д.г.н П.Н. Маккавеева и д.г.н. И.В. Мискевича за проявленное внимание к работе, ценные замечания и предложения, а также к.г.н. М.И. Зметную, к.г.н. Е.И. Котову за плодотворное сотрудничество и А.С. Лохова за разработку приложения «oxugen\_interp\_build».

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении поставлены цель и задачи исследования, обоснована актуальность выбранной темы, ее научная новизна, научная и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту, описаны

методология и методы, применяемые в работе, представлены сведения о степени достоверности и апробации результатов, а также личный вклад автора.

В **Главе 1** сделан литературный обзор. Показана значимость кислорода для Земли в целом как фактора, определяющего окислительно-восстановительные условия среды, возможность развития жизни, миграционные способности большой группы элементов. Описан процесс, являющийся основным источником кислорода на Земле – кислородный фотосинтез. Приведены примеры практического использования показателей содержания растворенного кислорода в морских водах. Обосновано использование показателя степени насыщения кислородом, т.е. процентного отношения измеренной концентрации растворенного кислорода к его растворимости, для объективной оценки избытка или дефицита кислорода. Перечислены процессы, влияющие на величину концентрации кислорода в морских водах. Приведены районы Мирового океана с гипоксическими и аноксическими условиями, а также поставлена проблема деоксигенации. Обозначена теоретическая возможность возникновения дефицита кислорода в придонном слое глубоководной части Белого моря ввиду его конфигурации, гидрологического режима и изменяющихся условий окружающей среды, таких как глобальное изменение климата и рост антропогенной нагрузки.

В **Главе 2** дана физико-географическая характеристика Белого моря и устьевой области Северной Двины. Также рассмотрены особенности формирования кислородного режима в Белом море и история его изучения. Рассмотрена экологическая обстановка в районе исследования. Отмечено возрастающее антропогенное воздействие на Мировой океан, в том числе и на Белое море с его водосбором.

В **Главе 3** охарактеризован массив исходных данных, который представляет собой таблицу, где содержится информация о температуре, солености и содержании растворенного кислорода на стандартных океанографических горизонтах Белого моря. Для поверхностного горизонта также приведены данные о содержании хлорофилла «а». Для каждой станции

мониторинга указаны ее номер, координаты, месяц, глубина места и горизонты отбора проб. Расположение станций отмечено на карте-схеме (рис. 1).

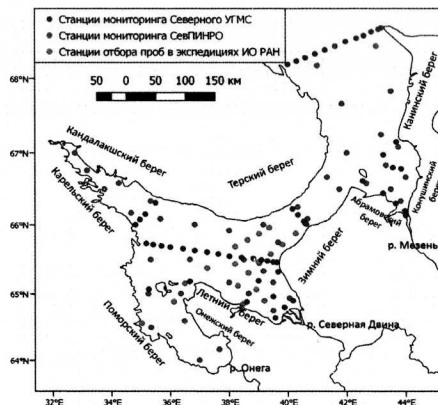


Рисунок 1. Карта-схема Белого моря с обозначением станций комплексного мониторинга Северного УГМС, СевПИНРО и ИО РАН

Основным источником массива данных послужили результаты экспедиционных работ в Белом море Северного УГМС за период 1979–2014 гг. (Ежегодные данные..., 1979–2014; Качество морских вод..., 2001–2014). С 2001 по 2014 г. (за исключением 2009 г.) в исследование добавлены результаты съемок СевПИНРО (Нецветаева и др., 2017). Для этих же станций приведены данные по содержанию хлорофилла «а» (Нецветаева и др., 2018). Также массив данных дополнен результатами экспедиционных работ ИО РАН летом 2013 г. (Отчет..., 2013) и 2014 г. (Отчет..., 2014).

В настоящей работе под поверхностным слоем понимались воды на глубине 0 м (пробы воды отобраны на поверхностном горизонте). Под придонным слоем – придонные воды, залегающие вблизи дна на разных глубинах для разных частей моря (для каждой станции глубина отбора проб воды своя).

Кислородные условия устьевой области Северной Двины оценены на основании данных, полученных в экспедиционных работах в 2014 г. (с 17 по 28 марта) (Лещев и др., 2015), а также в 2015 г. (с 1 по 10 октября), проводимых СЗО

ИО РАН в рамках темы «Физические и химические процессы в экосистемах устьевых областей и водосборов рек бассейна Белого моря». Пробы воды отбирались на 5 полусуточных станциях (рис. 2а). Полученные результаты сравнены с архивными данными с трех створов государственной службы наблюдения за состоянием окружающей природной среды (ГСН): в черте с. Усть-Пинеги, 1,5 км выше г. Новодвинска и в черте г. Новодвинска (рис. 2б).

Также в Главе 3 описаны методология и методы исследования.

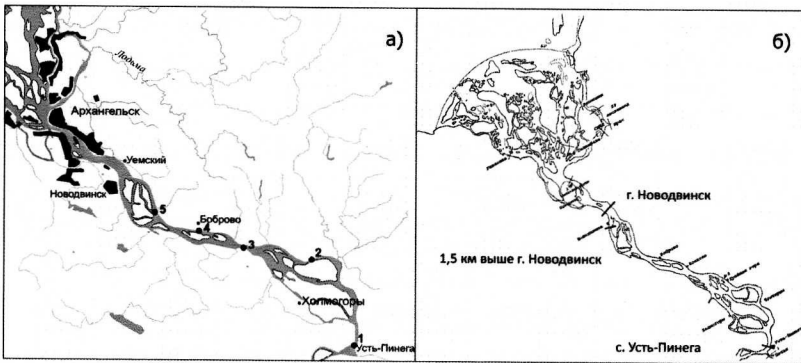


Рисунок 2. Карта-схема с обозначением точек отбора проб воды в устьевой области Северной Двины СЗО ИО РАН (а) и створов ГСН (б)

В Главе 4 подробно рассмотрена пространственно-временная изменчивость концентрации растворенного кислорода и степени насыщения кислородом в водах Белого моря и устьевой области Северной Двины.

В разделе 4.1 внутригодовой ход концентрации растворенного кислорода и степени насыщения кислородом в поверхностном и придонном слоях Белого моря рассмотрен по сети мониторинга Северного УГМС для шести месяцев (май, июнь, июль, август, октябрь, ноябрь) по среднегодовым значениям за период 1979–2014 гг. (рис. 3).

Показано, что степень насыщения кислородом в водах Белого моря снижается с мая по ноябрь в поверхностном слое на 10,53 %, в придонном – на 2,18 %. А сезонные изменения концентрации растворенного кислорода

происходят синхронно с температурой. С мая по август отмечается постепенное прогревание вод: в поверхностном слое на  $7,44^{\circ}\text{C}$ , в придонном – на  $4,39^{\circ}\text{C}$ , которое сопровождается снижением концентрации кислорода: в поверхностном слое на  $1,64$  мл/л, в придонном – на  $0,95$  мл/л. Осенью происходит естественное охлаждение вод: в поверхностном слое на  $7,61^{\circ}\text{C}$ , в придонном – на  $2,11^{\circ}\text{C}$ , что приводит к росту концентрации кислорода: в поверхностном слое – на  $0,79$  мл/л, в придонном – на  $0,42$  мл/л.

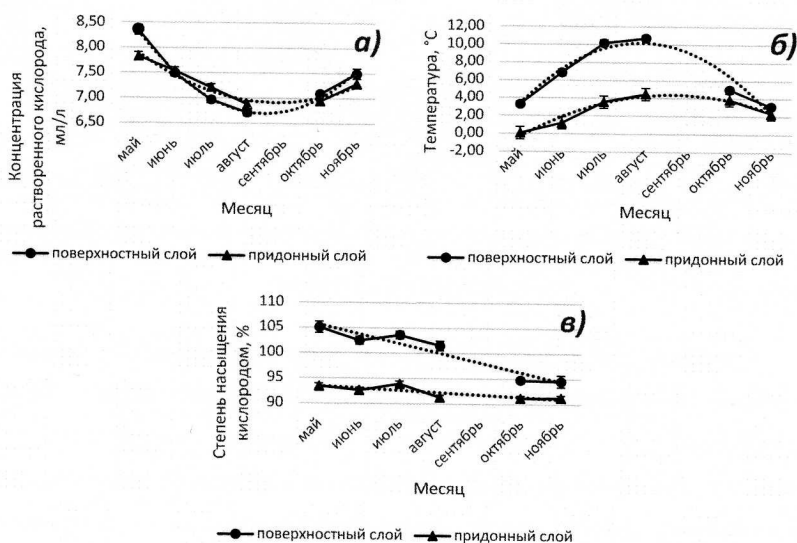


Рисунок 3. Внутригодовой ход среднееголетних (1979–2014 гг.) концентрации растворенного кислорода (а), температуры (б) и степени насыщения кислородом (в)

Далее представлены и подробно описаны карты распределения среднееголетних (1979–2014 гг.) концентрации растворенного кислорода (подраздел 4.1.1) и степени насыщения кислородом (подраздел 4.1.2) по акватории Белого моря в поверхностном и придонном слоях для шести месяцев (май, июнь, июль, август, октябрь, ноябрь). С целью экономии места здесь приведены только карты распределения концентрации растворенного кислорода в поверхностном слое (рис. 4).

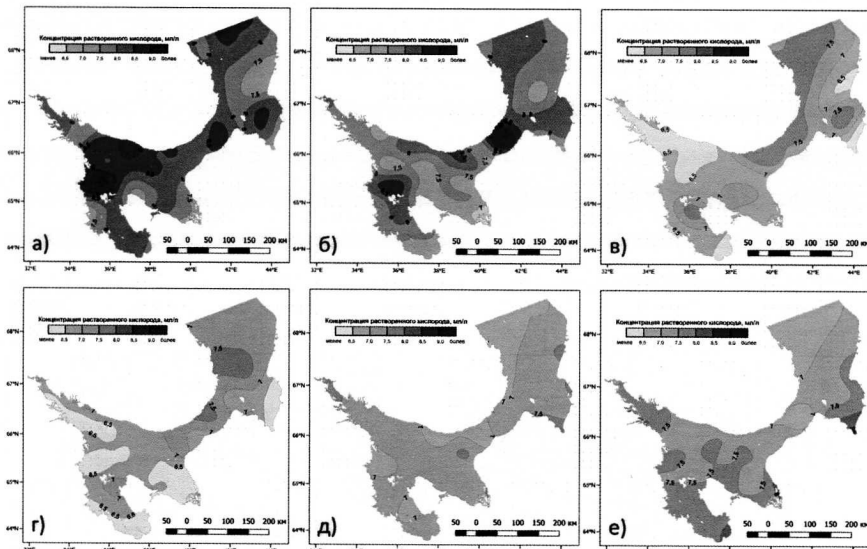


Рисунок 4. Распределение среднееголетней (1979–2014 гг.) концентрации растворенного кислорода (мл/л) в поверхностном слое Белого моря (а – май, б – июнь, в – июль, г – август, д – октябрь, е – ноябрь)

В разделе 4.2 с целью уточнения сети экологического мониторинга проведено однофакторное районирование акватории Белого моря по среднееголетней степени насыщения кислородом. Выбор именно этого показателя обусловлен его чувствительностью к антропогенному воздействию как показателя интенсивности протекания химических и биохимических процессов (Бреховских, 1988). В результате на акватории Белого моря выделены районы в поверхностном и придонном слоях с сильным и слабым недонасыщением, слабым и сильным перенасыщением для трех сезонов: весны (май), лета (июнь, июль, август) и осени (октябрь, ноябрь) (рис. 5).

Станции мониторинга предложено расположить в центральных частях выделенных районов, а кратчайший маршрут их прохождения получен при помощи метода ближайшего соседа (рис. 6). Проведение экологического мониторинга по такой последовательности позволит сократить материальные и

временные затраты (15–20 %) на проведение экспедиционных работ (Нецветаева и др., 2020).

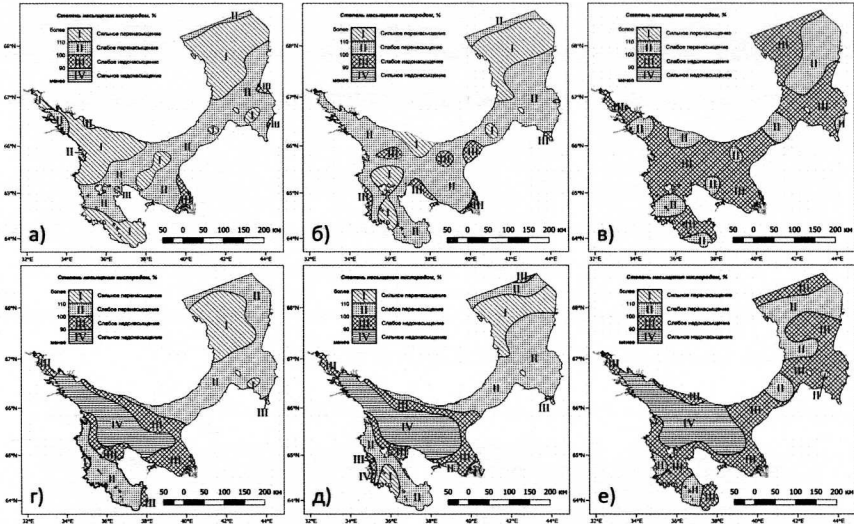


Рисунок 5. Районирование акватории Белого моря по среднегодовой (1979–2014 г.) степени насыщения вод кислородом (%) весной в поверхностном слое (а), летом в поверхностном слое (б), осенью в поверхностном слое (в), весной в придонном слое (г), летом в придонном слое (д), осенью в придонном слое (е)

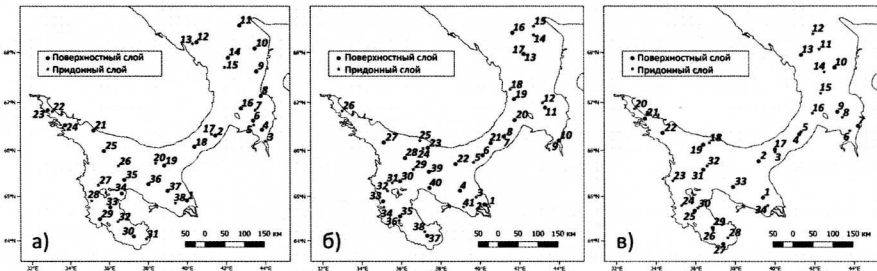


Рисунок 6. Уточненная сеть экологического мониторинга в Белом море для весны (а), лета (б) и осени (в) с обозначением очередности станций

В разделе 4.3 с целью рассмотрения сезонной изменчивости концентрации растворенного кислорода и степени насыщения кислородом в толще вод Белого моря представлены и подробно описаны профили распределения

среднегодовых значений на стандартных океанографических разрезах для шести месяцев (май, июнь, июль, август, октябрь, ноябрь). Всего рассмотрено пять разрезов в различных районах моря: вековые разрезы «м. Канин Нос – м. Святой Нос» (граница с Баренцевым морем) и «м. Инцы – р. Пулоньга» (Горло); стандартные разрезы «м. Зимнегорский – Ивановы Луды» (Бассейн), «о. Сальница – м. Кирбей-Наволоку» (Кандалакшский залив) и «Унская Губа – м. Керецкий» (Двинский залив).

С целью экономии места здесь приведены только профили распределения степени насыщения кислородом для двух принципиально разных разрезов, один из них – в районе моря с хорошим перемешиванием – разрез «м. Канин Нос – м. Святой Нос» (рис. 7), другой – в глубоководном стратифицированном районе – разрез «м. Зимнегорский – Ивановы Луды» (рис. 8).

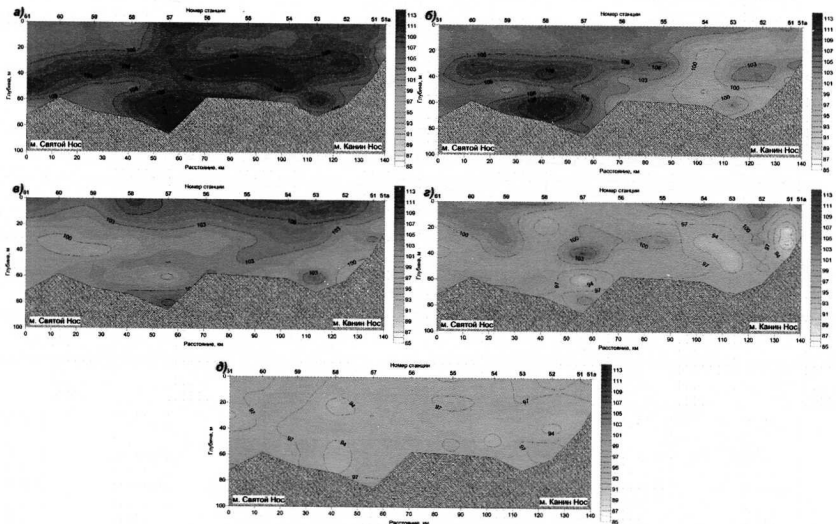


Рисунок 7. Распределение среднегодовой (1979–2014 гг.) степени насыщения кислородом (%) на вековом разрезе «м. Канин Нос – м. Святой Нос» на границе Белого моря с Баренцевым (а – май, б – июнь, в – июль, г – август, д – октябрь)



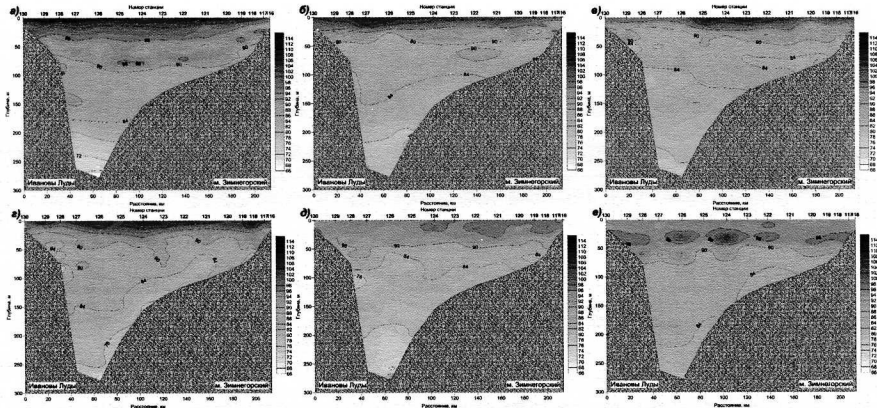


Рисунок 8. Распределение среднемноголетней (1979–2014 гг.) степени насыщения кислородом (%) на стандартном разрезе «м. Зимнегорский – Ивановы Луды» в Бассейне Белого моря (а – май, б – июнь, в – июль, г – август, д – октябрь, е – ноябрь)

**Раздел 4.4** посвящен межгодовой динамике концентрации растворенного кислорода и степени насыщения кислородом в водах Белого моря, которая рассмотрена для поверхностного и придонного слоев в летний сезон по сети мониторинга Северного УГМС, где наблюдения велись на протяжении всего периода 1979–2014 гг. с наименьшим количеством пропущенных лет (**подраздел 4.4.1**). За рассмотренные 36 лет отмечено три периода с различной направленностью трендов кислородных показателей: их рост имел место в периоды похолодания вод моря, а спад – в период потепления (рис. 9).

Предпринята попытка выяснить, влияют ли глобальные колебания в атмосфере, такие как Арктическое, Северо-Атлантическое и Северо-Тихоокеанское колебания, а также события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, на концентрацию растворенного кислорода и степень насыщения кислородом в поверхностном слое Белого моря (**подраздел 4.4.2**). Однако практически все рассчитанные коэффициенты синхронной и лаговой (до 5 месяцев) корреляции указывают на отсутствие связей ( $r \leq 0,2$ ). Только между концентрацией растворенного кислорода и событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья (индекс *ONI*) отмечена очень слабая связь ( $r = 0,21–0,25$ ).

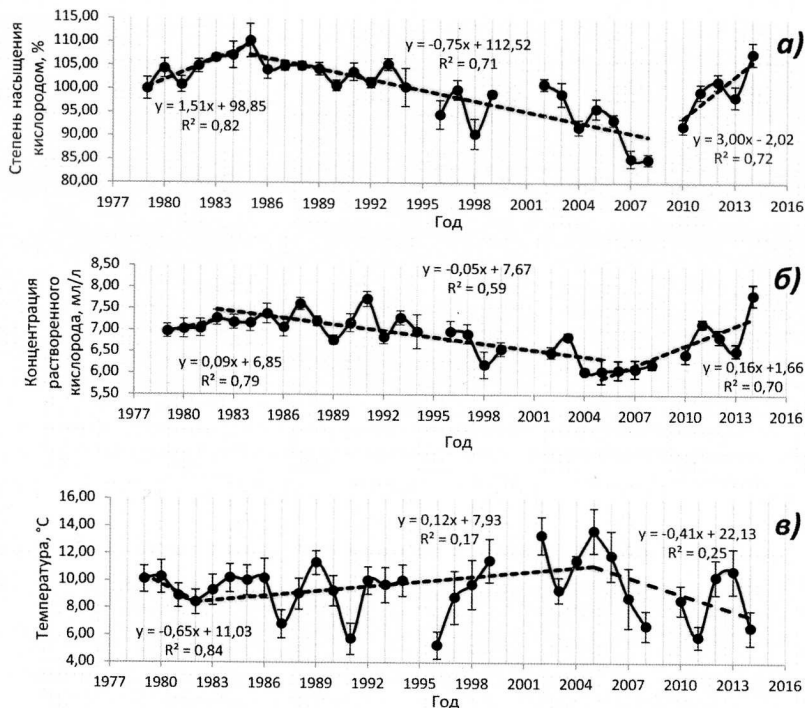


Рисунок 9. Межгодовая динамика среднееголетних степени насыщения кислородом (а), концентрации растворенного кислорода (б) и температуры (в) в поверхностном слое Белого моря за период 1979–2014 гг. (вертикальные отрезки – 95 % доверительный интервал)

В разделе 4.5 рассмотрена пространственно-временная изменчивость степени насыщения вод кислородом в устьевой области Северной Двины в осенний и зимний сезоны, а также оценено качество вод по показателю степени насыщения кислородом (Гусева и др., 2000). Воды в марте отнесены к категории «грязные» (в силу естественных причин), а в октябре – «чистые». Отмечено снижение более чем в два раза степени насыщения кислородом зимой по сравнению с осенью, хорошее перемешивание устьевых вод и отсутствие значительных колебаний этого показателя вдоль русла и в течение приливного цикла. Полученные результаты не противоречат архивным данным по степени насыщения кислородом на створах ГСН за период 2000–2014 гг.

В разделе 4.6 сделаны выводы по Главе 4.

В **Главе 5** рассмотрено влияние термохалинных характеристик и продукционно-деструкционных процессов на кислородный режим Белого моря.

В **разделе 5.1** рассмотрена связь степени насыщения кислородом вод Белого моря с температурой и соленостью его вод. Корреляция в обоих случаях прямая, но с температурой она оценивается как сильная ( $r = 0,85$ ), а с соленостью – слабая ( $r = 0,42$ ). Однако следует понимать, что в данном случае речь идет о влиянии температуры или солености без учета других факторов. Насыщенность же кислородом является, как уже отмечалось, многофакторно изменяющимся параметром. Поэтому в природных условиях, когда множество факторов влияет друг на друга, решающее влияние на изменчивость степени насыщения кислородом вод Белого моря имеет все-таки не температура, а соотношение продукционно-деструкционных процессов, что рассмотрено далее. По изменениям же солености удалось отследить влияние на уровень насыщенности кислородом стоковой фронтальной зоны в Двинском заливе и различия между беломорскими и баренцевоморскими водами: на графике изменения насыщенности в зависимости от солености это проявляется в виде значительных «провалов» насыщенности при солености 15 ‰ и 30 ‰.

В **разделе 5.2** представлены и подробно описаны карты распределения среднесезонной (2001–2014 гг.) концентрации хлорофилла «а» по акватории Белого моря в поверхностном слое для шести месяцев (май, июнь, июль, август, октябрь, ноябрь). После чего по аналогии с температурой и соленостью рассмотрена связь между степенью насыщения кислородом и содержанием хлорофилла «а». Полученная корреляция оценивается как сильная ( $r = 0,82$ ).

В **разделе 5.3** оценено соотношение продукционных и деструкционных процессов в водах Белого моря по показателю «кажущегося потребления кислорода» (*AOU – Apparent Oxygen Utilization*) (Redfield et al., 1963). В результате показано, что в толще вод Белого моря преобладают процессы деструкции, причем с глубиной их интенсивность усиливается. До глубины в 20 м доля продукционных процессов превышает долю деструкции только в мае, а в самом поверхностном слое такое соотношение сохраняется до августа. Осенью

даже на поверхности процессы деструкции играют решающую роль в кислородном режиме Белого моря.

В разделе 5.4 сделаны выводы по Главе 5.

В **Заключении** сформулированы основные выводы исследования:

1. Основными факторами, влияющими на кислородный режим Белого моря, являются его водообмен с Баренцевым морем, речной сток, приливно-отливные явления и продукционно-деструкционные процессы, происходящие в самом море. Приток баренцевоморских вод обеспечивает аэрацию глубинных вод и Воронки Белого моря. Влияние речного стока, наоборот, проявляется в формировании областей с пониженной концентрацией растворенного кислорода и насыщенностью преимущественно в вершинах заливов. Интенсивные приливно-отливные явления способствуют хорошему перемешиванию вод в заливах (за исключением глубоководного Кандалакшского). Процессы деструкции в толще вод Белого моря преобладают, причем с глубиной интенсивность этих процессов растет. Исключение составляют поверхностные слои (до 20 м), где протекает активный фотосинтез, для которого характерен сезонный ход.

2. Концентрация растворенного кислорода и степень насыщения кислородом изменяются в течение года не единообразно в водах Белого моря. Так, концентрация растворенного кислорода снижается с мая по август при прогревании вод и растет к ноябрю при их охлаждении, что вызвано естественной зависимостью растворимости газа от температуры. В то же время насыщенность кислорода неуклонно снижается с мая по ноябрь, т.к. она более зависит от соотношения продукционно-деструкционных процессов, нежели от температуры, а доля деструкции растет в течение этого периода, что установлено по показателю «кажущегося потребления кислорода» (*AOU – Apparent Oxygen Utilization*).

3. В районах с однородной структурой вод сезонная изменчивость проявляется во всей толще, а в глубоководных районах со стратифицированной структурой она ограничивается глубиной в 100–120 м. При этом наиболее ярко

она проявляется в зоне активного фотосинтеза (10–30 м) и заключается не только в снижении величин кислородных показателей, но и в сокращении глубины слоя, перенасыщенного кислородом, а также в формировании слоя подповерхностного максимума концентрации растворенного кислорода в летние месяцы параллельно с истощением запасов кислорода на поверхности.

4. В водах Белого моря за период 1979–2014 гг. по усредненным за летний сезон значениям выделено три периода с различной направленностью трендов концентрации растворенного кислорода и степени насыщения кислородом. Рост кислородных показателей имел место в периоды похолодания вод моря, а спад – в период потепления. Примечательно, что первая смена трендов произошла в период наиболее интенсивного Эль-Ниньо (1982–1983 гг.). Однако следующее наиболее интенсивное Эль-Ниньо в 1997–1998 гг. не нашло отражения в межгодовой динамике ни температуры, ни концентрации растворенного кислорода, так же, как и не выявлено корреляции между рассматриваемыми кислородными показателями и индексами глобальных осцилляций (Арктическое, Северо-Атлантическое, Северо-Тихоокеанское колебания и события Эль-Ниньо и Ла-Нинья).

5. Хотя известно, что при росте температуры и солёности растворимость кислорода в воде снижается, их влияние именно на степень насыщения кислородом не так однозначно. При рассмотрении влияния температуры на степень насыщения кислородом вод Белого моря выявлено, что с ее ростом также растет и насыщенность, при этом корреляция оценивается как сильная ( $r = 0,85$ ). Однако такое положение вещей возможно только при отсутствии влияния других факторов, что в природных условиях невозможно. Поэтому, как уже отмечено в выводе «2» решающее влияние на изменчивость степени насыщения кислородом вод Белого моря имеет все-таки не температура, а соотношение продукционно-деструкционных процессов. Влияние солёности не столь существенно: корреляция между рассматриваемыми показателями оценивается как слабая ( $r = 0,42$ ). Однако по изменениям солёности прослеживается влияние на насыщенность кислородом стоковой фронтальной зоны в Двинском заливе,

когда при солености 15 ‰ показатель степени насыщения значительно снижается. Также при переходе через изогалину 30 ‰ прослеживаются различия в степени насыщения кислородом беломорских и баренцевоморских вод.

6. Распределение по акватории Белого моря концентрации хлорофилла «а», как и степени насыщения кислородом, подвержено ярко выраженной сезонной и пространственной изменчивости, так как эти показатели изменяются в результате одного и того же процесса – фотосинтетической активности водной биоты, причем изменяются синхронно, о чем свидетельствует наличие между ними положительной и сильной корреляции ( $r = 0,82$ ).

7. В устьевой области Северной Двины зимой степень насыщения вод кислородом снижается более чем в два раза по сравнению с осенними показателями в результате ограничения ледовым покровом газообмена с атмосферой и снижения интенсивности процесса фотосинтеза. Отмечается хорошее перемешивание устьевых вод по степени насыщения кислородом и отсутствие значительных колебаний вдоль русла и в течение приливного цикла этого показателя. Полученные нами в 2014 и 2015 гг. результаты не противоречат архивным данным за период 2000–2014 гг. на створах ГСН, расположенных на том же участке устьевой области Северной Двины.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статья в рецензируемом научном журнале, входящем в Web of Science:*

1. Лещев А.В., Хоменко Г.Д., Коробов В.Б., Лохов А.С., Чульцова А.Л., Ружникова Н.Н., Махнович Н.Н., Белоруков С.К., Яковлев А.Е., Ефремова О.П., Муангу Ж.Э.Р. Экспедиционные работы в устьевой области реки Северной Двины в марте 2014 г. // *Океанология*. – 2015. – Т. 55. – № 2. – С. 348–350.

*Статьи в рецензируемых научных журналах из списка ВАК:*

2. Нецветаева О.П., Попова Л.Ф., Коробичина Ю.С. Распределение биогенных элементов (кислорода, фосфора и кремния) в водах Белого и Баренцева морей // *Вода: химия и экология*. – 2014. – № 9. – С. 16–20.

3. **Нецветаева О.П.** Изменчивость кислородонасыщения вод в устьевой области р. Северной Двины // Arctic Environmental Research. – 2017. – Т. 17. № 2. – С. 88–97.

4. Мискевич И.В., **Нецветаева О.П.** Короткопериодная изменчивость насыщения кислородом вод в устьях рек Белого моря // Проблемы региональной экологии. – 2017. – № 2. – С. 101–105.

5. **Нецветаева О.П.**, Македонская И.Ю., Коробов В.Б., Змётная М.И. Зависимость кислородонасыщения от содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое вод Белого моря // Арктика: экология и экономика. – 2018. – № 3 (31). – С. 31–41.

*Прочие публикации:*

6. Коробов В.Б., Середкин К.А., Лохов А.С., **Нецветаева О.П.**, Кошелева В.П. Проблемы интерполяции пространственно-неоднородных данных на нерегулярных сетках в Белом море // Геология морей и океанов: Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. – 2015. – С. 203–205.

7. **Нецветаева О.П.** Кислородный режим устьевой области р. Северной Двины в осенний период // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2016: сборник материалов конференции. – 2016. – С. 435–439.

8. **Нецветаева О.П.** Особенности кислородного режима устьевой области р. Северная Двина в октябре 2015 г. // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XXXI пленарного межвузовского координационного совещания «Современные проблемы эрозионных, русловых и устьевых процессов». – 2016. – С. 199–201.

9. **Нецветаева О.П.**, Коробов В.Б. Особенности кислородного режима устьевой области Северной Двины // Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. – 2017. – С. 250–253.

10. **Нецветаева О.П.**, Змётная М.И., Коробов В.Б. Особенности кислородонасыщения вод Белого моря в начале XXI века // Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. – 2017. – С. 254–258.

11. **Нецветаева О.П.** Межгодовая динамика кислородонасыщения вод Белого моря в изменяющихся условиях окружающей среды по данным многолетних наблюдений // Геология морей и океанов: Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. – 2019. – С. 207–211.

12. **Нецветаева О.П.**, Коробов В.Б., Антипов Е.О., Тутьгин А.Г. Оптимизация сети экологического мониторинга Белого моря // Океанологические исследования. – 2020. – Т. 48. – № 1. – С. 73–84.

Подписано в печать 06.03.2021 г.  
Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16  
Тираж 100 экз. Усл.печ.л. 2,0. Заказ 125

ООО «Центр документации»  
г. Архангельск, пл. Ленина, 4.  
Тел.: (8182) 21-51-83, e-mail: [cdx18@yandex.ru](mailto:cdx18@yandex.ru)