

Межгодовая изменчивость биооптических характеристик Баренцева и Карского морей

Д. И. Глуховец^{1,2}, И. В. Салинг¹, С. В. Вазюля¹, С. В. Шеберстов¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Shirshova РАН, Москва, 117997, Россия*

² *Московский физико-технический институт (НИУ)*

Долгопрудный, Московская обл., 141700, Россия

E-mail: glukhovets@ocean.ru

Работа посвящена расчёту трендов временной изменчивости биооптических характеристик в субрегионах Баренцева (концентрации хлорофилла *a* и кокколитофорид за период 1998–2024 гг.) и Карского (концентрации хлорофилла *a* за период 2003–2024 гг.) морей по данным спутниковых сканеров цвета MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и SeaWiFS (*англ.* Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor), обработанных с использованием региональных биооптических алгоритмов. Для расширения временного ряда биооптических характеристик выполнено объединение данных спутниковых сканеров цвета. Для оценки климатических изменений также проанализированы временные ряды температуры поверхности моря. При расчёте трендов использовались методы гармонического анализа, сингулярного спектрального анализа, а также квантильная регрессия. Значимые тренды зафиксированы лишь для температуры поверхности моря. В среднем субрегионе Баренцева моря периодограмма концентрации хлорофилла *a* имеет два выраженных максимума, соответствующих периодам 1 год и 0,5 года. Получены значимые тренды в квантилях, включающих 10 % наибольших и наименьших значений ряда концентрации хлорофилла *a* в юго-западном субрегионе Карского моря. Они составили $0,86 \cdot 10^{-2}$ и $-0,38 \cdot 10^{-2}$ мг/м³ в год соответственно при доверительной вероятности 75 %. Применение метода сингулярного спектрального анализа позволило зарегистрировать колебания концентрации хлорофилла *a* в среднем субрегионе Баренцева моря с периодом 6–7 лет.

Ключевые слова: спутниковые данные, концентрация хлорофилла *a*, кокколитофоридные цветения, межгодовые тренды, метод «Гусеница», квантильная регрессия

Одобрена к печати: 07.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-244-255

Введение

Биооптические характеристики морской воды, в первую очередь концентрации хлорофилла *a* (Хл) и кокколитофорид, являются важным фактором, влияющим на первичную продукцию и динамику потоков климатически активных газов (Kulk et al., 2020; Siegel et al., 2023). Кроме того, кокколитофориды оказывают значительное влияние на альбедо океана (Глуховец, Шеберстов, 2024). Особенно ярко влияние проявляется во время массовых цветений фитопланктона. В Баренцевом море интенсивные цветения диатомовых водорослей происходят в мае, кокколитофорид — в августе (Копелевич и др., 2018). Процессы цветения фитопланктона наблюдаются также и в Карском море. В широком смысле цветение фитопланктона проявляется в значительном увеличении его биомассы, что отражается в значениях биооптических характеристик морской воды. Для кокколитофорид цветение наступает, когда их концентрация превышает 1 млн клеток/л; для других видов фитопланктона, в частности диатомовых водорослей, имеется в виду резкое увеличение концентрации Хл в два раза и более. Для исследования пространственно-временной изменчивости биооптических характеристик морской воды широко используются данные спутниковых сканеров цвета. Эти данные позволяют рассчитывать значения межгодовых трендов, что и делается многими исследователями.

В недавней работе (Zhai et al., 2024) выполнен расчёт трендов концентрации Хл за период 1997–2022 гг. в открытом океане между 60° с. ш. и 60° ю. ш. Авторы выделили реги-

оны, в которых за 26 лет зафиксирован наибольший рост концентрации Хл, связываемый с последствиями климатических изменений. В другой современной публикации, регион исследования которой ограничен Арктикой (Serra-Pompei, Dutkiewicz, 2024), показано, что в Баренцевом море наблюдается положительный тренд концентрации Хл в период 1998–2022 гг. В этих работах, как и во многих других, расчёты выполнялись с использованием стандартных спутниковых алгоритмов. Однако в Арктике, в первую очередь в акватории Карского моря, которая подвержена сильному влиянию речного стока с высоким содержанием окрашенного органического растворённого вещества, применение стандартных биооптических алгоритмов приводит к большим погрешностям (Вазюля и др., 2014; Glukhovets et al., 2020, 2022). Для количественной оценки биооптических характеристик в этих акваториях целесообразно использование региональных спутниковых алгоритмов, обеспечивающих существенное повышение точности расчёта (Копелевич и др., 2018). Рассчитанные с применением региональных алгоритмов среднемесячные величины биооптических характеристик в различных субрегионах исследуемых морей, необходимые для анализа их межгодовой изменчивости, представлены в электронном Атласе лаборатории оптики океана Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН) (<https://optics.ocean.ru>).

Настоящая работа посвящена расчёту трендов временной изменчивости биооптических характеристик в субрегионах Баренцева (концентрации Хл и кокколитофорид за период 1998–2024 гг.) и Карского (концентрации Хл за период 2003–2024 гг.) морей по данным спутниковых сканеров цвета, обработанных с использованием региональных биооптических алгоритмов. Для оценки климатических изменений также анализируется температура поверхности моря (ТПМ).

Материалы и методы

В работе использованы осреднённые за месяц данные спутниковых сканеров цвета MODIS-Aqua (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с 2003 по 2024 г. с разрешением 4 км и SeaWiFS (*англ.* Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) с 1998 по 2007 г. с разрешением 9 км третьего уровня, доступные на сайте <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/l3/>. Обработка данных с применением региональных алгоритмов ИО РАН (Копелевич и др., 2018) проводилась в пакете программ SMCS, разработанном в Лаборатории оптики океана ИО РАН (Шеберстов, 2015). По спектрам коэффициента яркости моря $R_{rs}(\lambda)$ рассчитывалась концентрация Хл в Баренцевом (Glukhovets et al., 2022) и Карском (Vazyulya et al., 2024) морях. В Баренцевом море также вычислена концентрация кокколитофорид N_{coc} (Копелевич и др., 2017). Значения ТПМ получены по данным MODIS-Aqua и AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer). Данные второго прибора доступны на сайте <https://www.ncei.noaa.gov/data/sea-surface-temperature-optimum-interpolation/v2.1/access/avhrr>.

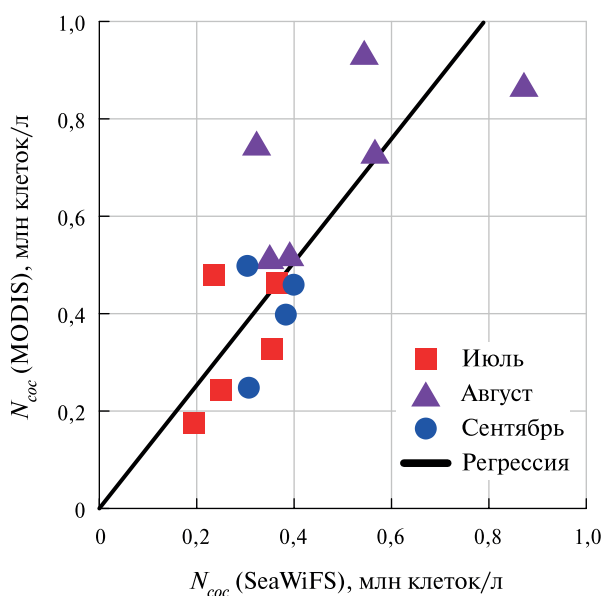
Расчёты трендов выполнены во всех субрегионах исследуемых морей, кроме южного субрегиона Баренцева моря. Это связано с тем, что, во-первых, в нём не происходят кокколитофоридные цветения, а во-вторых, для расчёта концентрации Хл в этом субрегионе, по-видимому, нужен отдельный алгоритм, учитывающий влияние речного стока (Каралли, Вазюля, 2021). Более представительными следует считать субрегионы с наиболее полным покрытием спутниковыми данными: средний субрегион Баренцева моря, в котором происходят ежегодные массовые цветения диатомовых водорослей и кокколитофорид, а также менее ледовитый юго-западный субрегион Карского моря. Расчёт концентрации кокколитофорид в Баренцевом море проводился внутри контура, границы которого определены по средне-многолетнему положению цветения. Такой подход позволяет учитывать изменчивость расположения цветений между средним и северным субрегионами Баренцева моря. Количество рассматриваемых месяцев для каждого из морей связано с продолжительностью полярной ночи и особенностями ледового режима в каждом из районов исследований: май – сентябрь для Баренцева моря и июнь – сентябрь для Карского. Данные о концентрации кокколитофорид анализировались с июля по сентябрь.

Использованные данные содержатся в обновлённом в 2024 г. Атласе биооптических характеристик лаборатории оптики океана ИО РАН (<https://optics.ocean.ru>). Атлас включает результаты расчёта основных биооптических параметров семи российских морей: карты, диаграммы и таблицы межгодовых изменений среднемесячных параметров для разных субрегионов.

Для расширения временного ряда значений биооптических характеристик целесообразно объединение данных спутниковых сканеров цвета: SeaWiFS (1998–2002) и MODIS-Aqua (2002–2024). Для успешного решения этой задачи необходимо наличие надёжных региональных алгоритмов для каждого сканера цвета, применимых ко всей исследуемой акватории. Задача осложняется различиями положений спектральных каналов указанных сканеров, что делает невозможным прямой расчёт биооптических характеристик для разных сканеров цвета одним региональным алгоритмом. Это условие не позволяет выполнить объединение данных о концентрации Хл в Карском море, поскольку для его акватории региональный алгоритм для данных SeaWiFS разработан не был. В Баренцевом море объединение данных о концентрации Хл и кокколитофорид возможно. Оно было выполнено следующим образом. Данные SeaWiFS с мая 1998 по июнь 2002 г. были пересчитаны в «MODIS-подобные» по уравнениям регрессии, рассчитанным по совместным данным этих сканеров в период с июля 2002 по сентябрь 2007 г. Объединение выполнялось непосредственно для концентрации Хл и кокколитофорид в каждом субрегионе. Данные SeaWiFS с 2008 по 2010 г. не были использованы для расчётов, поскольку с 2008 г. наблюдались перебои в работе этого сканера. Пример регрессии, полученной для концентрации кокколитофорид, показан на *рис. 1*. Коэффициент детерминации равен 0,65; средняя относительная величина расхождения составила 25 %, что является удовлетворительным для результатов оценки значений биооптических характеристик по данным дистанционного зондирования. Данные о концентрации Хл объединены аналогичным образом. Значения коэффициентов детерминации для северного и среднего субрегионов составляют 0,9 и 0,85 соответственно.

По данным о среднемесячных величинах выбранных биооптических характеристик и ТПМ выполнен расчёт линейных трендов временной изменчивости отобранных параметров для исследуемых арктических регионов. Вычисление основано на разложении исходных рядов на три части: периодическую (сезонную) компоненту, тренд и шум (Шеберстов и др., 2011). Для нахождения периодической части построены периодограммы, т.е. функции

частоты ν , $D(\nu) = \frac{1}{N^2} \left| \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp(-i2\pi\nu t_k) \right|^2$, где t_k — равномерная временная сетка с интервалом один месяц. К ряду применяется метод наименьших квадратов для определения параметров



трендов a и b линейного тренда $x(t) = at + b$. Для каждого из рассмотренных параметров получены значения коэффициента линейного тренда a , характеризующего годовое изменение соответствующей величины, а также 95%-е доверительные интервалы (Шеберстов и др., 2011). Отметим, что для различных исследуемых характеристик и морей получается разная продолжительность «года»: от трёх до пяти месяцев.

Рис. 1. Сопоставление среднемесячных величин концентрации кокколитофорид (N_{coc} , млн клеток/л), рассчитанных по данным сканеров цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua в регионе кокколитофоридного цветения в Баренцевом море, июль — сентябрь 2002–2007 гг.

В ряде работ (Beaulieu et al., 2013; Zhai et al., 2024) обсуждается необходимость исключения влияния автокорреляции временного ряда биооптических характеристик, естественным образом возникающей в процессе развития фитопланктона. Для этого принято рассматривать авторегрессионный процесс первого порядка (значение в предыдущем месяце влияет на значение в последующем), спектр шума которого должен быть красным. Если считать, что шум белый (что предполагается в данной работе), то последующее применение метода наименьших квадратов может привести к получению статистически значимого тренда там, где его нет. Отметим, что для использованных нами временных рядов автокорреляция незначима. По-видимому, это связано с тем, что продолжительность цветения фитопланктона в исследуемых регионах не превышает месяца.

Для более детального исследования временных рядов использовался метод сингулярного спектрального анализа «Гусеница» или SSA (*англ.* Singular Spectrum Analysis) (Голяндина, 2004; Elsner, Tsonis, 1996), предназначенный для разложения исходного ряда на отдельные слагаемые. В нашем случае это медленно меняющаяся компонента, периодическое слагаемое и остаток (шум). Метод основан на преобразовании исходного ряда $x(t_i)$, $i = 1 \dots N$, в траекторную матрицу X , столбцами которой являются последовательные отрезки ряда длины L , т.е. $(x(t_1), \dots, x(t_L))$, $(x(t_2), \dots, x(t_{L+1}))$ и т.д. до $(x(t_{N-L+1}), \dots, x(t_N))$. К полученной матрице применяется процедура сингулярного разложения $X = \sum_{i=1}^L X_i$, $X_i = U_i w_i V_i$, где X_i — элементарные матрицы; U , V — сингулярные векторы; w_i — сингулярные числа, упорядоченные по убыванию. Далее выполняется группировка полученных элементарных матриц $Y_i = \sum_j X_j$, где суммирование осуществляется по некоторому подмножеству набора $[1 \dots L]$. При этом количество групп и их состав определяется в первую очередь поставленной задачей, а также значениями w_j . После этого проводится диагональное усреднение каждой матрицы сгруппированного разложения. Последний этап процедуры — восстановление медленно меняющейся и периодической компоненты исходного ряда по диагонально усреднённым матрицам Y_i .

Таким образом, применение метода SSA включает выбор параметра L и способа группировки. При выборе способа группировки мы исходим из вида последовательности w_j , см., например, *рис. 2 (слева)*. Во всех рассмотренных нами случаях первое сингулярное число существенно превосходит все остальные, далее следует одна или несколько пар близких сингулярных чисел, оставшиеся сингулярные числа образуют медленно убывающую последовательность. При группировке мы выделяем первую элементарную матрицу в отдельную группу. Эта группа содержит медленно меняющуюся компоненту ряда, в которой исключены сезонные колебания.

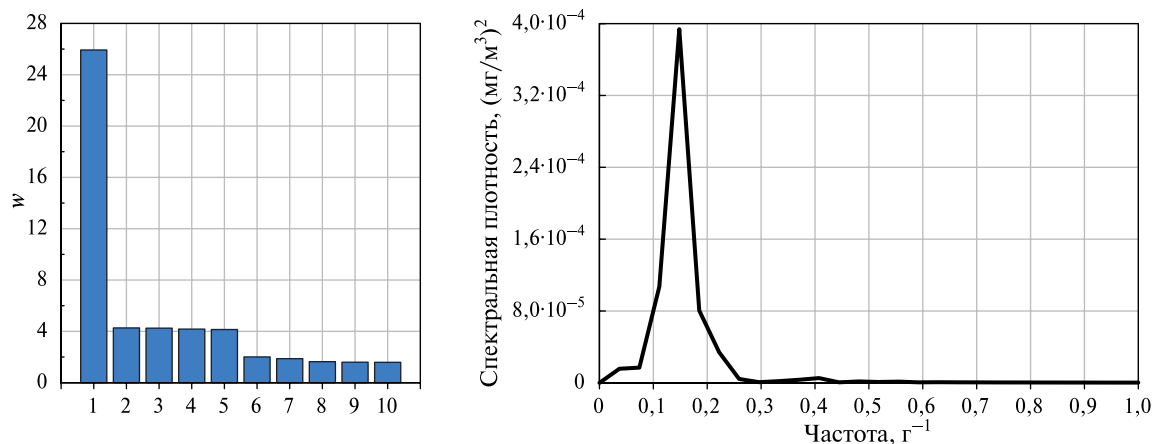


Рис. 2. Сингулярные числа, возникающие при разложении временного ряда концентрации Хл в среднем субрегионе Баренцева моря (*слева*), и периодограмма, соответствующая первому сингулярному числу (*справа*)

Ряд, восстановленный методом SSA, с большой точностью совпадает с результатом сглаживания методом скользящего среднего с весами, распределёнными по закону Гаусса:

$$x_i = \frac{\sum_{k=0}^N x_k \exp\left(-\left(\frac{t_k - t_i}{s}\right)^2\right)}{\sum_{k=0}^N \exp\left(-\left(\frac{t_k - t_i}{s}\right)^2\right)}.$$

Здесь параметр s , определяющий степень сглаживания, связан с параметром L метода SSA формулой $s = kL/n_m$, где n_m — количество рассматриваемых месяцев для каждого из морей. Для всех рассмотренных нами случаев величина k оказалась близкой к 0,6 года. Рисунок 3 демонстрирует хорошее совпадение двух методов расчёта (SSA и скользящего среднего).

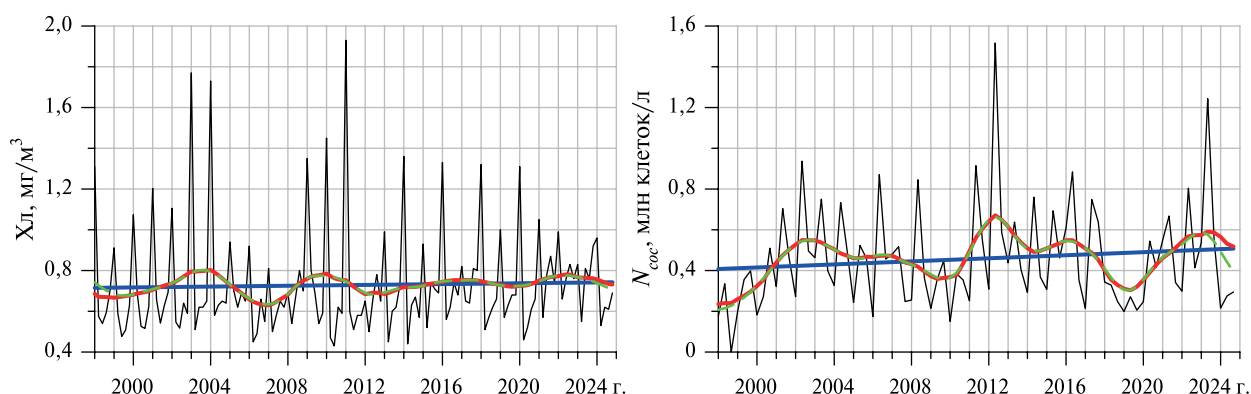


Рис. 3. Временные ряды концентрации Хл (слева) и кокколитофорид (справа) в среднем субрегионе Баренцева моря. Синими линиями показаны линейные тренды, красными — SSA, зелёными штриховыми — скользящее среднее

Оптимальный выбор параметра L зависит от цели исследования. Если требуется найти медленно меняющуюся компоненту, не содержащую периодической составляющей, величина L должна быть достаточно большой, порядка $N/2$. Для обнаружения колебаний с периодом несколько лет оптимальной является величина $L = 2n_m$, т. е. 2 года.

Результаты

Баренцево море

В табл. 1 и на рис. 3 показаны результаты расчёта трендов для ТПМ, концентрации Хл и кокколитофорид N_{coc} в субрегионах Баренцева моря. Северный субрегион находится в основном под влиянием холодных вод арктического бассейна, тогда как средний — под влиянием относительно тёплых вод Норвежского (Нордкапского) течения. Граница между ними проведена по 75° с. ш., что примерно соответствует положению полярного фронта. В обоих субрегионах выявлен положительный тренд температуры моря с положительными значениями границ доверительного интервала. В отличие от температуры тренды концентрации Хл и кокколитофорид незначимы по уровню 95 %, поскольку границы доверительных интервалов имеют разные знаки. Можно получить значимый тренд в северном субрегионе Баренцева моря путём небольшого уменьшения границы доверительного интервала. Однако величина этого тренда останется ничтожно малой. Интересно отметить, что в среднем субрегионе Баренцева моря периодограмма концентрации Хл показала два выраженных максимума, соответствующих периодам 1 год и 0,5 года (рис. 4, см. с. 249).

Таблица 1. Параметры временной изменчивости характеристик в субрегионах Баренцева моря в 1998–2024 гг.

Субрегион	Характеристика	Тренд	Границы доверительного интервала ($\gamma = 95\%$)
Средний	ТПМ, °С в год	0,080	0,029...0,132
Северный	ТПМ, °С в год	0,050	0,012...0,088
Средний	Хл, мг/м ³ в год	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$-4,8...6,8 \cdot 10^{-2}$
Северный	Хл, мг/м ³ в год	$0,06 \cdot 10^{-2}$	$-0,68...8,10 \cdot 10^{-2}$
Кокколитофоридного цветения	N_{coc} , млн клеток/л в год	0,0037	-0,0034...0,0110

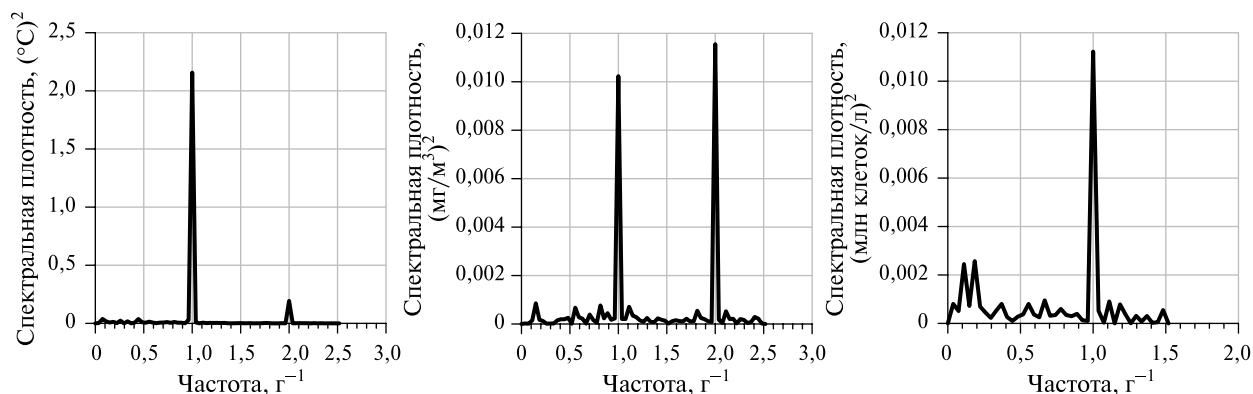


Рис. 4. Периодограммы параметров в среднем субрегионе Баренцева моря: ТПМ (слева), концентрация Хл (посередине) и кокколитофорид (справа)

При обработке данных для Баренцева моря методом SSA параметр сглаживания L был выбран равным $2n_m$. Это позволило обнаружить колебания концентрации Хл в среднем субрегионе моря с периодом 6–7 лет. Соответствующая периодограмма, вычисленная по медленно меняющейся компоненте ряда $X_l(t_i)$, приведена на рис. 2 (справа).

Карское море

В табл. 2 и на рис. 5 (см. с. 250) показаны результаты расчёта трендов для ТПМ и Хл в субрегионах Карского моря. В обоих субрегионах наблюдается статистически значимый положительный тренд ТПМ, но в юго-западном субрегионе он почти в два раза больше, чем в северо-восточном. В Карском море отмечается рост не только средних величин ТПМ, но и амплитуды их сезонной изменчивости (см. рис. 5). Для Хл тренды в двух субрегионах Карского моря незначимы и близки по величине. При этом в юго-западном субрегионе тренд Хл положительный, а в северо-восточном — отрицательный.

Таблица 2. Параметры временной изменчивости величин ТПМ и Хл в субрегионах Карского моря в 2003–2024 гг.

Субрегион	Характеристика	Тренд	Границы доверительного интервала ($\gamma = 95\%$)
Юго-западный	ТПМ, °С в год	0,098	0,02...0,18
Северо-восточный	ТПМ, °С в год	0,058	0,02...0,10
Юго-западный	Хл, мг/м ³ в год	$0,26 \cdot 10^{-2}$	$-0,12...0,63 \cdot 10^{-2}$
Северо-восточный	Хл, мг/м ³ в год	$-0,20 \cdot 10^{-2}$	$-0,76...0,35 \cdot 10^{-2}$

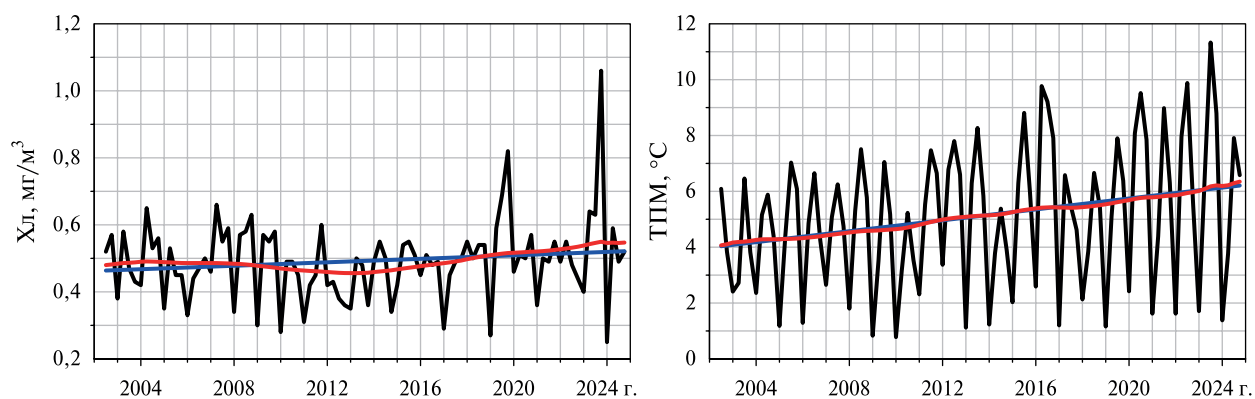


Рис. 5. Временные ряды величин Хл (слева) и ТПМ (справа) в юго-западном субрегионе Карского моря. Синими линиями показаны линейные тренды, красными — SSA

Стоит отметить ненадёжность данных для северо-восточного субрегиона Карского моря, так как из-за ледового покрова и частой облачности покрытие спутниковыми данными в этом субрегионе редко превышает 50 % даже в летние месяцы. Несмотря на короткий сезон спутниковых наблюдений в Карском море (июнь — сентябрь) периодограммы Хл показывают два максимума, а ТПМ — один.

Метод SSA позволяет получить результаты, аналогичные приведённым выше для Баренцева моря. Однако построенные периодограммы не дают возможности выделить основную частоту колебаний с периодом в несколько лет. Поэтому при расчёте методом SSA было выбрано значение параметра сглаживания $L = 6n_m = 24$, в результате чего полученная медленно меняющаяся зависимость не содержит периодической компоненты и может интерпретироваться как нелинейный тренд.

Обсуждение

Интересно отметить, что оценка многолетних трендов концентрации Хл в Баренцевом море выполнялась также и по данным контактных измерений. В работе (Dvoretsky et al., 2023) на основе анализа 803 проб морской воды, отобранных в 27 рейсах в период 1984–2021 гг., зарегистрирован положительный тренд $0,01 \pm 0,006$ мг/м³ в год с уровнем значимости $p = 0,112$. Этот результат отличается от нашего (см. табл. 1), что может быть объяснено различным временным интервалом исследования и малым количеством данных судовых измерений (в среднем около 22 точек в год). Различие временных интервалов, по которым выполнялся расчёт, может оказывать заметное влияние на результат. Например, в публикации (Demidov et al., 2023) по результатам использованного в данной статье подхода был получен отрицательный тренд изменчивости концентрации Хл во всей акватории Карского моря за период 2002–2021 гг. Результаты, полученные в настоящей работе, показывают различные знаки трендов в юго-западном и северо-восточном субрегионах моря (табл. 2), тренды при этом незначимы.

При анализе межгодовой изменчивости биооптических характеристик морской воды можно по-разному подходить к рассмотрению интенсивных цветений фитопланктона. Такие природные явления не имеют периода (в любом случае, мы не можем его зарегистрировать при использовании доступной для исследования длины ряда) и заметно отклоняются от средних значений. Для методов статистики цветения представляют собой выбросы, вклад которых влияет на значение тренда. В качестве примера рассмотрим ряд концентрации Хл в юго-западном субрегионе Карского моря. В этом ряду два значения (в сентябре 2019 и сентябре 2023 г.) отклоняются от среднего на три среднеквадратических отклонения (СКО). При исключении этих точек тренд уменьшается в пять раз. После итеративного исключения точек, отличающихся от среднего на два значения СКО, величина тренда уменьшится

на два порядка, а доверительные интервалы станут близки по модулю — т.е. тренд исчезнет. Итерации необходимы для учёта уменьшения дисперсии, возникающей при последующем исключении точек. При этом без исключения точек положительный тренд становится значимым (границы доверительного интервала положительны) при доверительной вероятности 82 %. Вариация этого параметра влияет только на границы доверительного интервала, значение тренда при этом не меняется (табл. 2).

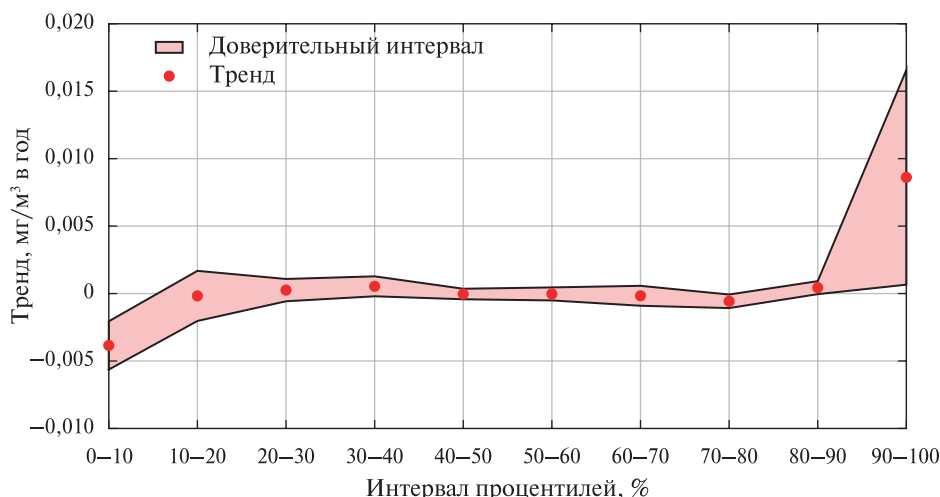


Рис. 6. Тренды концентрации Хл в юго-западном субрегионе Карского моря для интервалов процентилей распределения с шагом в 10 % при значении доверительной вероятности 75 %, 2002–2024 гг. Цветной заливкой показаны границы доверительных интервалов

Известно, что климатические изменения влекут за собой увеличение частоты экстремальных гидрометеорологических явлений (Голицын, Васильев, 2019). Подобный отклик можно ожидать и в биооптических характеристиках поверхностного слоя морской воды (Cael et al., 2023). Для исследования межгодовой изменчивости высоких значений этих характеристик удобно использовать метод квантильной регрессии. Результат расчёта трендов для всех интервалов процентилей распределения концентрации Хл в юго-западном субрегионе Карского моря с шагом в 10 % показан на рис. 6. Доверительная вероятность γ выбрана равной 75 %, чтобы сделать значимыми тренды в квантилях, включающих 10 % наибольших и наименьших значений ряда. Интересно отметить, что эти тренды имеют противоположный знак. Аналогичный анализ для северо-восточного субрегиона Карского моря показал отсутствие тренда для всех интервалов процентилей. В среднем и северном субрегионах Баренцева моря, а также в области цветения кокколитофорид во всех интервалах процентилей при разумных значениях доверительной вероятности значимых трендов концентрации Хл и кокколитофорид зарегистрировано не было.

Выводы

По данным спутниковых сканеров цвета MODIS и SeaWiFS о среднемесечных значениях концентрации Хл и кокколитофорид, а также температуры поверхности моря в субрегионах Баренцева и Карского морей выполнен расчёт трендов их временной изменчивости. При вычислениях использовались региональные алгоритмы и ряды данных, продлённые до 2024 г. (<https://optics.ocean.ru>). Значимые тренды зафиксированы лишь для ТПМ, что соответствует представлениям о происходящих в Арктике климатических изменениях. Их значения составили 0,080 и 0,050 °C в год в среднем и северном субрегионах Баренцева моря; 0,098 и 0,058 °C в год в юго-западном и северо-восточном субрегионах Карского моря.

Большинство периодограмм биооптических характеристик в Баренцевом море имеют доминирующий максимум, соответствующий периоду один год, что согласуется с закономерным ежегодным повторением цикла развития фитопланктона. Единственное отличие от этого цикла обнаружено в среднем субрегионе. Там периодограмма концентрации Хл имеет два выраженных равных по амплитуде максимума, соответствующих периодам 1 год и 0,5 года.

Применение метода SSA с разным параметром сглаживания позволило проанализировать ряды биооптических характеристик на наличие трендов с периодом в несколько лет. Так, для концентрации Хл в среднем субрегионе Баренцева моря были зарегистрированы колебания с периодом 6–7 лет. В Карском море получаемые периодограммы не дают возможности выделить основную частоту многолетних колебаний.

Для анализа экстремальных значений биооптических характеристик использован метод квантильной регрессии с вариацией доверительной вероятности. Так в юго-западном субрегионе Карского моря получены значимые тренды в квантилях, включающих 10 % наибольших и наименьших значений ряда концентрации Хл. Они составили $0,86 \cdot 10^{-2}$ и $-0,38 \cdot 10^{-2}$ мг/м³ в год соответственно при доверительной вероятности 75 %.

В большинстве случаев, представленных в табл. 1 и 2, изменения биооптических характеристик в рассматриваемый период не имеют систематического характера. Отчасти наблюдаемые изменения могут быть обусловлены тем, что площади покрытия акватории спутниковыми данными в разные годы неодинаковы из-за различий в облачности и ледового покрытия. Задача дальнейшего проведения исследований заключается в том, чтобы уточнить положение границ регионов, наиболее показательных для анализа межгодовой изменчивости биооптических характеристик.

Обработка данных спутниковых сканеров цвета выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2024-0015, расчёт трендов выполнен в рамках соглашения № 169-15-2023-002.

Литература

1. Вазюля С. В., Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Артемьев В. А. Оценка по спутниковым данным показателей поглощения окрашенного органического вещества и диффузного ослабления солнечного излучения в водах Белого и Карского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 31–41.
2. Глуховец Д. И., Шеберстов С. В. Влияние фитопланктона на альбедо океана // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2024. Т. 17. № 3. С. 73–83. DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(3)-6.
3. Голицын Г. С., Васильев А. А. Изменение климата и его влияние на частоту экстремальных гидрометеорологических явлений // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 9–12.
4. Голяндина Н. Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие. СПб., 2004. 76 с.
5. Каралли П. Г., Вазюля С. В. Модификация регионального спутникового алгоритма определения концентрации хлорофилла-а в Баренцевом море // Тр. 11-й Всероссийской конф. с международ. участием «Современные проблемы оптики естественных вод (ONW'2021)». СПб.: ООО «Химиздат», 2021. С. 234–239.
6. Копелевич О. В., Каралли П. Г., Лохов А. С. и др. Перспективы улучшения точности оценки параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом море по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 267–279. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-267-279.
7. Копелевич О. В., Салинг И. В., Вазюля С. В., Глуховец Д. И., Шеберстов С. В., Буренков В. И., Каралли П. Г., Юшманова А. В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. 140 с.
8. Шеберстов С. В. Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 154–161.
9. Шеберстов С. В., Копелевич О. В., Лукьянова Е. А. Анализ межгодовых трендов температуры поверхности океана и концентрации хлорофилла в Атлантическом океане по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 274–282.

10. *Beaulieu C., Henson S. A., Sarmiento J. L. et al.* Factors challenging our ability to detect long-term trends in ocean chlorophyll // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. Iss. 4. P. 2711–2724. DOI: 10.5194/bg-10-2711-2013.
11. *Cael B. B., Bisson K., Boss E. et al.* Global climate-change trends detected in indicators of ocean ecology // *Nature*. 2023. V. 619. Iss. 7970. P. 551–554. DOI: 10.1038/s41586-023-06321-z.
12. *Demidov A. B., Gagarin V. I., Sheberstov S. V.* Impact of regional warming on primary production of the Kara Sea in the last two decades (2002–2021) // *Oceanology*. 2023. V. 63. No. 2. P. 195–211. DOI: 10.1134/S0001437023020029.
13. *Dvoretsky V. G., Vodopianova V. V., Bulavina A. S.* Effects of climate change on chlorophyll *a* in the Barents Sea: A long-term assessment // *Biology*. 2023. V. 12. No. 1. Article 119. DOI: 10.3390/biology12010119.
14. *Elsner J. B., Tsonis A. A.* Singular spectrum analysis: A new tool in time series analysis. N.Y.; L.: Plenum Press, 1996. 164 p.
15. *Glukhovets D., Kopelevich O., Yushmanova A. et al.* Evaluation of the CDOM absorption coefficient in the Arctic seas based on Sentinel-3 OLCI data // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 19. Article 3210. DOI: 10.3390/rs12193210.
16. *Glukhovets D., Sheberstov S., Vazyulya S. et al.* Influence of the accuracy of chlorophyll-retrieval algorithms on the estimation of solar radiation absorbed in the Barents Sea // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 19. Article 4995. DOI: 10.3390/rs14194995.
17. *Kulk G., Platt T., Dingle J. et al.* Primary production, an index of climate change in the ocean: Satellite-based estimates over two decades // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 5. Article 826. DOI: 10.3390/rs12050826.
18. *Serra-Pompei C., Dutkiewicz S.* Phytoplankton Chlorophyll trends in the Arctic at the local, regional, and pan-Arctic scales (1998–2022) // *Geophysical Research Letters*. 2024. V. 51. No. 23. Article e2024GL110454. DOI: 10.1029/2024GL110454.
19. *Siegel D. A., DeVries T., Cetinić I., Bisson K. M.* Quantifying the ocean's biological pump and its carbon cycle impacts on global scales // *Annu. Review of Marine Science*. 2023. V. 15. P. 329–356. DOI: 10.1146/annurev-marine-040722-115226.
20. *Vazyulya S. V., Sahling I. V., Glukhovets D. I., Demidov A. B.* Regional algorithms for chlorophyll concentration estimation in the Kara Sea from MODIS ocean color data // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2024. V. 37. P. S135–S143. DOI: 10.1134/S1024856024701641.
21. *Zhai D., Beaulieu C., Kudela R. M.* Long-term trends in the distribution of ocean chlorophyll // *Geophysical Research Letters*. 2024. V. 51. No. 7. Article e2023GL106577. DOI: 10.1029/2023GL106577.

Interannual variability of bio-optical characteristics of the Barents and Kara seas

D. I. Glukhovets^{1,2}, I. V. Sahling¹, S. V. Vazyulya¹, S. V. Sheberstov¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*

² *Moscow Institute of Physics and Technology
Dolgoprudny, Moscow Region 141700, Russia
E-mail: glukhovets@ocean.ru*

The paper is devoted to the calculation of trends in the temporal variability of bio-optical characteristics in the subregions of the Barents Sea (chlorophyll *a* and coccolithophore concentrations for the period 1998–2024) and Kara Sea (chlorophyll *a* concentrations for the period 2003–2024) based on MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) satellite ocean color data processed using regional bio-optical algorithms. To expand the time series of bio-optical characteristics, the satellite ocean color data were combined. To assess the magnitude of climate change, the time series of sea surface temperature were also analyzed. When calculating the trends, the methods of harmonic analysis, singular spectrum analysis and quantile regression were used. Significant trends were recorded only for the sea surface temperature values. In the middle subregion of the Barents Sea, the periodogram of chlorophyll *a* concentration has two pronounced maxima corresponding to periods of 1 year and 0.5 year. Significant trends were obtained in quantiles including 10 % of the largest and smallest values of the chlorophyll *a* concentration series in the southwestern subregion of the Kara Sea. They amounted to $0.86 \cdot 10^{-2}$ and $-0.38 \cdot 10^{-2}$ mg/m³ per year, respectively, with a confidence level of 75 %. The use of the singular spectrum analysis

method made it possible to record fluctuations in the chlorophyll *a* concentration values in the middle subregion of the Barents Sea with a period of 6–7 years.

Keywords: satellite data, chlorophyll *a* concentration, coccolithophore blooms, interannual trends, singular spectrum analysis, quantile regression

Accepted: 07.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-244-255

References

1. Vazyulya S. V., Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Artemiev V. A., Satellite estimation of the coefficients of CDOM absorption and diffuse attenuation in the White and Kara Seas, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, V. 11, No. 4, pp. 31–41 (in Russian).
2. Glukhovets D. I., Sheberstov S. V., Influence of phytoplankton on ocean albedo, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2024, V. 17, No. 3, pp. 73–83 (in Russian), DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(3)-6.
3. Golitsyn G. S., Vasil'ev A. A., Climate change and its impact on the frequency of extreme hydrometeorological events, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2019, No. 11, pp. 9–12 (in Russian).
4. Golyandina N. E., *Metod "Gusenica"-SSA: Analiz vremennykh ryadov: uchebnoe posobie* (Caterpillar-SSA method: Time series analysis: Teaching guide), Saint Petersburg, 2004, 76 p. (in Russian).
5. Karalli P. G., Vazyulya S. V., Modification of the regional satellite algorithm for determining the concentration of chlorophyll-*a* in the Barents Sea, *Trudy 11-i Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Sovremennye problemy optiki estestvennykh vod (ONW'2021)"* (Proc. 11th All-Russian Conf. with intern. participation "Current problems in optics of natural waters (ONW'2021)"), Saint Petersburg: LLC "Chimizdat", 2021, pp. 234–239 (in Russian).
6. Kopelevich O. V., Karalli P. G., Lokhov A. S. et al., Prospects for improving the accuracy of estimates of the parameters of coccolithophore blooms in the Barents Sea from satellite data, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 7, pp. 267–279 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-267-279.
7. Kopelevich O. V., Sahling I. V., Vazyulya S. V., Glukhovets D. I., Sheberstov S. V., Burenkov V. I., Karalli P. G., Yushmanova A. V., *Bioopticheskie kharakteristiki morei, omyvayushchikh berega zapadnoi poloviny Rossii, po dannym sputnikovykh skanerov tsveta 1998–2017 gg.* (Bio-optical characteristics of the seas, surrounding the western part of Russia, from data of the satellite ocean color scanners of 1998–2017), Moscow: OOO "VASH FORMAT", 2018, 140 p. (in Russian).
8. Sheberstov S. V., System for batch processing of oceanographic satellite data, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 6, pp. 154–161 (in Russian).
9. Sheberstov S. V., Kopelevich O. V., Lukyanova E. A., Analysis of inter-annual trends of sea surface temperature and chlorophyll concentration in the Atlantic Ocean from satellite data, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, V. 8, No. 4, pp. 274–282 (in Russian).
10. Beaulieu C., Henson S. A., Sarmiento J. L. et al., Factors challenging our ability to detect long-term trends in ocean chlorophyll, *Biogeosciences*, 2013, V. 10, Iss. 4, pp. 2711–2724, DOI: 10.5194/bg-10-2711-2013.
11. Cael B. B., Bisson K., Boss E. et al., Global climate-change trends detected in indicators of ocean ecology, *Nature*, 2023, V. 619, Iss. 7970, pp. 551–554, DOI: 10.1038/s41586-023-06321-z.
12. Demidov A. B., Gagarin V. I., Sheberstov S. V., Impact of regional warming on primary production of the Kara Sea in the last two decades (2002–2021), *Oceanology*, 2023, V. 63, No. 2, pp. 195–211, DOI: 10.1134/S0001437023020029.
13. Dvoretzky V. G., Vodopianova V. V., Bulavina A. S., Effects of climate change on chlorophyll *a* in the Barents Sea: A long-term assessment, *Biology*, 2023, V. 12, No. 1, Article 119, DOI: 10.3390/biology12010119.
14. Elsner J. B., Tsonis A. A., *Singular spectrum analysis: A new tool in time series analysis*, New York; London: Plenum Press, 1996, 164 p.
15. Glukhovets D., Kopelevich O., Yushmanova A. et al., Evaluation of the CDOM absorption coefficient in the Arctic seas based on Sentinel-3 OLCI data, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 19, Article 3210, DOI: 10.3390/rs12193210.
16. Glukhovets D., Sheberstov S., Vazyulya S. et al., Influence of the accuracy of chlorophyll-retrieval algorithms on the estimation of solar radiation absorbed in the Barents Sea, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 19, Article 4995, DOI: 10.3390/rs14194995.
17. Kulk G., Platt T., Dingle J. et al., Primary production, an index of climate change in the ocean: Satellite-based estimates over two decades, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 5, Article 826, DOI: 10.3390/rs12050826.

18. Serra-Pompei C., Dutkiewicz S., Phytoplankton Chlorophyll trends in the Arctic at the local, regional, and pan-Arctic scales (1998–2022), *Geophysical Research Letters*, 2024, V. 51, No. 23, Article e2024GL110454, DOI: 10.1029/2024GL110454.
19. Siegel D. A., DeVries T., Cetinić I., Bisson K. M., Quantifying the ocean's biological pump and its carbon cycle impacts on global scales, *Annu. Review of Marine Science*, 2023, V. 15, pp. 329–356, DOI: 10.1146/annurev-marine-040722-115226.
20. Vazyulya S. V., Sahling I. V., Glukhovets D. I., Demidov A. B., Regional algorithms for chlorophyll concentration estimation in the Kara Sea from MODIS ocean color data, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2024, V. 37, pp. S135–S143, DOI: 10.1134/S1024856024701641.
21. Zhai D., Beaulieu C., Kudela R. M., Long-term trends in the distribution of ocean chlorophyll, *Geophysical Research Letters*, 2024, V. 51, No. 7, Article e2023GL106577, DOI: 10.1029/2023GL106577.