

ЗАВИСИМОСТЬ КИСЛОРОДОНАСЫЩЕНИЯ ОТ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА «А» В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОД БЕЛОГО МОРЯ

О. П. Нецветаева

ООО «Агентство прикладной экологии» (Архангельск, Российская Федерация)

И. Ю. Македонская

ФГБНУ Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича, Северный филиал (Архангельск, Российская Федерация)

В. Б. Коробов

ФГБНУ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

М. И. Змётная

ФГБНУ Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича, Северный филиал (Архангельск, Российская Федерация)

Исследование посвящено выявлению и оценке зависимости между кислородонасыщением и содержанием хлорофилла «а» в поверхностном слое вод Белого моря. В основе выполненных расчетов лежит массив данных за период 2001–2014 гг. Построены сезонные карты распределения кислородонасыщения и содержания хлорофилла «а» по акватории Белого моря в поверхностном слое, проведен регрессионный анализ. Отмечено снижение значений рассматриваемых показателей от весны к осени. Выявлена положительная связь между кислородонасыщением и содержанием хлорофилла «а» с наибольшей теснотой при содержании хлорофилла «а» до 1 мкг/л.

Ключевые слова: кислородонасыщение, хлорофилл «а», Белое море, регрессионный анализ.

Статья поступила в редакцию 17 мая 2018 г.

Введение

В настоящее время внимание многих ученых приковано к Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) вследствие ожидаемого увеличения воздействия на ее территории и акватории при освоении данного макрорегиона в сложных природно-климатических условиях.

Отличительной чертой морей АЗРФ является значительное влияние на их гидрологический и гидрохимический режимы речного стока. Известно, что модуль стока от общего объема поверхностных и подземных вод, впадающих в Северный Ледовитый океан, составляет 355 мм в год на единицу площади, что в три раза превышает соответствующую величину для Мирового океана [1]. Модуль стока

Белого моря превышает аналогичный показатель для Мирового океана в 20 раз [2]. Распространение загрязняющих веществ в Белом море происходит главным образом со стоковыми течениями крупных рек. Через устьевые области рек в прибрежную зону моря в год сбрасывается около 250,5 млн м³ сточных вод. Зонами аккумуляции поллютантов становятся Онежский, Двинский, Кандалакшский и Мезенский заливы, а также центральная глубоководная область моря — Бассейн с замкнутой системой циркуляции вод. Северная Двина служит наиболее значимым источником поступления загрязняющих веществ [3]. Несмотря на изложенное, в настоящее время на водосборе Белого моря преобладают условно-фоновые участки, сохранившие первоначальные природные характеристики, однако при неизменности существующих тенденций экологическая ситуация и в данных районах в ближайшее время может заметно ухудшиться [4].

В связи с этим большое внимание уделяется непрерывному экологическому мониторингу состояния вод Белого моря и его водосбора. Одним из обязательных элементов экологического мониторинга качества поверхностных и морских вод является определение степени насыщения вод кислородом, отличающейся чувствительностью к антропогенному воздействию, как показателя интенсивности протекания химических и биохимических процессов [5].

Первые сведения о гидрохимических наблюдениях в Белом море относятся к 20—30-м годам XX в. Уже тогда определение растворенного кислорода было неотъемлемой частью наблюдений. Систематические сезонные гидрохимические наблюдения (в том числе и определение кислорода) на сети станций в Белом море были начаты Северным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Северным УГМС) в конце 1950-х годов [6].

Содержание растворенного кислорода в водах Белого моря анализируется не только в контексте мониторинга, осуществляемого Северным УГМС [7; 8], в последние десятилетия активно ведутся его исследования в рамках деятельности научных организаций [9—17 и др.]. Данные о содержании в воде растворенного кислорода встречаются и в других работах, имеющих различные цели и задачи, анализировать которые в настоящей статье не представляется целесообразным, так как в них показатель кислородонасыщения приводится в качестве характеристики водной среды наравне с температурой, соленостью и пр., однако этот факт указывает на фундаментальность показателя кислородонасыщения.

В ряде работ изучена зависимость степени насыщения кислородом вод пресноводных водоемов от различных факторов, определяющих фотосинтетическую активность, в том числе от содержания хлорофилла «а». Несмотря на присутствие в водорослях хлорофилла «b» и «c», внимание уделяется именно хлорофиллу «а», что обосновывается максимальной эффективностью переноса энергии от пигментов к фотосинтезирующим системам именно хлорофиллом «а» [18; 19]. В кислородном режиме пресноводного водоема определяющая роль отдается фотосинтетической аэрации только при содержании хлорофилла «а» более 5 мкг/л, поскольку при меньших значениях определяющими становятся гидрофизические факторы [20]. В другой работе для поверхностных вод суши показано запаздывание минимума содержания кислорода относительно минимума содержания хлорофилла «а» [21]. Для вод поверхностного слоя Белого моря отмечалась положительная связь между рассматриваемыми показателями в летний период [6].

Несмотря на то что фотосинтетические пигменты, в том числе хлорофилла «а», в водах Белого моря хорошо изучены и данные об их содержании широко представлены в источниках [19; 22—27 и др.], на сегодня отсутствуют работы, посвященные

нахождению зависимости насыщения вод кислородом от содержания хлорофилла «а».

В то же время изучение такой зависимости может быть полезно в прикладном аспекте. Выявление связи между рассматриваемыми показателями и построение экологической модели в дальнейшем могло бы способствовать разработке классификации трофических состояний вод с использованием только показателя кислородонасыщения для районов Белого моря, определение которого значительно проще, чем хлорофилла «а» и других показателей, по которым в настоящее время классифицируют трофические состояния.

В связи с этим целью настоящего исследования являются выявление и оценка зависимости между кислородонасыщением и содержанием хлорофилла «а» в поверхностном слое вод Белого моря.

Материалы и методы

В основе исследования лежит массив данных по результатам съемок Северного филиала Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича (СевПИПРО), состоящий из значений кислородонасыщения (%) и содержания хлорофилла «а» (мкг/л) в поверхностном слое вод Белого моря, полученных с 2001 по 2014 гг. (за исключением 2009 г.) на сети комплексного мониторинга, включающей 42 станции (рис. 1). Это данные трех весенних съемок (в 2003, 2005 и 2008 гг.), 13 летних (в 2001—2014 гг. за исключением 2009 г.) и 9 осенних (за исключением 2002, 2005, 2006, 2009 и 2013 гг.).

Массив данных по кислородонасыщению дополнен материалами по результатам съемок Северного УГМС в период с 2001 по 2014 г. на сети комплексного мониторинга в Двинском заливе и на стандартных разрезах «мыс Зимнегорский — Ивановы Луды» в Бассейне Белого моря, «мыс Инцы — река Пулоньга» в Горле и «мыс Святой Нос — мыс Канин Нос» на границе с Баренцевым морем. Рассматриваемый период включает данные летних и осенних съемок за исключением 2001 г. (только осенняя съемка) и 2004, 2014 гг. (только летняя съемка) [7; 8].

Определение содержания растворенного кислорода проводилось Северным УГМС¹ и СевПИПРО² с помощью метода Винклера. Расчет хлорофилла «а» производился СевПИПРО по ГОСТ 17.1.4.02—90³.

Сезонные карты распределения кислородонасыщения и содержания хлорофилла «а» по акватории

¹ РД 52.10.243-92. Руководство по химическому анализу морских вод. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. — 128 с.; РД 52.10.736-2010. Объемная концентрация растворенного кислорода в морских водах. Методика измерений йодометрическим методом. — М.: ФГУ «ГОИН», 2010. — 21 с.

² Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. — М.: ВНИРО, 1988. — 119 с.

³ ГОСТ 17.1.4.02—90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла-а. — М.: Изд-во стандартов, 1999. — 12 с.

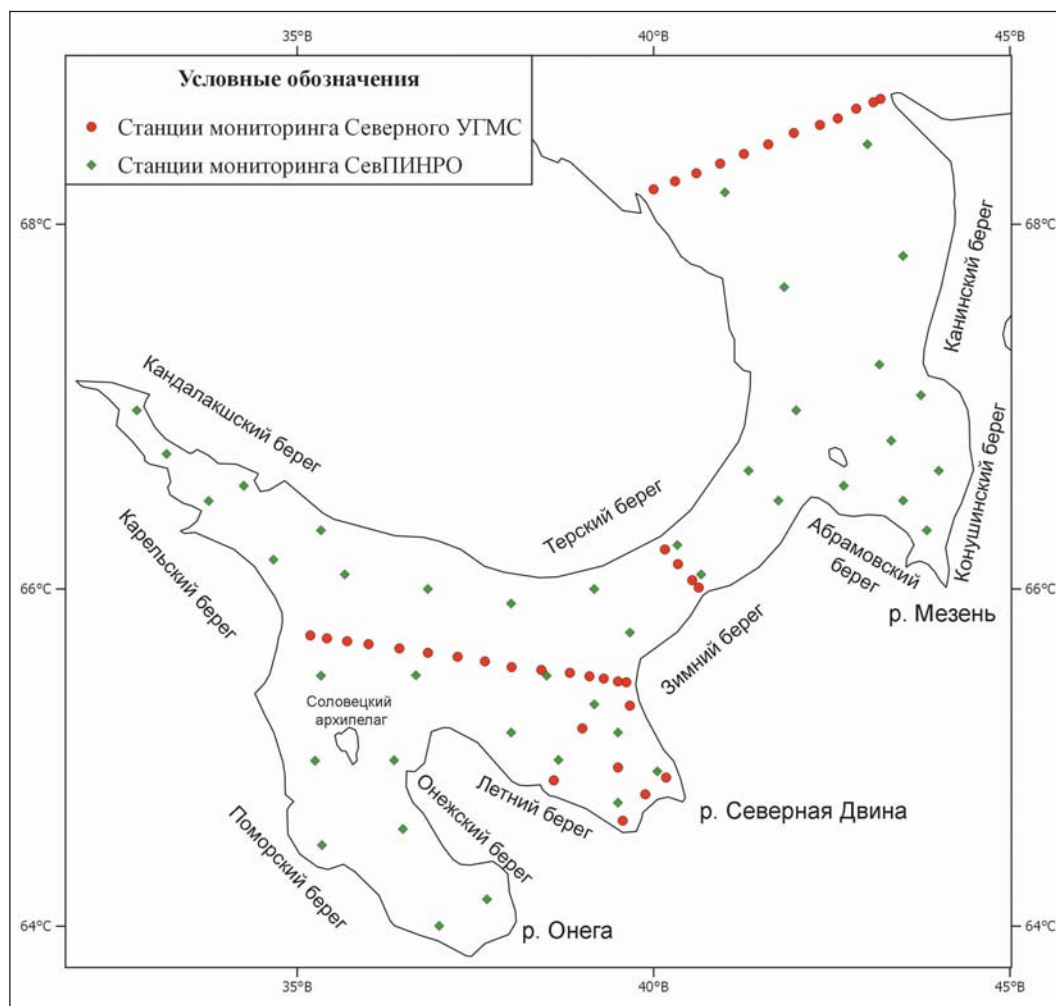


Рис. 1. Карта-схема с обозначением станций комплексного мониторинга СевПИНРО и станций на вековых и стандартных разрезах Северного УГМС

Белого моря в поверхностном слое построены посредством программы Surfer и специально разработанного приложения «oxygen_interp_build». В основу построения карт положен метод RBF-ML (вариация интерполяционного алгоритма RBF (Radial Basis Function) с поддержкой многослойности) [28].

Математическая обработка данных производилась с помощью традиционных статистических параметров в программе IBM SPSS Statistics 21.0. Графики построены посредством MS Excel 2016.

Результаты и обсуждения

Кислородонасыщение по объединенным среднесезонным значениям (2001—2014 гг.)

Весной поверхностные воды Белого моря повсеместно перенасыщены кислородом (рис. 2а) за исключением юго-восточной области Двинского залива, что может быть связано с влиянием весеннего паводка. В Воронке и Бассейне Белого моря, в Онежском заливе отмечаются крупные поля с перенасыщением вод кислородом более 110%,

в северной части моря, вероятно, сказывается приток богатых кислородом баренцевоморских вод, а в южной — продукция кислорода фитопланктоном, развитие которого начинается в первую очередь в Бассейне Белого моря, где воды первыми освобождаются ото льда.

Летом общее перенасыщение кислородом поверхностных вод сохраняется (рис. 2б), однако появляются области с недоныщением, что вызвано снижением интенсивности продукционных процессов: происходит значительное снижение насыщения с величины, превышающей 110%, в Воронке до 90—95% при продвижении к границе с Баренцевым морем, а также в юго-западной области Горла Белого моря до менее 85%. Область Горла отличается появлением значительного градиента в центре района и в северной части условной границы с Бассейном. При этом северная область Горла Белого моря отличается перенасыщением кислорода более 110%, а южная — недоныщением вплоть до менее 85%.

Осенью в поверхностных водах северной части моря кислородонасыщение заметно снижается,

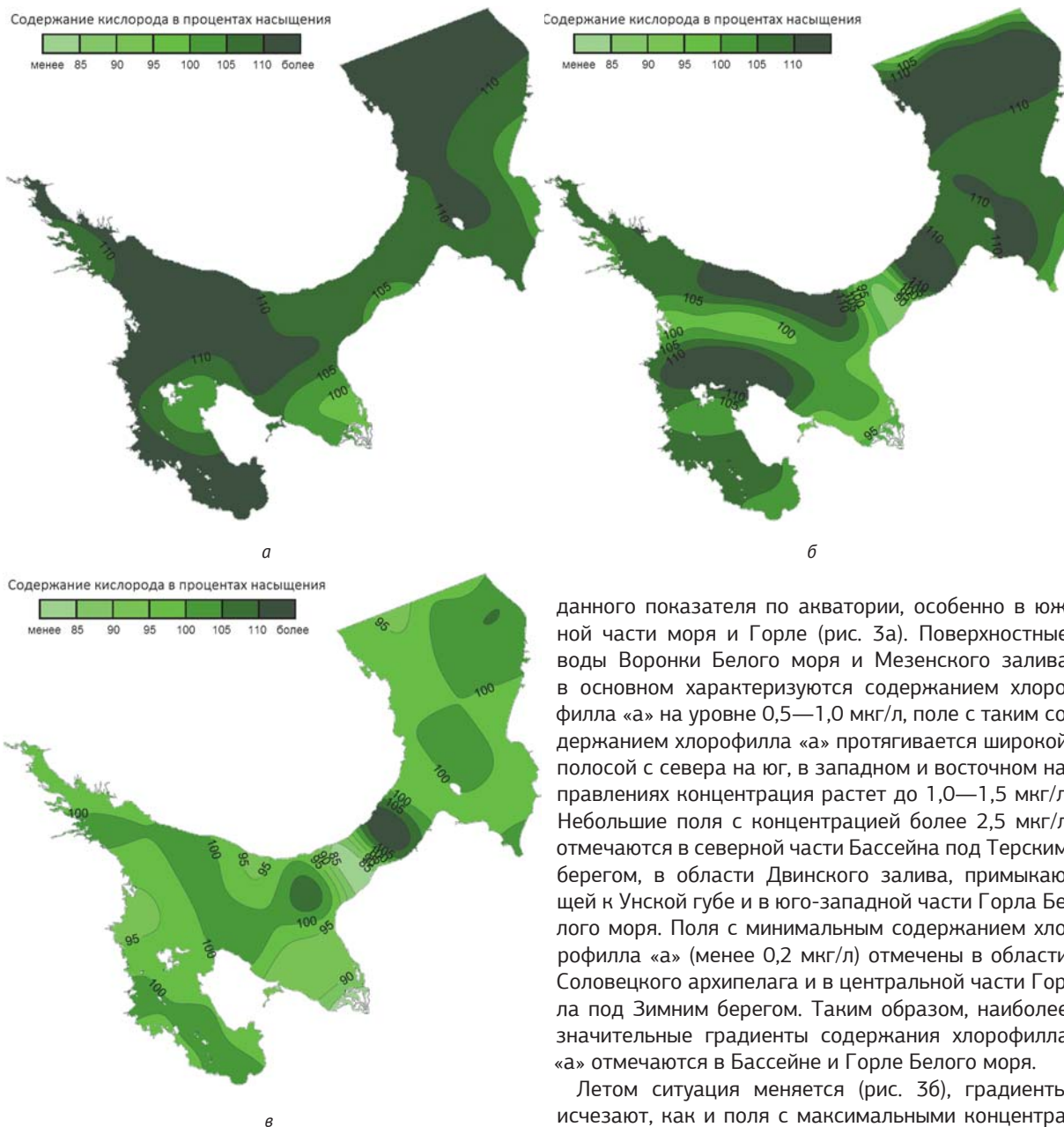


Рис. 2. Среднее кислородонасыщение поверхностных вод Белого моря за период 2001–2014 гг. весной (а), летом (б) и осенью (в)

и преобладают значения 95–100% (рис. 2в). С насыщением 100–105% отмечаются крупные поля на северо-востоке и юге Воронки Белого моря, а также в вершине Мезенского залива. В Горле Белого моря сохраняется значительный градиент, однако область с перенасыщением более 110% сокращается, а с недоныщением менее 85% расширяется.

Содержание хлорофилла «а» в среднем за период 2001–2014 гг.

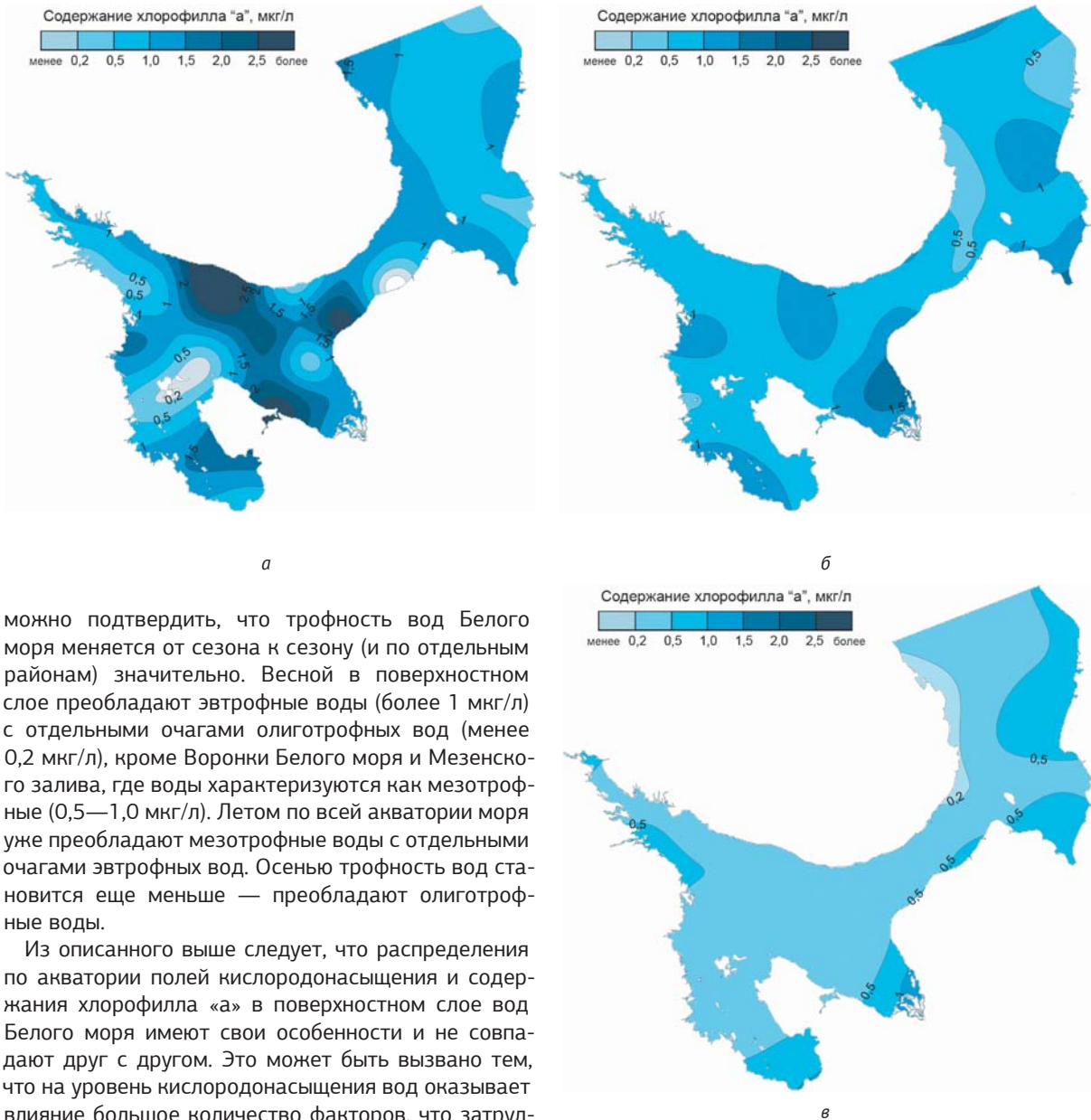
Весной поверхностный слой вод Белого моря характеризуется значительной изменчивостью

данного показателя по акватории, особенно в южной части моря и Горле (рис. 3а). Поверхностные воды Воронки Белого моря и Мезенского залива в основном характеризуются содержанием хлорофилла «а» на уровне 0,5–1,0 мкг/л, поле с таким содержанием хлорофилла «а» протягивается широкой полосой с севера на юг, в западном и восточном направлениях концентрация растёт до 1,0–1,5 мкг/л. Небольшие поля с концентрацией более 2,5 мкг/л отмечаются в северной части Бассейна под Терским берегом, в области Двинского залива, примыкающей к Унской губе и в юго-западной части Горла Белого моря. Поля с минимальным содержанием хлорофилла «а» (менее 0,2 мкг/л) отмечены в области Соловецкого архипелага и в центральной части Горла под Зимним берегом. Таким образом, наиболее значительные градиенты содержания хлорофилла «а» отмечаются в Бассейне и Горле Белого моря.

Летом ситуация меняется (рис. 3б), градиенты исчезают, как и поля с максимальными концентрациями, общим фоном по акватории моря служит содержание хлорофилла «а» на уровне 0,5–1,0 мкг/л. Наиболее заметный рост концентраций отмечается в Двинском заливе, где у Зимнего берега образуется поле с содержанием хлорофилла «а» 1,5–2,0 мкг/л.

Осенью изменчивость по акватории, как и общий уровень содержания хлорофилла «а», становится еще ниже. В основном воды характеризуются содержанием хлорофилла «а» на уровне 0,2–0,5%. В Мезенском, Онежском заливах и в восточной области Воронки Белого моря концентрации возрастают до 0,5–1,0 мкг/л, в вершине Двинского залива — до 1,0–1,5 мкг/л. В Воронке вдоль Терского берега появляется поле с содержанием хлорофилла «а» менее 0,2 мкг/л.

Так, используя классификацию трофности вод по содержанию хлорофилла «а», предложенную в [19],



можно подтвердить, что трофность вод Белого моря меняется от сезона к сезону (и по отдельным районам) значительно. Весной в поверхностном слое преобладают эвтрофные воды (более 1 мкг/л) с отдельными очагами олиготрофных вод (менее 0,2 мкг/л), кроме Воронки Белого моря и Мезенского залива, где воды характеризуются как мезотрофные (0,5—1,0 мкг/л). Летом по всей акватории моря уже преобладают мезотрофные воды с отдельными очагами эвтрофных вод. Осенью трофность вод становится еще меньше — преобладают олиготрофные воды.

Из описанного выше следует, что распределения по акватории полей кислородонасыщения и содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое вод Белого моря имеют свои особенности и не совпадают друг с другом. Это может быть вызвано тем, что на уровень кислородонасыщения вод оказывает влияние большое количество факторов, что затрудняет выделение эффекта от влияния именно содержания хлорофилла «а».

Регрессионный анализ

Конфигурация корреляционного поля, характеризующего связь между содержанием хлорофилла «а» и кислородонасыщением в поверхностных водах Белого моря за 2001—2014 гг. (рис. 4), не позволяет использовать стандартный метод наименьших квадратов (МНК) для получения одномерной регрессионной модели, так как она характеризуется крайне низким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,0446$), что формально указывает на отсутствие связи между рассматриваемыми показателями, однако визуально кажется очевидным присутствие какой-то определенной закономерности. Для ее нахождения сократим число анализируемых корреляционных точек, что снизит влияние других факторов [29].

Рис. 3. Среднее содержание хлорофилла «а» в поверхностных водах Белого моря за 2001—2014 гг. весной (а), летом (б) и осенью (в)

В работе [29] сокращение точек было достигнуто путем выборки максимальных значений, так как рассматривалось влияние на параметр среды антропогенного воздействия, которое фундаментально характеризуется снижением параметра среды при его усилении. В нашем случае рассматривается влияние изменения одного параметра среды на изменение другого, поэтому были сделаны выборки медианных значений.

Шкала изменений содержания хлорофилла «а» была разделена на интервалы, равные 0,1 мкг/л, в каждом интервале рассчитывались медианы кислородонасыщения, затем строился график

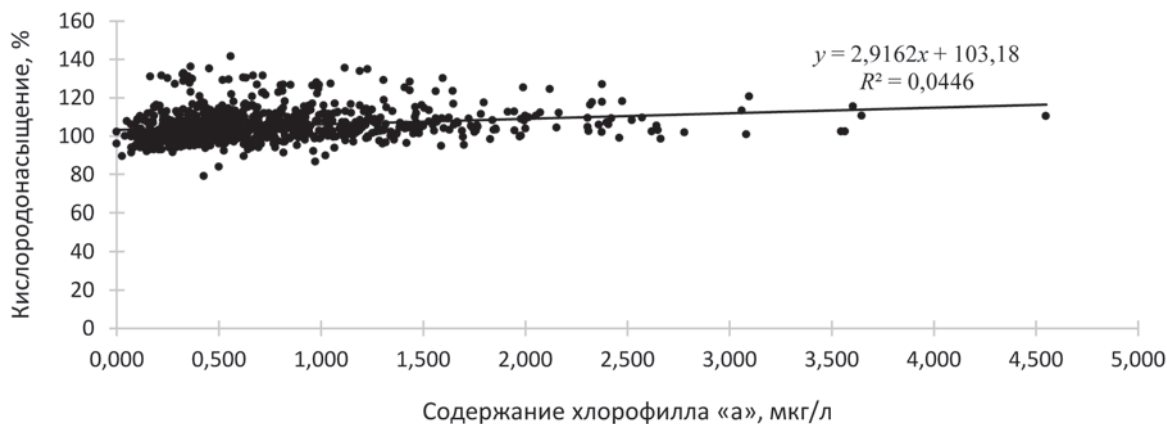


Рис. 4. Корреляционное поле, характеризующее связь между содержанием хлорофилла «а» и кислородонасыщением в поверхностных водах Белого моря за 2001–2014 гг.

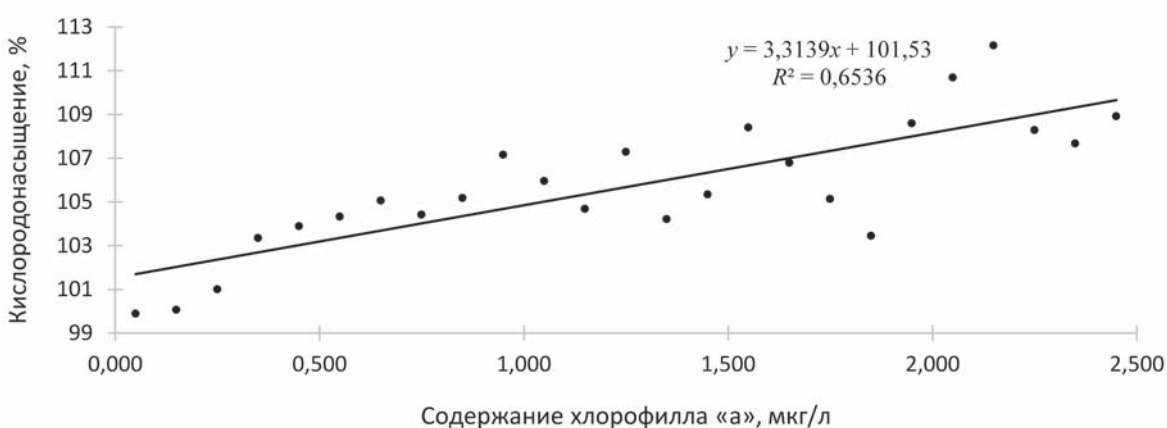


Рис. 5. График зависимости кислородонасыщения в поверхностных водах Белого моря от содержания хлорофилла «а» в диапазоне 0–2,5 мкг/л

зависимости медианных значений кислородонасыщения в поверхностных водах Белого моря от содержаний хлорофилла «а», соответствующих средним значениям выделенных интервалов (рис. 5). График ограничен диапазоном содержания хлорофилла «а» 0–2,5 мкг/л, так как свыше 2,5 мкг/л значительно сокращается число усредняемых корреляционных точек. Для оценки связи между преобразованными величинами был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона, равный 0,8084, что указывает на положительную направленность связи и на ее высокую тесноту по шкале Чеддока.

На рис. 5 видно, что при увеличении содержания хлорофилла «а» возрастает разброс корреляционных точек, что, вероятно, указывает на снижение тесноты связи по мере роста содержания хлорофилла «а». Для дальнейшего рассмотрения массив преобразованных величин был разделен на две группы по содержанию хлорофилла «а»: 0–1,0 мкг/л и 1,1–2,5 мкг/л. В первой группе получен коэффициент корреляции Пирсона, равный 0,9516, что характеризует весьма высокую тесноту связи, а во

второй группе — 0,1594 (слабая теснота связи). На рис. 6а и 6б различия построенных корреляционных полей показаны наглядно.

Таким образом, наибольшее влияние содержания хлорофилла «а» без учета других факторов на кислородонасыщение отмечается до его концентрации 1 мкг/л.

Заключение

Подводя итоги исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Кислородонасыщение по объединенным среднесезонным значениям (2001–2014 гг.) по всей акватории Белого моря подвержено ярко выраженной сезонной изменчивости. Весной поверхностные воды Белого моря повсеместно перенасыщены кислородом за исключением юго-восточной области Двинского залива, что может быть связано с влиянием весеннего паводка. Летом общее перенасыщение кислородом поверхностных вод сохраняется, однако появляются области с недонасыщением, что вызвано снижением интенсивности

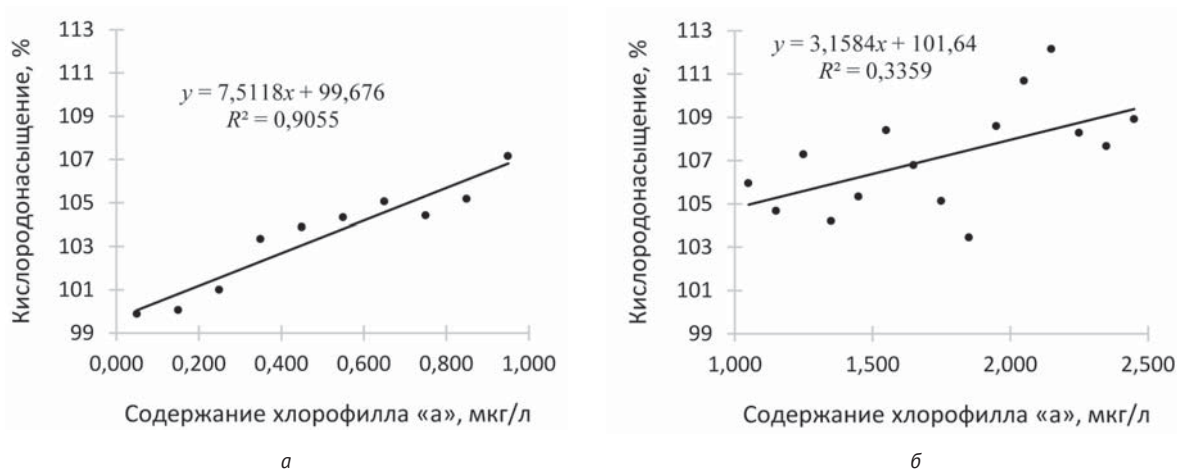


Рис. 6. График зависимости кислородонасыщения в поверхностных водах Белого моря от содержания хлорофилла «а» в диапазоне 0—1,0 мкг/л (а) и 1,0—2,5 мкг/л (б)

продукционных процессов. Осенью недонасыщенные кислородом области еще больше расширяются. Содержание хлорофилла «а» в среднем за период 2001—2014 гг., также как и кислородонасыщение, снижается от весны к осени в целом по акватории, однако пространственная изменчивость этих показателей различна: весной распространение содержания хлорофилла «а» носит мозаичный характер, летом и осенью его пространственная изменчивость значительно снижается по всей акватории.

2. На кислородонасыщение поверхностных вод Белого моря оказывает влияние значительное число факторов, что затрудняет выделение эффекта от влияния какого-либо одного из них с помощью стандартного МНК непосредственно по всему объему выборок. Показано, что с помощью сокращения числа корреляционных точек путем выборки медианных значений кислородонасыщения для определенных интервалов значений содержания хлорофилла «а» возможно выявление связи между рассматриваемыми показателями. Таким образом, между кислородонасыщением поверхностных вод Белого моря и содержанием хлорофилла «а» (без учета других факторов) была отмечена положительная связь с наибольшей теснотой ($r = 0,9516$) при содержании хлорофилла «а» до 1,0 мкг/л. При дальнейшем росте его содержания теснота связи ослабевает ($r = 0,1594$ в диапазоне содержания хлорофилла «а» 1,0—2,5 мкг/л). Предложенная методика выявления зависимости с помощью регрессионного анализа может быть использована для определения связей между другими параметрами окружающей среды.

3. Выявленная взаимосвязь не позволяет на данном этапе исследования построить экологическую модель для оценки трофности поверхностных вод Белого моря по кислородонасыщению, необходимо в дальнейшем рассмотреть взаимосвязи с другими влияющими факторами. Поэтому оценка трофности поверхностных вод Белого моря была проведена по

содержанию хлорофилла «а», и в результате было показано, что она подвержена ярко выраженной сезонной изменчивости и неоднородна по акватории, особенно весной, когда в поверхностном слое преобладают эвтрофные воды (более 1 мкг/л) с отдельными очагами олиготрофных вод (менее 0,2 мкг/л), кроме Воронки и Мезенского залива, где воды характеризуются как мезотрофные (0,5—1,0 мкг/л). В следующие сезоны градиенты сглаживаются: летом по всей акватории моря уже преобладают мезотрофные воды с отдельными очагами эвтрофных вод, осенью трофность вод становится еще меньше — преобладают олиготрофные воды.

Литература

1. Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. — М.: Наука, 1983. — 183 с.
2. Актуальные проблемы современной океанологии / Гл. ред. Н. П. Лаверов; Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова РАН. — М.: Наука, 2003. — 635 с.
3. Ильин Г. В., Усягина И. С., Касаткина Н. Е. Геоэкологическое состояние среды морей российского сектора Арктики в условиях современных техногенных нагрузок // Вестн. Кольского науч. центра РАН. — 2015. — № 2. — С. 82—93.
4. Толстиков А. В., Чернов И. А. Антропогенное воздействие на экологическое состояние Белого моря // Науч.-исслед. публикации. — 2014. — № 15 (19). — С. 19—31.
5. Бреховских В. Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима. — М.: Наука, 1988. — 167 с.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: В 10 т. — Т. 2: Белое море. — Вып. 2: Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биопродуктивности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1991. — 193 с.
7. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодники за 2001—2014 гг.

8. Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. — Т. 2. — Ч. 1: Белое море. 1976—2014 гг.
9. Ишкулова Т. Г. Гидрохимические исследования вод Белого моря в августе 2003 г. // Актуальные проблемы изучения и использования водных биоресурсов: материалы 2-й Всероссийской интернет-конференции молодых ученых. — Владивосток, 2004. — С. 148—151.
10. Чугайнова В. А. Гидрохимическая характеристика вод Белого моря по данным исследований 2001—2002 гг. // Материалы отчетной сессии Северного отделения ПИНРО по итогам научно-исследовательских работ 2001—2002 гг. — Архангельск, 2003. — С. 18—25.
11. Чугайнова В. А. Комплексные исследования экосистемы Онежского залива Белого моря в 2001—2008 гг. // Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря: Материалы XI Всероссийской конференции с международным участием. — СПб., 2010. — С. 205—206.
12. Чугайнова В. А. Тенденции изменений некоторых гидрохимических характеристик вод Белого моря в 2001—2006 гг. // Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря: Материалы X международной конференции. — Архангельск, 2007. — С. 77—80.
13. Максимова М. П. Гидрохимия Белого моря: Дис. ... д-ра геогр. наук по специальности 11.00.08. — М., 1989. — 475 с.
14. Система Белого моря. — Т. 2: Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. — М.: Науч. мир, 2012. — 784 с.
15. Чугайнова В. А. Океанологический мониторинг вод Белого моря в 2001—2013 гг. // Материалы XVI конференции по промысловой океанологии. — Калининград, 2014. — С. 161—163.
16. Мискевич И. В. Оценка сезонной и междугодовой изменчивости гидролого-гидрохимических показателей прибрежных участков Белого моря в период 2000—2009 гг. // Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря: Материалы XI Всероссийской конференции с международным участием. — СПб., 2010. — С. 115—116.
17. 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. 3. — М., 2017. — С. 254—258.
18. Сапожников В. В. Морская гидрохимия в XXI в. // Новые идеи в океанологии. — Т. 1: Физика. Химия. Биология. — М.: Наука, 2004. — С. 159—167.
19. Мордасова Н. В. Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // Тр. ВНИРО. — 2014. — Т. 152. — С. 41—56.
20. Девяткин В. Г., Метелева Н. Ю. О роли фитопланктона в формировании кислородного режима водоема в связи с климатическими вариациями // Вода: химия и экология. — 2012. — № 12. — С. 68—74.
21. Берникова Т. А., Кривоусова Е. В., Назорнова Н. Н. Хлорофилл «а» и взаимосвязанные с ним гидрологические характеристики реки Неман в районе строящейся Балтийской атомной электростанции // Науч. журн. «Известия КГТУ». — 2015. — № 38. — С. 1—10.
22. Ильях Л. В., Ратькова Т. Н., Радченко И. Г. и др. Состав и пространственно-временная изменчивость фитопланктона // Биологические ресурсы Белого моря: изучение и использование. — СПб.: ЗИН РАН, 2012. — С. 48—67. — (Сер. «Исследования фауны морей»; т. 69).
23. Ильях Л. В., Радченко И. Г., Кузнецов Л. Л. и др. Пространственная вариабельность состава, обилия и продукции фитопланктона Белого моря в конце лета // Океанология. — 2011. — Т. 51, № 1. — С. 24—32
24. Чугайнова В. А., Македонская И. Ю. Сезонные изменения первичной продуктивности и хлорофилла «а» в районе Соловецких островов // Морские прибрежные экосистемы: водоросли, беспозвоночные и продукты их переработки: Тезисы докладов 3-й Международной научно-практической конференции. — Владивосток, 2008. — С. 163—164.
25. Македонская И. Ю. Фитопланктон заливов Белого моря в 2001—2008 гг. // Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. XI Всероссийская конференция с международным участием. — СПб., 2010. — С. 106—107.
26. Македонская И. Ю., Отченаш Н. Г. Характеристика фитопланктона Белого моря в 2001—2008 гг. // Материалы XII Международной конференции с элементами школы для молодых ученых и аспирантов «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря». — Петрозаводск, 2013. — С. 199—201.
27. Македонская И. Ю., Мохова О. Н. Межгодовая динамика фитопланктона и биогенных веществ в Двинском заливе Белого моря // V Балтийский морской форум. Всероссийская научная конференция «Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов»: Сб. тр. — Калининград, 2017. — С. 197—202.
28. Коробов В. Б., Середкин К. А., Лохов А. С. и др. 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. 3. — М., 2015. — С. 203—205.
29. Мискевич И. В., Самохина Л. А. Реализация экологических моделей, использующих связи «воздействие-отклик», с помощью регрессионного анализа границ корреляционного поля // Вестн. Арханг. гос. техн. ун-та. — 2008. — Вып. 75. — С. 8—15.

Информация об авторах

Нецветаева Ольга Петровна, инженер-океанолог, ООО «Агентство прикладной экологии» (163020, Россия, Архангельск, ул. Шилова, д. 6), e-mail: melob@bk.ru.

Македонская Ирина Юрьевна, старший научный сотрудник, Северный филиал ФГБНУ Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича (163002, Россия, Архангельск, ул. Урицкого, д. 17).

Коробов Владимир Борисович, доктор географических наук, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский проспект, д. 36).

Змётная Мария Ивановна, кандидат географических наук, заведующий лабораторией промысловой океанографии, ФГБНУ Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича, Северный филиал (163002, Россия, Архангельск, ул. Урицкого, д. 17), e-mail: zmetnaya@pinro.ru.

Библиографическое описание данной статьи

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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-31-41.

DEPENDENCE OF OXYGEN SATURATION ON THE “A” CHLOROPHYLL CONTENT IN THE SURFACE LAYER OF THE WHITE SEA

Netsvetaeva O. P.

LLC “Agency of applied ecology” (Arkhangelsk, Russian Federation)

Makedonskaya I. Yu.

North Branch of Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (Arkhangelsk, Russian Federation)

Korobov V.B.

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Zmetnaya M.I.

North Branch of Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (Arkhangelsk, Russian Federation)

Abstract

The paper attempts to reveal the relationship between oxygen saturation and the “a” chlorophyll content in the surface layer of the White Sea, and the assumption was made that if the nature of such dependence was found; the oxygen saturation index could be used in estimating the trophicity of the White Sea waters. The study was based on the initial data obtained during the PINRO surveys of the Northern Branch and the Northern UGMS in 2001-2014 (with the exception of 2009). Oxygen dissolved in the water was measured by Winkler method, the “a” chlorophyll content was determined in accordance with GOST 17.1.4.02-90 (spectrophotometry method). Seasonal maps of the indicator distribution were made using the RBF-ML method by means of Surfer and specially developed “oxygen_interp_build” application. Mathematical data were processed with the aid of traditional statistical parameters of the IBM SPSS Statistics 21.0 software. The graphs were constructed using MS Excel 2016. The study showed that the oxygen saturation and “a” chlorophyll content in the surface layer of the White Sea had a tendency of a general decrease of parameters from spring to summer, and then to autumn. It is shown that, by reducing the number of correlation points by selecting the median oxygen saturation values for certain intervals of the “a” chlorophyll values, it is possible to identify the relationship between the indicators considered. Thus, between the oxygen saturation and the “a” chlorophyll content in the surface waters of the White Sea there is a positive relationship with the greatest closeness ($r = 0.9516$) with the “a” chlorophyll content of $1.0 \mu\text{g/l}$. With further increase in its content, the tightness of the connection weakens ($r = 0.1594$ in the range of the “a” chlorophyll of $1.1-2.5 \mu\text{g/l}$).

Keywords: oxygen saturation, “a” chlorophyll, the White Sea, regression analysis.

References

1. Gordeev V. V. Rechnoi stok v okean i cherty ego geokhimii. [River runoff in the ocean and features of its geochemistry]. Moscow, Nauka, 1983, 183 p. (In Russian).
2. Aktual'nye problemy sovremennoi okeanologii. [Actual problems of modern oceanology]. Gl. red. N. P. Laverov; In-t okeanologii im. P. P. Shirshova RAN. Moscow, Nauka, 2003, 635 p. (In Russian).
3. Il'in G. V., Usyagina I. S., Kasatkina N. E. Geoekologicheskoe sostoyanie sredy morei rossiiskogo sektora Arktiki v usloviyakh sovremennykh tekhnogennykh nagruzok. [Geocological state of the environment of the seas of the Russian Arctic sector in conditions of modern man-made loads]. Vestn. Kol'skogo nauch. tsentra RAN, 2015, no. 2, pp. 82—93. (In Russian).
4. Tolstikov A. V., Chernov I. A. Antropogennoe vozdeistvie na ekologicheskoe sostoyanie Belogo morya. [Anthropogenic impact on the ecological state of the White Sea]. Nauch.-issled. publikatsii, 2014, no. 15 (19), pp. 19—31. (In Russian).
5. Brekhovskikh V. F. Gidrofizicheskie faktory formirovaniya kislorodnogo rezhima. [Hydrophysical factors of oxygen regime formation]. Moscow, Nauka, 1988, 167 p. (In Russian).
6. Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei CCSR: V 10 t. T. 2: Beloe more. — Vyp. 2: Gidrokhimicheskie usloviya i okeanologicheskie osnovy formirovaniya bioproduktivnosti. [Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR seas in 10 vol. Vol. 2. White sea. Ed. 2. Hydrochemical conditions and oceanological foundations of bioproductivity formation]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991, 193 p. (In Russian).
7. Kachestvo morskikh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam. Ezhegodniki za 2001—2014 gg. [Quality of marine waters by hydrochemical indicators. Yearbooks 2001—2014]. (In Russian).
8. Ezhegodnye dannye o rezhime i kachestve vod morei i morskikh ust'ev rek. — T. 2. — Ch. 1: Beloe more. 1976—2014 gg. [Annual data on the regime and quality of the waters of the seas and marine estuaries of rivers. Vol. 2. Pt. 1. The White Sea. 1976—2014]. (In Russian).
9. Ishkulova T. G. Gidrokhimicheskie issledovaniya vod Belogo morya v avguste 2003 g. [Hydrochemical studies of the waters of the White Sea in August 2003]. Aktual'nye problemy izucheniya i ispol'zovaniya vodnykh biosursov: materialy 2-i Vserossiiskoi internet-konferentsii molodykh uchenykh. Vladivostok, 2004, pp. 148—151. (In Russian).
10. Chugainova V. A. Gidrokhimicheskaya kharakteristika vod Belogo morya po dannym issledovaniyu 2001—2002 gg. // Materialy otchetnoi sessii Severnogo otdeleniya PINRO po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot 2001—2002 gg. Arkhangel'sk, 2003, pp. 18—25. (In Russian).
11. Chugainova V. A. Kompleksnye issledovaniya ekosistemy Onezhskogo zaliva Belogo morya v 2001—2008 gg. [Hydrochemical characteristics of the waters of the White Sea according to the 2001–2002 research data]. Problemy izucheniya, ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany prirodnykh resursov Belogo morya: Materialy XI Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. St. Petersburg, 2010, pp. 205—206. (In Russian).
12. Chugainova V. A. Tendentsii izmenenii nekotorykh gidrokhimicheskikh kharakteristik vod Belogo morya v 2001—2006 gg. [Tendencies of changes in some hydrochemical characteristics of the waters of the White Sea in 2001—2006]. Problemy izucheniya, ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany resursov Belogo morya: Materialy X mezhdunarodnoi konferentsii. Arkhangel'sk, 2007, pp. 77—80. (In Russian).
13. Maksimova M. P. Gidrokimiya Belogo morya: Dis. ... d-ra geogr. nauk po spetsil'nosti 11.00.08. [Hydrochemistry of the White Sea. Doct. Diss.]. Moscow, 1989, 475 p. (In Russian).
14. Sistema Belogo morya. Vol. 2. Vodnaya tolshcha i vzaimodeistvuyushchie s nei atmosfera, kriosfera, rechnoi stok i biosfera. [System of the White Sea. Vol. II. The water column and the atmosphere interacting with it, the cryosphere, the river flow and the biosphere]. Moscow, Nauch. mir, 2012, 784 p. (In Russian).
15. Chugainova V. A. Okeanologicheskii monitoring vod Belogo morya v 2001—2013 gg. [Oceanological monitoring of the waters of the White Sea in 2001–2013]. Materialy XVI konferentsii po promyslovoi okeanologii. Kaliningrad, 2014, pp. 161—163. (In Russian).
16. Miskevich I. V. Otsenka sezonnoi i mezhdugodovoi izmenchivosti gidrologo-gidrokhimicheskikh pokazatelei pribrezhnykh uchastkov Belogo morya v period 2000—2009 gg. [Estimation of seasonal and inter-annual variability of hydro-hydrochemical indicators of the coastal areas of the White Sea in the period 2000–2009]. Problemy izucheniya, ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany prirodnykh resursov Belogo morya: Materialy XI Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. St. Petersburg, 2010, pp. 115—116. (In Russian).
17. Netsvetaeva O. P., Zmetnaya M. I., Korobov V. B. Osobennosti kislorodonasyshcheniya vod Belogo morya v nachale XXI veka. [Peculiarities of the oxygen saturation of the waters of the White Sea at the beginning of the XXI century]. Geologiya morei i okeanov: Materialy XXII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii. Vol. 3. Moscow, 2017, pp. 254—258. (In Russian).
18. Sapozhnikov V. V. Morskaya gidrokimiya v XXI v. [Marine hydrochemistry in the XXI century]. Novye idei v okeanologii. Vol. 1. Fizika. Khimiya. Biologiya. Moscow, Nauka, 2004, pp. 159—167. (In Russian).
19. Mordasova N. V. Kosvennaya otsenka produktivnosti vod po sodержaniyu khlorofilla. [Indirect assessment of water productivity by chlorophyll content]. Tr. VNIRO, 2014, vol. 152, pp. 41—56. (In Russian).
20. Devyatkin V. G., Meteleva N. Yu. O roli fitoplanktona v formirovanii kislorodnogo rezhima vodoema v svyazi s klimaticheskimi variatsiyami. [Role of phytoplankton

- in the formation of oxygen regime of a waterbody in view of climatic variations]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2012, no. 12, pp. 68—74. (In Russian).
21. *Bernikova T. A., Krivopuskova E. V., Nagornova N. N.* Khlorofill “a” i vzaimosvyazannye s nim gidrologicheskie kharakteristiki reki Neman v raione stroyashcheysya Baltiiskoi atomnoi elektrostantsii. [Chlorophyll “a” and the associated hydrological characteristics of the Neman River in the area of the Baltic Nuclear Power Plant under construction]. *Nauch. zhurn. “Izvestiya KGTU”*, 2015, no. 38, pp. 1—10. (In Russian).
22. *Il'yash L. V., Rat'kova T. N., Radchenko I. G., Zhitina L. S., Belevich T. A., Fedorov V. D.* Sostav i prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' fitoplanktona. [Composition and spatio-temporal variability of phytoplankton]. *Biologicheskie resursy Belogo morya: izuchenie i ispol'zovanie*. St. Petersburg, ZIN RAN, 2012, pp. 48—67. (Ser. “Issledovaniya fauny morei”; vol. 69). (In Russian).
23. *Il'yash L. V., Radchenko I. G., Kuznetsov L. L., Lisitsin A. P., Martynova D. M., Novigatskii A. N., Chul'tsova A. L.* Spatial variability of the species composition, abundance, and productivity of the phytoplankton in the White Sea in the late summer period. *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 1, pp. 19—26.
24. *Chugainova V. A., Makedonskaya I. Yu.* Sezonnnye izmeneniya pervichnoi produktivnosti i khlorofilla “a” v raione Solovetskikh ostrovov. [Seasonal changes in primary productivity and chlorophyll “a” in the Solovetsky Islands]. *Morskie pribrezhnye ekosistemy: vodorosli, bespozvonochnye i produkty ikh pererabotki. Tezisy dokladov 3-i Mezhdunarodnoi nauchno prakticheskoi konferentsii*. Vladivostok, 2008, pp. 163—164. (In Russian).
25. *Makedonskaya I. Yu.* Fitoplankton zalivov Belogo morya v 2001—2008 gg. [Phytoplankton of the bays of the White Sea in 2001—2008]. *Problemy izucheniya ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany prirodnykh resursov Belogo morya*. XI Vserossiiskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem. St. Petersburg, 2010, pp. 106—107. (In Russian).
26. *Makedonskaya I. Yu., Otchenash N. G.* Kharakteristika fitoplanktona Belogo morya v 2001—2008 gg. // *Materialy XII Mezhdunarodnoi konferentsii s elementami shkoly dlya molodykh uchenykh i aspirantov “Problemy izucheniya, ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany prirodnykh resursov Belogo morya”*. Petrozavodsk, 2013, pp. 199—201. (In Russian).
27. *Makedonskaya I. Yu., Mokhova O. N.* Mezhgodovaya dinamika fitoplanktona i biogennykh veshchestv v Dvinskom zalive Belogo morya. [Interannual Dynamics of Phytoplankton and Nutrients in the Dvina Bay of the White Sea]. V Baltiiskii morskoi forum. Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya “Vodnye bioresursy, akvakul'tura i ekologiya vodoemov”: sbornik trudov. Kaliningrad, 2017, pp. 197—202. (In Russian).
28. *Korobov V. B., Seredkin K. A., Lokhov A. S., Netsvetaeva O. P., Kosheleva V. P.* Problemy interpolatsii prostranstvenno-neodnorodnykh dannykh na neregulyarnykh setkakh v Belom more. [Problems of interpolation of spatially inhomogeneous data on irregular grids in the White Sea]. *Geologiya morei i okeanov: Materialy XXI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii*. Vol. 4. Moscow, 2015, pp. 203—205. (In Russian).
29. *Miskevich I. V., Samokhina L. A.* Realizatsiya ekologicheskikh modelei, ispol'zuyushchikh svyazi “vozdeistvie-otklik”, s pomoshch'yu regressionnogo analiza granits korrelyatsionnogo polya. [Realization of ecological models using “impact-response” links, using regression analysis of the boundaries of the correlation field]. *Vestn. Arkhang. gos. tekhn. un-ta*, 2008, iss. 75, pp. 8—15. (In Russian).

Information about the authors

Netsvetaeva Olga Petrovna, Ocean Engineer, LLC “Agency of applied ecology” (6, Shilova st., Arkhangelsk, Russia, 163020), e-mail: melob@bk.ru.

Makedonskaya Irina Yuryevna, Senior Researcher, North Branch of Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (17, Uritsky st., Arkhangelsk, Russia, 163002).

Korobov Vladimir Borisovich, Doctor of Geographic Sciences, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36, Nakhimovsky Prosp., Moscow, Russia, 117997).

Zmetnaya Maria Ivanovna, Candidate of Geographic Sciences, Head of laboratory of commercial oceanography, North Branch of Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (17, Uritsky st., Arkhangelsk, Russia, 163002).

Bibliographic description

Netsvetaeva O. P., Makedonskaya I. Yu., Korobov V. B., Zmetnaya M. I. Dependence of oxygen saturation on the “a” chlorophyll content in the surface layer of the White Sea. *Arctic: ecology and economy*, 2018, no. 3 (31), pp. 31—41. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-31-41. (In Russian).