

УДК 551.58 528.8

МНОГОЛЕТНИЕ ТЕНДЕНЦИИ В ДИНАМИКЕ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ БЕЛОГО МОРЯ: СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ 2003–2020 ГГ.

Е. А. Морозов^{1*}, Д. В. Поздняков²

¹ Морской гидрофизический институт РАН (ул. Капитанская, 2, Севастополь, Россия, 299011), * frisman@list.ru

² Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена» (Фонд «Нансен-центр») (14-я линия В. О., 7, оф. 49, Санкт-Петербург, Россия, 199034)

Приведены и обсуждаются результаты спутниковых наблюдений за качеством вод в Белом море (БМ) в течение вегетационного периода на протяжении 2003–2020 гг. Впервые получены статистические данные почти на двадцатилетнем временном промежутке по пространственно-временной динамике концентраций хлорофилла *a* фитопланктона (ХЛ), консервативной фракции растворенного органического вещества (РОВ) и минеральной взвеси, в сочетании с данными о температуре поверхности воды (ТПВ) и речном стоке. Величина и знак изменений указанных параметров в традиционно выделяемых районах морской акватории оказались различными. Выяснилось, что в процентном отношении произошедшие сдвиги ХЛ относительно невысоки. В Онежском и Мезенском заливах, а также в Воронке и Горле за период 2003–2020 гг. ХЛ выросла за вегетационный сезон в целом в диапазоне от 4 до 8 %, а в Кандалакшском заливе и Бассейне снизилась на ~3 – ~4 %. Таким образом, в условиях происходящего климатического сдвига и на фоне зарегистрированного роста от 2 до ~7 % ТПВ, 11–13-процентного суммарного увеличения (за март–октябрь) стока основных рек БМ и связанного с этим увеличения уровня РОВ на ~2–10 %, а также усиления мутности воды, серьезных изменений в уровне продуктивности БМ не обнаружено. Отсутствие в условиях умеренно меняющихся факторов окружающей среды признаков мультипликативного эффекта в динамике первичного продуцирования дает основание полагать, что экологическая система БМ на современном этапе остается устойчивой.

Ключевые слова: Белое море; дистанционное зондирование; хлорофилл; взвешенное минеральное вещество; окрашенное растворенное органическое вещество; температура поверхности воды; сток рек; влияние потепления климата; пространственно-временная динамика параметров качества воды

Для цитирования: Морозов Е. А., Поздняков Д. В. Многолетние тенденции в динамике развития фитопланктона в поверхностных водах Белого моря: спутниковые наблюдения 2003–2020 гг. // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 98–110. doi: 10.17076/lim2144

Финансирование. Часть исследования выполнена в рамках госзадания МГИ РАН FNNN-2024-0012.

E. A. Morozov^{1*}, D. V. Pozdnyakov². MULTIYEAR TRENDS IN PHYTOPLANKTON GROWTH IN THE WHITE SEA SURFACE WATERS: A SATELLITE STUDY ACROSS 2003–2020

¹Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences (2 Kapitanskaya St., 299011 Sevastopol, Russia), * frisman@list.ru

²Nansen International Environmental and Remote Sensing Center (14th Line, 7, Office 49, Vasilievsky Island, 199034 St. Petersburg, Russia)

The article presents and discusses the results of satellite observations of water quality in the White Sea (WS) during the growing season from 2003 to 2020. For the first time, statistical data were obtained over an almost twenty-year time interval on the spatio-temporal dynamics of phytoplankton chlorophyll (CHL), chromophoric/refractory dissolved organic matter (DOM), and suspended mineral matter concentrations in conjunction with sea surface temperature (SST) and river discharge. The magnitude and sign of changes in these parameters proved to vary between the traditionally distinguished sub-areas of the sea. However, in percentage terms, the shifts in CHL concentrations were relatively small. In Onega and Mezen Bays, as well as in Voronka and Gorlo, growing-season's CHL concentrations increased in the range of 4–8 % from 2003 to 2020. At the same time, in the Gulf of Kandalaksha and the Basin, primary productivity decreased by ~3 – ~4 %. That is, no major change has occurred in the productivity level of the White Sea. The rise in the SST (2 – ~7 %), however, points to climate warming in the WS region. The 11–13 % increase in the March to October total runoff of the WS main rivers (reflected in the DOM increase by ~2–10 %) is in line with the ongoing climate change. There being no indications of a multiplier effect in the dynamics of primary production under the moderate change in environmental factors, the WS ecological system can presently be assumed to remain quite stable.

Keywords: White Sea; remote sensing; chlorophyll; suspended mineral matter; colored dissolved organic matter; water surface temperature; river runoff; impact of climate warming; spatio-temporal dynamics of water quality parameters

For citation: Morozov E. A., Pozdnyakov D. V. Multiyear trends in phytoplankton growth in the White Sea surface waters: a satellite study across 2003–2020. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 98–110. doi: 10.17076/lim2144

Funding. The study was partially implemented under state assignment to the Marine Hydrophysical Institute RAS FNNN-2024-0012.

Введение

Наблюдающиеся за последние 30 лет значительные сдвиги во многих характеристиках окружающей среды в Арктике [Филатов и др., 2012; Ardyna, Arrigo, 2020; Серых, Толстиков, 2022] находят свое отражение в существенных изменениях состояния ее экосистемы как на панарктическом, так и на региональном уровне [Тишков и др., 2019; Филатов и др., 2019; Серых, Толстиков, 2022; Frolova et al., 2023; Malysheva et al., 2023]. В частности, зарегистрированы изменения в численности и флористическом составе фитопланктонных сообществ и, как следствие, – в функционировании всей цепи трофических взаимодействий [Sergeeva et al., 2020; Кашулин, Беккелунд, 2022].

Это в равной мере относится к Белому морю (БМ) – окраинному средиземному субарктическому водоему. Из характерных черт,

выделяющих БМ на фоне других шельфовых морей Арктики, можно назвать чрезвычайно большое влияние речного стока, поступление значительных объемов вод сопредельного моря, наличие интенсивных приливных течений, а также сильно выраженную морфологическую неоднородность этого водоема. Последняя обуславливает, совместно с речным стоком, отчетливо выраженную в нем районированность гидродинамических процессов и экологических условий.

Влияние пространственно-временной динамики внешних и внутриводных условий на разных временных масштабах прослеживается и на уровне гидробионтов БМ, по-видимому, прежде всего – первичных продуцентов, определяющих иерархические взаимодействия морской трофической системы [Ilyash et al., 2018].

Определяя баланс между процессами продуцирования и разложения, концентрации

фитопланктона, как фотосинтезирующего первичного продуцента, и растворенного хромофорного органического вещества (РОВ) являются экологическими параметрами, отражающими трофический уровень водоема. Концентрация взвешенных частиц, прежде всего взвешенного минерального вещества (ВМВ), как наиболее многочисленных и сильно сказывающихся на уровне прозрачности воды и, следовательно, интенсивности фотохимических процессов, является также важным параметром в оценке состояния природных вод.

Таким образом, концентрации фотосинтезирующего пигмента хлорофилла *a* фитопланктона (ХЛ), как индикатора концентрации клеток всех видов фитопланктона [Roy et al., 2011], а также РОВ и ВМВ являются во многом интегральными индикаторами экологического состояния водоема, часто называемыми параметрами качества воды (ПКВ) [Bukata et al., 1995; Sokoletsky et al., 2012]. Как поглощающие и рассеивающие солнечный свет субстанции, наряду с водой как таковой, ХЛ, РОВ и ВМВ формируют цвет воды, и таким образом, их содержание в водоеме может быть оценено дистанционными оптическими датчиками, измеряющими интенсивность и спектральный состав светового потока, выходящего из-под поверхности воды. Спутниковое дистанционное зондирование позволяет с высоким пространственным и временным разрешением осуществлять синоптический мониторинг текущего состояния и соответствующие количественные оценки в протяженных и биогеохимически неоднородных водных объектах [Копелевич и др., 2018].

Так, по спутниковым данным по БМ установлено, что в течение 1998–2004 гг. в Кандалакшском, Онежском и Северодвинском заливах, а также в Бассейне и Горле за вегетационный период происходило сокращение концентрации ХЛ фитопланктона в пределах от –5 до –20 мкг/л, увеличение мутности, а также окрашенности консервативной/хромоформной фракцией аллохтонного РОВ. При этом конкретные численные показатели носили явно региональный характер, т. е. отчетливую приуроченность к упомянутым районам [Pozdnyakov et al., 2007].

Поскольку выявленные изменения могли быть обусловлены лишь усилением потепления в Арктике [Филатов и др., 2012] и погодными сдвигами непосредственно в районе БМ, полученные результаты давали основание полагать, что экосистемы полузамкнутых шельфовых морей Северного Ледовитого океана довольно оперативно реагируют на климати-

ческие изменения и, таким образом, уязвимы в перспективе усиливающегося глобального потепления.

В настоящей работе расширен временной интервал исследования с момента упомянутых выше наших предыдущих наблюдений 1998–2003 гг. Цель – проследить дальнейшую пространственно-временную динамику содержания в поверхностных водах БМ концентрации ХЛ фитопланктона, консервативной фракции РОВ, а также ВМВ на протяжении 2003–2020 гг., добавив в рассмотрение также данные по температуре поверхности воды (ТПВ) и стоку наиболее полноводных рек (СР). И таким образом актуализировать наше понимание характера влияния на экологию БМ происходящих/усиливающихся процессов потепления климата в Арктическом регионе.

Объект исследования

Как следует из энциклопедической монографии [Filatov et al., 2005], Белое море – субарктический водоем с площадью зеркала 90 000 км². Сильная морфометрическая неоднородность (средние глубины 60 м, максимальная глубина 340 м) проявляется в наличии четырех крупных заливов (Кандалакшский, Онежский, Северодвинский и Мезенский) и резких свалов глубин на границе с Баренцевым морем, а также между центральной частью (Бассейном) и проливом (Горлом), соединяющим БМ с Баренцевым морем через промежуточную область (Воронка), которая непосредственно прилегает к Баренцеву морю (рис. 1). Это определяет естественное районирование БМ и отражает характерную пространственную неоднородность не только гидродинамических процессов, но и экологических условий в БМ, на формирование которых оказывают большое влияние и крупные реки (Мезень и Поной, Онега, Северная Двина, Варзуга, впадающие, соответственно, в Мезенский, Онежский, Двинский заливы и Бассейн), а также множество более мелких рек. Приток пресных/речных вод (максимальный весной и наименьший в конце зимы – начале весны) регулирует уровень моря и величину водообмена с Баренцевым морем: в среднем за год $2 \cdot 10^3$ км³ баренцевоморской воды поступает в БМ и $2,2 \cdot 10^3$ км³ покидают БМ.

Значительно заболоченный водосбор обуславливает поступление в БМ большого количества силикатов, фосфатов, РОВ, нитритного и аммонийного (но не нитратного) азота, обогащая этими веществами поверхностный слой прилежащих к устьям рек беломорских вод и снижая их прозрачность.

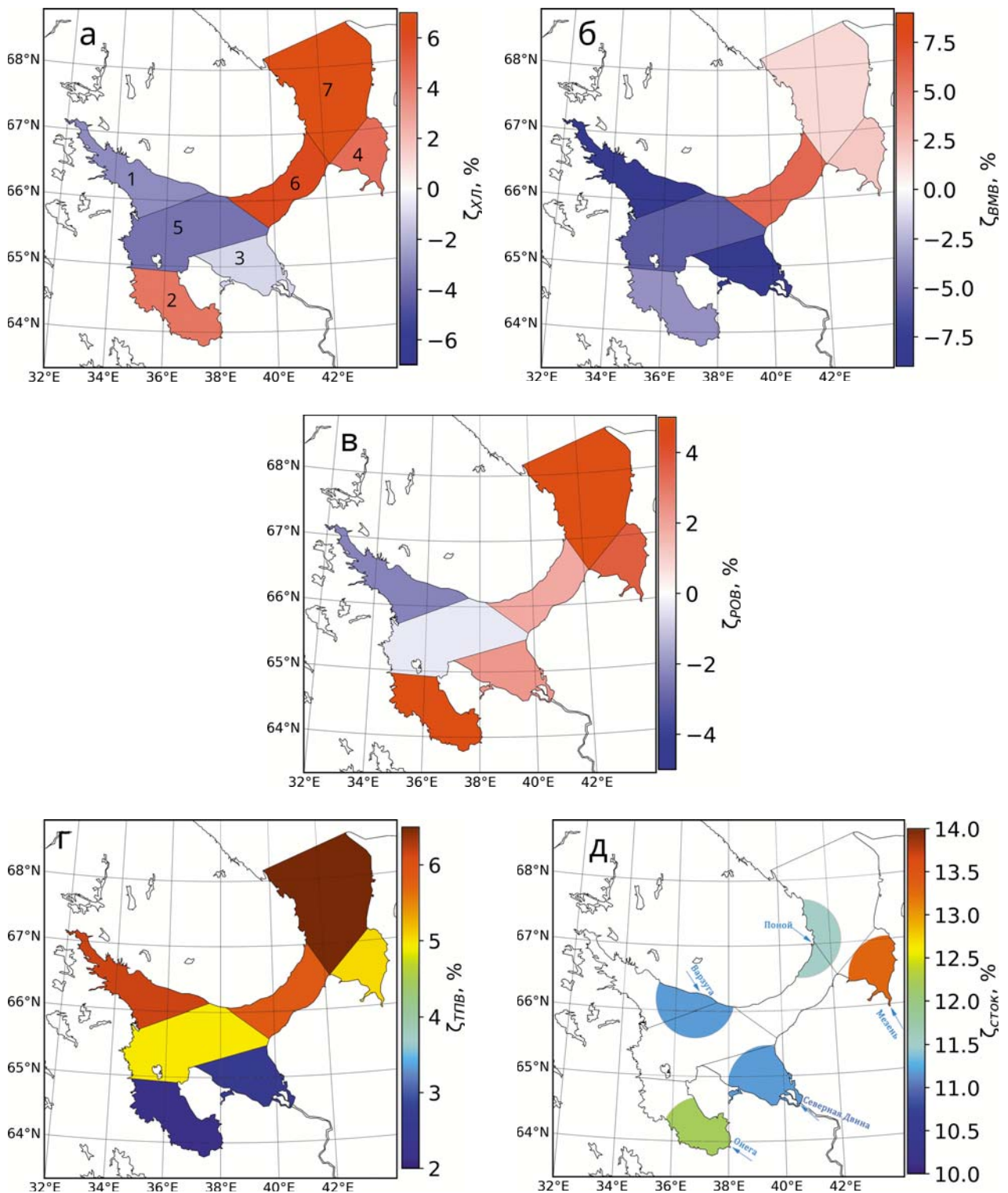


Рис. 1. Значение параметра ζ (%) по выделенным районам Белого моря в вегетационный период для параметров качества воды (ПКВ) (а – хлорофилла а, б – взвешенной минеральной взвеси, в – растворенного органического вещества), температуры поверхности воды (г) и речного стока (д) между двумя временными промежутками 2003–2011 и 2012–2020 гг. Цифрами на фрагменте а обозначены Кандалакшский (1), Онежский (2), Двинский (3), Мезенский (4) заливы, Бассейн (5), Горло (6), Воронка (7)

Fig. 1. а – ζ_{chl} , б – ζ_{smm} , в – ζ_{dom} as well as г – ζ_{sst} and д – ζ_{rd} values in (%) pertaining to the identified subareas in the White Sea during the vegetation period between two time periods 2003–2011 and 2012–2020. Numbers in Fig. 1a stand for Kandalakhsky (1), Onezhsky (2), Dvinsky (3), Mezensky (4) Bays, Bassein (5), Gorlo (6), and Voronka (7)

Этот эффект в значительной мере усиливается интенсивными турбулизированными течениями над встречающимися в различных районах БМ глинистыми наносами, а также илистыми и песчаными донными отложениями соответственно абразивного и приливно-отливного происхождения. В совокупности все это снижает глубину эвфотической зоны ($Z_{эф}$), которая варьирует в БМ в диапазоне 5–15 м [Вазюля и Копелевич, 2012]. Согласно [Kravchishina et al., 2013], ниже уровня $Z_{эф}$ глубинные максимумы концентрации клеток фитопланктона в БМ не обнаруживаются, и даже в летний период концентрация ХЛ $\approx 0,05$ мкг/л.

Гидрологический режим в БМ определяется синоптическими метеорологическими условиями, водообменом с Баренцевым морем, приливами (со скоростями в заливах от ~ 1 до 9 км/ч), расходом рек и рельефом дна. Течения формируются халинными механизмами: опресненные поверхностные воды продвигаются вдоль восточных берегов моря и поступают через Горло в Баренцево море, откуда вдоль западных берегов в БМ поступают заглубленные более соленые баренцевоморские воды. Эти же механизмы формируют множественные вихревые циклонические структуры в Бассейне – центральной части БМ.

В зависимости от района характерная температура в поверхностных водах по акватории БМ составляет 9–17 °С летом и 0,5–1,7 °С зимой. Устойчивое появление льда наблюдается в ноябре–декабре, а освобождение ото льда зависит от погодных условий конкретного года.

Штормовые условия в БМ особенно характерны зимой, однако в Онежском заливе, Бассейне и Двинском заливе очень сильные ветры (>20 м/с) регистрируются и в октябре.

Методология

Алгоритмизация процедуры восстановления концентраций ПКВ

В пелагиальных океанических водах, в которых вариации интенсивности и спектрального состава светового сигнала, выходящего из-под поверхности воды ($L_{up}(\lambda)$), т. е. цвета воды, однозначно связаны с вариациями концентрации фитопланктона, стандартные одномерные регрессионные алгоритмы NASA (National Aeronautics and Space Administration) и ESA (European Space Agency) применимы для количественной оценки ХЛ, но неприменимы в этих целях в случае водоемов с гидрооптически сложными водами, примером которых является БМ. Для БМ характерны достаточно высокие

уровни первичной продукции, а также высокие концентрации растворенных и взвешенных веществ морского и водосборного происхождения, обозначенных выше как ПКВ. Поскольку ПКВ независимо друг от друга влияют на спектр дистанционно регистрируемого светового сигнала, восстановление индивидуальных концентраций ПКВ из пространственно-временных вариаций $L_{up}(\lambda)$ с использованием одномерных регрессионных алгоритмов невозможно.

Для преодоления этой сложности в работе применен алгоритм многомерной оптимизации BOREAL, основанный на методе многомерной оптимизации [Pozdnyakov et al., 2005].

Многомерное решение методом наименьших квадратов на всех длинах волн находится путем минимизации функции квадратов невязки:

$$f(C) = \sum_j g_j^2(C),$$

где $g_j = (S_j - R_{rswj})/S_j$, S_j и R_{rswj} – соответственно измеренный и рассчитанный с использованием гидрооптической модели (т. е. значений коэффициентов поглощения и рассеяния назад, отнесенных к единице концентрации ПКВ) коэффициент отражения для дистанционного зондирования $R_{rs}(\lambda)$ на длине волны λ , $C = \sum C_i$, i – ПКВ ($i = 1, 2, 3$). По определению, $R_{rs}(\lambda)$ – спектральная яркость восходящего потока непосредственно под границей раздела вода-воздух, нормированная на спектральную освещенность нисходящего потока на том же уровне [Bukata et al., 2001]. $R_{rs}(\lambda)$ рассчитывается из значений коэффициента отражения для дистанционного зондирования $R_{rs}(\lambda)$, определяемого как спектральная яркость света, исходящего из водяного столба и нормированная на спектральную освещенность (с учетом атмосферной коррекции) водной поверхности [Mobley, 1999]. $R_{rs}(\lambda)$ является стандартным продуктом основных платформ спутниковых данных цвета океана. Алгоритм BOREAL использует значения $R_{rs}(\lambda)$, получаемые из значений $R_{rs}(\lambda)$ с помощью параметризации, предложенной Lee et al. [2002].

В алгоритме BOREAL применена конечно-разностная процедура Левенберга – Марквардта [Press et al., 1992], обеспечивающая быструю сходимость итерационной процедуры при наложении априорных ограничений на диапазон варьируемых при этом значений C_i : $C_{i\min} < C_i < C_{i\max}$. В качестве последних выступают соответствующие литературные натурные данные для зондируемого водоема.

При использовании соответствующей водоему гидрооптической модели (т. е. табулированных удельных спектральных значений

коэффициентов поглощения и рассеяния назад каждого ПКВ) алгоритм BOREAL успешно работает для условий Ладожского и Онежского озер, Великих Американских озер, Белого, Баренцева, Карского и Берингова морей [Pozdnyakov et al., 2007, 2013; Hessen et al., 2010; Korosov et al., 2011; Petrenko et al., 2013; Kondrik et al., 2017].

В данном исследовании использовалась та же гидрооптическая модель БМ, что и в исследовании [Pozdnyakov et al., 2007], в ходе которого статистическая оценка средней ошибки поиска абсолютного минимума функции невязки $f(C)$ для каждого из ПКВ составляла около 15–20 % [Pozdnyakov et al., 2005].

Статистический подход

Поскольку в каждом временном периоде (то есть 2003–2011 и 2012–2020 гг.) у нас есть только 9 годовых данных/чисел по искомым параметрам, усредненных за вегетационный период (июнь–октябрь), использование подхода гистограмм статистического распределения было бы неуместным, а построенные по имеющимся 18 годам тренды в большинстве случаев незначимы или малоинформативны ввиду высокой межгодовой изменчивости. Вместо этого был применен подход, известный как диаграмма размаха (или «ящики с усами», англ. *box-and-whiskers diagrams*) и широко используемый в описательной статистике [Boddy, Smith, 2009].

В нашем случае временной ряд характеризуется малой длиной (18 измерений) и большой дисперсией данных (например, в некоторых случаях тренд может менять знак при исключении первой или последней точки ряда). Поскольку короткий ряд с большой дисперсией имеет малую статистическую значимость тренда, с точки зрения классической параметрической статистики оценка тренда как такового не имеет смысла.

Проведение одним и тем же выбранным методом статистического анализа значений каждого из рассматриваемых ПКВ за указанные выше два временных периода (в дальнейшем условно названные декадами) обеспечивает получение как графического описания статистического распределения полученных данных, так и возможности определения таких вспомогательных характеристик, как степень разброса/дисперсию и асимметрию данных, их средние и медианные характеристики, а также наличие сильных выбросов, являющихся наглядными индикаторами степени репрезентативности среднего значения.

Таким образом, в нашем случае большой дисперсии данных и относительно малой длины рядов имеется возможность оценки методом диаграмм размаха изменения (параметр ζ , здесь и далее в %) среднеарифметических значений по пространству и времени каждого из ПКВ (ХЛ, ВМВ и РОВ), а также влияющих факторов в период с первой (2003–2011 гг.) по вторую (2012–2020 гг.) декаду. Параметр ζ рассчитывается как разница в процентах между значениями ПКВ, ТПВ и стока рек в первой и второй декадах: $\zeta_x = (X_2 - X_1) / X_1 \cdot 100 \%$, где X – один из исследуемых параметров (ХЛ, ВМВ, РОВ, ТПВ, СР), а X_1 и X_2 – средние значения исследуемого параметра за первую и вторую декаду соответственно.

Совместное рассмотрение диаграмм динамики ПКВ и факторов окружающей среды дает возможность их визуального сравнения и выявления наличия или отсутствия влияния одних на другие на фоне происходящих климатических изменений.

Данные и их обработка

Значения $S(\lambda)$ за март–октябрь 2003–2020 гг. были рассчитаны с использованием прошедшей процедуру атмосферной коррекции данных датчика MODIS Aqua, уровня обработки L2, по $R_{rs}(\lambda)$ из единичных спутниковых изображений исключительно только открытой водной поверхности в спектральных каналах 412, 443, 488, 531, 555 и 667 нм.

Пространственные распределения концентраций ПКВ в БМ восстановлены алгоритмом BOREAL и репроецировались на прямоугольную сетку. Длина стороны пикселя была рассчитана на основе предположения, что одна координатная минута на поверхности моря соответствует 1852 м по широте и долготе. На юге и севере акватории моря длины сторон пикселя составили (1 и 1,1) и (1 и 0,9) км соответственно.

Ежедневные репроецированные изображения усреднялись, и методом экспертной оценки отфильтровывались изображения пространственного распределения ПКВ, если хотя бы у одного ПКВ обнаруживались нереалистично высокие значения, покрывающие нереалистично протяженные участки моря. Это требовалось, например, в период арктического лета при очень низком положении Солнца, когда данные, прошедшие автоматическую процедуру проверки NASA L2 и обработанные алгоритмом BOREAL, приводили к неадекватно высоким значениям ПКВ (в разы или даже на порядок выше соответствующих значений в снимке).

Усреднение для каждого пикселя выполнялось как суммирование/наложение ежедневных изображений, прошедших вышеуказанную проверку качества. Средние ежемесячные изображения представляют собой мозаику усредненных пикселей за пикселем ежедневных изображений, полученных за один месяц. В случае отсутствия данных в пикселе интерполяция не производилась. Усреднение среднемесячных изображений для получения среднеклиматических изображений выполнено путем суммирования/наложения среднемесячных изображений, полученных для каждой декады, т. е. 2003–2011 и 2012–2020 гг.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 для периода между двумя декадами 2003–2011 и 2012–2020 гг. даны пространственные распределения по выделенным районам БМ значений параметра ζ (см. раздел «Статистический подход») по каждому из исследуемых показателей (ПКВ, ТПВ и РС). Возможность такого представления результатов в виде закрашенных площадей БМ цветом, приписанным соответствующему значению и знаку параметра ζ , без одновременной визуализации информации по соответствующим медианам, квартилям и выбросам обусловлена тем, что по совокупному анализу диаграмм размаха по всем искомым показателям выясняется, что в подавляющем числе случаев (более 75 %) медианные и средние значения однообразно демонстрируют существенное падение значения исследуемого показателя (например ХЛ, как представлено на рис. 2, а). В остальных ~25 % случаев значения параметра ζ оказываются незначительными (рис. 2, б).

Это позволяет условно принять отсутствие значимых изменений во вспомогательных статистических характеристиках репрезентативности среднего значения.

Обнаружено, что в обширных районах БМ в течение вегетационного периода произошло небольшое снижение концентрации ХЛ: значение параметра $\zeta_{\text{ХЛ}}$ (%) снизилось до $-1...-4$ в Кандалакшском и Двинском заливах, а также в Бассейне. В то же время параметр $\zeta_{\text{ХЛ}}$ вырос в пределах $4-6$ в Онежском и Мезенском заливах и Горле и до 8 в Воронке. Одновременно концентрации ВМВ снизились в Кандалакшском, Онежском ($\zeta_{\text{ВМВ}} \approx -17$) и особенно Двинском ($\zeta_{\text{ВМВ}} \approx -23$) заливах, а также в Бассейне, но умеренно выросли в Мезенском заливе, Воронке и Горле ($1,5 < \zeta_{\text{ВМВ}} < 6$). За исключением Кандалакшского залива и Бассейна (значения $\zeta_{\text{РОВ}}$ попали в диапазон $-0,4...-2,3$) концентрация РОВ выросла, особенно в Онежском заливе ($\zeta_{\text{РОВ}} \approx 6$) и Воронке ($\zeta_{\text{РОВ}} \approx 10$).

Указанные междекадные изменения с ПКВ произошли на фоне сдвига того же порядка погодно-климатических условий. В сочетании с динамикой ТПВ изменения СР ожидаемо свидетельствуют о потеплении климата в регионе БМ. Действительно: за этот временной промежуток ТПВ выросла в среднем за вегетационный период во всех районах БМ (значения $\zeta_{\text{ТПВ}}$ оказались в диапазоне $2...6$), а с марта по октябрь сток основных рек (см. раздел «Объект исследования») увеличился со значениями $\zeta = 11-13$.

Картина изменений более пестрая на внутрисезонном уровне в отношении как ПКВ, так и ТПВ и СР. Максимальное междекадное снижение ХЛ оказалось в июне, особенно в Кандалакшском и Двинском заливах ($\zeta_{\text{ХЛ}} \approx -10$

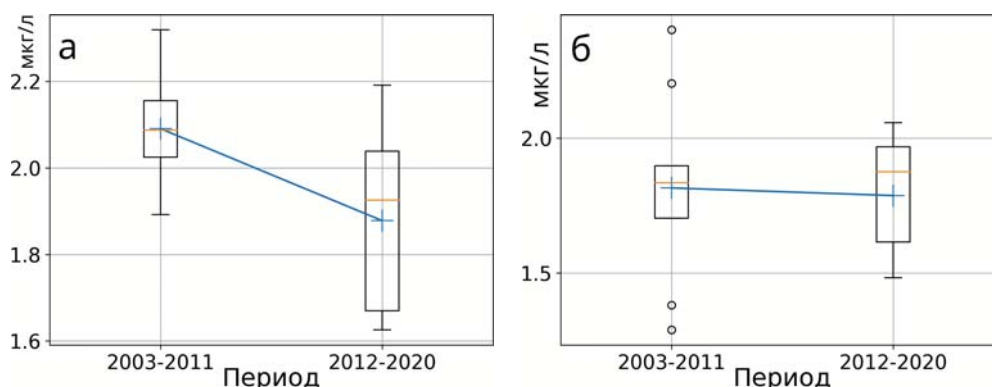


Рис. 2. Диаграммы размаха для хлорофилла а в Кандалакшском заливе Белого моря: а – июнь, б – август

Fig. 2. Box-and-whiskers diagrams for CHL in the Kandalaksha Bay of the White Sea: а – June, б – August

и ~ 7 соответственно) и в Бассейне ($\zeta_{\text{ХЛ}} \approx -10$), а также в октябре, особенно в Кандалакшском, примерно одинаково в Двинском и Мезенском заливах ($\zeta_{\text{ХЛ}} > -30$ и ≈ -10 соответственно) и Горле ($\zeta_{\text{ХЛ}} > -13$).

За исключением августа в остальные месяцы уровни ВМВ и РОВ также существенно снизились: так, в июне в Кандалакшском заливе $\zeta_{\text{ВМВ}} > -30$, $\zeta_{\text{РОВ}} > -14$, в октябре $\zeta_{\text{ВМВ}} > -30$ и $\zeta_{\text{РОВ}} = -24$. В сентябре снижение ВМВ происходило во всех районах БМ ($-13 < \zeta_{\text{ВМВ}} < -50$). За исключением Онежского залива имело место повсеместное значительное снижение и РОВ ($-9,5 < \zeta_{\text{РОВ}} < -24$).

Примечательно, что в августе, за исключением очень незначительного снижения ХЛ ($\zeta_{\text{ХЛ}} \approx -1,6$), остальные два ПКВ показали заметный рост: $4,6 < \zeta_{\text{ВМВ}} < 7,5$; $6,0 < \zeta_{\text{РОВ}} < \sim 17$.

Указанные помесечные вариации $\zeta_{\text{ПКВ}}$ происходили на фоне изменений $\zeta_{\text{ТГВ}}$ на уровне, не превышающем $< \pm 10$. Однако в июне значения $\zeta_{\text{ПКВ}}$ оказались только положительными и существенно выше по величине: > 15 в Онежском и Двинском заливах, а в Бассейне, Кандалакшском и Мезенском заливах составили соответственно 31,7; 36,8 и 57,7.

Параметр СР помесечно оставался положительным с августа по октябрь, что особенно проявилось в августе ($22 < \zeta_{\text{СР}} < 80$) и, хотя и в меньшей степени, в октябре ($\sim 3 < \zeta_{\text{СР}} < 33$). В июне $\zeta_{\text{СР}}$ принимал отрицательные значения в пределах, не превышающих -10 , в случае рек Двина, Мезень и Онега, а в июле это происходило в таких же пределах на реках Двина и Варзуга.

Полученные нами усредненные по каждому из двух временных периодов помесечные пространственные распределения самих значений ХЛ, ВМВ и РОВ свидетельствуют (рис. 3), что их общий характер не претерпел больших изменений и с наступлением теплого периода; именно прибрежная зона по всему периметру БМ преимущественно являлась основной зоной активной сезонной динамики параметров ПКВ. Однако по мере прогревания поверхностных вод с конца июля – начала августа эта зона начинала расширяться, распространяясь и на пелагиальные воды БМ. Постоянство этой схемы/последовательности подтверждается и другими спутниковыми наблюдениями, проведенными в течение 1998–2011 гг. Помимо этого, рис. 3 свидетельствует о расширении в 2012–2020 гг. зон со значениями ПКВ, нехарактерно высокими для БМ в предыдущие годы и тем более десятилетия [Filatov et al., 2005; Pozdnyakov et al., 2007; Kravchishina et al., 2013].

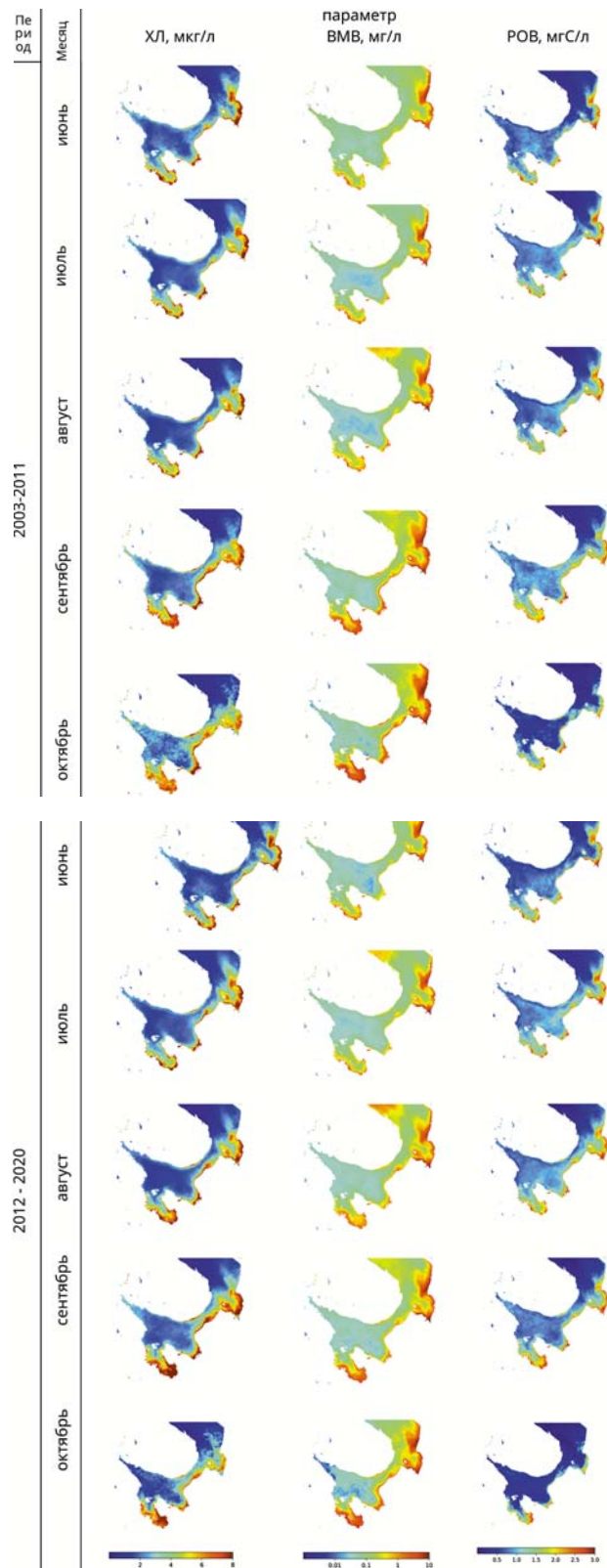


Рис. 3. Помесечные пространственные распределения параметров качества воды в Белом море в периоды 2003–2011 и 2012–2020 гг. по спутниковым данным

Fig. 3. Satellite data on monthly mean maps of WQP in the White Sea for the time periods 2003–2011 and 2012–2020

Кандалакшский залив. Глубоководность залива (максимальные глубины превышают 300 м при средних 50–60 м), беспрепятственный по всей толще воды водообмен с Бассейном, а также низкий уровень стока впадающих небольших рек в совокупности определяют характерные для него условия формирования уровня первичного продуцирования. При высокой для БМ прозрачности вод ($Z_{эф} = 10–15$ м), относительной холодноводности залива (в глубоководных районах максимальная ТПВ наблюдается в июле и не превышает $15\text{ }^{\circ}\text{C}$) и малом поступлении аллохтонных биогенов первичная продуктивность уступает даже мелководным районам Онежского залива [Максимова, Чугайнова, 2014].

С учетом сказанного снижение уровня первичного продуцирования ($\zeta_{хл} \approx -3$) во второй декаде в течение всего вегетационного периода ($\zeta_{хл} \approx -3$), особенно в октябре ($\zeta_{хл} \approx -33$), на фоне роста $\zeta_{тпв}$ до ~ 6 и повышения прозрачности вод ($\zeta_{вмв} > 17$) было обусловлено зарегистрированным нами пониженным уровнем фотосинтетически активной радиации (ФАР) ($\zeta_{фар} > -3$), а также, возможно, дефицитом биогенов аллохтонного происхождения.

Сказанное выше о динамике ХЛ в первой и второй декадах отчетливо иллюстрируется и пространственно-временными распределениями всех трех параметров ПКВ на рис. 3.

Онежский залив. По сравнению с некоторыми другими областями БМ (рис. 1) зарегистрированный рост концентрации ХЛ за весь вегетационный период и, следовательно, первичной продуктивности в 2012–2020 гг. отмечен относительно невысоким значением показателя $\zeta_{хл}$ (чуть выше 4). Причина этого обусловлена прежде всего величиной исходной базы отсчета: уровень ХЛ и так был высоким в 2003–2011 гг. Благодаря преобладающей мелководности (глубины в диапазоне от 5 до 25–30 м) и в известной мере изолированности от центральной части моря грядой Соловецких островов залив хорошо прогревается и для него были характерны повышенные уровни ХЛ на всем протяжении наблюдений. Указанному росту ХЛ во второй декаде способствовали рост температуры воды за вегетационный период ($\zeta_{тпв} = 2,1$), особенно в июне–сентябре ($\zeta_{тпв} \approx 16$ и $7,5$ соответственно), и стока одноименной реки ($\zeta_{сп} = 16$). Последнее обстоятельство обусловило усиление притока биогенов, а также снижение уровня взмученности воды ($\zeta_{вмв} \approx -4$) и, как следствие, определенное увеличение глубины эвфотического слоя, которое, однако, в значительной мере оказалось компенсированным повышением уровня аллохтон-

ного РОВ (рис. 1), а также снижением зарегистрированного нами поступления ФАР ($\zeta_{фар} \approx -3$). В пространственном распределении повышенный уровень ХЛ (рис. 3) приурочен к особо мелководным и наиболее благоприятным для продуцирования районам залива, т. е. к дельте р. Онега и протяженной зоне вдоль западного побережья, где расположены многочисленные мелкие острова.

В мелководном Онежском заливе (средняя глубина ~ 50 м) сильные приливные течения и интенсивное вертикальное турбулентное перемешивание вод приводят к вертикальной гомотермии и гомогалинности на большей части акватории залива, благодаря чему в центральной его части распределение ХЛ по поверхности более равномерно и снижено по величине. На выходе из залива на рис. 3 обнаруживается особо низкопродуктивная область, обусловленная постоянным апвеллингом у Соловецких островов.

Двинский залив. Со средними глубинами до 50 м (при наличии на севере глубин до 120 м и относительного мелководья на юге) этот залив, хотя и замерзающий зимой, после Онежского залива – самая теплая, но отнюдь не самая продуктивная часть БМ (рис. 3). На фоне незначительного увеличения ТПВ во второй декаде (в вегетационный период $\zeta_{тпв} = 2,5$, а в некоторые месяцы < 0), роста $\zeta_{сп}$ за март–октябрь в среднем до значения 13, разнонаправленного в некоторые внутрисезонные периоды изменения показателей ζ для МВ и РОВ, уровень первичной продуктивности в среднем за вегетационный период также не претерпел существенных изменений ($\zeta_{хл} = -1$), практически оставив его на уровне 2003–2011 гг.

Мезенский залив. Замерзающий зимой, практически повсеместно мелководный (средняя глубина 13 м), с обширной ультрамелководной зоной (~ 5 м), с низкой прозрачностью, обусловленной поступлением мутных вод наиболее полноводной одноименной реки, являющийся зоной высокой амплитуды (до 11 м) приливо-отливных изменений уровня воды, тем не менее отличается довольно высоким значением ХЛ в акватории БМ. За вторую декаду в вегетационный период все показатели продемонстрировали умеренный рост в несколько процентов. Согласованная по знаку динамика ПКВ дает основание предполагать, что именно динамика речного стока в этом временном периоде явилась важным фактором роста ХЛ. Но на фоне увеличения ТПВ (за вегетационный сезон $\zeta_{тпв} = 5$, а в июне составил почти 60) увеличение стока (рис. 1) привело не только к увеличению мутности воды и содержания РОВ,

но и к притоку биогенов. Подтверждением этому является характер пространственно-временного распределения ПКВ: градиент их концентраций явно направлен от дельты р. Мезень к северной границе залива и за ее пределы (рис. 3).

Бассейн. На фоне роста ТПВ во второй декаде за вегетационный период ($\zeta_{\text{ТПВ}} = 5$) и снижения уровня ХЛ ($\zeta_{\text{ХЛ}} \approx -4$) за тот же период произошло согласованное по знаку понижение концентрации двух других параметров ПКВ: $\zeta_{\text{ВМВ}} \approx -6$ и $\zeta_{\text{РОВ}} < -1$ (рис. 1). Можно полагать, что в этой глубоководной части БМ причиной ухудшения условий первичного продуцирования стало, по пока неясным причинам, снижение поступления речных вод (несущих взвешенное минеральное и растворенное вещество и биогены), а также зарегистрированное нами снижение во второй декаде уровня ФАР ($\zeta_{\text{ФАР}} \approx -3$) в этом районе.

Горло. Благодаря преобладающей циклонической циркуляции поверхностных вод БМ [Filatov et al., 2005] в эту относительно узкую в меридиональном направлении область из Онежского и Двинского заливов направляются водные потоки с высоким уровнем биогенов аллохтонного происхождения. Произошедший в 2012–2020 гг. рост $\zeta_{\text{ТПВ}}$ и $\zeta_{\text{СР}}$, а также зарегистрированное нами практически неизменное с предыдущей декады значение ФАР ($\zeta_{\text{ФАР}} < -1$) обусловили рост первичного продуцирования и продвижение с июля по сентябрь области повышенных значений ХЛ в северной литоральной зоне. Примечательно, однако, что во второй декаде вегетационный сезон в Горле закончился в октябре, т. е. на месяц раньше, чем в предыдущее десятилетие, несмотря на то, что значение $\zeta_{\text{ТПВ}}$ продолжало расти в сентябре и практически осталось в октябре на уровне предыдущего десятилетия.

В Воронке динамика ХЛ, свойств водной среды (ТПВ, СР) и зарегистрированного нами повышенного (относительно предыдущей декады) уровня ФАР ($\zeta_{\text{ФАР}} \approx 3$) в 2012–2020 гг. оказалась аналогична той, что имела место в Горле. В условиях устойчивой циклонической циркуляции поверхностных вод увеличение притока биогенов в результате возросшего в этот период стока и без того полноводной р. Мезень, а также р. Поной, резкое (в процентном отношении, но не в абсолютных значениях) потепление поверхностных вод в этой области (рис. 1) в совокупности могли обеспечить зарегистрированное за вегетационный период увеличение уровня ХЛ во второй декаде. Логично, что благодаря циклонической циркуляции (преимущественно приуроченной

по всему БМ к южной части литоральной зоны) наиболее отчетливо увеличение ХЛ проявилось именно в северо-восточной части Горла (рис. 3).

Заключение

Основанные на восстановлении спутниковых данных наши данные свидетельствуют, что по сравнению с 2003–2011 гг. первичная продуктивность, оцененная по уровню ХЛ, в 2012–2020 гг. в Онежском и Мезенском заливах, а также в Воронке и Горле выросла в целом за вегетационный сезон, и этот рост $\zeta_{\text{ХЛ}}$ оказался в диапазоне лишь 4–8 %. При этом в Кандалакшском заливе и Бассейне первичная продуктивность даже снизилась: $\zeta_{\text{ХЛ}} \sim -3 \dots \sim -4$ %).

Учитывая относительно невысокие в процентном отношении значения произошедших за временной период 2003–2020 гг. изменений $\zeta_{\text{ХЛ}}$, можно констатировать, что серьезных сдвигов в уровне продуктивности БМ не произошло и наблюдаемые изменения первичной продуктивности относительно невелики. Рост ТПВ (в диапазоне $2 \% < \zeta_{\text{ТПВ}} < \sim 7$ %) свидетельствует тем не менее о потеплении климата в районе БМ. Увеличение стока основных рек БМ суммарно за март–октябрь ($11 < \zeta_{\text{СР}} < 13$ %) и обусловленное этим увеличение уровня РОВ ($\sim 2 < \zeta_{\text{РОВ}} < 10$ %) идет в русле происходящего климатического сдвига.

Таким образом, отсутствие в условиях умеренно меняющихся таких естественных факторов окружающей среды, как СР, ТПВ, ФАР, признаков мультипликативного эффекта в динамике первичного продуцирования дает основание полагать, что в современных условиях антропогенной нагрузки экологическая система БМ остается еще довольно устойчивой и в течение 2003–2020 гг. не демонстрирует признаков резкой дестабилизации.

В силу ограниченного числа вовлеченных в рассмотрение факторов окружающей среды проведенный нами анализ причин междекадной динамики ПКВ, и прежде всего ХЛ, конечно, не является исчерпывающим. В частности, сведения о видовом составе фитопланктона и содержании биогенных веществ в воде могли бы способствовать раскрытию причин разнонаправленных изменений в экосистемах отдельных частей БМ. На данном этапе исследование является шагом к планируемому проведению такого специального исследования, но уже на более продвинутом вперед временном ряде.

Авторы благодарят за помощь в подготовке статьи А. Ю. Демченко.

Литература

- Вазюля С., Копелевич О. Сравнительная оценка баланса фотосинтетически активной радиации в Баренцевом, Карском и Черном морях по данным судовых и спутниковых измерений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т. 5(4). С. 47–53.
- Кашулин Н. А., Беккелунд А. К. Изменения климата и цветение арктического озера Имандра // *Биосфера*. 2022. Т. 14(2). С. 99–125. doi: 10.24855/biosfera.v14i2.6763
- Копелевич О. В., Салинг И. В., Вазюля С. В., Глуховец Д. И., Шеберстов С. В., Буренко В. И., Каралли П. Г., Юшманов А. В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. М.: Ваш формат, 2018. 140 с.
- Максимова М., Чугайнова В. Гидрохимический и гидрологический режим прибрежной зоны Белого моря. Марикультура. М.: ИИУ МГОУ, 2014. 200 с.
- Серых И. В., Толстиков А. В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 1. Температура воздуха, осадки, ветер // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022. Т. 68(3). С. 258–277. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277
- Тишкова А. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Морозова О. В., Пузаченко А. Ю., Тertiцкий Г. М., Титов С. В. Биотически значимые тренды климата и динамика биоты Российской Арктики // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 1(33). С. 71–85. doi: 10.25283/2223-4594-2019-1-71-87
- Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Семенов А. В., Анциферова А. Р., Ожигина В. Н., Богдан М. И. Изменение и изменчивость климата Европейского Севера России и их влияние на водные объекты // *Арктика. Экология и экономика*. 2012. № 2(6). С. 80–94.
- Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Дружинин П. В. Влияние климатических и антропогенных факторов на состояние системы «Белое море – водосбор» // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2019. № 9. С. 30–50. doi: 10.17076/lim1117
- Ardyna M., Arrigo K. R. Phytoplankton dynamics in a changing Arctic Ocean // *Nat. Clim. Change*. 2020. Vol. 10. P. 892–903. doi: 10.1038/s41558-020-0905-y
- Boddy R., Smith G. Statistical methods in practice: for scientists and technologists. John Wiley and Sons, 2009. 29 p.
- Bukata R., Jerome J., Kondratyev K., Pozdnyakov D. Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters. New York: CRC Press, 1995. 362 p.
- Bukata R. P., Pozdnyakov D. V., Jerome J. H., Tanis F. J. Validation of a radiometric color made applicable to optically complex water // *Remote Sens. Environ.* 2001. Vol. 77(2). P. 165–172.
- Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen O. M., Pettersson L., Bobylev L. White Sea: its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Chichester: Springer Praxis, 2005. 472 p.
- Frolova A. V., Morozov E. A., Pozdnyakov D. V. The Arctic Ocean primary production in response to amplification of climate change: insights from 2003–2022 satellite data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023. Vol. 59(12). P. 196–204. doi: 10.1134/S0001433823120095
- Hessen D. O., Carroll J.-L., Kjeldstad B., Korosov A. A., Pettersson L. H., Pozdnyakov D. V., Sørensen K. Input of organic carbon as determinant of nutrient fluxes, light climate and productivity in the Ob and Yenisey estuaries // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2010. Vol. 88(1). P. 53–62. doi: 10.1016/J.ECSS.2010.03.006
- Ilyash L. V., Belevich T. A., Zhitina L. S., Radchenko I. G., Ratkova T. N. Phytoplankton of the White Sea // *Biogeochemistry of the Atmosphere, Ice and Water of the White Sea / Lisitsyn A., Gordeev V. (eds.). The Handbook of Environmental Chemistry*. Vol. 81. Cham: Springer, 2018. P. 187–222. doi: 10.1007/698_2018_320
- Kondrik D. V., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H. Particulate inorganic carbon production within *E. huxleyi* blooms in subpolar and polar seas: a satellite time series study (1998–2013) // *Int. J. Remote Sens.* 2017. Vol. 38(22). P. 6179–6205. doi: 10.1080/01431161.2017.1350304
- Korosov A. A., Pozdnyakov D., Grassl H. Speceborne quantitative assessment of dissolved organic carbon fluxes in the Kara Sea // *Advances in Space Research. Special Issue: Oceanography, Cryosphere and Freshwater Flux to the Ocean*. 2012. Vol. 50. P. 1173–1188. doi: 10.1016/j.asr.2011.10.008
- Kravchishina M., Burenkov V., Kopelevich O., Sheberstov S., Vazulya S., Lisitzin A. New data on the spatial and temporal variability of the chlorophyll a concentration in the White Sea // *Doklady Earth Sciences*. 2013. Vol. 48(1). P. 120–125. doi: 10.1134/S1028334X13010170
- Lee Z., Carder K. L., Arnone R. A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters // *Applied Optics*. 2002. Vol. 41(27). P. 5755–5772. doi: 10.1364/AO.41.005755
- Malysheva A. S., Radchenko I. V., Pozdnyakov D. V. Arctic ocean acidification dynamics during 1993–2021 and its projections for the rest of this century // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023. Vol. 16(4). P. 63–74. doi: 10.59887/2073-6673.2023.16(4)-5
- Mobley C. D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // *Applied Optics*. 1999. Vol. 38(36). P. 7442–7455. doi: 10.1364/AO.38.007442
- Petrenko D., Pozdnyakov D., Johannessen J., Counillon F., Syrov V. Satellite-derived multi-year trend in primary production in the Arctic Ocean // *Int. J. Remote Sens.* 2013. Vol. 34(11). P. 3903–3937. doi: 10.1080/01431161.2012.762698
- Pozdnyakov D. V., Johannessen O. M., Korosov A. A., Pettersson L. H., Grassl H. G., Miles M. W. Satellite evidence of ecosystem changes in the White Sea: A semi-enclosed arctic marginal shelf sea // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 4(8). Art. L08604. doi: 10.1029/2006GL028947
- Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Grassl H., Pettersson L. H. An advanced algorithm for operational retrieval of water quality from satellite data in the visible // *Int. J. Remote Sens.* 2005. Vol. 26(12). P. 2669–2687.

Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Petrova N. A., Grassl H. Multi-year satellite observations of Lake Ladoga's biogeochemical dynamics in relation to the lake's trophic status // *Journal of Great Lakes Research*. 2013. Vol. 39, Suppl. 1. P. 34–45. doi: 10.1016/j.jglr.2013.05.002

Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical recipes in C: the art of scientific computing, 2nd ed., New York: Cambridge Univ. Press, 1992. 452 p.

Roy S., Llwellyn C. A., Egeland E., Johnsen G. (eds.). Phytoplankton pigments. Characterization, chemotaxonomy and applications in oceanography. Cambridge Univ. Press, 2011. 845 p.

Sergeeva V. V., Sukhanova I. N., Flint M. V., Polukhin A. A., Klemenetsky V. V., Fedorov A. V. Phytoplankton of the St. Anna Trough: influence of abiotic factors // *Oceanology*. 2020. Vol. 60. P. 458–472. doi: 10.1134/S0001437020040207

Sokoletsky L. G., Lunetta R. S., Wetz M. S., Paerl H. Assessment of the water quality components in turbid estuarine waters based on radiative transfer approximations // *Isr. J. Plant Sci.* 2012. Vol. 60(1–2). P. 209–229. doi: 10.1560/IJPS.60.1-2.209

References

Ardyna M., Arrigo K. R. Phytoplankton dynamics in a changing Arctic Ocean. *Nat. Clim. Change*. 2020; 10:892–903. doi: 10.1038/s41558-020-0905-y

Boddy R., Smith G. Statistical methods in practice: for scientists and technologists. John Wiley and Sons; 2009. 29 p.

Bukata R., Jerome J., Kondratyev K., Pozdnyakov D. Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters. New York: CRC Press; 1995. 362 p.

Bukata R. P., Pozdnyakov D. V., Jerome J. H., Tannis F. J. Validation of a radiometric color made applicable to optically complex water. *Remote Sens. Environ.* 2001;77(2);165–172.

Filatov N. N., Nazarova L. E., Georgiev A. P., Semenov A. V., Antsiferova A. R., Ozhigina V. N., Bogdan M. I. Climate change and variability in the European North of Russia and their impact on water bodies. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2012;2(6):80–94. (In Russ.)

Filatov N. N., Nazarova L. E., Druzhinin P. V. Influence of climatic and anthropogenic factors on the White Sea - catchment system. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2019;9:30–50. doi: 10.17076/lim1117

Filatov N., Pozdnyakov D., Johsannessen O. M., Petterssen L., Bobylev L. White Sea: its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Chichester: Springer Praxis; 2005. 472 p.

Frolova A. V., Morozov E. A., Pozdnyakov D. V. The Arctic Ocean primary production in response to amplification of climate change: insights from 2003–2022 satellite data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023;59(12):196–204. doi: 10.1134/S0001433823120095

Hessen D. O., Carroll J.-L., Kjeldstad B., Korosov A. A., Pettersson L. H., Pozdnyakov D. V., Søren-

sen K. Input of organic carbon as determinant of nutrient fluxes, light climate and productivity in the Ob and Yenisey estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2010;88(1):53–62. doi: 10.1016/J.ECSS.2010.03.006

Ilyash L. V., Belevich T. A., Zhitina L. S., Radchenko I. G., Ratkova T. N. Phytoplankton of the White Sea. *Biogeochemistry of the Atmosphere, Ice and Water of the White Sea. The Handbook of Environmental Chemistry*. Vol. 81. Cham: Springer; 2018. P. 187–222. doi: 10.1007/698_2018_320

Kashulin N. A., Bekkelund A. K. Climate changes and algal bloom in the Arctic Lake Imandra. *Biosfera*. 2022;14(2):99–125. (In Russ.). doi: 10.24855/biosfera.v14i2.6763

Kondrik D. V., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H. Particulate inorganic carbon production within *E. huxleyi* blooms in subpolar and polar seas: a satellite time series study (1998–2013). *Int. J. Remote Sens.* 2017;38(22):6179–6205. doi: 10.1080/01431161.2017.1350304

Kopelevich O. V., Saling I. V., Vazyulya S. V., Glukhovets D. I., Sheberstov S. V., Burenko V. I., Karalli P. G., Yushmanov A. V. Biooptical characteristics of the seas washing the coasts of the western part of Russia, according to satellite colour scanners in 1998–2017. Moscow: Vash format; 2018. 140 p. (In Russ.)

Korosov A. A., Pozdnyakov D., Grassl H. Spaceborne quantitative assessment of dissolved organic carbon fluxes in the Kara Sea. *Advances in Space Research. Special Issue: Oceanography, Cryosphere and Freshwater Flux to the Ocean*. 2012;50:1173–1188. doi: 10.1016/j.asr.2011.10.008

Kravchishina M., Burenkov V., Kopelevich O., Sheberstov S., Vazyulya S., Lisitzin A. New data on the spatial and temporal variability of the chlorophyll a concentration in the White Sea. *Doklady Earth Sciences*. 2013;48(1):120–125. doi: 10.1134/S1028334X13010170

Lee Z., Carder K. L., Arnone R. A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*. 2002;41(27):5755–5772. doi: 10.1364/AO.41.005755

Maksimova M., Chugainova V. Hydrochemical and hydrological regime of the coastal zone of the White Sea. Mariculture. Moscow: IIU MGOU; 2014. 200 p. (In Russ.)

Malysheva A. S., Radchenko I. V., Pozdnyakov D. V. Arctic ocean acidification dynamics during 1993–2021 and its projections for the rest of this century. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023;16(4): 63–74. doi: 10.59887/2073-6673.2023.16(4)-5

Mobley C. D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*. 1999;38(36):7442–7455. doi: 10.1364/AO.38.007442

Petrenko D., Pozdnyakov D., Johannessen J., Counillon F., Syrov V. Satellite-derived multi-year trend in primary production in the Arctic Ocean. *Int. J. Remote Sens.* 2013;34(11):3903–3937. doi: 10.1080/01431161.2012.762698

Pozdnyakov D. V., Johannessen O. M., Korosov A. A., Pettersson L. H., Grassl H. G., Miles M. W.

Satellite evidence of ecosystem changes in the White Sea: A semi-enclosed arctic marginal shelf sea. *Geophys. Res. Lett.* 2007;4(8):L08604. doi: 10.1029/2006GL028947

Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Grassl H., Pettersson L. H. An advanced algorithm for operational retrieval of water quality from satellite data in the visible. *Int. J. Remote Sens.* 2005;26(12):2669–2687.

Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Petrova N. A., Grassl H. Multi-year satellite observations of Lake Ladoga's biogeochemical dynamics in relation to the lake's trophic status. *Journal of Great Lakes Research.* 2013;39(1):34–45. doi: 10.1016/j.jglr.2013.05.002

Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical recipes in C: the art of scientific computing, 2nd ed. New York: Cambridge Univ. Press; 1992. 452 p.

Roy S., Llewellyn C. A., Egeland E., Johnsen G. (eds.). Phytoplankton pigments. Characterization, chemotaxonomy and applications in oceanography. Cambridge Univ. Press; 2011. 845 p.

Sergeeva V. V., Sukhanova I. N., Flint M. V., Polukhin A. A., Klemenetsky V. V., Fedorov A. V. Phytoplankton of the St. Anna Trough: influence of abiotic

factors. *Oceanology.* 2020;60:458–472. doi: 10.1134/S0001437020040207

Serykh I. V., Tolstikov A. V. Climate changes in the Western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 1. Air temperature, precipitation, and wind. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research.* 2022;68(3):258–277. (In Russ.). doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277

Sokoletsky L. G., Lunetta R. S., Wetz M. S., Paerl H. Assessment of the water quality components in turbid estuarine waters based on radiative transfer approximations. *Isr. J. Plant Sci.* 2012;60(1–2):209–229. doi: 10.1560/IJPS.60.1-2.209

Tishkov A. A., Vaisfel'd M. A., Glazov P. M., Morozova O. V., Puzachenko A. Yu., Tertitskii G. M., Titov S. V. Biotic significant climate trends and biota dynamics of the Russian Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy.* 2019;1(33):71–85. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2019-1-71-87

Vazyulya S. V., Kopelevich O. V. Comparative estimates of the budget of Photosynthetic Available Radiation (PAR) in the Barents, White, Kara and Black Seas derived from *in situ* and satellite data. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics.* 2012;5(4):47–53. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 21.07.2025; принята к публикации / accepted: 05.02.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Морозов Евгений Александрович

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
отдела дистанционных методов исследований

e-mail: frisman@list.ru

Поздняков Дмитрий Викторович

д-р физ.-мат. наук, профессор, заместитель директора
по науке, руководитель группы водных экосистем

e-mail: dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru

CONTRIBUTORS:

Morozov, Evgeny

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Pozdnyakov, Dmitry

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Full Professor, Deputy Director
for Science, Group Head