

**УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ
ENVIRONMENTS OF FISHERIES RESOURCES**

Научная статья

УДК 581.526.325

DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-553-576

EDN: ХУНУСВ

**ФЕНОЛОГИЯ ВЕСЕННЕГО «ЦВЕТЕНИЯ» ФИТОПЛАНКТОНА
В МОРСКИХ ВОДАХ ВОКРУГ КАМЧАТКИ**А.С. Малышева^{1,2}, К.К. Кивва¹, А.А. Сумкина^{1*}¹ Всероссийский научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии,
105187, г. Москва, Окружной проезд, 19;² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Аннотация. Представлены многолетние оценки сроков и параметров весеннего «цветения» фитопланктона в водах вокруг Камчатского полуострова за 1998–2024 гг. на основе спутниковых данных по концентрации хлорофилла-*a*. Рассмотрены три метода определения сроков «цветения», предложен модифицированный метод, более подходящий для исследуемого района. Описаны характерные черты весеннего «цветения» у западного и восточного побережий Камчатки. Показана отрицательная значимая связь (до $r = -0,9$) даты начала весеннего «цветения» с его продолжительностью. В Тихом океане к востоку от Камчатки выявлен положительный тренд (до +2 сут в год) даты начала весеннего «цветения», что указывает на тенденцию к позднему развитию «цветения», тогда как в некоторых шельфовых районах (западная часть зал. Шелихова, кутловая часть Пенжинской губы, Карагинский залив) в целом, наоборот, тренд отрицательный (до –1,5 сут в год) — весенние «цветения» происходят раньше. При этом в мористой части зал. Шелихова в районе Ямских островов «цветения» длятся дольше (до +1,5 сут в год). Во многих прибрежных районах зал. Шелихова «цветения» становятся более интенсивными (до +0,1 мг/м³ в год). Обнаружена статистически значимая корреляция фенологических параметров весеннего «цветения» с датой полного очищения ото льда в зал. Шелихова, локально вдоль западного побережья Камчатки и в Карагинском заливе.

Ключевые слова: хлорофилл-*a*, фитопланктон, фенология, весеннее «цветение» фитопланктона, морской лед, даты полного очищения ото льда, Берингово море, Охотское море

Для цитирования: Малышева А.С., Кивва К.К., Сумкина А.А. Фенология весеннего «цветения» фитопланктона в морских водах вокруг Камчатки // Изв. ТИНРО. — 2026. — Т. 206, вып. 3. — С. 553–576. DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-553-576. EDN: ХУНУСВ.

* Малышева Александра Сергеевна, старший специалист, аспирант, malysheva@vniro.ru, ORCID 0009-0000-1225-9579; Кивва Кирилл Константинович, кандидат географических наук, директор департамента, kivva@vniro.ru, ORCID 0000-0001-8100-8095; Сумкина Александра Андреевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, sumkina@vniro.ru, ORCID 0000-0003-1007-2115.

Original article

Phenology of spring phytoplankton bloom in the marine waters around Kamchatka

Aleksandra S. Malysheva*, Kirill K. Kivva**, Aleksandra A. Sumkina***

*-*** Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,
19, Okružnoy proezd, Moscow, 105187, Russia

* Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

* postgraduate student, senior specialist, malysheva@vniro.ru, ORCID 0009-0000-1225-9579

** Ph.D., head of department, kivva@vniro.ru, ORCID 0000-0001-8100-8095

*** Ph.D., senior researcher, sumkina@vniro.ru, ORCID 0000-0003-1007-2115

Abstract. Timing and other phenological parameters of the spring phytoplankton bloom in the waters around Kamchatka are determined on long-term satellite-derived data for chlorophyll *a* concentration obtained in 1998–2024. Three methods of the timing determining are compared, as the biomass threshold, the cumulative biomass threshold, and the maximum biomass growth rate; finally, a modified threshold method is proposed, more suitable for the study area. Significant negative correlation (up to $r = -0.9$) between the spring bloom onset date and its duration is shown. Features of the spring blooms off the western and eastern coasts of Kamchatka are described. A tendency towards later start of the bloom is revealed in the Pacific waters (up to +2 days per year), but opposite tendency occurs in local areas at both coasts, as the western Shelikhov Bay, inner Penzhina Bay, and Karaginsky Bay (up to –1.5 days per year). The bloom tends to last longer (up to +1.5 days per year) in the outer Shelikhov Bay at Yamsky Islands, and becomes more intense (up to +0.1 mg/m³ per year) in many coastal areas of this bay. Phenological parameters of the spring bloom in the Shelikhov Bay, Karaginsky Bay, and some areas at the western coast of Kamchatka have statistically significant dependence on the timing of sea ice retreat.

Keywords: chlorophyll *a*, phytoplankton, phenology, spring phytoplankton bloom, sea ice, ice retreat, Bering Sea, Okhotsk Sea

For citation: Malysheva A.S., Kivva K.K., Sumkina A.A. Phenology of spring phytoplankton bloom in the marine waters around Kamchatka, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2026, vol. 206, no. 3, pp. 553–576. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-553-576. EDN: XYHUCV.

Введение

Любые изменения в жизнедеятельности фитопланктона и его сезонных циклах находят отражение в организмах более высоких трофических уровней, поскольку фитопланктон — ключевое звено морских экосистем. В большинстве районов Мирового океана в годовом цикле развития фитопланктона наблюдается период существенного роста биомассы, который называется «цветением». В наиболее продуктивных районах океана, в том числе во многих субарктических морских экосистемах, более 50 % от общего годового объема чистой первичной продукции формируется во время весеннего «цветения» фитопланктона (ВЦ) [Wassmann et al., 2006; Leu et al., 2015; Mueter et al., 2021; Nielsen et al., 2023]. «Цветение» фитопланктона стимулирует увеличение биомассы зоопланктона, который, в свою очередь, служит кормом для личинок рыб [Platt et al., 2003], т.е. соответствие между репродуктивными циклами морских организмов и их пищей может частично определять численность годовалых особей рыб [Cushing, 1990]. В последние десятилетия наблюдаются изменения в сроках ВЦ фитопланктона в высокоширотных районах [Kahru et al., 2011; Henson et al., 2018], что может повлиять на структуру пищевой цепи и на виды, находящиеся на более высоких трофических уровнях, в том числе используемые в российском рыбном промысле. Такие изменения особо ярко проявляются в субарктических и арктических районах [Racault et al., 2012; Mueter et al., 2021; Silva et al., 2021], в частности под влиянием «арктического усиления» [Qu et al., 2006; Serreze, Barry, 2011; Hunter-Cevera et al., 2016; Friedland et al., 2018]. В связи с этим эффектом были зафиксированы сдвиги в сроках наступления ключевых сезонных физических и биологических процессов и смещение границ биогеографических зон в северном направлении [Kahru et al., 2011; Mueter et al., 2021].

Исследуемый район — воды, окружающие Камчатский полуостров (50–65° с.ш. 153–167° в.д., рис. 1), — это один из наиболее продуктивных промысловых районов Мирового океана, который охватывает 4 важных промысловых подзоны России: Западно-Камчатскую, Камчатско-Курильскую, Петропавловско-Командорскую и Карагинскую [Биология океана, 1977; Шунтов, 2001]. В пределах этого района добывают существенные объемы (суммарно — более 1 млн т ежегодно) многих видов, в том числе минтая, сельди и горбуши [Бугаев и др., 2024; Датский, Антонов, 2025; Смирнов и др., 2025; Шейбак и др., 2025]. Молодь всех перечисленных видов питается зоопланктоном, концентрация которого зависит от условий «цветения» фитопланктона [Бугаев и др., 2024; Горбатенко и др., 2024; Шевляков и др., 2024].

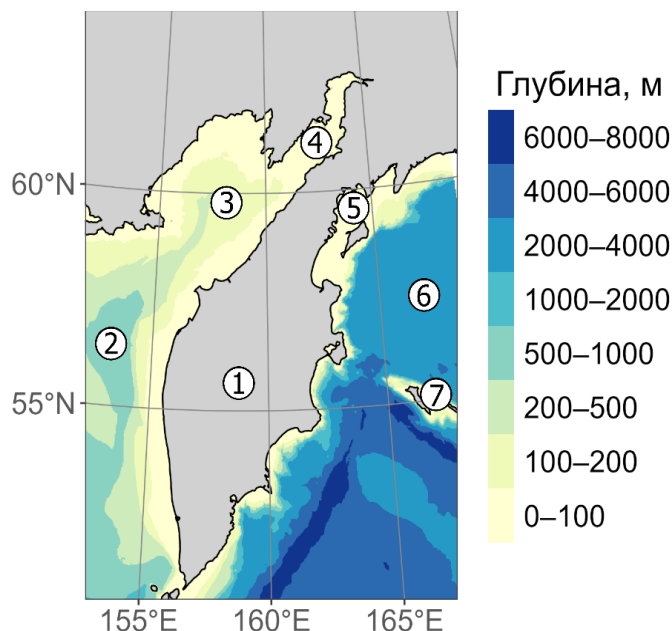


Рис. 1. Батиметрия исследуемого района по данным GEBCO_2024: 1 — п-ов Камчатка; 2 — впадина ТИНРО; 3 — зал. Шелихова; 4 — Пенжинская губа; 5 — Карагинский залив; 6 — Командорская котловина; 7 — Командорские острова

Fig. 1. Bathymetry of the study area (shading, generalized from <https://www.gebco.net>): 1 — Kamchatka Peninsula, 2 — TINRO Basin, 3 — Shelikhov Bay, 4 — Penzhina Bay, 5 — Karaginsky Bay, 6 — Commander Basin, 7 — Commander Islands

Исследования видового состава и плотности фитопланктона в прибрежных водах Камчатки начаты в середине прошлого века [Орлова и др., 2024]. С восточной и с западной стороны Камчатского полуострова было установлено доминирование ВЦ фитопланктона над осенним «цветением» с максимальным развитием ВЦ в мае-июне [Семина, 1956; Kawarada, 1957; Ohwada, 1957].

В настоящее время регулярные мониторинговые исследования планктонных сообществ проводятся КамчатНИРО с 2013 г. в районе Авачинской губы, Авачинского и Камчатского заливов, а также у западного побережья, в том числе на локальных полигонах [Лепская, 2015; Орлова и др., 2024]. Приведен видовой список фитопланктона и описано наличие каждого вида в выделенных районах у побережья Камчатки [Орлова и др., 2024]. Однако в данных работах натурные измерения проводились в основном в пределах шельфа полуострова и были ограничены во времени.

В последние десятилетия дистанционное зондирование Земли из космоса позволяет охватить большие пространственные и временные масштабы. В частности, спутниковые спектрорадиометры (сканеры цвета) дают возможность получить оценку концентрации хлорофилла-*a* (Хл-*a*) в поверхностном слое в пределах первой

оптической глубины [Antoine et al., 1996]. В недавних работах по оценке фенологии «цветения» фитопланктона рассчитаны сроки и параметры как для всего Мирового океана [Nicholson et al., 2025], так и для Берингова моря в частности [Kivva et al., 2026]. Однако описание для вод вдоль Камчатского полуострова представлено фрагментарно [Цхай, Шевченко, 2022].

Цель данной работы — оценка сроков и параметров весеннего «цветения» фитопланктона вдоль побережья Камчатки по спутниковым данным концентрации Хл-а за 1998–2024 гг., а также анализ их тенденций.

Материалы и методы

Концентрация хлорофилла-а

В настоящей работе предполагается, что концентрация Хл-а отражает биомассу фитопланктона. В исследовании использованы материалы дистанционного зондирования о концентрации Хл-а (мг/м^3) из базы Ocean Colour Climate Change Initiative (OCCCI) версии 6, объединенные с датчиков MODIS, MERIS, OLCI, SeaWiFS и VIIRS (<https://www.oceancolour.org>) [Sathyendranath et al., 2019]. Исходные ежедневные данные с пространственным разрешением 4×4 км интерполированы на сетку 25×25 км в полярной стереографической системе координат, так же как в литературных источниках [Kivva et al., 2026], и преобразованы в универсальную поперечную проекцию Меркатора для района Камчатки ($156\text{--}162^\circ$ в.д.; EPSG:32657). Поскольку в исследуемом районе практически отсутствуют зимние значения Хл-а, для каждого года учитывались только сведения за период с 31 января по 26 ноября (с 30-го по 330-й день года). Концентрация Хл-а для каждой ячейки за каждую дату рассчитана как медиана всех исходных значений, попавших в пределы ячейки за трое суток (дата и два соседних дня).

Для заполнения пропусков в спутниковых данных (облачность, морской лед) использована пространственная интерполяция по методу Data Interpolation Empirical Orthogonal Function (DINEOF) [Beckers, Rixen, 2003; Alvera-Azcárate et al., 2011; Ćatipović et al., 2023; Zhao et al., 2024]. Ранее было показано, что применение метода DINEOF без дополнительных ограничений для интерполяции Хл-а в пределах обширной акватории и в условиях большого количества отсутствующих значений дает относительно большую ошибку [Kivva et al., 2026]. Поэтому в рамках данной работы использован DINEOF с дополнительным ограничением в 50 км радиуса поиска соседей для вычисления главных компонент. Проверка на тестовой выборке по Берингову морю (примерно 3000 ячеек) показала, что этот вариант метода DINEOF позволяет получить интерполированные значения Хл-а, хорошо соответствующие исходным данным ($r = 0,92$, $\text{RMSE} = 0,67 \text{ мг/м}^3$), лучше, чем другие методы, проверенные ранее [Kivva et al., 2026].

Для расчета использовалась функция `dineof` из пакета R `sinkr`*. Метод DINEOF выявляет доминирующие закономерности в трехмерном массиве данных и на их основе вычисляет недостающие значения искомого параметра в конкретной ячейке массива. Новыми значениями заполняются все пропуски в данных, начиная с первого дня в любой из ячеек анализируемой области (в нашем случае — области в радиусе 50 км от центра данной ячейки). Таким образом могут быть заполнены все пропуски в данных, даже в случае наличия пропусков значительной длины. Это потенциально может привести к появлению недостоверных значений Хл-а. Поэтому дополнительно вводилась проверка для каждой ячейки сетки за каждый день: если в радиусе поиска в исходных данных отсутствовали значения Хл-а в течение недели, то интерполированные методом DINEOF значения исключались. Такой подход позволил избежать необоснованной экстраполяции данных. Если в ячейке за отдельный год было менее 50 значений, для нее дальнейший расчет не проводился. Заполнение пропусков в данных

* Taylor M. `sinkr`: Collection of functions with emphasis on multivariate data analysis. R package version 0.8.0. 2025.

методом DINEOF может привести к появлению необоснованно высоких значений, поэтому интерполированные концентрации Хл-а выше 30 мг/м^3 исключались из анализа.

В каждой ячейке годовой ход концентрации Хл-а дополнительно сглажен с помощью локальной полиномиальной регрессии (LOESS — locally estimated scatterplot smoothing, функция loess из пакета R stats). Степень сглаживания, определяемая параметром span (α), выбрана равной 0,1 на основе анализа 100 рядов данных, отобранных случайно. Метод LOESS уже использовался ранее для сглаживания временных рядов концентрации Хл-а в Беринговом море [Kivva et al., 2026]. В случае резкого роста концентрации Хл-а с последующим наличием длительного пропуска в ряду данных сглаживание рядов методом LOESS также может привести к появлению необоснованно высоких значений, поэтому результирующие концентрации Хл-а выше 30 мг/м^3 исключались из анализа.

В результате 98 % ячеек сетки исследуемой области (2296 из 2341 ячейки) содержали ряды Хл-а, необходимые для расчета фенологических параметров, более чем за 20 лет (из 27). Только в 2 % ячеек ряды Хл-а за 8–17 лет не позволили рассчитать фенологические параметры (в западной части зал. Шелихова и в южной части Каргинского залива); для этих ячеек климатические значения параметров и их трендов рассчитаны по рядам длиной 10–19 лет. Таким образом, все полученные в работе оценки статистически надежны.

Определение сроков «цветения» фитопланктона

Для описания сезонного «цветения» фитопланктона используются фенологические параметры: даты начала, пика и окончания «цветения» [Racault et al., 2012; Friedland et al., 2018; Silva et al., 2021; Jin et al., 2025].

Существует несколько подходов к определению даты начала «цветения» [Brody et al., 2013; Jin et al., 2025]. Исследуемый район охватывает прибрежные воды Камчатки, заливы Охотского моря и открытые воды Тихого океана, т.е. разные с точки зрения географии и, следовательно, условий формирования продуктивности области. Поэтому отдельной задачей исследования стал выбор метода определения даты начала весеннего «цветения», который бы позволил описать «цветение» в пределах всего рассматриваемого района. После визуального анализа выбранных случайным образом 300 рядов Хл-а выявлено, что в разных частях исследуемого района «цветение» может начинаться с марта по июнь, а его пик может приходиться на середину лета. При этом летом могут присутствовать «вспышки» Хл-а, которые трудно отделить от ВЦ, и во многих ячейках происходит осеннее «цветение». Таким образом, в некоторых частях района может наблюдаться длительный период повышенной концентрации Хл-а с весны до конца лета, что затрудняет идентификацию ВЦ. В данной работе под ВЦ понимается период повышенной концентрации Хл-а с пиком до 1 августа. Рассмотрены три наиболее часто используемых в литературе метода и предложен модифицированный.

1. Пороговый метод (предложенный авторами). Порог для даты начала ВЦ — медиана ряда Хл-а от начала года до пика «цветения». Если было несколько случаев превышения порога до пика ВЦ — выбиралась дата, ближайшая к дате пика. Порог для даты окончания ВЦ — медиана ряда Хл-а от пика до конца ряда. В случаях, когда пороговое значение концентрации Хл-а для даты окончания оказывалось больше значения пика ВЦ, дата окончания не определялась. Авторами применен данный метод для вод Берингова моря [Kivva et al., 2026], однако дата окончания ранее не устанавливалась.

2. Классический пороговый метод — превышение 5 % от среднегодовой медианы концентрации Хл-а, ближайшее к пику ВЦ [Siegel et al., 2002; Racault et al., 2012; Brody et al., 2013].

3. Метод кумулятивной биомассы фитопланктона [Mackas et al., 2012; Brody et al., 2013] подразумевает расчет кумулятивной суммы Хл-а и выбор порогового значения; в литературе обычно используются значения 15–25 % от интеграла Хл-а в данной ячейке за год. Использование порогового значения, соответствующего 20 или 25 %, для вы-

бранного района исследований в большинстве случаев приводит к очень короткому интервалу (менее 2 нед.) между датой пересечения порога и датой максимума Хл-а. Поэтому нами выбрано пороговое значение 15 % от годовой суммы Хл-а; такое значение ранее использовано для субполярных экосистем [Brody et al., 2013; Silva et al., 2021]. Недостаток метода — невозможность определить дату окончания «цветения».

4. Метод максимальной скорости роста биомассы [Sharples et al., 2006; Brody et al., 2013; Jin et al., 2025]. Дата начала ВЦ — точка максимальной скорости роста концентрации Хл-а до пика. Дата окончания ВЦ — дата максимальной скорости падения концентрации Хл-а после пика.

Методы 1, 2 и 4 подразумевают поиск пика «цветения». С помощью функции `rollapply` из пакета R `zoo` [Zeileis, Grothendieck, 2005] находили все локальные максимумы ряда Хл-а, превышающие $0,5 \text{ мг/м}^3$ — концентрация, используемая в качестве порогового значения «цветения» в Мировом океане [Behrenfeld, Boss, 2014]. В качестве пика «цветения» выбирали максимальный из таких локальных экстремумов, наблюдавшийся до 1 августа.

Кроме того, оценивается продолжительность «цветения» — разница между датой окончания и датой начала (дни) — и интенсивность «цветения» — максимальное значение концентрации Хл-а в пике (мг/м^3).

Дата полного очищения акватории ото льда

По ежедневным данным о концентрации (сплоченности) морского льда из массива Climate Data Record (CDR) NOAA/NSIDC [Meier et al., 2017] были рассчитаны сроки полного очищения акватории ото льда с использованием метода порогового значения концентрации льда (порог 0,15) [Кивва и др., 2020; Baker et al., 2020; Сумкина и др., 2022].

Статистический анализ

Исследуемый район содержит воды как шельфовых, так и глубоководных областей с разным содержанием Хл-а, причем в прибрежных районах вблизи устьев рек (в пределах приблизительно 100 м изобаты) спутниковые данные по Хл-а могут быть ошибочными за счет содержания высоких концентраций окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ) [Salyuk et al., 2016; Скороход и др., 2025; Korchemkina et al., 2026]. Массив данных OCCCИ подходит для оценки фенологии ВЦ фитопланктона в выбранном районе, однако значения Хл-а в данном продукте рассчитаны по общим для Мирового океана, а не региональным алгоритмам, что может отразиться в высоких значениях интенсивности ВЦ в прибрежных районах. Заполнение пропусков в значениях Хл-а по методу DINEOF также может вносить погрешность в данные. Кроме того, рассмотренный временной ряд концентрации Хл-а довольно короткий — 27 лет (1998–2024 гг.). На основании этих факторов и того, что рассчитанные фенологические параметры ВЦ потенциально имеют ненормальное распределение (не подчиняются закону Гаусса), для статистического анализа в работе применены непараметрические методы: медиана вместо среднего значения и разность перцентилей вместо среднеквадратичного отклонения для описания климатологии фенологических характеристик; ранговая корреляция Спирмена и непараметрический тест Уилкоксона (Wilcoxon signed-rank test) для сравнения методов определения сроков ВЦ; оценочная функция Тейла-Сена для определения многолетних тенденций фенологических параметров ВЦ.

Все расчеты, анализ и визуализация данных выполнены в R версии 4.5.2.

Результаты и их обсуждение

Оценка методов определения сроков «цветения»

Для составления общего описания характера годовой изменчивости Хл-а рассмотрены 300 рядов концентрации Хл-а, выбранных случайным образом (примеры рис. 2).

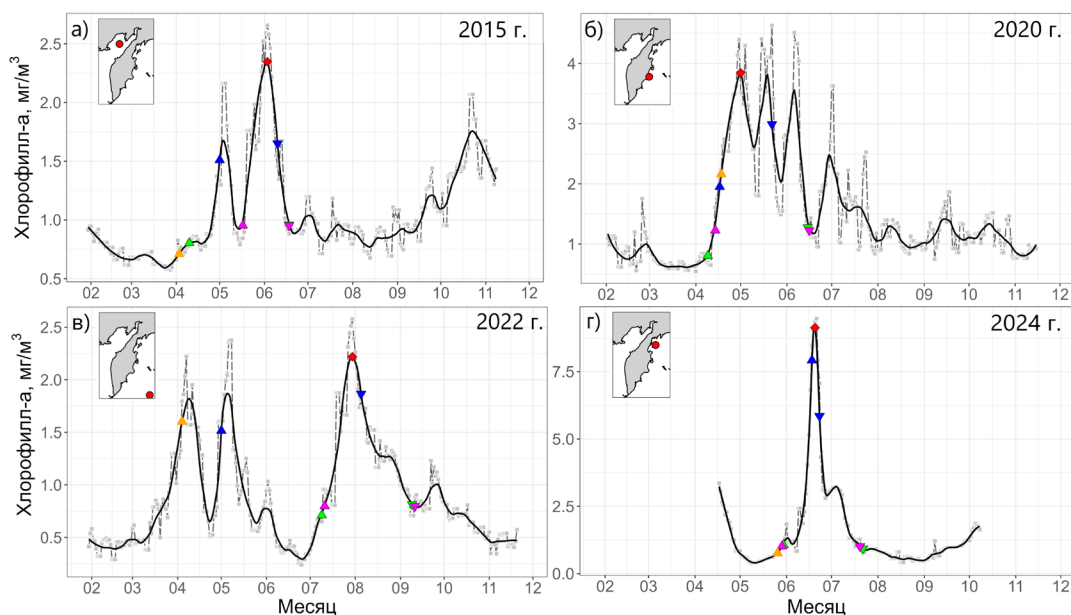


Рис. 2. Годовой ход концентрации Хл-а с выделенными сроками весеннего «цветения» по 4 методам в четырех случайно выбранных ячейках сетки: **а** — 2015 г., **б** — 2020 г., **в** — 2022 г., **г** — 2024 г. Серые квадраты — концентрация Хл-а после интерполяции методом DINEOF; черная сплошная линия — концентрация Хл-а, сглаженная методом LOESS; зеленые треугольники — предложенный пороговый метод; розовые — классический пороговый метод; желтые — метод кумулятивной биомассы; синие треугольники — метод максимальной скорости роста биомассы. Расположение ячеек показано на врезках

Fig. 2. Annual variability of Chl *a* concentration: **a** — 2015, **б** — 2020, **в** — 2022, **г** — 2024. Periods of the spring phytoplankton bloom determined by certain methods are shaded in colors: pink triangles — biomass threshold; yellow triangles — cumulative biomass threshold; blue triangles — maximum biomass growth rate; green triangles — proposed method of modified threshold. Gray squares — interpolated values; black solid line — locally estimated scatterplot smoothing. Location of the data cells is shown in inserts

Характерный случай ВЦ для данного района: увеличение биомассы в конце апреля — начале мая, достижение пика в конце мая — начале июня и окончание «цветения» в июле — начале августа.

Сравнение методов определения сроков ВЦ выполнено не только визуально, но и статистически с помощью попарного корреляционного анализа и сравнения выборок в каждой ячейке. Предполагается, что если два разных метода дают близкие к достоверным значения сроков ВЦ, эти значения должны иметь высокую степень корреляции между собой. Также выборки, полученные для одной ячейки двумя этими методами, не должны статистически различаться. Обратные случаи (низкий коэффициент корреляции или статистически достоверное отличие выборок) свидетельствуют о существенном несовпадении значений и, следовательно, о вероятной ошибочности значений, полученных одним из двух сравниваемых методов. При этом возможно расхождение значений, оцененных какими-либо двумя методами, только на части рассматриваемой акватории. Такие случаи также рассматривались как основание для исключения одного из методов.

При сравнении методов определения сроков ВЦ сразу были отклонены два варианта: метод кумулятивной биомассы (метод 3) определял более ранние сроки ВЦ в открытых водах, чем в прибрежной зоне (рис. 2, а, в; рис. 3), что проявилось и в отрицательной корреляции с пороговыми методами 1, 2 (рис. 4). Такое соотношение дат не соответствует действительности, как было показано ранее [Кивва, Кубряков, 2021; Kivva et al., 2026]. Кроме того, по данному методу нет возможности определять дату

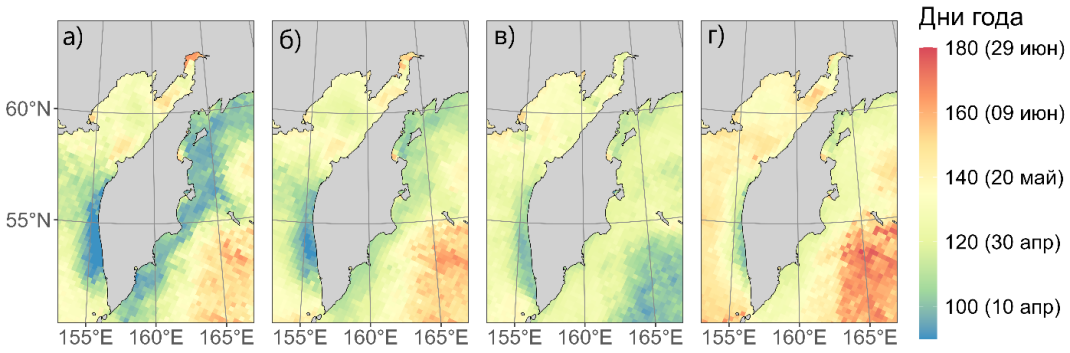


Рис. 3. Медиана даты начала весеннего «цветения» за 1998–2024 гг., определенная 4 методами: **а** — предложенный пороговый метод; **б** — классический пороговый метод; **в** — метод кумулятивной биомассы; **г** — метод максимальной скорости роста биомассы

Fig. 3. Climatology of spring bloom onset date (1998–2024) determined by certain methods: **a** — proposed method of modified threshold; **б** — biomass threshold method; **в** — cumulative biomass threshold method; **г** — maximum biomass growth rate method

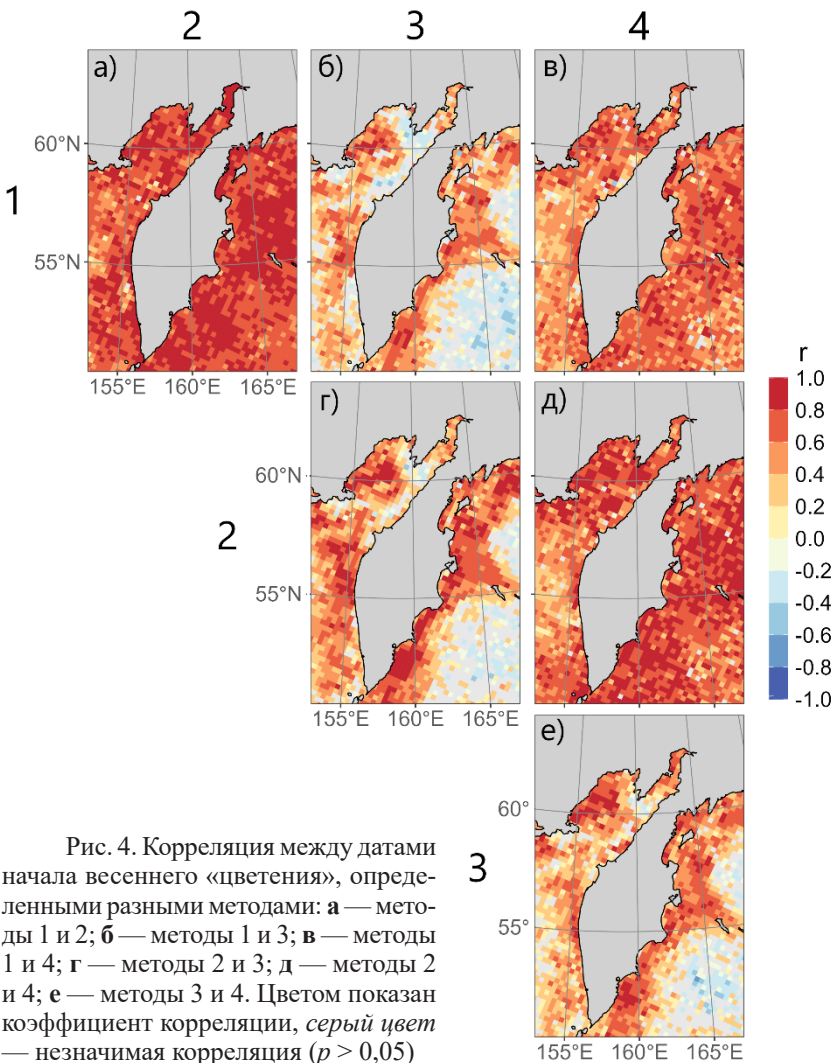


Рис. 4. Корреляция между датами начала весеннего «цветения», определенными разными методами: **а** — методы 1 и 2; **б** — методы 1 и 3; **в** — методы 1 и 4; **г** — методы 2 и 3; **д** — методы 2 и 4; **е** — методы 3 и 4. Цветом показан коэффициент корреляции, *серый цвет* — незначимая корреляция ($p > 0,05$)

Fig. 4. Intercorrelation between spring bloom onset date determined by different methods (1–4): **a** — 1 vs 2; **б** — 1 vs 3; **в** — 1 vs 4; **г** — 2 vs 3; **д** — 2 vs 4; **е** — 3 vs 4. Values of the correlation coefficient are shown by colors, *gray color* — insignificant correlation ($p > 0.05$)

окончания ВЦ. Метод максимальной скорости роста биомассы (метод 4) показывал самые поздние даты начала ВЦ (141-й день года ± 5 сут; здесь и далее — среднее среднегодовых значений $\pm$ стандартное отклонение, см. рис. 3, г), расположенные очень близко к дате пика ВЦ (151-й день года ± 5 сут, см. рис. 2, б, г). Также метод 4 давал самые ранние даты окончания, т.е. самый короткий период ВЦ (рис. 2). Такая закономерность в определении сроков «цветения» по данному методу отмечалась для Желтого моря [Jin et al., 2025], а для субполярных районов Атлантики, наоборот, по методу 4 были получены самые ранние даты начала ВЦ [Brody et al., 2013]. Несмотря на то что метод 4 сильно коррелировал с пороговыми методами (см. рис. 4, в, д), в дальнейшем анализе он не рассматривался.

Два пороговых метода показали близкие результаты (пример на рис. 2: зеленый и розовый цвета; даты окончания на рис. 2 (а) совпадают), однако классический пороговый метод давал более поздние даты начала по сравнению с модифицированным пороговым методом (соответственно 129-й день года ± 5 сут и 117-й день года ± 4 сут). Для рассматриваемого района характерны случаи, когда Хл-а после ВЦ в целом выше, чем до ВЦ. Это приводит к тому, что значение медианы всего ряда обычно выше значения медианы для части ряда до пика «цветения». В пространственном распределении медиан даты начала ВЦ также заметно, что по методу 2 ВЦ начинается позже, чем по предложенному пороговому методу, особенно вдоль береговой линии (см. рис. 3, а, б).

Результаты, полученные с помощью пороговых методов, сильно коррелируют между собой (см. рис. 4, а), поэтому для сравнения методов были дополнительно рассмотрены результаты непараметрического теста Уилкоксона (Wilcoxon signed-rank test) и параметрического парного t-теста Стьюдента (paired t-test), примененных к выборкам дат начала ВЦ в каждой ячейке сетки. На большей части района исследования разница двух методов статистически значима: начало ВЦ, определенное по методу 2, имеет более поздние даты (рис. 5). С восточной стороны Камчатки наблюдается значимая отрицательная разница методов по результатам двух тестов, тогда как в западной части зал. Шелихова и в районе впадины ТИНРО разница статистически незначима, что может быть связано с высокой вариативностью в сроках ВЦ, оцененных по двум методам (рис. 5). Например, в зал. Шелихова дата начала ВЦ может быть определена по методу 1 на месяц раньше, чем по методу 2, в связи с присутствием ранней «вспышки» «цвете-

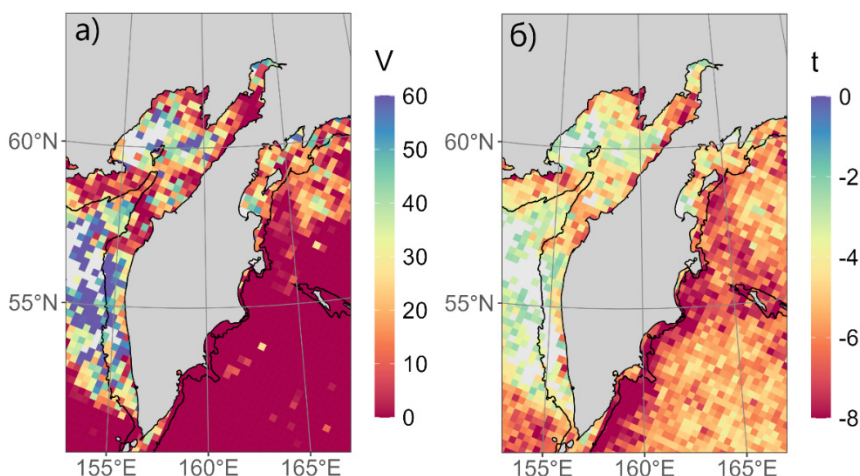


Рис. 5. Результаты статистического сравнения сроков начала весеннего «цветения», оцененных по методам 1 и 2: **а** — с помощью непараметрического теста Уилкоксона (v -статистика); **б** — парного t -теста Стьюдента (t -статистика). Черная линия здесь и далее — изобата 200 м. Серый цвет — $p > 0,05$

Fig. 5. Estimates of the Wilcoxon signed-rank test (**a**) and paired t -test (**b**) for time-series of spring bloom onset date determined by two different methods (methods 1 and 2). Areas with $p > 0.05$ are shaded in grey. Hereinafter: black line shows 200 m isobath

ния» (см. рис. 2, а). Однако наблюдались случаи, когда пороговые методы определяли сроки «цветения» в одно и то же время, но «цветение» скорее относилось к летнему, чем к весеннему. Так, в Карагинском заливе в 2024 г. временной ряд Хл-а начинается с середины-апреля, и значения в начале ряда превышают $2,5 \text{ мг/м}^3$, скорее всего, из-за пропусков в данных пик ВЦ был упущен (рис. 2, г). В открытых водах океана в 2022 г. наблюдался случай максимального пика Хл-а в конце июля, но использованные методы не позволили выявить явное ВЦ с конца марта по конец мая (рис. 2, в). Эти примеры иллюстрируют, что даже предложенные в этой работе дополнительные условия для усовершенствования наиболее часто используемого порогового метода определения сроков ВЦ в исследуемом районе не всегда позволяют получить удовлетворительный результат. Тем не менее визуальный анализ хода Хл-а показал существенно более частое попадание результата, полученного по методу 1, на первый перегиб хода Хл-а. Соответственно, для дальнейшего анализа фенологических характеристик ВЦ для вод Камчатки использовался модифицированный пороговый метод (метод 1).

Сроки весеннего «цветения» фитопланктона

Наиболее раннее начало ВЦ (в конце марта) отмечено в водах у южной части западного побережья Камчатки. Несколько позже (в первой половине апреля) ВЦ развивается вдоль восточного побережья и над центральным шельфом западного побережья Камчатки (рис. 6, а). В Охотском море над глубоководной частью ВЦ начинается только в конце апреля. В зал. Шелихова ВЦ развивается позже, в начале мая, после освобождения вод ото льда [Добровольский, Залогин, 1982; Думанская, 2015], затем начинается в Пенжинской губе в конце месяца. В глубоководной части Берингова моря к северу от Командорских островов даты начала ВЦ приходятся на начало мая, а к юго-востоку от п-ова Камчатка в открытых водах Тихого океана ВЦ начинается в более широком диапазоне дат: с конца апреля по конец мая (рис. 6, а).

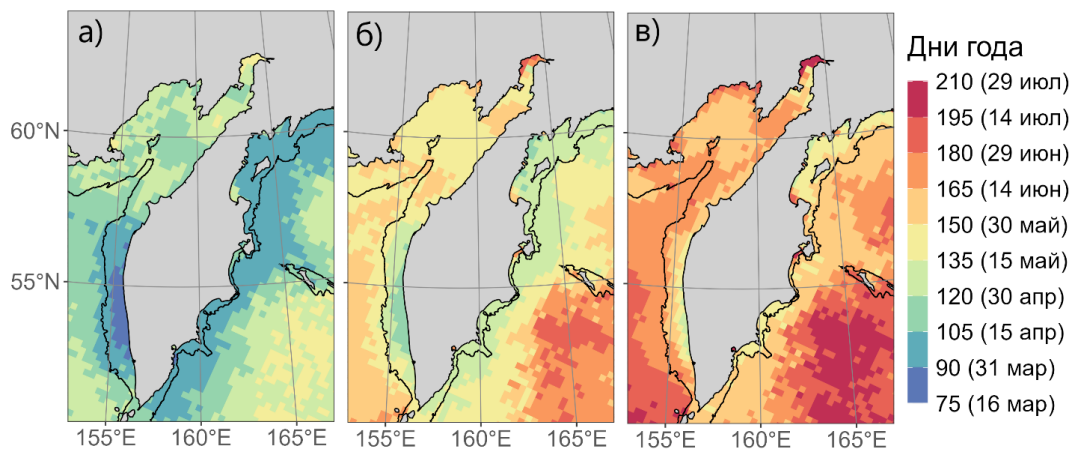


Рис. 6. Медианы даты начала (а), максимума (б) и даты окончания (в) весеннего «цветения» фитопланктона в водах вокруг Камчатки за 1998–2024 гг.

Fig. 6. Climatology for median spring bloom onset date (а), median date of maximum chlorophyll *a* concentration (б), and spring bloom termination date (в) in the waters around Kamchatka (1998–2024)

Аналогичная картина распределения характерна для медианы даты максимума ВЦ (рис. 6, б). Вдоль западного шельфа Камчатки, в его южной и центральной частях, ВЦ достигает пика уже во второй половине апреля, тогда как у восточного побережья это происходит на полмесяца позже — с начала мая. В Охотском море пик «цветения» наблюдается в конце мая — начале июня. Самый поздний максимум ВЦ (июнь) выделяется в районе Пенжинской губы и в открытой части Тихого океана (конец июня — начало

июля). В кутовой части Пенжинской губы поздний срок пика ВЦ обусловлен поздним сходом льда либо это артефакт спутниковых данных Хл-а, связанный с высокой концентрацией ОРОВ. Поздний пик ВЦ в малопродуктивных открытых водах Тихого океана объяснить без привлечения дополнительного анализа гидрологических параметров на данном этапе исследования не представляется возможным. В этом же районе ВЦ заканчивается позже всего (вторая половина июля), тогда как в шельфовой области полуострова окончание «цветения» происходит в конце мая — начале июня (рис. 6, в). Даты начала и пика ВЦ описаны для исследуемого района в предыдущей работе авторов на основе данных MODIS за 2003–2024 гг. [Kivva et al., 2026], однако распределение даты окончания ВЦ представлено впервые.

Продолжительность и интенсивность весеннего «цветения»

Для зал. Шелихова, ежегодно покрывающегося льдом [Добровольский, Залогин, 1982; Думанская, 2015; Пищальник и др., 2016], характерны короткие ВЦ длительностью порядка 30–40 сут (рис. 7, а). У восточной Камчатки такая продолжительность ВЦ характерна для Карагинского залива, имеющего ежегодный ледовый покров*. Вдоль обоих берегов Камчатки ВЦ в среднем длится 40–50 сут, к востоку от Камчатки в открытых водах — почти 2 мес., местами до 60–70 сут, в глубоководной части Охотского моря может продолжаться более 70 сут.

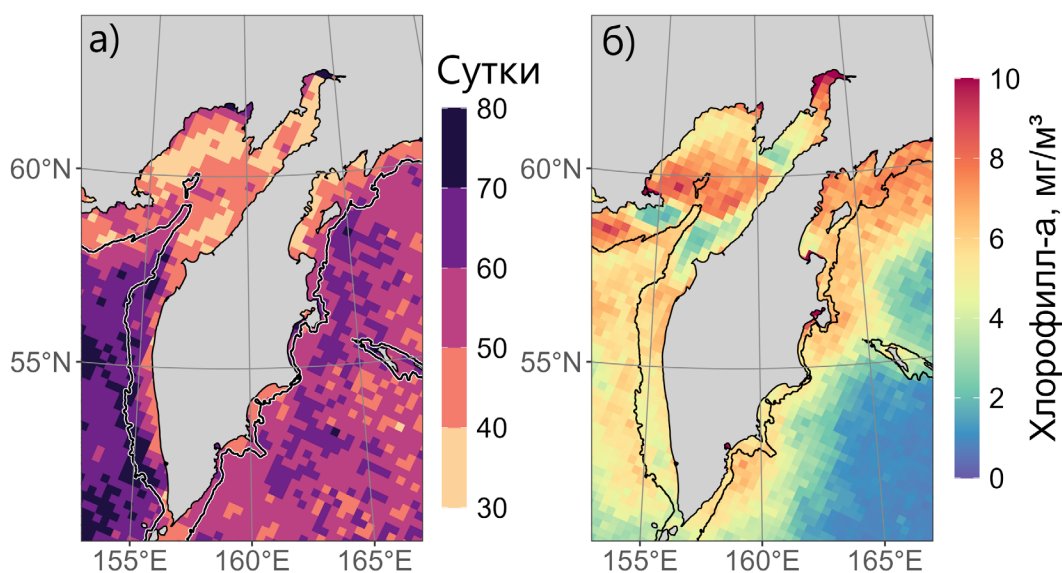


Рис. 7. Медианы продолжительности (а) и интенсивности (б) весеннего «цветения» фитопланктона в водах вокруг Камчатки за 1998–2024 гг.

Fig. 7. Climatology for median duration of the spring bloom (а, days) and median value of chlorophyll *a* maximum concentration (б, mg/m^3) in the waters around Kamchatka (1998–2024)

В Охотском море ВЦ более продуктивно, чем с восточной стороны Камчатки, где наиболее интенсивные ВЦ наблюдаются только в северной части Карагинского и в Олюторском заливах, в которых характерная концентрация Хл-а в пике «цветения» составляет 7–9 mg/m^3 (рис. 7, б). В зал. Шелихова и в Пенжинской губе медиана интенсивности ВЦ превышает 10 mg/m^3 , однако есть три области в этом районе с низкой концентрацией Хл-а в пике «цветения» (менее 3 mg/m^3) — участок к северу от 60° с.ш. в Пенжинской губе, в районе Ямских островов и западнокамчатского шельфа. В

* Лощия Берингова моря. Часть 1. Западная часть моря. Л.: Главное управление навигации и океанографии Министерства океанологии, 1981. 492 с.

этих областях отмечается интенсивное приливное перемешивание [Жабин, Дубина, 2013; Жабин и др., 2019]. Вероятно, постоянное перемешивание приводит к перераспределению фитопланктона по слою большей мощности, чем в соседних районах. В результате при близкой или даже более высокой интегральной биомассе значения Хл-а в поверхностном слое, наблюдаемые со спутников, оказываются ниже, чем в районах, где приливное перемешивание слабее. Южнее в Охотском море как в шельфовой, так и в глубоководной части медианное многолетнее значение концентрации Хл-а составляет порядка 5–6 мг/м³. Открытые воды Тихого океана и глубоководная часть Берингова моря низкопродуктивные (менее 2 мг/м³ в пике «цветения»). По всей видимости, это связано с дефицитом железа, необходимого микрокомпонента для жизнедеятельности фитопланктона [Maldonado et al., 1999; Hawco et al., 2025].

Изменчивость фенологических параметров весеннего «цветения» фитопланктона

Наибольшая вариабельность сроков начала ВЦ, оцененная с помощью разницы 90- и 10-го перцентилей, наблюдалась в Пенжинской губе (до 80 сут), что, вероятно, связано с изменчивостью ледовой обстановки, а также на юго-западном шельфе Камчатки и в открытом океане к востоку от полуострова (рис. 8, а). Вдоль побережья

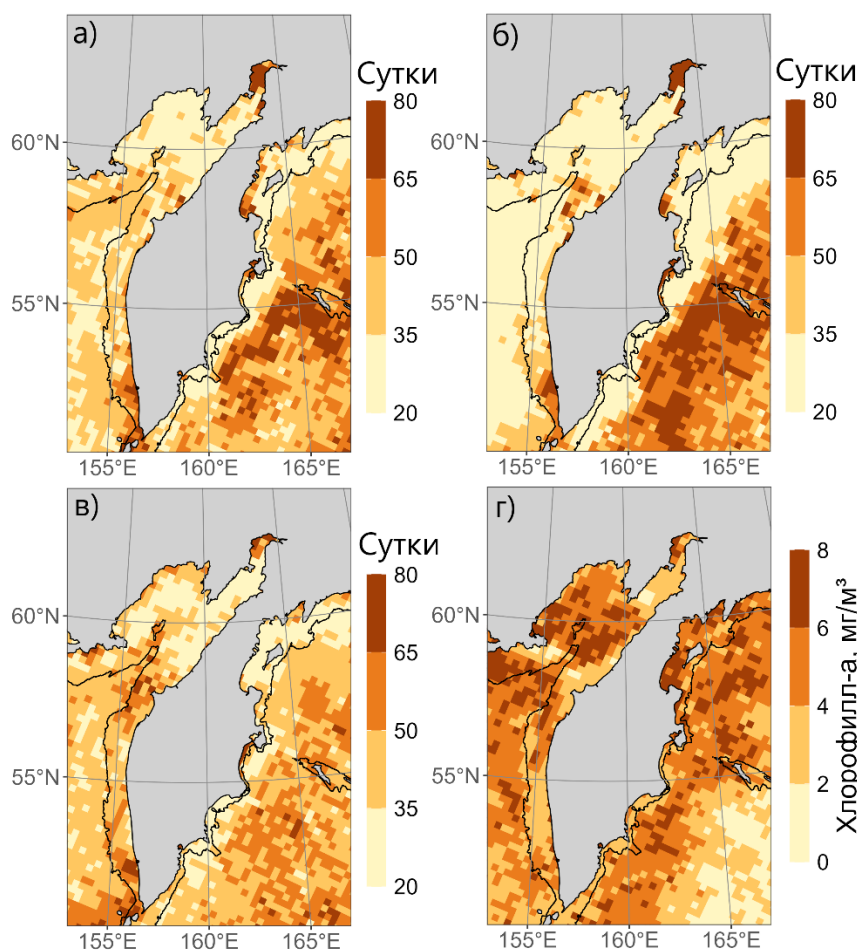


Рис. 8. Разница 90- и 10-го перцентилей даты начала (а), максимума (б), продолжительности (в) и интенсивности (г) весеннего «цветения» фитопланктона в водах вокруг Камчатки за период 1998–2024 гг.

Fig. 8. The difference between the 90 and 10 percentiles for spring bloom onset date (а), date of the maximum chlorophyll *a* concentration (б), the bloom duration (в), and the bloom intensity (г) in the waters around Kamchatka in 1998–2024

Камчатки и в открытой части Охотского моря 80 %-ный доверительный интервал даты максимума ВЦ составляет около 1 мес. (рис. 8, б). Как и в случае с датой начала, дата пика имеет максимум изменчивости (65–80 сут) в Пенжинской губе и к югу от Командорских островов (рис. 8, б).

Минимальная дисперсия значений продолжительности ВЦ (разница 90- и 10-го перцентилей 20–30 сут) характерна для зал. Шелихова и восточного побережья Камчатки (рис. 8, в). В глубоководных районах Охотского и Берингова морей доверительный интервал составлял в основном 35–50, реже 50–60 сут.

По обе стороны от полуострова значения интенсивности «цветения» варьировали в широком диапазоне (4–8 мг/м³), тогда как в открытом океане к югу от Командорских островов изменчивость была минимальна (до 2 мг/м³, рис. 8, г). Однако следует отметить, что медианные многолетние значения Хл-а в пике там ниже 1 мг/м³. Таким образом, 80 %-ный доверительный интервал интенсивности «цветения» существенно превышает характерное значение Хл-а в пике.

Связь фенологических параметров между собой

В большей части рассматриваемого района наблюдалась значимая отрицательная корреляция даты начала ВЦ с его продолжительностью (рис. 9, а). Значения коэффициента корреляции до –0,9 зафиксированы во впадине ТИНРО и зал. Шелихова в Охотском море, а также в Карагинском заливе, т.е. чем раньше начинается ВЦ в районе, тем дольше оно длится. В водах открытого океана данная связь отмечена точно.

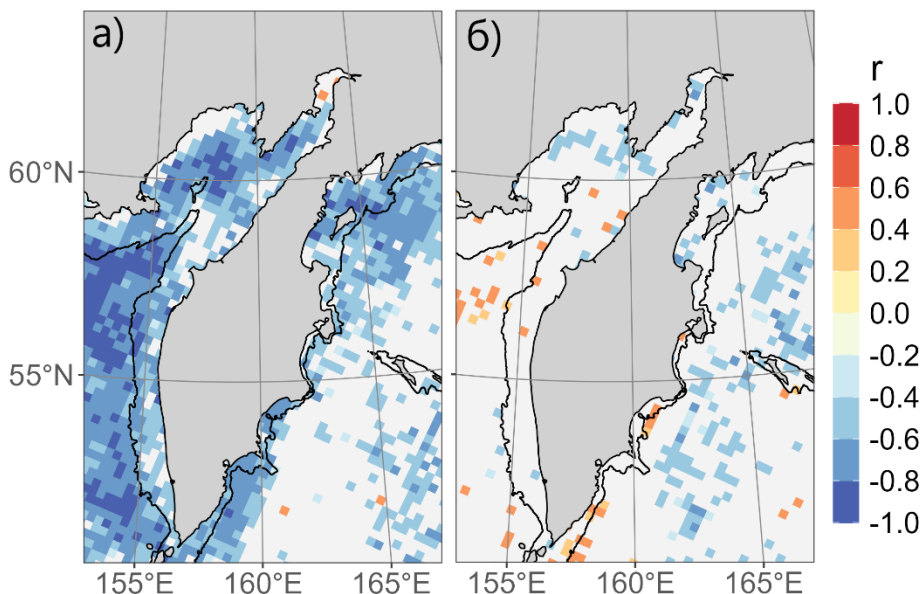


Рис. 9. Корреляция даты начала весеннего «цветения» с его продолжительностью (а) и интенсивностью (б). Цветом показан коэффициент корреляции Спирмена. Серый цвет — незначимая корреляция ($p > 0,05$)

Fig. 9. Correlation between the time-series for spring bloom onset date and the bloom duration (а) and intensity (б). Values of the Spearman's correlation coefficient are shown by colors, gray color — insignificant correlation ($p > 0.05$)

Значимая связь дат начала ВЦ с интенсивностью зафиксирована в меньшем количестве ячеек сетки (рис. 9, б). В восточной части района наблюдалась отрицательная корреляция (до $r = -0,7$) в Карагинском заливе и в открытых водах Тихого океана, а также в зал. Шелихова и Пенжинской губе — чем раньше начинается ВЦ, тем более оно интенсивно. На юго-восточном шельфе и в глубокой части Охотского моря значения коэффициентов корреляции положительны (до $r = 0,6$), т.е. ранние ВЦ имеют низкую концентрацию Хл-а.

Тенденции фенологических характеристик весеннего «цветения»

Многолетние линейные тренды фенологических характеристик ВЦ фитопланктона были рассчитаны с использованием оценочной функции Тейла-Сена за период 1998–2024 гг. (рис. 10).

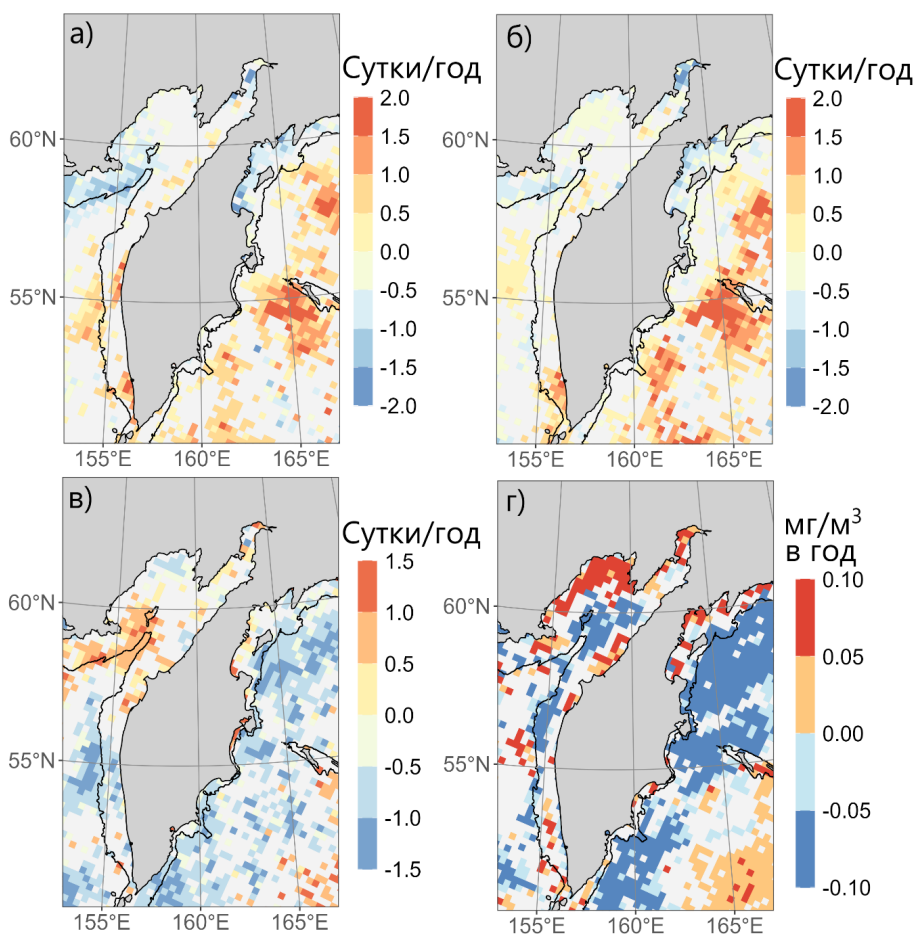


Рис. 10. Многолетние тренды (а — даты начала, б — даты максимума, в — продолжительности, г — интенсивности) весеннего «цветения» фитопланктона в водах вокруг Камчатки за 1998–2024 гг. Ячейки с незначимыми трендами ($p > 0,05$) показаны серым цветом

Fig. 10. Long-term trends for starting date of the spring bloom (а), the date of the maximum chlorophyll *a* concentration (б), the bloom duration (в), and the bloom intensity (г) in the waters around Kamchatka (1998–2024). Grid cells with insignificant trends ($p > 0.05$) are shown by gray

В сроках начала и максимума ВЦ ярко выражен положительный тренд (до +2 сут в год) в восточной части района как в открытых водах океана, так и в Беринговом море (рис. 10, а, б), т.е. наблюдается тенденция к сдвигу «цветения» на более поздний срок. Менее выражен положительный тренд в Охотском море (до +1,5 сут в год) вдоль центральной и южной частей побережья Камчатки. В Карагинском заливе и зал. Шелихова, напротив, отмечен отрицательный значимый тренд (до –1,5 сут в год).

У продолжительности ВЦ положительная тенденция (до +1,5 сут в год) наблюдалась во внешней части зал. Шелихова и на локальных участках вод Тихого океана (рис. 10, в). В остальной части района тренд был отрицательным (до –1,5 дня в год): ВЦ за последние 27 лет стали менее продолжительными. Более того, в этих же областях ВЦ стали и менее интенсивными (рис. 10, г). Отрицательный тренд в 0,1 мг/м³ в год кажется относительно небольшим, однако в пересчете на 10 лет это уже 1 мг/м³, что довольно значительно в единицах концентрации Хл-а. Интенсивность ВЦ в целом растет в северной

части зал. Шелихова, Пенжинской губе, Карагинском заливе (до $+0,1 \text{ мг/м}^3$ в год), а также в удаленной от материка части океана (до $+0,05 \text{ мг/м}^3$ в год). Ранее отмечалась тенденция к снижению интенсивности ВЦ в центральной части Охотского моря [Зуенко и др., 2019]. При этом к оценке трендов интенсивности ВЦ в прибрежных районах нужно относиться с осторожностью, поскольку часть наблюдаемых трендов может быть следствием не увеличения концентрации Хл-а в пике «цветения», а увеличения выноса ОРОВ крупными реками (например, р. Пенжина).

Связь фенологических параметров с датой полного очищения ото льда

Для оценки одной из возможных причин изменения в сроках и параметрах ВЦ фитопланктона в водах Камчатки проведен корреляционный анализ с датой полного очищения (ДПО) акватории ото льда (рис. 11). Значимая связь отмечена в небольшом количестве ячеек района, однако можно выделить следующие закономерности. Как в случае с датой

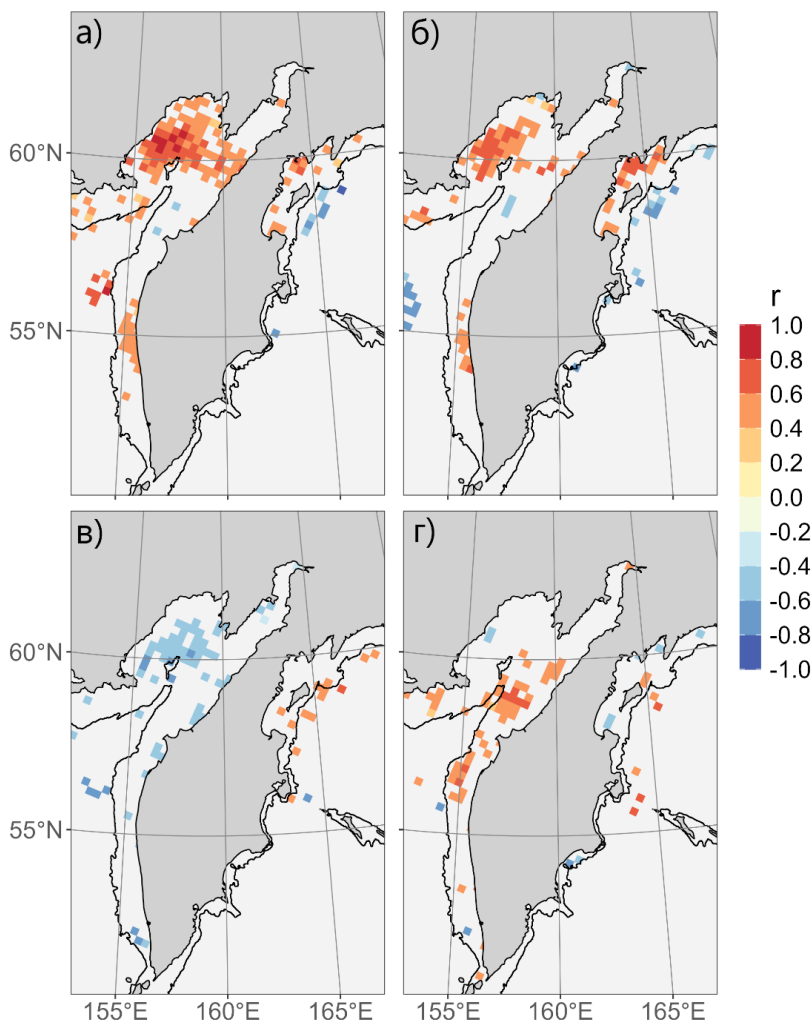


Рис. 11. Корреляция даты полного очищения ото льда с датой начала (а), максимума (б), продолжительностью (в), интенсивностью (г) ВЦ фитопланктона в водах вокруг Камчатки за 1998–2024 гг. Величины коэффициентов корреляции показаны цветом. Серый цвет — незначимая корреляция ($p > 0,05$)

Fig. 11. Correlation of dates of the sea ice retreat with spring bloom onset date (а), dates of the maximum chlorophyll *a* concentration (б), the bloom duration (в), and the bloom intensity (г) in the waters around Kamchatka in 1998–2024. Values of the Spearman's correlation coefficient are shown by colors, gray color — insignificant correlation ($p > 0.05$)

пики ВЦ (рис. 11, б), дата начала ВЦ сильно коррелировала с ДПО ($r > 0,6$, $p < 0,05$) в зал. Шелихова, вдоль центральной части западного шельфа Камчатки и в Карагинском заливе (рис. 11, а), т.е. в тех же районах, где наблюдались статистически значимые коэффициенты линейных трендов в сроках начала и максимума ВЦ.

В Беринговом море восточнее Карагинского шельфа, наоборот, зафиксирована отрицательная корреляция даты начала ВЦ с ДПО ($r = -0,6$, $p < 0,05$), т.е. ранний сход льда связан с поздним «цветением». Такая ситуация соответствует гипотезе колебаний ограничивающего фактора (Oscillating control hypothesis), описанной для юго-восточной части Берингова моря [Hunt et al., 2002, 2011]. Задержка ВЦ в таком случае связана с интенсивным ветровым перемешиванием на свободных ото льда акваториях в весеннее время.

Значимая, но невысокая отрицательная связь ($-0,4 < r < -0,6$) ДПО и продолжительности ВЦ наблюдалась в зал. Шелихова и вдоль западного побережья Камчатки (рис. 11, в): ранний сход льда способствовал более длительному «цветению». В Беринговом море вдоль изобаты 200 м отмечены положительные коэффициенты корреляции ($0,4 < r < 0,6$): чем раньше очищалась акватория ото льда, тем меньше длилось ВЦ.

В юго-восточной части зал. Шелихова и вдоль западного побережья Камчатки зафиксирована положительная корреляция ($0,4 < r < 0,8$) интенсивности ВЦ с ДПО (рис. 11, г). Можно сделать вывод, что в этой области ранний сход льда способствует раннему началу ВЦ, его большей продолжительности, но меньшей интенсивности.

Заключение

Впервые описаны фенологические характеристики ВЦ фитопланктона в морских водах вокруг Камчатки по спутниковым данным концентрации Хл-а массива ОСССІ за последние 27 лет. Для этого проведено сравнение основных методов определения сроков ВЦ фитопланктона (пороговый метод, метод кумулятивной биомассы, метод максимальной скорости роста биомассы), а также предложен модифицированный пороговый метод, который лучше подходит для исследуемого района.

Раньше всего ВЦ начинается в водах вдоль юго-западного побережья Камчатки (конец марта) и вдоль восточного шельфа (начало апреля). В этих областях ВЦ длится в среднем 50–70 сут с максимальной концентрацией Хл-а в пике порядка 5–6 мг/м³. В Пенжинской губе и в открытых водах Тихого океана ВЦ начинается примерно в одно и то же время (середина-конец мая), однако в зал. Шелихова и в Пенжинской губе продолжается 30–50 сут с интенсивностью более 8 мг/м³, а к юго-востоку от Камчатки в низкопродуктивных водах (интенсивность менее 2 мг/м³) длится 50–60 сут.

Отмечена отрицательная значимая связь (до $r = -0,9$ при $p < 0,05$) даты начала ВЦ с его продолжительностью с западной и с северо-восточной сторон Камчатки, т.е. раннее ВЦ характеризуется большей продолжительностью.

С восточной стороны Камчатки как в Беринговом море, так и в открытых водах океана выявлен положительный тренд (до +2 сут в год) в сроках ВЦ, что указывает на тенденцию к позднему развитию ВЦ, тогда как в некоторых шельфовых районах (западная часть зал. Шелихова, кутовая часть Пенжинской губы, Карагинский залив), наоборот, тренд отрицательный (до -1,5 сут в год), т.е. ВЦ происходят раньше. При этом в мористой части зал. Шелихова ВЦ длятся дольше (до +1,5 сут в год), а во многих прибрежных районах залива «цветения» становятся более интенсивными (до +0,1 мг/м³ в год), что связано с тенденцией к потеплению и более ранними датами очищения акватории ото льда (положительная корреляция даты начала и интенсивности ВЦ с ДПО, до $r = 0,9$ при $p < 0,05$).

Обнаружена статистически значимая связь фенологических параметров ВЦ (даты начала, даты максимума, значений длительности и интенсивности) с датой полного очищения ото льда в зал. Шелихова и на локальных участках вдоль западного побережья Камчатки и в Карагинском заливе.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы искренне благодарны рецензентам за ценные советы и замечания в ходе подготовки данной статьи.

The authors are sincerely grateful to anonymous reviewers for their valuable comments and useful advices to the manuscript.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование выполнено в рамках гранта РНФ № 25-27-00385.

The study was funded by Russian Science Foundation, project № 25-27-00385.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The study did not concern any research with using animals as a subject.

The authors declare no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

А.С. Малышева — обработка, анализ данных по хлорофиллу-*a*, визуализация и интерпретация результатов, написание текста работы; К.К. Кивва — концепция, интерпретация результатов, написание текста работы; А.С. Сумкина — обработка, анализ данных по льду.

Aleksandra Malysheva — satellite data processing, Chl *a* data analyzing, visualizing and interpretation of the analysis results, the text writing; Kirill Kivva — the study concept, the results interpretation, the text writing; Aleksandra Sumkina — the sea ice data processing and analyzing.

Список литературы

Биология океана. Т. 2. Биологическая продуктивность океана / отв. ред. М.Е. Виноградов. — М. : Наука, 1977. — 400 с. (Серия «Океанология»).

Бугаев А.В., Зикунова О.В., Тепнин О.Б. и др. Основные принципы формирования и интерпретация оправдываемости промысловых прогнозов тихоокеанских лососей Камчатского края в современный период (аналитический обзор 2010–2020-х гг.) // Изв. ТИНРО. — 2024. — Т. 204, вып. 4. — С. 964–1002. DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-964-1002. EDN: UWVHLB.

Горбатенко К.М., Мельников И.В., Шейбак А.Ю. Питание минтая *Gadus chalcogrammus* (Gadidae) в эпипелагиали Берингова моря // Вопр. ихтиол. — 2024. — Т. 64, № 3. — С. 341–353. DOI: 10.31857/S0042875224030088. EDN: FNJONZ.

Датский А.В., Антонов Н.П. Тресковые рыбы дальневосточных морей и тихоокеанских вод Камчатки и Курильских островов: запасы и перспективы промысла // Тр. ВНИРО. — 2025. — Т. 201. — С. 70–95. DOI: 10.36038/2307-3497-2025-201-70-95. EDN: CWMPNF.

Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР : учеб. — М. : МГУ, 1982. — 192 с.

Думанская И.О. Изменение климатических ледовых характеристик Охотского моря в конце XX — начале XXI века // Тр. Гидрометцентра России. — 2015. — Вып. 354. — С. 112–137. EDN: SIGYBK.

Жабин И.А., Ванин Н.С., Дмитриева Е.В. Летний ветровой апвеллинг и приливное перемешивание на западно-камчатском шельфе Охотского моря // Метеорол и гидрол. — 2019. — № 2. — С. 66–73. EDN: VUMMOO.

Жабин И.А., Дубина В.А. Особенности структуры и динамики вод северо-восточного шельфа Охотского моря // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. — 2013. — № 2. — С. 32–39. EDN: OMYSLS.

Зуенко Ю.И., Асеева Н.Л., Глебова С.Ю. и др. Современные изменения в экосистеме Охотского моря (2008–2018 гг.) // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 197. — С. 35–61. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-35-61. EDN: VRGZIS.

Кивва К.К., Кубряков А.А. Сезонная и межгодовая изменчивость поля концентрации хлорофилла-*a* в Беринговом море по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. — 2021. — № 4. — С. 28–45. DOI: 10.31857/S0205961421040047. EDN: EHGDQ.

Кивва К.К., Селиванова Ю.В., Писарева М.Н., Сумкина А.А. Роль физических процессов в формировании весеннего «цветения» фитопланктона в Беринговом море // Тр. ВНИРО. — 2020. — Т. 181. — С. 206–222. DOI: 10.36038/2307-3497-2020-181-206-222. EDN: ХОМOLS.

Лепская Е.В. Фитопланктон северной части западно-камчатского шельфа в летний период 2008 г. // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2015. — Вып. 36. — С. 87–98. DOI: 10.15853/2072-8212.2015.36.87-98. EDN: TWNJAL.

Орлова Т.Ю., Селина М.С., Стоник И.В. и др. Фитопланктон прибрежных вод Камчатки и сопредельных акваторий : моногр. — Владивосток : ЛИТ, 2024. — 184 с. EDN: YULNPY.

Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 185. — С. 228–239. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-185-228-239. EDN: WCAHXP.

Семина Г.И. Сезонные смены фитопланктона западной части Берингова моря // Ботанические материалы Института споровых растений Главного ботанического сада РСФСР. — 1956. — Т. 11. — С. 84–98. DOI: 10.31111/bmosr/1956.11.84.

Скореход Е.Ю., Чурилова Т.Я., Моисеева Н.А. и др. Валидация спутниковых продуктов Sentinel-3/OLCI L2 вдоль юго-западного и юго-восточного побережья Камчатского полуострова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2025. — Т. 22, № 2. — С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-9-27. EDN: CIDRRY.

Смирнов А.А., Датский А.В., Антонов Н.П. Состояние запасов и динамика промысла дальневосточных сельдей (*Clupea pallasii* Valenciennes, 1847) // Рыб. хоз-во. — 2025. — № 3. — С. 61–70. DOI: 10.36038/0131-6184-2025-3-61-70. EDN: ZGGMQR.

Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В., Смирнов А.В. Сезонное очищение ото льда Баренцева моря и его зависимость от адвекции тепла атлантическими водами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2022. — Т. 15, № 1. — С. 82–97. DOI: 10.59887/fpg/1krp-xbuk-6gpz. EDN: WDGZHA.

Шевляков Е.А., Дедерер Н.А., Островский В.И., Хен Г.В. Термические условия морских прибрежных вод как фактор, благоприятствующий появлению экстравысокочисленных поколений карагинской горбуши // Изв. ТИНРО. — 2024. — Т. 204, вып. 1. — С. 30–47. DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-30-47. EDN: RVYEMU.

Шейбак А.Ю., Кузнецова Е.Н., Антонов Н.П. Результаты учетной траловой съемки водных биологических ресурсов в Охотском море весной 2025 г. // Тр. ВНИРО. — 2025. — Т. 201. — С. 193–198. DOI: 10.36038/2307-3497-2025-201-193-198. EDN: KMHONV.

Шунтов В.П. Биология дальневосточных морей России : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2001. — Т. 1. — 580 с. EDN: ENBFKL.

Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В. Особенности распределения концентрации хлорофилла а у восточного побережья Камчатки осенью 2020 года по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2022. — Т. 19, № 1. — С. 226–238. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-226-238. EDN: MWSZTP.

Alvera-Azcárate A., Barth A., Sirjacobs D. et al. Data Interpolating Empirical Orthogonal Functions (DINEOF): a tool for geophysical data analyses // Mediterranean Marine Science. — 2011. — Vol. 12(3). — P. 5–11. DOI: 10.12681/mms.64.

Antoine D., André J., Morel A. Oceanic primary production: 2. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll // Global Biogeochemical Cycles. — 1996. — Vol. 10, Iss.1. — P. 57–69. DOI: 10.1029/95GB02831. EDN: LMIPI.

Baker M.R., Kivva K.K., Pisareva M.N. et al. Shifts in the physical environment in the Pacific Arctic and implications for ecological timing and conditions // Deep-Sea Res. II. — 2020. — Vol. 177. 104802. DOI: 10.1016/j.dsr2.2020.104802. EDN: GDIOPX.

Beckers J.M., Rixen M. EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets // J. Atmos. Oceanic Technol. — 2003. — Vol. 20(12). — P. 1839–1856. DOI: 10.1175/1520-0426(2003)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2.

Behrenfeld M.J., Boss E.S. Resurrecting the Ecological Underpinnings of Ocean Plankton Blooms // Ann. Rev. Mar. Sci. — 2014. — Vol. 6, Iss. 1. — P. 167–194. DOI: 10.1146/annurev-marine-052913-021325.

Brody S.R., Lozier M.S., Dunne J.P. A comparison of methods to determine phytoplankton bloom initiation // J. Geophys. Res. Oceans. — 2013. — Vol. 118, Iss. 5. — P. 2345–2357. DOI: 10.1002/jgrc.20167.

Ćatipović L., Matić F., Kalinić H. Reconstruction Methods in Oceanographic Satellite Data Observation—A Survey // J. Mar. Sci. Engineering. — 2023. — Vol. 11, Iss. 2. — P. 340. DOI: 10.3390/jmse11020340. EDN: BFKYFR.

Cushing D.H. Plankton Production and Year-class Strength in Fish Populations: an Update of the Match/Mismatch Hypothesis // *Advances in Marine Biology*. — 1990. — Vol. 26. — P. 249–293. DOI: 10.1016/S0065-2881(08)60202-3.

Friedland K.D., Mouw C.B., Asch R.G. et al. Phenology and time series trends of the dominant seasonal phytoplankton bloom across global scales // *Global Ecol. Biogeogr.* — 2018. — Vol. 27, Iss. 5. — P. 551–569. DOI: 10.1111/geb.12717.

Hawco N.J., Conway T.M., Coesel S.N. et al. Anthropogenic iron alters the spring phytoplankton bloom in the North Pacific transition zone // *Proc. Nat. Acad. Sci.* — 2025. — Vol. 122, Iss. 23. — P. e2418201122. DOI: 10.1073/pnas.2418201122. EDN: QXDONA.

Henson S.A., Cole H.S., Hopkins J. et al. Detection of climate change-driven trends in phytoplankton phenology // *Glob. Chang. Biol.* — 2018. — Vol. 24(4). — P. 101–111. DOI: 10.1111/gcb.13886.

Hunt Jr G.L., Coyle K.O., Eisner L.B. et al. Climate impacts on eastern Bering Sea foodwebs: a synthesis of new data and an assessment of the Oscillating Control Hypothesis // *ICES J. Mar. Sci.* — 2011. — Vol. 68, Iss. 6. — P. 1230–1243. DOI: 10.1093/icesjms/fsr036.

Hunt Jr G.L., Stabeno P., Walters G. et al. Climate change and control of the southeastern Bering Sea pelagic ecosystem // *Deep-Sea Res. II*. — 2002. — Vol. 49, Iss. 26. — P. 5821–5853. DOI: 10.1016/S0967-0645(02)00321-1.

Hunter-Cevera K.R., Neubert M.G., Olson R.J. et al. Physiological and ecological drivers of early spring blooms of a coastal phytoplankter // *Science*. — 2016. — Vol. 354, Iss. 6310. — P. 326–329. DOI: 10.1126/science.aaf8536.

Jin K., Dong C., Liu X. et al. Phenological Characteristics of the Yellow Sea Spring Bloom: A Comparative Evaluation of Multiple Diagnostic Methods // *Remote Sensing*. — 2025. — Vol. 17, Iss. 17. — P. 3106. DOI: 10.3390/rs17173106. EDN: VPAQLX.

Kahru M., Brotas V., Manzano-Sarabia M., Mitchell, B.G., Are phytoplankton blooms occurring earlier in the Arctic? // *Global Change Biology*. — 2011. — Vol. 17, Iss. 4. — P. 1733–1739. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02312.x.

Kawarada Y. A Contribution of Microplankton Observations to the Hydrography of the Northern North Pacific and Adjacent Seas-II // *J. Oceanogr. Soc. Japan*. — 1957. — Vol. 13, Iss. 4. — P. 151–155. DOI: 10.5928/kaiyol942.13.151.

Kivva K., Malysheva A., Sumkina A. Spring Phytoplankton Bloom Phenology in the Bering Sea and Surrounding Waters Based on MODIS Data // *Oceans*. — 2026. — Vol. 7, Iss. 2. — P. 21. DOI: 10.3390/oceans7020021. EDN: DILLUY.

Korchemkina E., Churilova T., Skorokhod E. et al. Development of the satellite bio-optical algorithm for the shelf waters along the southern Kamchatka Peninsula: effect of optically active components variability on the spectral remote sensing reflectance // *Science of Remote Sensing*. — 2026. — Vol. 13, art. № 100365. DOI: 10.1016/j.srs.2026.100365. EDN: DBBEBH.

Leu E., Mundy C., Assmy P. et al. Arctic spring awakening — Steering principles behind the phenology of vernal ice algae blooms // *Prog. Oceanogr.* — 2015. — Vol. 139. — P. 151–170. DOI: 10.1016/j.pocean.2015.07.012. EDN: WQASDF.

Mackas D.L., Greve W., Edwards M. et al. Changing zooplankton seasonality in a changing ocean: Comparing time series of zooplankton phenology // *Prog. Oceanogr.* — 2012. — Vol. 97–100. — P. 31–62. DOI: 10.1016/j.pocean.2011.11.005. EDN: PIPUGP.

Maldonado M.T., Boyd P.W., Harrison P.J., Price N.M. Co-limitation of phytoplankton growth by light and Fe during winter in the NE subarctic Pacific Ocean // *Deep-Sea Res. II*. — 1999. — Vol. 46, Iss. 11–12. — P. 2475–2485. DOI: 10.1016/S0967-0645(99)00072-7.

Meier W.N., Fetterer F., Savoie M. et al. (No title) NOAA/NSIDC climate data record of passive microwave sea ice concentration, Version 3. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2017. DOI: 10.7265/N59P2ZTG.

Mueter F., Iken K., Cooper L.W. et al. Changes in Diversity and Species Composition Across Multiple Assemblages in the eastern Chukchi Sea During Two Contrasting Years are Consistent with Borealization // *Oceanogr.* — 2021. — Vol. 34, Iss. 2. — P. 39–51. DOI: 10.5670/oceanog.2021.213. EDN: IQWGKG.

Nicholson S.-A., Ryan-Keogh T.J., Thomalla S.J. et al. Satellite-derived global-ocean phytoplankton phenology indices // *Earth System Science Data*. — 2025. — Vol. 17, Iss. 5. — P. 1959–1975. DOI: 10.5194/essd-17-1959-2025. EDN: TQXQJW.

Nielsen J.M., Pelland N.A., Bell S.W. et al. Seasonal Dynamics of Primary Production in the Southeastern Bering Sea Assessed Using Continuous Temporal and Vertical Dissolved Oxygen and Chlorophyll-a Measurements // *J. Geophys. Res. Oceans*. — 2023. — Vol. 128, Iss. 5. — P. e2022JC019076. DOI: 10.1029/2022JC019076. EDN: IEYUBF.

- Ohwada M.** Diatom Communities in the Okhotsk sea, Principally on the West Coast of Kamchatka, Spring to Summer 1955 // J. Oceanogr. Soc. Japan. — 1957. — Vol. 13, Iss. 1. — P. 29–34. DOI: 10.5928/kaiyou1942.13.29.
- Platt T., Fuentes-Yaco C., Frank K.T.** Spring algal bloom and larval fish survival // Nature. — 2003. — Vol. 423. — P. 398–399. DOI: 10.1038/423398b.
- Qu B., Gabric A.J., Matrai P.A.** The satellite-derived distribution of chlorophyll-a and its relation to ice cover, radiation and sea surface temperature in the Barents Sea // Polar Biol. — 2006. — Vol. 29, Iss. 3. — P. 196–210. DOI: 10.1007/s00300-005-0040-2. EDN: MDAPKT.
- Racault M.-F., Le Quéré C., Buitenhuis E. et al.** Phytoplankton phenology in the global ocean // Ecological Indicators. — 2012. — Vol. 14, Iss. 1. — P. 152–163. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.07.010. EDN: PLLLPB.
- Salyuk P.A., Stepochkin I.E., Bukin O.A. et al.** Determination of the chlorophyll a concentration by MODIS-Aqua and VIIRS satellite radiometers in Eastern Arctic and Bering Sea // Izv. Atmos. Ocean. Phys. — 2016. — Vol. 52, Iss. 9. — P. 988–998. DOI: 10.1134/S0001433816090206. EDN: YVCIOF.
- Sathyendranath S., Brewin R.J.W., Brockmann C. et al.** An Ocean-Colour Time Series for Use in Climate Studies: The Experience of the Ocean-Colour Climate Change Initiative (OC-CCI) // Sensors. — 2019. — Vol. 19, Iss. 19. DOI: 10.3390/s19194285.
- Serreze M.C., Barry R.G.** Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // Global and Planetary Change. — 2011. — Vol. 77, Iss. 1. — P. 85–96. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004. EDN: OLOJLP.
- Sharples J., Ross O.N., Scott B.E. et al.** Inter-annual variability in the timing of stratification and the spring bloom in the North-western North Sea // Cont. Shelf Res. — 2006. — Vol. 26, Iss. 6. — P. 733–751. DOI: 10.1016/j.csr.2006.01.011.
- Siegel D.A., Doney S.C., Yoder J.A.** The North Atlantic spring phytoplankton bloom and Sverdrup's critical depth hypothesis // Science. — 2002. — Vol. 296, Iss. 5568. — P. 730–733. DOI: 10.1126/science.1069174. EDN: EERMIH.
- Silva E., Counillon F., Brajard J. et al.** Twenty-One Years of Phytoplankton Bloom Phenology in the Barents, Norwegian, and North Seas // Front. Mar. Sci. — 2021. — Vol. 8. — P. 746327. DOI: 10.3389/fmars.2021.746327. EDN: GSCRCO.
- Wassmann P., Reigstad M., Haug T. et al.** Food webs and carbon flux in the Barents Sea // Progr. Oceanogr. — 2006. — Vol. 71, № 2–4. — P. 232–287. DOI: 10.1016/j.pocean.2006.10.003. EDN: LJNYVL.
- Zeileis A., Grothendieck G.** zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series // Journal of Statistical Software. — 2005. — Vol. 14, Iss. 6. — P. 1–27. DOI: 10.18637/jss.v014.i06.
- Zhao H., Matsuoka A., Manizza M., Winter A.** DINEOF Interpolation of Global Ocean Color Data: Error Analysis and Masking // J. Atmos. Oceanic Technol. — 2024. — Vol. 41, Iss. 10. — P. 953–968. DOI: 10.1175/JTECH-D-23-0105.1. EDN: UNLMVY.

References

- Biologiya okeana. T. 2. Biologicheskaya produktivnost' okeana** (Ocean Biology. Vol. 2. Biological Productivity of the Ocean), Vinogradov, M.E., ed., Moscow: Nauka, 1977 (Oceanology Series).
- Bugaev, A.V., Zikunova, O.V., Tepnin, O.B., Artyukhina, N.B., and Shpigalskaya, N.Yu.** Basic principles of developing and interpretation of validity for fishery forecasts of pacific salmon in the Kamchatka Region in the modern period (analytical review for 2010–2020s), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2024, vol. 204, no. 4, pp. 964–1002. doi 10.26428/1606-9919-2024-204-964-1002. EDN: UWVHLB
- Gorbatenko, K.M., Melnikov, I.V. and Sheibak A.Yu.** Feeding of walleye pollock *Gadus chalcogrammus* (Gadidae) in the epipelagic zone of the Bering Sea, *Vopr. Ichtiol.*, 2024, vol. 64, no. 3, pp. 452–463. doi 10.1134/s0032945224700127. EDN: WLDMPX
- Datsky, A.V. and Antonov, N.P.** Cod fishes of the Far Eastern seas and the Pacific waters of Kamchatka and the Kuril Islands: stocks and fishery prospects, *Trudy VNIRO*, 2025, vol. 201, pp. 70–95. doi 10.36038/2307-3497-2025-201-70-95. EDN: CWMPNF
- Dobrovolsky, A.D. and Zalogin, B.S.**, *Morya SSSR* (Seas of the USSR). Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1982.
- Dumanskaya, I.O.**, Changes in the climatic ice characteristics of the Sea of Okhotsk in the late 20th — early 21st centuries, *Tr. Gidrometeorol. Nauchno-Issled. Tsentra Ross. Fed.*, 2015, vol. 354. pp. 112–137. EDN: SIGYBK

Zhabin, I.A., Vanin, N.S. and Dmitrieva, E.V., Summer Wind-driven Upwelling and Tidal Mixing on the Western Kamchatka Shelf in the Sea of Okhotsk, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 2, pp. 130–135. doi 10.3103/S1068373919020067. EDN: HSILDC

Zhabin, I.A. and Dubina, V.A., The peculiarities of the water structure and dynamics at the North-Eastern shelf of the Sea of Okhotsk, *Vestn. Sev.-Vost. Nauch. Tsentra, Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2013, no. 2, pp. 32–39. EDN: OMYSLS

Zuenko, Yu.I., Aseeva, N.L., Glebova, S.Yu., Gostrenko, L.M., Dubinina, A.Yu., Dulepova, E.P., Zolotov, A.O., Loboda, S.V., Lysenko, A.V., Matveev, V.I., Muktepavel, L.S., Ovsyannikov, E.E., Figurkin, A.L., and Shatilina, T.A., Recent changes in the Okhotsk Sea ecosystem (2008–2018), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 197, pp. 35–61. doi 10.26428/1606-9919-2019-197-35-61. EDN: VRGZIS

Kivva, K.K. and Kubryakov, A.A., Seasonal and Interannual Variability of Chlorophyll-a Concentration in the Bering Sea Found from Satellite Data, *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2021, no. 4, pp. 28–45. doi 10.31857/S0205961421040047. EDN: EH GKDQ

Kivva, K.K., Selivanova, Yu.V., Pisareva, M.N. and Sumkina A.A., Role of physical processes in formation of spring phytoplankton bloom in the Bering Sea, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 181, pp. 206–222. doi 10.36038/2307-3497-2020-181-206-222. EDN: XOMOLS

Lepsкая, E.V., Phytoplankton of the northern part of the West Kamchatka shelf in summer 2008, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2015, vol. 36, pp. 87–98. doi 10.15853/2072-8212.2015.36.87-98. EDN: TWNJAL

Orlova, T.Yu., Selina, M.S., Stonik, I.V., Morozova, T.V., Begun, A.A. and Lepsкая, E.V., *Phytoplankton in the coastal zone of Kamchatka and adjacent waters*, Vladivostok: LIT, 2024. EDN: YULNPY

Pishchalnik, V.M., Romanyuk, V.A., Minervin, I.G., and Batuhina, A.S., Analysis of dynamics for anomalies of the ice cover in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 185, pp. 228–239, doi 10.26428/1606-9919-2016-185-228-239. EDN: WCAHXP

Semina, G.I., Sezonnye smeny fitoplanktona zapadnoy chasti Beringova morya, *Botanicheskie materialy Instituta sporovykh rasteniy Glavnogo botanicheskogo sada RSFSR*, 1956, vol. 11, pp. 84–98. doi 10.31111/bmosr/1956.11.84

Skorokhod, E.Yu., Churilova, T.Ya., Moiseeva, N.A., Salyuk P.A. and Efimova, T.V., Validation of Sentinel-3/OLCI L2 products along the southwestern and southeastern coasts of the Kamchatka Peninsula, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, vol. 22, no. 2, pp. 9–27. doi 10.21046/2070-7401-2025-22-2-9-27. EDN: CIDRRY

Smirnov, A.A., Datsky A.V., and Antonov, N.P., The state of stocks and the dynamics of fishing for Far Eastern herrings (*Clupea pallasii* Valenciennes, 1847), *Rybn. Khoz.*, 2025, no. 3. pp. 61–70. doi 10.36038/0131-6184-2025-3-61-70. EDN: ZGGMQR

Sumkina, A.A., Kivva, K.K., Ivanov, V.V. and Smirnov, A.V., Seasonal ice removal in the Barents Sea and its dependence on heat advection by Atlantic waters, *Fundam. Prikl. Gidrofiz.*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 82–97. doi 10.48612/fpg/1krp-xbuk-6gpz. EDN: WDGZHA

Shevlyakov, E.A., Dederer, N.A., Ostrovsky, V.I., and Khen, G.V., Thermal conditions in marine coastal waters as a favorable factor for formation of extremely strong year classes of Karaginsky Bay pink salmon, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2024, vol. 50, no. 7, pp. 486–496. doi 10.1134/S106307402470041X. EDN: YJHFKZ

Sheibak, A.Y., Kuznetsova, E.N. and Antonov, N.P., The results of the accounting trawl survey of aquatic biological resources in the Sea of Okhotsk in the spring of 2025, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2025, vol. 201, pp. 193–198. doi 10.36038/2307-3497-2025-201-193-198. EDN: KMHONV

Shuntov, V.P., *Biologiya dal'nevostochnykh morei Rossii* (Biology of the Far Eastern Seas of Russia), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2001, vol. 1. EDN: ENBFKL

Tskhay, Zh.R. and Shevchenko, G.V., Distribution features of chlorophyll *a* concentration off the east coast of Kamchatka in autumn 2020 from satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 226–238. DOI 10.21046/2070-7401-2022-19-1-226-238. EDN: MWSZTP

Alvera-Azcárate, A., Barth, A., Sirjacobs, D., Lenartz, F. and Beckers, J.M., Data Interpolating Empirical Orthogonal Functions (DINEOF): a tool for geophysical data analyses, *Mediterranean Marine Science*, 2011, vol. 12, no. 3, pp. 5–11. doi 10.12681/mms.64

- Antoine, D., André, J., and Morel, A., Oceanic primary production: 2. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll, *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, vol. 10, no. 1, pp. 57–69. DOI 10.1029/95GB02831. EDN: LMIPI
- Baker, M.R., Kivva, K.K., Pisareva, M.N., Watson, J.T., and Selivanova, J., Shifts in the physical environment in the Pacific Arctic and implications for ecological timing and conditions, *Deep Sea Res., Part II*, 2020, vol. 177, 104802. doi 10.1016/j.dsr2.2020.104802. EDN: GDIOPX
- Beckers, J.M. and Rixen, M., EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2003, vol. 20, no. 12, pp. 1839–1856. doi 10.1175/1520-0426(2003)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2
- Behrenfeld, M.J. and Boss, E.S., Resurrecting the Ecological Underpinnings of Ocean Plankton Blooms, *Ann. Rev. Mar. Sci.*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 167–194. doi 10.1146/annurev-marine-052913-021325
- Brody, S.R., Lozier, M.S. and Dunne, J.P., A comparison of methods to determine phytoplankton bloom initiation, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2013, vol. 118, no. 5, pp. 2345–2357. doi 10.1002/jgrc.20167
- Čatipović, L., Matić, F. and Kalinić, H., Reconstruction Methods in Oceanographic Satellite Data Observation—A Survey, *J. Mar. Sci. Engineering*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 340. doi 10.3390/jmse11020340. EDN: BFKYFR
- Cushing, D.H., Plankton Production and Year-class Strength in Fish Populations: an Update of the Match/Mismatch Hypothesis, *Advances in Marine Biology*, 1990, vol. 26, pp. 249–293. doi 10.1016/S0065-2881(08)60202-3
- Friedland, K.D., Mouw, C.B., Asch, R.G., Ferreira, A.S.A., Henson, S., Hyde, K.J.W., Morse, R.E., Thomas, A.C., and Brady, D.C., Phenology and time series trends of the dominant seasonal phytoplankton bloom across global scales, *Global Ecol. Biogeogr.*, 2018, vol. 27, no. 5, pp. 551–569. doi 10.1111/geb.12717
- Hawco, N.J., Conway, T.M., Coesel, S.N., Barone, B., Seelen, E.A., Yang, S.-C., Bundy, R.M., Pinedo-Gonzalez, P., Bian, X., Sieber, M., Lanning, N.T., Fitzsimmons, J.N., Foreman, R.K., König, D., Groussman, R.D., Allen, J.G., Juranek, L.W., White, E.A., Karl, D.M., Armbrust, E.V., and John, S.G., Anthropogenic iron alters the spring phytoplankton bloom in the North Pacific transition zone, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2025, vol. 122, no. 23, pp. e2418201122. doi 10.1073/pnas.2418201122. EDN: QXDONA
- Henson, S.A., Cole, H.S., Hopkins, J., Martin, A.P. and Yool, A., Detection of climate change-driven trends in phytoplankton phenology, *Glob. Chang. Biol.*, 2018, vol. 24, no. 4, pp. 101–111. doi 10.1111/gcb.13886
- Hunt Jr, G.L., Coyle, K.O., Eisner, L.B., Farley, E.V., Heintz, R.A., Mueter, F., Napp, J.M., Overland, J.E., Ressler, P.H., Salo, S., and Stabeno, P.J., Climate impacts on eastern Bering Sea foodwebs: a synthesis of new data and an assessment of the Oscillating Control Hypothesis, *ICES J. Mar. Sci.*, 2011, vol. 68, no. 6, pp. 1230–1243. doi 10.1093/icesjms/fsr036
- Hunt Jr, G.L., Stabeno, P., Walters, G., Sinclair, E., Brodeur, R.D., Napp, J.M., and Bond, N.A., Climate change and control of the southeastern Bering Sea pelagic ecosystem, *Deep Sea Res., Part II*, 2002, vol. 49, no. 26, pp. 5821–5853. doi 10.1016/S0967-0645(02)00321-1
- Hunter-Cevera, K.R., Neubert, M.G., Olson, R.J., Solow, A.R., Shalapyonok, A., and Sosik, H.M., Physiological and ecological drivers of early spring blooms of a coastal phytoplankter, *Science*, 2016, vol. 354, no. 6310, pp. 326–329. doi 10.1126/science.aaf8536
- Jin, K., Dong, C., Liu, X., Sun, Y., Liu, J., and Lin, L., Phenological Characteristics of the Yellow Sea Spring Bloom: A Comparative Evaluation of Multiple Diagnostic Methods, *Remote Sensing*, 2025, vol. 17, no. 17, pp. 3106. doi 10.3390/rs17173106. EDN: VPAQLX
- Kahru, M., Brotas, V., Manzano-Sarabia, M., and Mitchell, B.G., Are phytoplankton blooms occurring earlier in the Arctic? *Global Change Biology*, 2011, vol. 17, no. 4, pp. 1733–1739. doi 10.1111/j.1365-2486.2010.02312.x
- Kawarada, Y., A Contribution of Microplankton Observations to the Hydrography of the Northern North Pacific and Adjacent Seas-II, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 1957, vol. 13, no. 4, pp. 151–155. doi 10.5928/kaiyou1942.13.151
- Kivva, K., Malysheva, A., and Sumkina, A., Spring Phytoplankton Bloom Phenology in the Bering Sea and Surrounding Waters Based on MODIS Data, *Oceans*, 2026, vol. 7, no. 2, pp. 21. doi 10.3390/oceans7020021. EDN: DILLUY
- Korchemkina, E., Churilova, T., Skorokhod, E., Moiseeva, N., and Efimova, T., Development of the satellite bio-optical algorithm for the shelf waters along the southern Kamchatka Peninsula: effect of optically active components variability on the spectral remote sensing reflectance, *Science of Remote Sensing*, 2026, vol. 13, art. no. 100365. doi 10.1016/j.srs.2026.100365. EDN: DBBEBH

- Leu, E., Mundy, C., Assmy, P., Campbell, K., Gabrielsen, T.M., Gosselin, M., Juul-Pedersen, T., and Gradinger, R., Arctic spring awakening — Steering principles behind the phenology of vernal ice algae blooms, *Prog. Oceanogr.*, 2015, vol. 139, pp. 151–170. doi 10.1016/j.pocean.2015.07.012. EDN: WQASDF
- Mackas, D.L., Greve, W., Edwards, M., Chiba, S., Tadokoro, K., Eloire, D., Mazzocchi, M.G., Batten, S., Richardson, A.J., Johnson, C., Head, E., Conversi, A., and Peluso, T., Changing zooplankton seasonality in a changing ocean: Comparing time series of zooplankton phenology, *Prog. Oceanogr.*, 2012, vol. 97–100, pp. 31–62. doi 10.1016/j.pocean.2011.11.005. EDN: PIPUGP
- Maldonado, M.T., Boyd, P.W., Harrison, P.J., and Price, N.M., Co-limitation of phytoplankton growth by light and Fe during winter in the NE subarctic Pacific Ocean, *Deep Sea Res., Part II*, 1999, vol. 46, no. 11–12, pp. 2475–2485. doi 10.1016/s0967-0645(99)00072-7
- Meier, W.N., Fetterer, F., Savoie, M., Mallory, S., Duerr, R., and Stroeve, J., (No title), *NOAA/NSIDC climate data record of passive microwave sea ice concentration, Version 3*, Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2017, doi 10.7265/N59P2ZTG
- Mueter, F., Iken, K., Cooper, L., Grebmeier, J.M., Kuletz, K.J., Hopcroft, R.R., Danielson, S.L., Collins, R.T., and Cushing, D.A., Changes in Diversity and Species Composition Across Multiple Assemblages in the eastern Chukchi Sea During Two Contrasting Years are Consistent with Borealization, *Oceanogr.*, 2021, vol. 34, no. 2, pp. 39–51. doi 10.5670/oceanog.2021.213. EDN: IQWGKG
- Nicholson, S.-A., Ryan-Keogh, T.J., Thomalla, S.J., Chang, N. and Smith M.E., Satellite-derived global-ocean phytoplankton phenology indices, *Earth System Science Data*, 2025, vol. 17, no. 5, pp. 1959–1975. doi 10.5194/essd-17-1959-2025
- Nielsen, J.M., Pelland, N.A., Bell, S.W., Lomas, M.W., Eisner, L.B., Stabeno, P., Harpold, C., Stalin, S., and Mordy, C.W., Seasonal Dynamics of Primary Production in the Southeastern Bering Sea Assessed Using Continuous Temporal and Vertical Dissolved Oxygen and Chlorophyll-a Measurements, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2023, vol. 128, no. 5, pp. e2022JC019076. doi 10.1029/2022JC019076. EDN: IEYUBF
- Ohwada, M., Diatom Communities in the Okhotsk Sea, Principally on the West Coast of Kamchatka, Spring to Summer 1955, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 1957, vol. 13, no. 1, pp. 29–34. doi 10.5928/kaikyou1942.13.29
- Platt, T., Fuentes-Yaco, C., and Frank, K.T., Spring algal bloom and larval fish survival, *Nature*, 2003, vol. 423, pp. 398–399. doi 10.1038/423398b
- Qu, B., Gabric, A.J., and Matrai, P.A., The satellite-derived distribution of chlorophyll-a and its relation to ice cover, radiation and sea surface temperature in the Barents Sea, *Polar Biol.*, 2006, vol. 29, no. 3, pp. 196–210. doi 10.1007/s00300-005-0040-2. EDN: MDAPKT
- Racault, M.-F., Le Quéré, C., Buitenhuis, E., Sathyendranath, S., and Platt, T., Phytoplankton phenology in the global ocean, *Ecological Indicators*, 2012, vol. 14, no. 1, pp. 152–163. doi 10.1016/j.ecolind.2011.07.010. EDN: PLLLPB
- Salyuk, P.A., Stepochkin, I.E., Bukin, O.A., Sokolova, E.B., Mayor, A.Yu., Shambarova, J.V., and Gorbushkin, A.R., Determination of the chlorophyll a concentration by MODIS-Aqua and VIIRS satellite radiometers in Eastern Arctic and Bering Sea, *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2016, vol. 52, no. 9, pp. 988–998. doi 10.1134/S0001433816090206. EDN: YVCIOF
- Sathyendranath, S., Brewin, R.J.W., Brockmann, C., Brotas, V., Calton, B., Chuprin, A., Cipollini, P., Couto, A.B., Dingle, J., Doerffer, R., Donlon, C., Dowell, M., Farman, A., Grant, M., Groom, S., Horseman, A., Jackson, T., Krasemann, H., Lavender, S., Martinez-Vicente, V., Mazeran, C., Mélin, F., Moore, T.S., Müller, D., Regner, P., Roy, Sh., Steele, C.J., Steinmetz, F., Swinton, J., Taberner, M., Thompson, A., Valente, A., Zühlke, M., Brando, V.E., Feng, H., Feldman, G., Franz, B.A., Frouin, R., Gould, R.W., Hooker, S.B., Kahru, M., Kratzer, S., Mitchell, B.G., Muller-Karger, F.E., Sosik, H.M., Voss, K.J., Werdell, J., Platt, T., An Ocean-Colour Time Series for Use in Climate Studies: The Experience of the Ocean-Colour Climate Change Initiative (OC-CCI), *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 19, doi 10.3390/s19194285
- Serreze, M.C. and Barry, R.G., Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global and Planetary Change*, 2011, vol. 77, no. 1, pp. 85–96. doi 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004. EDN: OLOJLP
- Sharples, J., Ross, O.N., Scott, B.E., Greenstreet, S.P.R., and Fraser, H., Inter-annual variability in the timing of stratification and the spring bloom in the North-western North Sea, *Cont. Shelf Res.*, 2006, vol. 26, no. 6, pp. 733–751. doi 10.1016/j.csr.2006.01.011
- Siegel, D.A., Doney, S.C., and Yoder, J.A., The North Atlantic spring phytoplankton bloom and Sverdrup's critical depth hypothesis, *Science*, 2002, vol. 296, no. 5568, pp. 730–733. doi 10.1126/science.1069174. EDN: EERMIH

Silva, E., Counillon, F., Brajard, J., Korosov, A., Pettersson, L.H., Samuelsen, A., and Keenlyside, N., Twenty-One Years of Phytoplankton Bloom Phenology in the Barents, Norwegian, and North Seas, *Front. Mar. Sci.*, 2021, vol. 8, pp. 746327. doi 10.3389/fmars.2021.746327. EDN: GSCRCO

Wassmann, P., Reigstad, M., Haug, T., Rudels, B., Carroll, M.L., Hop, H., Gabrielsen, G.W., Falk-Petersen, S., Denisenko, S.G., Arashkevich, E., Slagstad, D., and Pavlova, O., Food webs and carbon flux in the Barents Sea, *Progr. Oceanogr.*, 2006, vol. 71, no. 2–4, pp. 232–287. doi 10.1016/j.pocean.2006.10.003. EDN: LJNYVL

Zeileis, A. and Grothendieck, G., zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series, *Journal of Statistical Software*, 2005, vol. 14, no. 6, pp. 1–27. doi 10.18637/jss.v014.i06

Zhao, H., Matsuoka, A., Manizza, M., and Winter, A., DINEOF Interpolation of Global Ocean Color Data: Error Analysis and Masking, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2024, vol. 41, no. 10, pp. 953–968. doi 10.1175/JTECH-D-23-0105.1. EDN: UNLMVY

<https://www.oceancolour.org>. Cited March 23, 2026.

Taylor, M., *sinkr: Collection of functions with emphasis on multivariate data analysis, R package version 0.8.0*, 2025.

Lotsiya Beringova morya. Chast' 1. Zapadnaya chast' morya (Sailing Directions for the Bering Sea. Part 1. Western Part of the Sea), Leningrad: Main Directorate of Navigation and Oceanography, Ministry of Oceanology, 1981.

Поступила в редакцию 17.04.2026 г.

После доработки 15.06.2026 г.

Принята к публикации 11.09.2026 г.

*The article was submitted 17.04.2026; approved after reviewing 15.06.2026;
accepted for publication 11.09.2026*