

Пространственно-временная изменчивость продукционных характеристик фитопланктона в Японском море по спутниковым данным (с 2002 по 2023 г.)

Ю. В. Шамбарова, И. Е. Стёпочкин, С. П. Захарков

*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: shambarova@poi.dvo.ru*

Исследована долговременная изменчивость продукционных характеристик фитопланктона в Японском море за период 2002–2023 гг. на основе спутниковых данных MODIS/Aqua (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Проанализировано пространственно-временное распределение концентрации хлорофилла *a*, первичной продукции фитопланктона, их связь с температурой поверхности океана и глубиной эвфотической зоны. Выявлены значимые линейные тренды в изменении первичной продукции фитопланктона, концентрации хлорофилла *a*, температуры поверхности океана и глубины эвфотической зоны, связанные с климатическими изменениями. Они охарактеризовали увеличение исследуемых параметров, кроме глубины эвфотической зоны. Тенденция уменьшения глубины эвфотической зоны может привести к ухудшению условий обитания фитопланктонных сообществ. Оценено влияние Тихоокеанского декадного колебания на изменчивость концентрации хлорофилла *a* и первичной продукции фитопланктона. Влияние Тихоокеанского декадного колебания на эти параметры в Японском море связано с изменениями температуры поверхности океана и процессом стратификации вод. Полученные результаты важны для понимания реакции морских экосистем на климатические изменения и могут быть использованы для прогнозирования биопродуктивности Японского моря.

Ключевые слова: первичная продукция фитопланктона, хлорофилл *a*, глубина эвфотической зоны, температура поверхности океана, Тихоокеанское декадное колебание, Японское море, MODIS/Aqua

Одобрена к печати: 09.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-285-297

Введение

В связи с глобальными изменениями климата изучение динамики продукционных характеристик фитопланктона критически важно для прогнозирования изменений в морских сообществах. Фитопланктон как основа трофической сети играет ключевую роль в морских экосистемах, определяет биогеохимические циклы углерода и создаёт почти половину мировой первичной продукции океанов (Hoegh-Guldberg, Bruno, 2010).

Комплексный мониторинг биопродукционных параметров морских акваторий доступен при помощи спутникового дистанционного зондирования (Boyce et al., 2010). Регулярные спутниковые измерения с высоким пространственно-временным разрешением позволяют оценить концентрацию хлорофилла *a* (КХЛ), температуру поверхности океана (ТПО), глубину эвфотической зоны (ЭЗ) и первичную продукцию (ПП) фитопланктона.

Особый интерес для изучения продукционных характеристик представляет Японское море — регион, который отличается повышенной чувствительностью к климатическим колебаниям. Несмотря на его значимость как индикатора глобальных изменений, Японское море остаётся недостаточно изученным в плане долгосрочных изменений продуктивности. Имеющиеся исследования либо ограничены отдельными районами, либо охватывают непродолжительные временные периоды (Kameda, Ishizaka, 2005; Kim et al., 2000). При этом, согласно данным исследования (Lee, Park, 2019), тенденции к потеплению воды в Японском море существенно опережают среднемировые показатели, наблюдаемые в других областях Мирового океана, что усиливает актуальность изучения происходящих процессов.

На основе многолетних данных спутникового сканера MODIS/Aqua (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (<https://aqua.nasa.gov/modis>) была проведена количественная оценка пространственно-временной изменчивости продукционных характеристик фитопланктона (КХЛ, ПП) в Японском море за 2002–2023 гг. Также установлена взаимосвязь наблюдаемых изменений исследуемых параметров с изменчивостью климатических и гидрологических параметров (ТПО, ЭЗ). Выявлены тренды изменений ПП, ТПО, КХЛ, ЭЗ в Японском море за последние 20 лет. Такого рода комплексный анализ межгодовой динамики продукционных характеристик для всей акватории моря, охватывающий период 2002–2023 гг., отсутствует.

Помимо этого, проведена оценка влияния Тихоокеанского декадного колебания (ТДК) на пространственно-временное распределение КХЛ и ПП. Воздействие ТДК на экосистему исследуемого региона до сих пор остаётся малоизученным фактором (Lee et al., 2022).

Полученные результаты позволяют улучшить понимание механизмов климатического воздействия на морские экосистемы, а также они могут быть использованы для прогнозирования изменений продуктивности в Японском море.

Методы и данные

Японское море расположено в северо-западной части Тихого океана между материковым берегом Азии, Японскими островами и островом Сахалин в географических координатах 34° 26'–51° 41' с. ш., 127° 20'–142° 15' в. д. Для исследования был выделен район с координатами 34–49° с. ш. и 128–142° в. д.

В работе были использованы открытые данные спутникового радиометра MODIS/Aqua уровня L3 (<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/l3/>) по концентрации хлорофилла *a*, фотосинтетически активной радиации, ТПО с временным разрешением 1 мес и пространственным разрешением 4 км за период 2002–2023 гг. Из этих данных были рассчитаны величины ПП по модели VGPM (*англ.* Vertically Generalized Production Model), предложенной М. Дж. Беренфельдом и П. Г. Фальковски в 1997 г. (Behrenfield, Falkowski, 1997). Модель для оценки ПП фитопланктона VGPM — одна из наиболее широко используемых моделей, преимущества которой заключаются в том, что её разработка велась на основе набора данных из 11 283 измерений ПП фитопланктона, выполненных с применением радиоуглеродного анализа в различных акваториях Мирового океана (Behrenfield, Falkowski, 1997). На сегодняшний день величины ПП, рассчитанные по VGPM, являются стандартным спутниковым продуктом (<http://orca.science.oregonstate.edu/vgpm.model.php>). Также применимость данной модели к акваториям Дальневосточных морей была показана ранее в статьях (Захарков и др., 2017; Звалинский и др., 2006; Шамбарова и др., 2019).

В рамках модели ПП рассчитывается следующим образом:

$$PP = 0,66125 P_{opt}^B \frac{PAR}{PAR + 4,1} Zeu \cdot Chl \cdot H,$$

где PP — значение ПП, интегрированной по глубине (в мгС/м²); PAR — ежедневная фотосинтетически активная радиация над морской поверхностью (в Э/м²); Zeu — ЭЗ (в м); Chl — КХЛ (в мг/м³); H — длительность светового дня (ч); P_{opt}^B — параметр, контролирующий ПП в модели, полиномиальная функция ТПО, здесь SST (*англ.* Sea Surface Temperature), которая рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{opt}^B (SST) = 1,2956 + 0,2749SST + 6,17 \cdot 10^{-2} SST^2 - 2,05 \cdot 10^{-2} SST^3 + \\ + 2,462 \cdot 10^{-3} SST^4 - 1,348 \cdot 10^{-4} SST^5 + 3,4132 \cdot 10^{-5} SST^6 - 3,27 \cdot 10^{-8} SST^7.$$

Авторы не использовали стандартный продукт ПП, поскольку данные тех массивов имеют минимальное пространственное разрешение 9 км. Для расчёта ПП по модели VGPM применялся официальный программный код (<http://orca.science.oregonstate.edu/vgpm.code.php>).

Эвфотическая зона рассчитывалась согласно модели для вод первого оптического типа, представленной в работе (Morel, Berthon, 1989).

Индекс Тихоокеанских десятилетних колебаний

Индекс ТДК — один из основных климатических индексов для всего Тихого океана и части Арктики (Хен и др., 2019). Тихоокеанское декадное колебание определяется как проекция среднемесячных ТПО-аномалий на их первые векторы эмпирических ортогональных функций в северной части Тихого океана (к северу от 20° с.ш.). Перед расчётом первого вектора эмпирических ортогональных функций из каждой среднемесячной аномалии ТПО вычитаются усреднённые среднемесячные аномалии ТПО, чтобы исключить влияние глобального потепления. Данные по ТДК взяты с сайта <https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/elnino/decadal/pdo.html>.

Тихоокеанское декадное колебание — это модель изменчивости климата Тихого океана, характеризующаяся сменой фаз аномалий ТПО в междекадном временном масштабе, обычно охватывающем более 10 лет. Тихоокеанское декадное колебание — важный климатологический фактор, который может влиять на условия окружающей среды океана и его различные компоненты (Lee et al., 2022; Mantua, Hare, 2002). В многолетнем ряду выделяются положительные и отрицательные фазы ТДК длиной 20–30 лет, которые могут прерываться короткими (от одного до трёх лет) периодами противоположного знака аномалий (Хен и др., 2019).

Тренды и оценка статистической значимости

Трёхмерные (пространственно-временные) массивы данных каждого параметра анализировались за исследуемый период по следующим характеристикам:

- а) временному ходу среднего значения параметра по акватории;
- б) временному ходу в каждом пикселе географической сетки.

Использовался метод сингулярного спектрального анализа, позволяющий выделить долговременный линейный тренд из временного ряда и выразить глобальное изменение параметра в процентах (Golyandina, Zhigljavsky, 2013). Таким образом были получены как значения трендов, характерных для всей акватории, так и карты пространственной изменчивости параметров.

Также была оценена статистическая значимость углового коэффициента линейного тренда путём проведения *t*-теста и расчёта *p*-значения (Holland, Welsch, 1977).

Все расчёты по всем данным были сделаны в программной среде Matlab.

Результаты и обсуждение

Пространственные и временные вариации КХЛ

Распределение КХЛ в Японском море демонстрирует пространственную, межгодовую и сезонную изменчивость. Пространственно-временная изменчивость средней КХЛ в Японском море с 2002 по 2023 г. показана на *рис. 1* (см. с. 288).

Повышенная КХЛ наблюдается вдоль прибрежных районов моря (от 1,2 до 4 мг/м³) и в юго-западной части — от 1,5 до 3–4 мг/м³. В некоторых местах прибрежных зон акватории Японского моря КХЛ достигает уровня 7 мг/м³. Высокий уровень КХЛ в прибрежной части вод России и Кореи связан с прибрежным апвеллингом, стоком рек, антропогенным загрязнением и другими процессами (Park et al., 2014, 2020; Yoo, Park, 2009).

Низкие показатели КХЛ отмечаются в центральной и юго-восточной части моря — 0,39–0,7 мг/м³.

Весеннее цветение фитопланктона в период с 2002 по 2023 г. наблюдалось с марта по май, а относительно небольшое осеннее цветение — с октября по декабрь, в зависимости от района. Спутниковые данные по КХЛ показали чёткую межгодовую изменчивость сезонности фитопланктона с высокими значениями параметра в апреле–мае — от 2 до 6,8 мг/м³. Во время осеннего цветения значения КХЛ не такие высокие, как во время весеннего цветения, — от 1,2 до 3 мг/м³. В зимний сезон рост фитопланктона в основном контролируется доступностью света. Поэтому слабое солнечное излучение и глубокий перемешанный слой способствуют низкой КХЛ по всей акватории в зимнее время. Среднегодовые значения в зимний период в большей части варьируют от 0,18 до 0,64 мг/м³.

Среднегодовые данные КХЛ по всей акватории — 0,75–1,07 мг/м³. Годы с минимальными показателями КХЛ — 2005 г. (0,75 мг/м³) и 2012 г. (0,8 мг/м³). Максимальные КХЛ наблюдались в 2015 г. (1,01 мг/м³) и 2023 г. (1,07 мг/м³) (рис. 2).

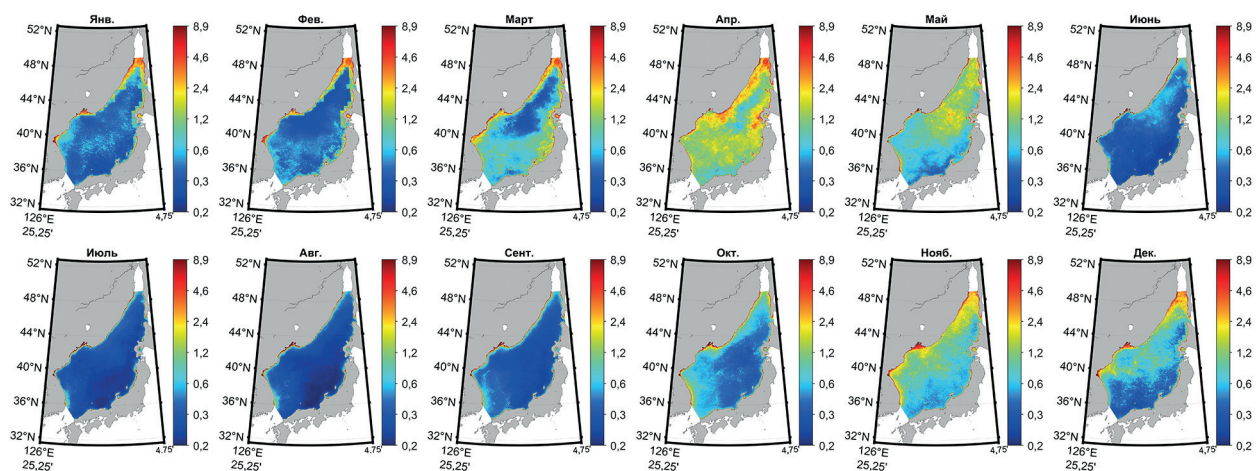


Рис. 1. Среднемесячные значения КХЛ в Японском море с 2002 по 2023 г. (в мг/м³)



Рис. 2. Временная изменчивость КХЛ с 2002 по 2023 г. (левая шкала — КХЛ (в мг/м³)). Синяя линия — среднемесячные данные КХЛ, чёрная — среднегодовые данные КХЛ, зелёная — ТДК

Выделенный из общего временного ряда линейный тренд характеризует значимое увеличение средней КХЛ за исследуемый период. Относительное изменение КХЛ за последние 20 лет составило 31,2 %.

Пространственные и временные изменения ПП

Динамика ПП по спутниковым данным за изученные годы демонстрирует сезонную изменчивость, которая характерна для умеренных морей (рис. 3, см. с. 289). В Японском море наблюдается два пика фотосинтетической активности — весной и осенью (Kim et al., 2000;

Yamada et al., 2004, 2005). Между субарктической и субтропической частью Японского моря сроки возникновения цветения фитопланктона отличаются (Kim et al., 2000; Yamada et al., 2004). В весенний и осенний сезон цветение фитопланктона в субтропической части происходит раньше, чем в субарктической. Масштабы и продолжительность весеннего цветения отличаются в зависимости от географического положения района моря, так как они имеют различные условия для развития фитопланктона и образования ПП (Kim et al., 2000).

Анализ межгодовых данных ПП, полученных с помощью дистанционных методов исследования в Японском море с 2002 по 2023 г., показал, что наибольшего значения этот параметр достигал в 2015 г. (940 мгС/м^2), а также высоким показателем продуктивности был отмечен 2022 г. (930 мгС/м^2). Низкие уровни ПП регистрировались в 2005 г. (779 мгС/м^2) и 2012 г. (766 мгС/м^2) (рис. 4). Среднее значение за весь период с 2002 по 2023 г. составило $760\text{--}940 \text{ мгС/м}^2$. Динамика среднегодовых значений ПП по всей акватории показала различие величины ПП год от года. Такое различие можно объяснить изменяющейся в течение изучаемых лет гидрологической обстановкой, которая влияет на образование ПП в изучаемой акватории.

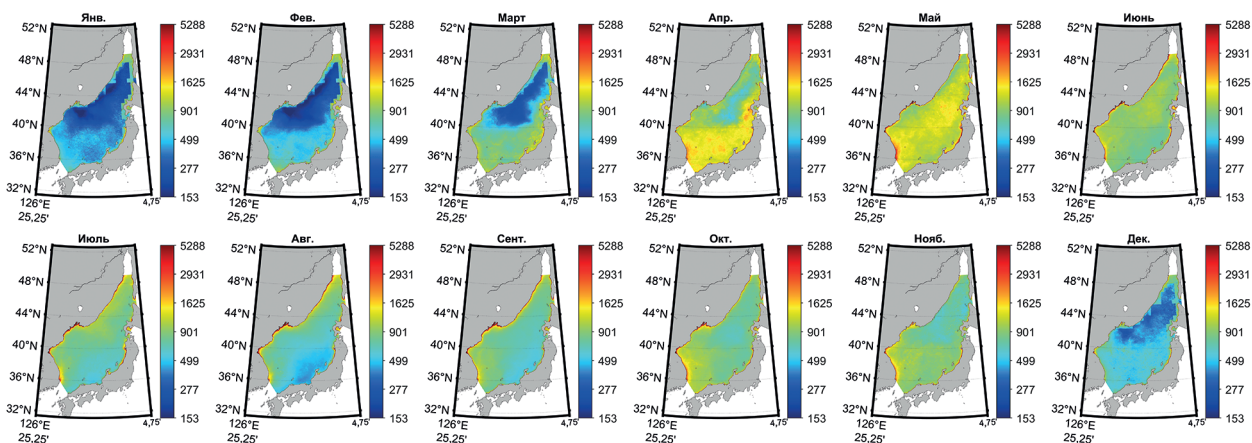


Рис. 3. Среднемесячные значения ПП в Японском море с 2002 по 2023 г. (в мгС/м^2)

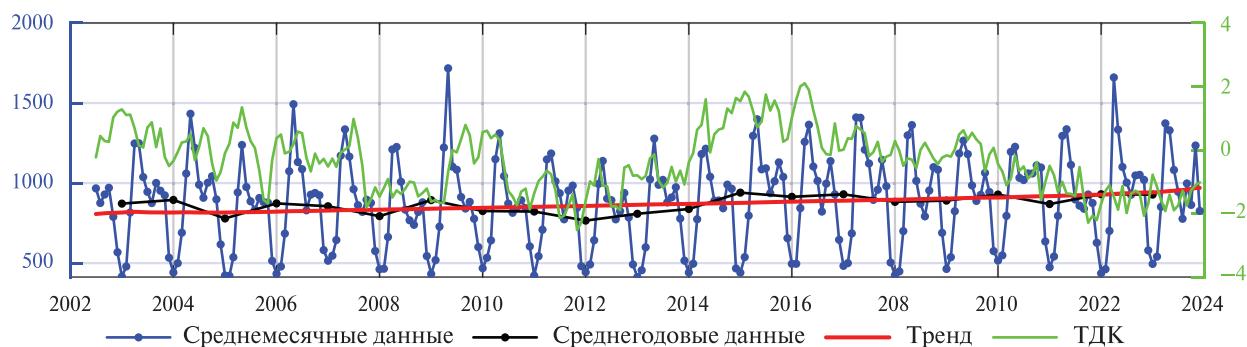


Рис. 4. Временная изменчивость ПП с 2002 по 2023 г. (левая шкала — ПП (в мгС/м^2)). Синяя линия — среднемесячные данные ПП, чёрная — среднегодовые данные ПП, зелёная — ТДК

Пространственное распределение ПП в изучаемые годы отличалось от севера к югу с границей по субполярному фронту, который проходит между Цусимским тёплым течением и Северо-Корейским холодным течением. В южной части моря отмечается более высокая ПП (до 1200 мгС/м^2) с различными физическими процессами, такими как прибрежный апвеллинг, водовороты и др. (Kim et al., 2000) (см. рис. 3). В центральной части моря на границе субполярного фронта величины ПП достигают $600\text{--}800 \text{ мгС/м}^2$. Здесь изменчивость ПП обусловлена интенсивными гидрографическими условиями, такими как слияние двух типов вод, крупномасштабное конвективное перемешивание в зимний период. Высокие значения ПП

наблюдаются по всей протяжённости прибрежной зоны Японского моря (до 3000 мгС/м²). В этом районе большое влияние имеет материковый сток (как естественных, так и антропогенных источников) как дополнительный источник биогенных элементов в ЭЗ (Sakata et al., 2012). Помимо этого, Приморское течение оказывает влияние на образование ПП вблизи прибрежной части Приморского края. В северной части моря показатели ПП варьируются от 400 до 600 мгС/м². Здесь на образование ПП оказывает влияние перемешивание вод в зимний период, которое стимулирует весеннее цветение фитопланктона, и стратификация вод в летний сезон, лимитирующая доступность биогенов в ЭЗ.

Выделенный из общего временного ряда линейный тренд характеризует значимое увеличение средней ПП за исследуемый период. Относительное изменение ПП за последние 20 лет составило 20,2 %.

Вариации глубины эвфотической зоны

Сезонная динамика ЭЗ, наблюдаемая в Японском море в период с 2002 по 2023 г., демонстрирует чёткий годовой ход с уменьшением с января по апрель, максимумом в августе и сокращением к ноябрю. Для всего моря минимальные значения ЭЗ отмечались в апреле, а максимальные — в августе, при этом вторая по величине ЭЗ наблюдалась в ноябре (диапазон от 21 до 52 м) (рис. 5).

Эвфотическая зона изменялась от 54,5 до 47,2 м для всего Японского моря с 2003 по 2023 г. Самые большие показатели ЭЗ наблюдались в 2005, 2008 и 2012 гг. (51,5; 51,6; 52,3 м), понижение ЭЗ прослеживается с 2013 г., с минимальным показателем в 2015 г. (47,2 м). В тёплую фазу ТДК прослеживается уменьшение ЭЗ — в 2014–2016 гг. (рис. 6).

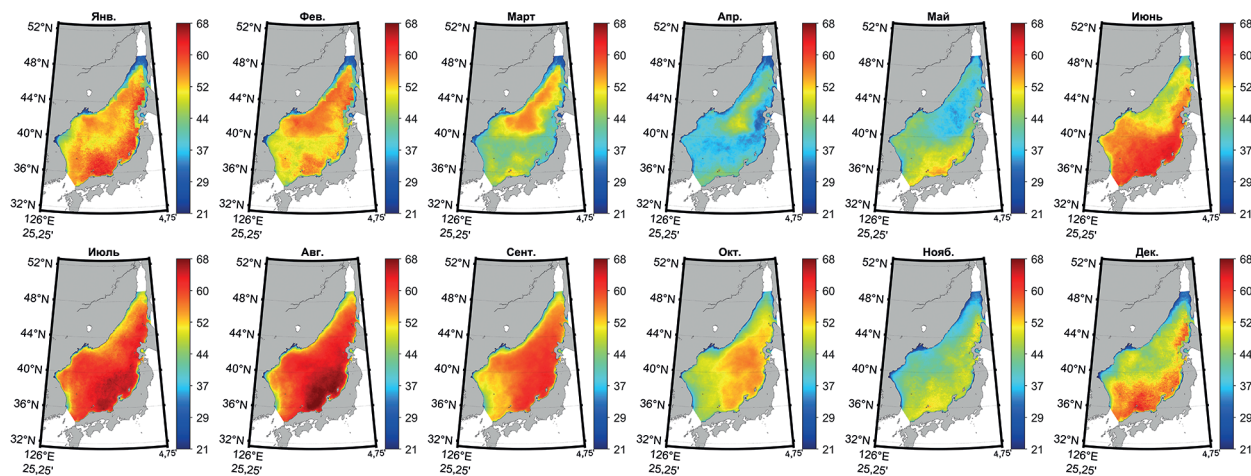


Рис. 5. Среднемесячные значения ЭЗ в Японском море в период с 2002 по 2023 г. (в м)

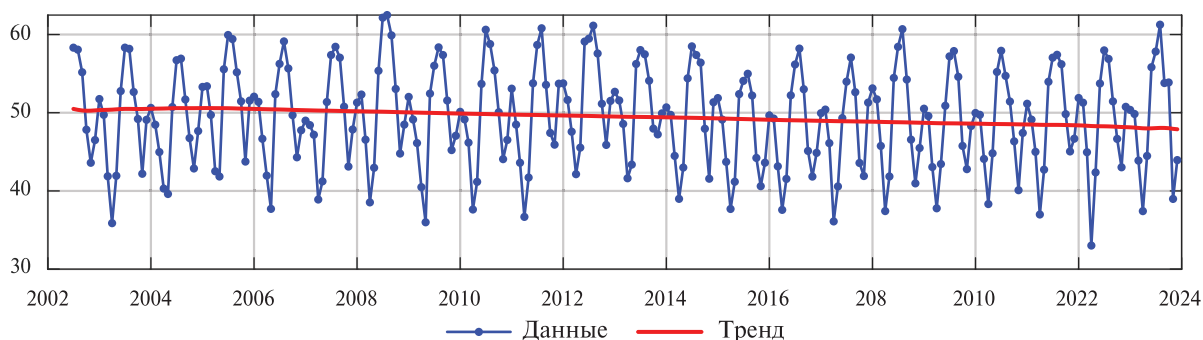


Рис. 6. Временная изменчивость ЭЗ с 2002 по 2023 г. (в м). Красная линия — тренд средней ЭЗ

Такая динамика напрямую связана с изменениями глубины перемешанного слоя (ПС), который является ключевым физическим фактором, регулирующим условия для фотосинтеза. Глубокий ПС перемешивает клетки фитопланктона по всей толще воды, вынося их из освещённой зоны, что приводит к сокращению пребывания клеток в зоне фотосинтеза и, как следствие, уменьшению эффективной ЭЗ. И наоборот, мелкий ПС способствует удержанию фитопланктона в хорошо освещённой поверхностной воде, что влияет на развитие ПП и увеличивает прозрачность воды, тем самым углубляя ЭЗ (Lewis et al., 1983; Siegel et al., 2002).

Данная взаимосвязь наглядно иллюстрируется сезонной гидрологией Японского моря. Зимой интенсивная конвекция в северной части моря формирует более глубокие перемешанные слои по сравнению с южным районом, что объясняет меньшие значения ЭЗ в холодный период. Летом водная толща на севере более стабильна из-за наличия плотной подповерхностной воды, что приводит к образованию более мелких смешанных слоёв, чем на юге. Сезонный ход стратификации и ПС напрямую обуславливает выявленные пространственно-временные закономерности в изменчивости ЭЗ (Park et al., 2007; Talley et al., 2006).

Первичная продукция контролируется двумя ключевыми факторами: доступностью света и питательных веществ, которые регулируются физическими процессами перемешивания и стратификации. Эвфотическая зона определяет глубину, на которой достаточно света для фотосинтеза, но продуктивность в пределах ЭЗ лимитируется концентрацией биогенных элементов в поверхностном слое.

В зимний период интенсивное ветровое и конвективное перемешивание приводит к углублению ПС, часто значительно превышающему ЭЗ. В результате происходит вынос питательных веществ из глубинных слоёв, но одновременно перемешивание клеток фитопланктона выносит их из освещённой ЭЗ, что ограничивает фотосинтез, несмотря на обилие биогенов (Sverdrup, 1953). Весной, с прогревом поверхности и ослаблением ветров, формируется сезонный термоклин. Перемешанный слой становится мельче и оказывается в пределах ЭЗ. Фитопланктон оказывается «заперт» в хорошо освещённом и обогащённом за зиму питательными веществами слое, что приводит к весеннему цветению (Behrenfeld, 2010; Sverdrup, 1953). Летом стабильная стратификация ограничивает поступление новых питательных веществ из глубины. Их потребление фитопланктоном приводит к истощению в поверхностном слое, и ПП снижается. Кратковременные события, такие как тайфуны, сильные ветры, могут вызывать эпизодическое перемешивание, которое разрушает стратификацию и приводит к небольшим всплескам ПП (Babin et al., 2004).

Таким образом, перемешивание является главным механизмом поставки биогенных элементов, а ЭЗ определяет световые условия для их усвоения. Сезонная динамика ПП представляется результатом сложного взаимодействия этих двух процессов. Наблюдаемый годовой ход ЭЗ в Японском море служит интегральным показателем этого взаимодействия, отражая сезонные циклы стратификации, перемешивания и биологической продуктивности.

Между ТПО и ЭЗ может наблюдаться косвенная статистическая корреляция, обусловленная биологическим откликом на физические процессы. Повышение ТПО часто усиливает стратификацию водной толщи, что подавляет вертикальное турбулентное перемешивание и ограничивает поступление биогенных элементов из глубинных слоёв в ЭЗ. Дефицит питательных веществ лимитирует рост фитопланктона, что приводит к снижению КХЛ и общей биомассы взвешенных частиц.

Уменьшение биомассы фитопланктона снижает коэффициент ослабления света водой. В результате прозрачность воды увеличивается, а глубина, на которую проникает достаточное для фотосинтеза количество света (т.е. ЭЗ), возрастает (Behrenfeld et al., 2006; Siegel et al., 1989).

Выделенный из общего временного ряда линейный тренд характеризует значимое уменьшение средней ЭЗ за исследуемый период. Относительное изменение ЭЗ за последние 20 лет составило $-5,2\%$. Таким образом, отмечена тенденция изменения ЭЗ в сторону уменьшения глубины залегания ЭЗ.

Вариации ТПО

На *рис. 7* видна чёткая граница термического фронта от месяца к месяцу. В субарктических водах северной части моря потепление происходит с большей скоростью, чем в субтропических водах на юге моря (Кильматов и др., 2012).

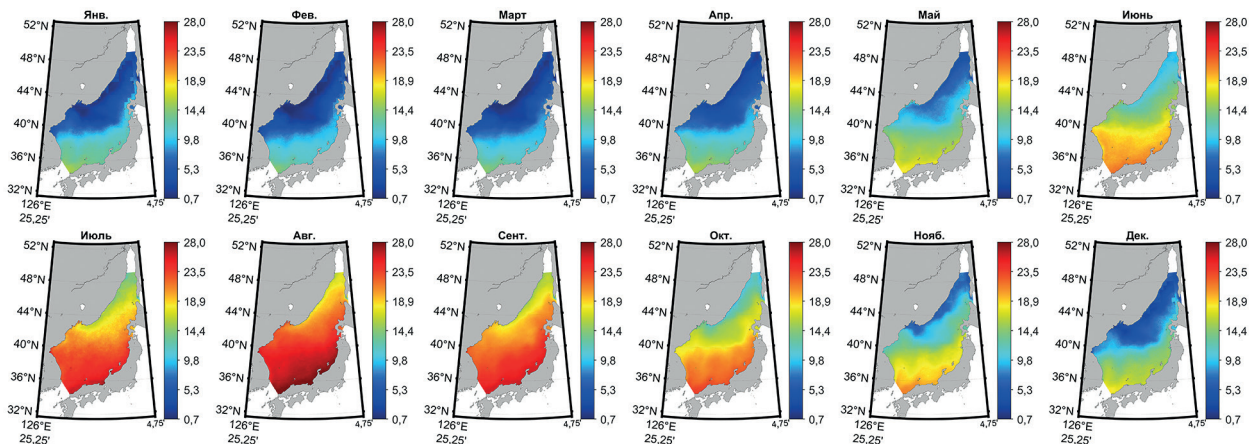


Рис. 7. Среднемесячные значения ТПО в Японском море с 2002 по 2023 г. (в °С)

Местоположение субполярного фронта меняется в зависимости от сезона, с сильным градиентом температуры поверхности летом и слабым градиентом зимой (Park et al., 2007).

Высокие показатели ТПО по среднегодовым данным для всего моря отмечены в 2002 г. — 17 °С, минимальная ТПО наблюдалась в 2003 и 2006 гг. — 13 °С. В целом наблюдается повышение средней ТПО с 2015 г. (13,2 °С) и до нашего времени (в 2023 г. — 15 °С) (*рис. 8*).

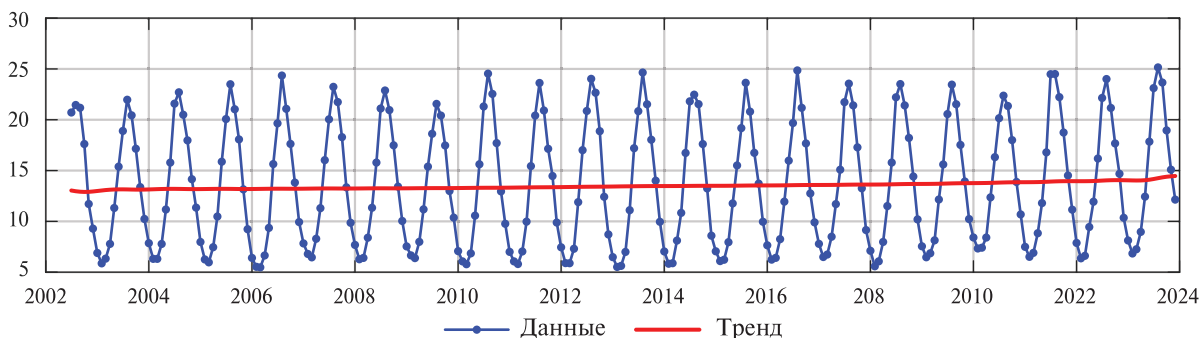


Рис. 8. Временная изменчивость ТПО в период с 2002 по 2023 г. (в °С).
Красная линия — тренд средней ТПО

Другими авторами отмечается, что рост среднегодовой температуры воздуха и ТПО происходит почти во всей северной части Тихого океана и прилегающих зонах азиатского и американского материков.

Выделенный из общего временного ряда линейный тренд характеризует значимое увеличение средней ТПО за исследуемый период. Относительное изменение ТПО за последние 20 лет составило 10,9 % (см. *рис. 8*).

Согласно данным других исследований за изучаемый период, положительные тренды ТПО в толще вод верхнего слоя прослеживаются на большей части Японского моря. И.Д. Ростов и соавторы (Ростов и др., 2023) отмечают, что корреляционные связи вариаций теплосодержания верхнего слоя океана с процессами в океане и атмосфере проявляются через климатические индексы, в том числе через ТДК.

Тихоокеанское декадное колебание

За изучаемый нами период с 2002 по 2023 г. наблюдались обе фазы ТДК — положительная и отрицательная. В 2002–2006 гг. проявилась положительная фаза ТДК (повлияло Эль-Ниньо в 2002–2003 гг.). В 2007 г. — нейтральная фаза (произошла смена с положительной фазы ТДК на отрицательную). В 2008–2013 гг. преобладала отрицательная фаза ТДК. В 2014–2016 гг. — положительная фаза (из-за влияния Эль-Ниньо в 2015–2016 гг.) (Ермолаев, 2022). В 2017–2023 гг. произошёл возврат к отрицательной фазе (здесь следует отметить 2020–2022 гг. из-за влияния Ла-Нинья). При сильных Эль-Ниньо и Ла-Нинья структура ТДК заметно изменяется (Хен и др., 2019).

Отрицательная фаза ТДК в Японском море характеризуется более холодными зимами, ухудшением ледовой обстановки в северных районах моря, а также более тёплым летним периодом. В положительную фазу ТДК в Японском море наблюдается потепление вод, более тёплые или аномально тёплые зимы (2015–2016), уменьшение ледовитости в районах с умеренным климатом, а также более прохладное лето. Также в положительную фазу ТДК усиливается стратификация вод, тогда как в отрицательную — ослабевает. В южной части Японского моря в положительную фазу ТДК происходит потепление вод, а в северной части усиливается ветровой апвеллинг.

Концентрация хлорофилла *a* и ПП чувствительны к изменениям и реагируют на смену фаз ТДК. В те годы, когда сочетается влияние ТДК и Эль-Ниньо, отмечается повышенная изменчивость продуктивности фитопланктона (Chiba et al., 2008, 2012). Влияние ТДК на ПП в Японском море связано с изменениями ТПО, стратификации вод, освещённости и доступности биогенов для фитопланктона.

Заключение

За 20-летний период исследования (с 2002 по 2023 г.) выявлены значимые тренды изучаемых биопродукционных характеристик. Выделенные нами из общего временного ряда линейные тренды характеризуют значимое увеличение средних КХЛ, ПП, ТПО и уменьшение ЭЗ за исследуемый период. Относительные изменения за последние 20 лет составили для ТПО 10,9 %, для КХЛ 31,2 %, для ПП 20,2 % и для ЭЗ отрицательное значение –5,2 %.

Установлена значительная межгодовая изменчивость ПП в акватории Японского моря, которая определяется взаимодействием физико-химических условий, биологических процессов и антропогенных факторов. Наибольшая продуктивность наблюдается в прибрежной, северной и юго-восточной части моря, а наименьшая — в открытых водах южной части и в юго-западном районе моря.

Влияние ТДК на КХЛ, ПП и ЭЗ в Японском море происходит опосредованно, через изменения ТПО и связанную с ней стратификацию. Тихоокеанское декадное колебание — важный климатический драйвер, модулирующий гидрологические условия и биопродуктивность региона. Авторами впервые был проведён комплексный анализ долгосрочной динамики продукционных параметров для всей акватории моря с учётом роли ТДК.

Для лучшего понимания реакции биопродукционных характеристик в Японском море на глобальные изменения климата необходимы дальнейшие углублённые исследования с учётом взаимодействия и влияния физических параметров.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тем, регистрационные номера: 124022100080-0, 124022100078-7.

Литература

1. Ермолаев Д. А. Влияние Тихоокеанской декадной осцилляции на динамический режим стратосферы: вып. квалификац. работа. СПб.: Российский гос. гидрометеорол. ун-т, 2022. 62 с.

2. Захарков С. П., Владимиров А. С., Штрайхерт Е. А. и др. Продукционные характеристики бактерий и фитопланктона в весенне-летний период в Охотском и Беринговом морях // Микробиология. 2017. Т. 86. № 3. С. 364–372. DOI: 10.7868/S002636561703020X.
3. Звалинский В. И., Лобанов В. Б., Захарков С. П., Тищенко П. Я. Хлорофилл, замедленная флуоресценция и первичная продукция в северо-западной части Японского моря осенью 2000 г. // Океанология. 2006. Т. 46. № 1. С. 27–37.
4. Кильматов Т. Р., Тринько О. И., Дмитриева Е. В. Климатический тренд в Тихом океане и теория катастроф // Изв. ТИНРО. 2012. Т. 170. С. 184–191.
5. Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И. Межгодовая изменчивость термических характеристик верхнего 1000-метрового слоя внетропической зоны северо-западной части Тихого океана на рубеже XX–XXI веков // Морской гидрофиз. журн. 2023. Т. 39. № 2(230). С. 157–176. DOI: 10.29039/0233-7584-2023-2-157-176.
6. Хен Г. В., Устинова Е. И., Сорокин Ю. Д. Основные климатические индексы для северной части Тихого океана: природа и история (литературный обзор) // Изв. ТИНРО. 2019. Т. 197. С. 166–181. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-166-181.
7. Шамбарова Ю. В., Степочкин И. Е., Захарков С. П. Верификация VGPM и K&I моделей первичной продукции в северо-западной части Японского моря по судовым и спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 186–195. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-186-195.
8. Babin S. M., Carton J. A., Dickey T. D., Wiggert J. D. Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert // J. Geophysical Research: Oceans. 2004. V. 109. No. C3. Article C03043. DOI: 10.1029/2003JC001938.
9. Behrenfeld M. J. Abandoning Sverdrup's Critical Depth Hypothesis on phytoplankton blooms // Ecology. 2010. V. 91. No. 4. P. 977–989. DOI: 10.1890/09-1207.1.
10. Behrenfeld M. J., Falkowski P. G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration // Limnology and Oceanography. 1997. V. 42. No. 1. P. 1–20. DOI: 10.4319/lo.1997.42.1.0001.
11. Behrenfeld M. J., O'Malley R. T., Siegel D. A. et al. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity // Nature. 2006. V. 444. No. 7120. P. 752–755. DOI: 10.1038/nature05317.
12. Boyce D. G., Lewis M. R., Worm B. Global phytoplankton decline over the past century // Nature. 2010. V. 466. No. 7306. P. 591–596. DOI: 10.1038/nature09268.
13. Chiba S., Aita M. N., Tadokoro K. et al. From climate regime shifts to lower-trophic level phenology: synthesis of recent progress in retrospective studies of the western North Pacific // Progress in Oceanography. 2008. V. 77. No. 2–3. P. 112–126. DOI: 10.1016/j.pocean.2008.03.004.
14. Chiba S., Batten S., Sasaoka K. et al. Influence of the Pacific Decadal Oscillation on phytoplankton phenology and community structure in the western North Pacific // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. No. 15. Article L15603. DOI: 10.1029/2012GL052912.
15. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. Ser. Springer Briefs in Statistics. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. 126 p. DOI: 10.1007/978-3-642-34913-3.
16. Hoegh-Guldberg O., Bruno J. F. The impact of climate change on the world's marine ecosystems // Science. 2010. V. 328. No. 5985. P. 1523–1528. DOI: 10.1126/science.1189930.
17. Holland P. W., Welsch R. E. Robust regression using iteratively reweighted least-squares // Communications in Statistics: Theory and Methods. 1977. V. 6. No. 9. P. 813–827. DOI: 10.1080/03610927708827533.
18. Kameda T., Ishizaka J. Size-fractionated primary production estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing // J. Oceanography. 2005. V. 61. No. 4. P. 663–672. DOI: 10.1007/s10872-005-0074-7.
19. Kim S.-W., Saitoh S., Ishizaka J. et al. Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentration in the Japan Sea derived from CZCS images // J. Oceanography. 2000. V. 56. No. 5. P. 527–538. DOI: 10.1023/A:1011148910779.
20. Lee E.-Y., Park K.-A. Change in the recent warming trend of sea surface temperature in the East Sea (Sea of Japan) over decades (1982–2018) // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 22. Article 2613. DOI: 10.3390/rs11222613.
21. Lee D., Kang J. J., Jo N. et al. Variations in phytoplankton primary production driven by the Pacific Decadal Oscillation in the East/Japan Sea // J. Geophysical Research: Biogeosciences. 2022. V. 127. No. 10. Article e2022JG007094. DOI: 10.1029/2022JG007094.
22. Lewis M. R., Cullen J. J., Platt T. Phytoplankton and thermal structure in the upper ocean: Consequences of nonuniformity in chlorophyll profile // J. Geophysical Research: Oceans. 1983. V. 88. No. C4. P. 2565–2570. DOI: 10.1029/JC088iC04p02565.
23. Mantua N. J., Hare S. R. The Pacific Decadal Oscillation // J. Oceanography. 2002. V. 58. No. 1. P. 35–44. DOI: 10.1023/A:1015820616384.

24. Morel A., Berthon J. F. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote sensing applications // *Limnology and oceanography*. 1989. V. 34. No. 8. P. 1545–1562. DOI: 10.4319/lo.1989.34.8.1545.
25. Park K.-A., Ullman D. S., Kim K. et al. Spatial and temporal variability of satellite-observed Subpolar Front in the East/Japan Sea // *Deep Sea Research Pt. I: Oceanographic Research Papers*. 2007. V. 54. No. 4. P. 453–470. DOI: 10.1016/j.dsr.2006.12.010.
26. Park K.-A., Kang C.-K., Kim K.-R., Park J.-E. Role of sea ice on satellite-observed chlorophyll-*a* concentration variations during spring bloom in the East/Japan sea // *Deep Sea Research Pt. I: Oceanographic Research Papers*. 2014. V. 83. P. 34–44. DOI: 10.1016/j.dsr.2013.09.002.
27. Park J.-E., Park K.-A., Kang C.-K., Kim G. Satellite-observed chlorophyll-*a* concentration variability and its relation to physical environmental changes in the East Sea (Japan Sea) from 2003 to 2015 // *Estuaries and Coasts*. 2020. V. 43. No. 3. P. 630–645. DOI: 10.1007/s12237-019-00671-6.
28. Sakata M., Yamada M., Mitsunobu S., Senga Y. Contribution of abiogenic and biogenic particles to trace-metal composition of phytoplankton assemblages in seawater of Shimizu Port, Japan // *J. Oceanography*. 2012. V. 68. No. 5. P. 807–813. DOI: 10.1007/s10872-012-0140-x.
29. Siegel D. A., Dickey T. D., Washburn L. et al. Optical determination of particulate abundance and production variations in the oligotrophic ocean // *Deep Sea Research Pt. A. Oceanographic Research Papers*. 1989. V. 36. No. 2. P. 211–222. DOI: 10.1016/0198-0149(89)90134-9.
30. Siegel D. A., Doney S. C., Yoder J. A. The North Atlantic spring phytoplankton bloom and Sverdrup's critical depth hypothesis // *Science*. 2002. V. 296. No. 5568. P. 730–733. DOI: 10.1126/science.1069174.
31. Sverdrup H. U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton // *J. du Conseil*. 1953. V. 18. No. 3. P. 287–295. DOI: 10.1093/icesjms/18.3.287.
32. Talley L. D., Min D.-H., Lobanov V. B. et al. Japan/East Sea water masses and their relation to the sea's circulation // *Oceanography*. 2006. V. 19. No. 3. P. 32–49. DOI: 10.5670/oceanog.2006.42.
33. Yamada K., Ishizaka J., Yoo S. et al. Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll *a* concentration in the Japan/East Sea (JES) // *Progress in Oceanography*. 2004. V. 61. No. 2–4. P. 193–211. DOI: 10.1016/j.pocean.2004.06.001.
34. Yamada K., Ishizaka J., Nagata H. Spatial and temporal variability of satellite estimated primary production in the Japan Sea from 1998 to 2002 // *J. Oceanography*. 2005. V. 61. No. 5. P. 857–869. DOI: 10.1007/s10872-006-0005-2.
35. Yoo S., Park J. Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Sea of Japan? // *J. Marine Systems*. 2009. V. 78. No. 2. P. 301–315. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2009.02.014.

Spatio-temporal variability of phytoplankton production characteristics in the Sea of Japan from satellite data (2002–2023)

Yu. V. Shambarova, I. E. Steepochkin, S. P. Zakharov

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russia
E-mail: shambarova@poi.dvo.ru

The long-term variability of phytoplankton productivity characteristics in the Sea of Japan from 2002 to 2023 was studied using Aqua MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) satellite data. The spatial and temporal distributions of chlorophyll *a* concentration and phytoplankton primary production, as well as their relationships with sea surface temperature and euphotic zone depth were considered. Significant linear trends were identified for phytoplankton primary production, chlorophyll *a* concentration, sea surface temperature, and euphotic zone depth, which are associated with climate change. The study found an increase in most of the parameters, except for the euphotic zone depth. The observed trend of euphotic zone shallowing may lead to a deterioration of habitat conditions for phytoplankton communities. The influence of the Pacific Decadal Oscillation on the variability of chlorophyll *a* concentration and phytoplankton primary production was also assessed. In the Sea of Japan, this influence is linked to changes in sea surface temperature and the process of water column stratification. The results are important for understanding the response of marine ecosystems to climate change and can be used to predict the bioproductivity of the Sea of Japan.

Keywords: primary production of phytoplankton, chlorophyll *a*, euphotic depth, sea surface temperature, Pacific Decadal Oscillation, PDO, Sea of Japan, Aqua MODIS

Accepted: 09.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-285-297

References

1. Ermolaev D. A., *Vliyanie Tikhoookeanskoj dekadnoi ostsillyatsii na dinamicheskii rezhim stratosfery: vypusk-naya kvalifikatsionnaya rabota* (Influence of the Pacific Decadal Oscillation on the dynamic regime of the stratosphere: Qualifying work), RGG, Saint Petersburg: Rossiiskii gosudarstvennyi gidrometeorologicheskii universitet, 2022, 62 p. (in Russian).
2. Zakharkov S. P., Vladimirov A. S., Shtraykhert E. A. et al., Production characteristics of bacteria and phytoplankton in the Sea of Okhotsk and Bering Sea during spring–summer, *Mikrobiologiya*, 2017, V. 86, No. 3, pp. 364–372 (in Russian), DOI: 10.7868/S002636561703020X.
3. Zvalinsky V. I., Lobanov V. B., Zakharkov S. P., Tishchenko P. Ya., Chlorophyll, delayed fluorescence, and primary production in the northwestern part of the Sea of Japan, *Oceanology*, 2006, V. 46, No. 1, pp. 23–32, DOI: 10.1134/S0001437006010048.
4. Kilmатов T. R., Trinko O. I., Dmitrieva E. V., Climate trend in the Pacific Ocean and catastrophe theory, *Izvestiya TINRO*, 2012, V. 170, pp. 184–191 (in Russian).
5. Rostov I. D., Dmitrieva E. V., Rudykh N. I., Interannual variability of thermal characteristics of the upper 1000-meter layer in the extratropical zone of the northwestern part of the Pacific Ocean at the turn of the XX–XXI centuries, *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2023, V. 39, No. 2(230), pp. 157–176 (in Russian), DOI: 10.29039/0233-7584-2023-2-157-176.
6. Khen G. V., Ustinova E. I., Sorokin Yu. D., Main climatic indices for the northern part of the Pacific Ocean: nature and history (literature review), *Izvestiya TINRO*, 2019, V. 197, pp. 166–181 (in Russian), DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-166-181.
7. Shambarova Yu. V., Stepochkin I. E., Zakharkov S. P., Verification of VGPM and K&I models of primary production in the northwestern part of the Japan Sea using shipboard and satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 2, pp. 186–195 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-186-195.
8. Babin S. M., Carton J. A., Dickey T. D., Wiggert J. D., Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2004, V. 109, No. C3, Article C03043, DOI: 10.1029/2003JC001938.
9. Behrenfeld M. J., Abandoning Sverdrup’s Critical Depth Hypothesis on phytoplankton blooms, *Ecology*, 2010, V. 91, No. 4, pp. 977–989, DOI: 10.1890/09-1207.1.
10. Behrenfeld M. J., Falkowski P. G., Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnology and Oceanography*, 1997, V. 42, No. 1, pp. 1–20, DOI: 10.4319/lo.1997.42.1.0001.
11. Behrenfeld M. J., O’Malley R. T., Siegel D. A. et al., Climate-driven trends in contemporary ocean productivity, *Nature*, 2006, V. 444, No. 7120, pp. 752–755, DOI: 10.1038/nature05317.
12. Boyce D. G., Lewis M. R., Worm B., Global phytoplankton decline over the past century, *Nature*, 2010, V. 466, No. 7306, pp. 591–596, DOI: 10.1038/nature09268.
13. Chiba S., Aita M. N., Tadokoro K., Saino T. et al., From climate regime shifts to lower-trophic level phenology: synthesis of recent progress in retrospective studies of the western North Pacific, *Progress in Oceanography*, 2008, V. 77, No. 2–3, pp. 112–126, DOI: 10.1016/j.pocean.2008.03.004.
14. Chiba S., Batten S., Sasaoka K. et al., Influence of the Pacific Decadal Oscillation on phytoplankton phenology and community structure in the western North Pacific, *Geophysical Research Letters*, 2012, V. 39, No. 15, Article L15603, DOI: 10.1029/2012GL052912.
15. Golyandina N., Zhigljavsky A., *Singular spectrum analysis for time series*, Ser. Springer Briefs in Statistics, Berlin; Heidelberg: Springer, 2013, 126 p., DOI: 10.1007/978-3-642-34913-3.
16. Hoegh-Guldberg O., Bruno J. F., The impact of climate change on the world’s marine ecosystems, *Science*, 2010, V. 328, No. 5985, pp. 1523–1528, DOI: 10.1126/science.1189930.
17. Holland P. W., Welsch R. E., Robust regression using iteratively reweighted least-squares, *Communications in Statistics: Theory and Methods*, 1977, V. 6, No. 9, pp. 813–827, DOI: 10.1080/03610927708827533.
18. Kameda T., Ishizaka J., Size-fractionated primary production estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing, *J. Oceanography*, 2005, V. 61, No. 4, pp. 663–672, DOI: 10.1007/s10872-005-0074-7.

19. Kim S.-W., Saitoh S., Ishizaka J. et al., Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentration in the Japan Sea derived from CZCS images, *J. Oceanography*, 2000, V. 56, No. 5, pp. 527–538, DOI: 10.1023/A:1011148910779.
20. Lee E.-Y., Park K.-A., Change in the recent warming trend of sea surface temperature in the East Sea (Sea of Japan) over decades (1982–2018), *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 22, Article 2613, DOI: 10.3390/rs11222613.
21. Lee D., Kang J.J., Jo N. et al., Variations in phytoplankton primary production driven by the Pacific Decadal Oscillation in the East/Japan Sea, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, V. 127, No. 10, Article e2022JG007094, DOI: 10.1029/2022JG007094.
22. Lewis M. R., Cullen J. J., Platt T., Phytoplankton and thermal structure in the upper ocean: Consequences of nonuniformity in chlorophyll profile, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1983, V. 88, No. C4, pp. 2565–2570, DOI: 10.1029/JC088iC04p02565.
23. Mantua N. J., Hare S. R., The Pacific Decadal Oscillation, *J. Oceanography*, 2002, V. 58, No. 1, pp. 35–44, DOI: 10.1023/A:1015820616384.
24. Morel A., Berthon J. F., Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote sensing applications, *Limnology and Oceanography*, 1989, V. 34, No. 8, pp. 1545–1562, DOI: 10.4319/lo.1989.34.8.1545.
25. Park K. A., Ullman D. S., Kim K. et al., Spatial and temporal variability of satellite-observed Subpolar Front in the East/Japan Sea, *Deep Sea Research Pt. I: Oceanographic Research Papers*, 2007, V. 54, No. 4, pp. 453–470, DOI: 10.1016/j.dsr.2006.12.010.
26. Park K.-A., Kang C.-K., Kim K.-R., Park J.-E., Role of sea ice on satellite-observed chlorophyll-*a* concentration variations during spring bloom in the East/Japan sea, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014, V. 83, pp. 34–44, DOI: 10.1016/j.dsr.2013.09.002.
27. Park J.-E., Park K.-A., Kang C.-K., Kim G., Satellite-observed chlorophyll-*a* concentration variability and its relation to physical environmental changes in the East Sea (Japan Sea) from 2003 to 2015, *Estuaries and Coasts*, 2020, V. 43, No. 3, pp. 630–645, DOI: 10.1007/s12237-019-00671-6.
28. Sakata M., Yamada M., Mitsunobu S., Senga Y., Contribution of abiogenic and biogenic particles to trace-metal composition of phytoplankton assemblages in seawater of Shimizu Port, Japan, *J. Oceanography*, 2012, V. 68, No. 5, pp. 807–817, DOI: 10.1007/s10872-012-0140-x.
29. Siegel D. A., Dickey T. D., Washburn L. et al., Optical determination of particulate abundance and production variations in the oligotrophic ocean, *Deep Sea Research Pt. A: Oceanographic Research Papers*, 1989, V. 36, No. 2, pp. 211–222, DOI: 10.1016/0198-0149(89)90134-9.
30. Siegel D. A., Doney S. C., Yoder J. A., The North Atlantic spring phytoplankton bloom and Sverdrup's critical depth hypothesis, *Science*, 2002, V. 296, No. 5568, pp. 730–733, DOI: 10.1126/science.1069174.
31. Sverdrup H. U., On conditions for the vernal blooming of phytoplankton, *J. du Conseil*, 1953, V. 18, No. 3, pp. 287–295, DOI: 10.1093/icesjms/18.3.287.
32. Talley L. D., Min D.-H., Lobanov V. B. et al., Japan/East Sea water masses and their relation to the sea's circulation, *Oceanography*, 2006, V. 19, No. 3, pp. 32–49, DOI: 10.5670/oceanog.2006.42.
33. Yamada K., Ishizaka J., Yoo S. et al., Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East Sea (JES), *Progress in Oceanography*, 2004, V. 61, No. 2–4, pp. 193–211, DOI: 10.1016/j.pocean.2004.06.001.
34. Yamada K., Ishizaka J., Nagata H., Spatial and temporal variability of satellite estimated primary production in the Japan Sea from 1998 to 2002, *J. Oceanography*, 2005, V. 61, No. 5, pp. 857–869, DOI: 10.1007/s10872-006-0005-2.
35. Yoo S., Park J., Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Sea of Japan?, *J. Marine Systems*, 2009, V. 78, No. 2, pp. 301–315, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2009.02.014.