

ПРОБЛЕМА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ  
И МОРСКАЯ РАДИОХЕМОЭКОЛОГИЯ

УДК [574.583.044:549.88](26)

DOI: [10.21072/eco.2023.28.02](https://doi.org/10.21072/eco.2023.28.02)

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ БИОМАССЫ ЗООПЛАНКТОНА В РЕГИОНАХ  
МИРОВОГО ОКЕАНА С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ \*

Пионтковский С. А.<sup>1</sup>, Минский И. А.<sup>1,2</sup>, Мегер Я. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация,  
e-mail: [spiontkovski@mail.ru](mailto:spiontkovski@mail.ru)

<sup>2</sup>ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,  
г. Севастополь, Российская Федерация

**Аннотация:** В водных экосистемах зоопланктон является важным промежуточным звеном в трансформации вещества и энергии от продуцентов (фитопланктон) к консументам (мелкие пелагические рыбы и другие организмы). Под воздействием природных факторов структурные и функциональные свойства сообществ зоопланктона подвержены многомасштабной пространственно-временной изменчивости. При этом возрастающее антропогенное воздействие выступает дополнительным и всё более значимым фактором. Для выявления трендов межгодовой изменчивости в регионах, различающихся фоновыми концентрациями нефтяных углеводородов (Персидский залив, Мексиканский залив, Каспийское море, Чёрное море и Средиземное море), выполнен анализ биомассы зоопланктона с 1970-х годов до первых декад 21-го века. Регионы ранжированы в соответствии с уровнем загрязнения нефтяными углеводородами. Для анализа временных трендов суммарной биомассы в верхнем 200-метровом слое использованы материалы опубликованных статей и международная база данных по зоопланктону (COPEPOD). В качестве фоновых характеристик использованы данные по температуре поверхности моря и концентрации хлорофилла *a* как показателя биомассы фитопланктона. Основу биомассы зоопланктона в исследованных регионах формировали мелкие Copepoda. Отмечено наличие монотонных отрицательных трендов биомассы зоопланктона в регионах с высокой фоновой концентрацией нефтяных углеводородов и их отсутствие в регионах со сравнительно низкими концентрациями.

**Ключевые слова:** зоопланктон, нефтяное загрязнение, межгодовая изменчивость, хлорофилл *a*, температура поверхности моря

## Введение

Оценка биомассы зоопланктона является составной частью глобального мониторинга Мирового океана и его морей. Необходимость оценки предопределена той важной ролью, которую зоопланктон играет в формировании структуры и функционировании морских экосистем, являясь промежуточным звеном в трансформации вещества и энергии по трофическим цепям [Ratnarajah et al., 2023]. Мониторинг биомассы планктона в различных регионах позволил выявить тренды её многолетней изменчивости [Пионтковский, Минский, Мегер, 2023; Boyce et al., 2020; Gregg, Rousseaux, 2019; Kröncke et al., 2019; Piontkovski, Serikova, 2022; Roxy et al., 2016].

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-24-00007). Авторы признательны Е. Ю. Георгиевой и Ю. А. Загородней (ИнБИОМ) за данные по биомассе фитопланктона и зоопланктона северной части Чёрного моря, а также А. Н. Коршенко (ГОИН) за данные по нефтяным углеводородам.

Наличие отрицательных трендов чаще всего связывают с глобальным потеплением и его следствием: усилением термогалинной стратификации верхних слоёв океана, что препятствует поступлению биогенов в эвфотический слой и отрицательно влияет на биомассу фитопланктона и первичную продукцию [Behrenfeld et al., 2016; Sallée et al., 2021]. Трофодинамические взаимодействия распространяют отрицательный эффект по трофической цепи экосистем. В силу пространственно-временной изменчивости термогалинной структуры и динамических процессов океан регионально неоднороден по характеру многолетних трендов: наряду с отрицательными существуют и положительные [Пионтковский, Минский, Мереп, 2023; Steinberg, Lomas, Cope, 2012]. При этом океан регионально неоднороден не только по природным факторам, но и по антропогенной нагрузке на шельф. В этой нагрузке по экологической значимости доминирует нефтяное загрязнение, о чём свидетельствует ретроспективный анализ экологических ситуаций в континентальных морях [Polinov, Boorman, Levin, 2021].

Попадая в верхние слои, коагулированная фракция нефтяных углеводов становится частью пищевого рациона организмов зоопланктона, которые аккумулируют её в теле [Bejarano et al., 2006; Gyllenburg, 1981], а также передают далее по трофической цепи [Hebert, Poulet, 1980; Lee, Köster, Paffenhöfer, 2012]. Организмы зоопланктона более чувствительны к нефтяному загрязнению по сравнению с фитопланктоном, что объясняется различной потребностью в кислороде и различием порогов критических (летальных) концентраций углеводов [Hallare, Lasafin, Magallanes, 2011; Jiang et al., 2010; Isukul, Ideozu, Udom, 2023].

Основными источниками нефтяного загрязнения океана являются выходы сырой нефти с морского дна (составляющие около 50 % всех утечек), утечки при бурении и обслуживании нефтяных скважин, аварийные разливы при судоходстве и континентальные стоки с нефтесодержащими отходами [Патин, 2017]. При эксплуатации природных ресурсов экосистемы шельфа испытывают наибольшие нагрузки, что обуславливает необходимость их рационального использования и разработки унифицированной системы их экологического мониторинга. В его основе лежат концепции больших морских экосистем [Sherman, 2014] и мониторинга индексов здоровья экосистем [Halpern et al., 2012].

Задачей наших исследований был сравнительный анализ многолетних трендов биомассы зоопланктона в регионах, наиболее подверженных нефтяному загрязнению. К таковым можно отнести континентальные моря (Средиземное, Чёрное, Каспийское) и заливы Мирового океана с большими объёмами нефтедобычи (Мексиканский и Персидский). Рабочая гипотеза состояла в том, что в регионах с высоким уровнем нефтяного загрязнения существует отрицательный наклон многолетних трендов биомассы зоопланктона, в то время как в регионах со сравнительно низким уровнем загрязнения концентрация нефти перестаёт быть доминирующим фактором и наклоны могут быть иными (положительными или нулевыми).

## **Материалы и методы**

Общая характеристика регионов представлена в таблице 1. Указанные диапазоны нефтяного загрязнения приближительны и охватывают несколько различающиеся периоды сбора планктонных проб. Для анализа временных трендов суммарной биомассы в верхнем 200-метровом слое были использованы материалы опубликованных статей и международная база данных по зоопланктону «COPROP» [O'Brien, 2005], из которой были выбраны временные серии среднегодовых значений по регионам.

Дополнительные материалы по планктону Чёрного моря были любезно предоставлены коллегами из Института биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН. При анализе данных биомасса была разделена на кормовой зоопланктон и некормовой (желетель). Основу

кормового зоопланктона (как рациона мелких пелагических рыб) формировали организмы размером 0,2–2,0 мм, среди которых массовыми являются, как правило, веслоногие ракообразные (*Copepoda*). Распределение соотношения биомассы кормового и желетелого зоопланктона рассмотрено нами в другой работе [Пионтковский, Минский, Мегер, 2023].

Таблица 1

Общие характеристики регионов

Регион и координаты	Годы измерений	Нефтяное загрязнение, мкг л <sup>-1</sup>	Зоопланктон	Источник
Персидский залив, 28–30° с. ш., 48–52° в. д.	1991–2020	190* 7–15	Расчётный метод**	[Elshobargy, 2005]
Каспийское море, 38–40° с. ш., 50–55° в. д.	2001–2019	30–50	Планктонная сеть с ячейей 100–500 мкм	[Качество морских вод, 2023]
Мексиканский залив, 28–30° с. ш., 90–95° з. д.	1982–2008	0,4–43	Сеть Бонго с ячейей 333 мкм	[Gulf State Fisheries ... ; Murawski et al., 2016]
Чёрное море (шельф Крыма), 44,5–45° с. ш., 34–36° з. д.	2000–2022	19 ± 13**	Сеть Джеди с ячейей 145 мкм	[Обзор состояния ... , 2022; Коршенко и др., 2023]
Море Альборан, 35–40° с. ш., 2–5° з. д.	1974–2005	7–26	Сеть Бонго с ячейей 200 мкм	[Zsolnay, 1979]

\*Разлив нефти в период военных действий 1991 г. \*\*См. раздел «Результаты»

Данные по нефтяному загрязнению в регионах взяты из разных источников (табл. 1). Эти данные фрагментарны, что не позволило решить задачу построения среднегодовых временных серий концентрации нефтяных углеводородов (за исключением крымского шельфа), поэтому при сопоставлении регионов были использованы диапазоны фоновых концентраций, которые не имеют надёжной статистики.

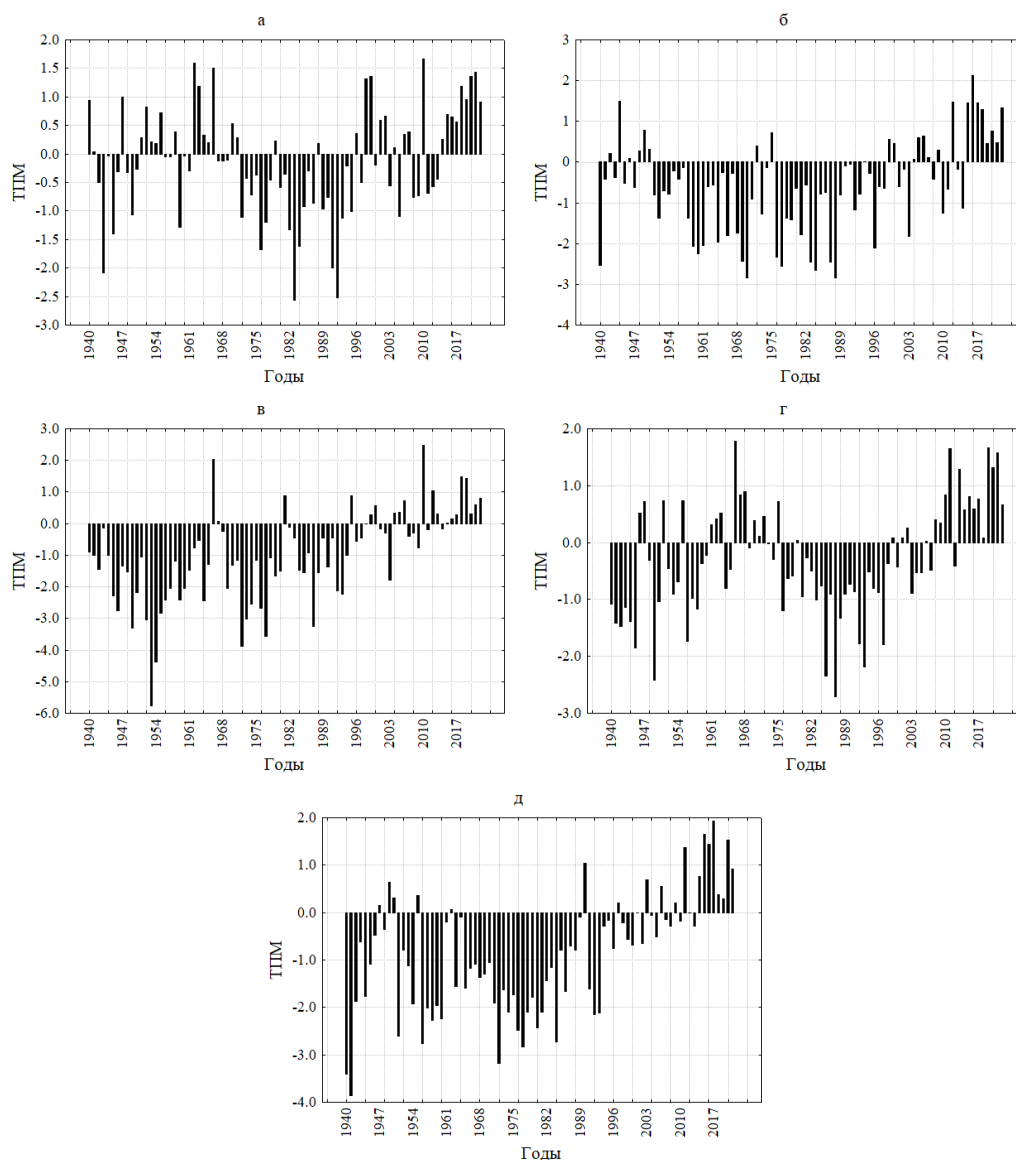
Для анализа многолетних временных серий температуры поверхности и концентрации хлорофилла *a* использовали базы данных HadISST1.1, Giovanni и Reanalysis (ECMWF ERA5) [HadISST1.1 ... ; Giovanni. The Bridge ... ; Monthly Reanalysis ... ].

Для графического представления и статистической обработки использованы программные пакеты Statistica v.9 и PAST v.3.25, позволяющие применять методы линейной и нелинейной статистики в оценках пространственно-временного распределения изучаемых характеристик. В частности, проверка статистической значимости монотонного многолетнего тренда во временных сериях базировалась на непараметрическом критерии Манна — Кендалла, применяемом в анализе временных серий в гидрофизике и гидрометеорологии [Wang et al., 2020]. В этом тесте параметр  $Z$  следует нормальному распределению с  $E(Z) = 0$   $V(Z) = 1$ . Нулевая гипотеза  $H_0$  (о статистической незначимости тренда) отвергается при абсолютном значении  $Z > Z_{1-a/2}$ , где  $a$  — принятый уровень значимости (в нашем случае  $a = 0,05$ ). При  $p$ -значении теста ниже принятого уровня значимости во временной серии присутствует монотонный тренд.

## Результаты

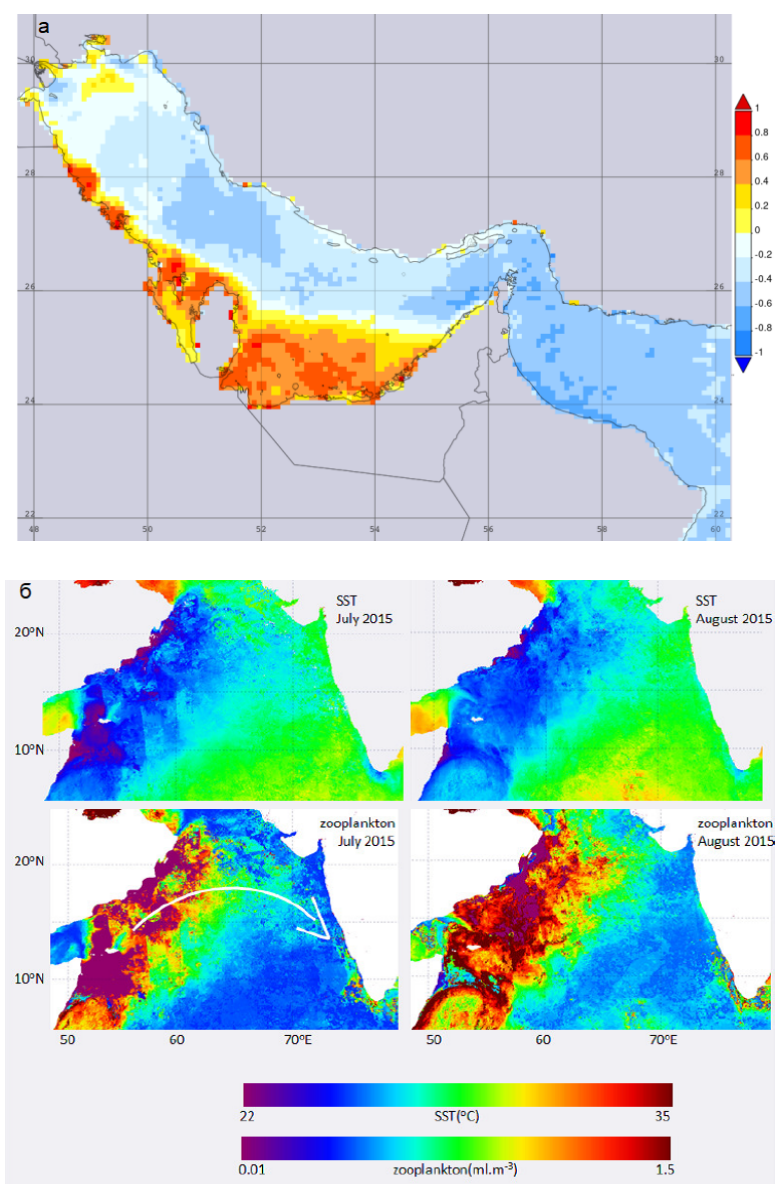
Исходя из рабочей гипотезы, выбранные для анализа регионы были ранжированы по объёмам нефтеперевозок, объёму и количеству разливов нефти и фоновым характеристикам концентрации нефтяных углеводородов, приводимых в литературе. При этом все районы оказались расположенными в сравнительно узком широтном поясе северного полушария ( $28\text{--}46^\circ$  с. ш.) (табл. 1). При изложении результатов первыми представлены океанические регионы, за которыми следуют регионы континентальных морей.

Графическое представление многолетней изменчивости температуры поверхности показало, что характерным свойством большинства временных серий в исследованных регионах является фаза положительных аномалий, начало которой приходится на первую декаду 21-го века (рис. 1).



**Рис. 1.** Временные серии среднегодовых отклонений температуры поверхности моря в исследованных регионах: Персидском заливе (а), Мексиканском заливе (б), южной части Каспийского моря (в), северной части Чёрного моря (г) и море Альборан (д)

**Персидский залив.** Война между Ираком и Кувейтом в 1991 г. привела к экологической катастрофе, которой по масштабам нет равных в истории антропогенных нагрузок на экосистемы шельфа. Объём разлитой нефти оценивался примерно в 2 млн тонн [State of the Marine ... , 2003]. В последующие годы Персидский залив был (и остаётся) самым нагруженным, обеспечивая 70 % мировых перевозок нефти. В результате нефтяное загрязнение в совокупности с другими антропогенными факторами привело к значительной деградации залива как экосистемы [Sheppard, 1993; Sheppard et al., 2010]. Что касается экологического мониторинга, то нам не удалось найти данных по многолетним измерениям биомассы зоопланктона, поэтому оценка характера тренда построена на косвенных расчётах. К таковым относятся данные по температуре поверхности моря и концентрации хлорофилла *a* (рис. 2).



**Рис. 2.** Распределение коэффициента корреляции концентрации хлорофилла *a* с температурой поверхности моря в Персидском и Оманском заливах (а). Пример соотношения пространственного распределения температуры поверхности моря и биомассы зоопланктона в северо-западной части Аравийского моря (б) [Dwiwedi et al., 2016]. Белая стрелка указывает направление генерального переноса биомассы зоопланктона из зоны Оманского прибрежного апвеллинга



Распределение коэффициента корреляции хлорофилла *a* с температурой поверхности моря указывает на существование обширной зоны отрицательных значений, охватывающей большую часть залива. Фрагментарные исследования зоопланктона показывают доминирование мелких копепод родов *Oithona*, *Paracalanus*, *Oncaea* и *Temoga* в суммарной численности организмов [Al-Yamani et al., 1998; Hamza et al., 2020]. Поскольку фитопланктон является основой их рациона, можно предположить, что многолетний тренд биомассы зоопланктона имеет отрицательный знак, так как тренд температуры поверхности моря в регионе положителен [Al-Rashidi et al., 2009]. Характерно, что значения коэффициента корреляции между температурой поверхности моря и концентрацией хлорофилла *a* нарастают в восточном направлении от Персидского залива — к Оманскому. В последнем видовое разнообразие и биомасса зоопланктона значительно выше [Piontkovski et al., 2019].

Другой способ оценки знака тренда в многолетней изменчивости биомассы зоопланктона в данном регионе основан на использовании алгоритма расчёта биомассы зоопланктона по дистанционным измерениям взвешенного органического углерода и температуры поверхности моря [Dwiwedi et al., 2016]. Данные по пространственному распределению указывают на отрицательную корреляцию между температурой поверхности и биомассой зоопланктона (рис. 2). Следовательно, положительный тренд температуры поверхности моря сопровождается отрицательным трендом биомассы.

**Мексиканский залив.** Взрыв на нефтедобывающей платформе Deepwater Horizon в 2010 г. привёл к разливу нефти в объёме 700 тысяч тонн [Noirungsee et al., 2020]. Наряду с этим район изобилует природными источниками (сипами) многолетнего поступления нефти в воды залива в связи с залеганиями нефтеносных пластов на малых глубинах шельфа.

Временная серия биомассы зоопланктона характеризует центральную часть шельфа штата Луизиана, на котором полевые съёмки были выполнены по сетке океанографических станций с последующим осреднением данных до среднегодовых величин (рис. 3). В пробах из интегрального слоя, собранных над шельфом, отклонения от средней аппроксимированы отрицательным трендом, показанным пунктиром. Тест Манна — Кендалла также свидетельствует о наличии монотонного тренда ( $S = -132$ ,  $Z = 2,59$ ,  $p = 0,01$ ). Мелкие копеподы (0,5–2,5 мм) родов *Oithona*, *Oncaea*, *Farranula*, *Coquasaeus* и др. вносили наибольший вклад в биомассу зоопланктона [Daly et al., 2021].

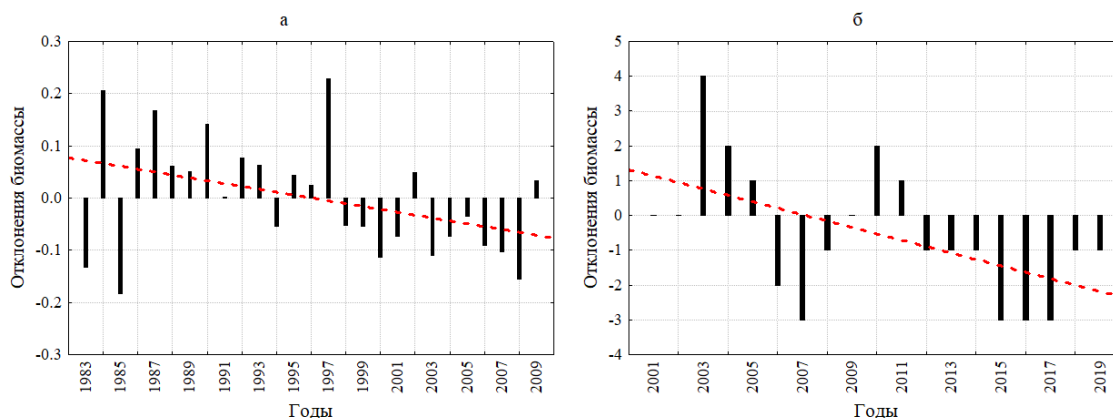
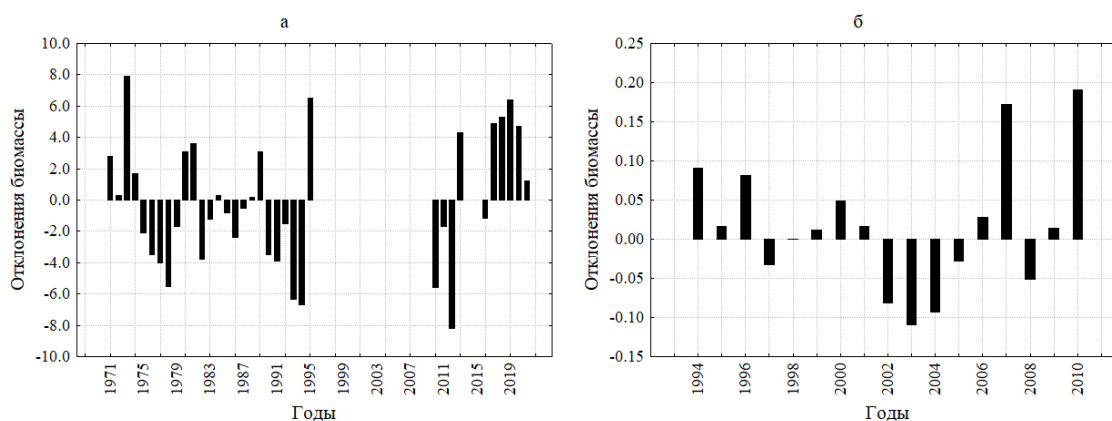


Рис. 3. Многолетняя изменчивость отклонений биомассы зоопланктона в Мексиканском заливе (а) [Seamap] и в южной части Каспийского моря (б) [Roohi et al., 2021]

**Каспийское море.** По объёму нефтеперевозок регион занимает третье место в выстроенной системе рангов (табл. 1). Его геоморфологической особенностью является большое количество грязевых вулканов и сипов (их более 400 в южной части моря), производящих большой объём выбросов нефти (около 500 тонн в сутки) параллельно с большими утечками при нефтедобыче. Оба процесса генерируют нефтяные плёнки площадью около 1000 квадратных километров с количеством пятен, растущим по годам [Mityagina, Lavrova, 2016].

Временная серия биомассы зоопланктона, полученная после обработки проб, характеризует южную часть моря (рис. 3). Основу биомассы кормового зоопланктона составляли копеподы родов *Acartia*, *Eurytemora*, *Limnocalanus* и др., видовое разнообразие которых заметно уменьшилось за указанный период сбора проб [Roohi et al., 2021]. Отклонения от средней биомассы аппроксимированы отрицательным трендом. Тест Манна — Кендалла также свидетельствует о его наличии ( $S = -65$ ,  $Z = 2,30$ ,  $p = 0,02$ ). Монотонный отрицательный тренд характерен и для биомассы массового вида-вселенца, относящегося к желетелым организмам, — *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz 1865 ( $S = -85$ ,  $Z = 4,21$ ,  $p = 0,003$ ).

**Чёрное море.** Наряду с проливом Босфор северная часть моря относится к регионам с наибольшей нагрузкой, возникающей вследствие морских транспортных перевозок, включая и транспорт нефти. По данным многолетнего мониторинга, концентрация нефтяных углеводородов в северной части моря составляла 3,0–9,0 мкг л<sup>-1</sup>. Временная серия межгодовой изменчивости биомассы зоопланктона на шельфе Крыма была любезно предоставлена Ю. А. Загородней (рис. 4). Основу биомассы зоопланктона в ней составляли мелкие копеподы родов *Pseudocalanus*, *Paracalanus*, *Oithona*, *Calanus*, *Centropages* и *Acartia* [Загородняя, Темных, Морякова, 2007].



**Рис. 4.** Многолетняя изменчивость отклонений биомассы зоопланктона от средней на шельфе Крыма (а) и в Средиземноморском бассейне (б) (Море Альборан) [Copepod. Interactive ...]

Межгодовая динамика отклонений биомассы от средней указывает на отсутствие монотонного тренда во временной серии. Отсутствовал он и в межгодовой изменчивости биомассы фитопланктона интегрального слоя над шельфом. Однако её оценки охватывали лишь первые декады 21-го века.

Среди рассматриваемых регионов шельф Крыма оказался единственным с доступными многолетними данными по среднегодовым концентрациям нефтяных углеводородов в 2000–2022 гг. [Коршенко и др., 2023]. Их статистический анализ показал отсутствие межгодового тренда во временных сериях, построенных для районов Севастополя, Ялты, Керчи, и временной серии пространственно осреднённых величин для шельфа (тест Манна — Кендала,  $S = -24$ ,  $Z = 0,61$ ,  $p = 0,54$ , для средней по шельфу).

**Средиземное море.** Западная часть Средиземноморского бассейна (море Альборан) является одной из самых продуктивных и самых загрязнённых, поскольку все маршруты нефтеналивных танкеров, как и маршруты других судов, курсирующих между Средиземным морем и Атлантикой (около 90 000 судов в год), проходят в этих водах. Для данного региона были проанализированы две временные серии. В пробах зоопланктона первой серии многолетний мониторинг позволил выявить положительный тренд суммарной численности организмов на шельфе с 1992 по 2020 г., в то время как в прибрежных районах таковой отсутствовал [Yebra et al., 2022].

На восток от этой станции располагалась станция со второй временной серией (с координатами 39°29' с. ш., 2°25' в. д., у острова Майорка). Пробы зоопланктона были собраны в 1994–2005 гг. [Fernandes de Puellas, Valencia, Vicente, 2004]. Многолетняя изменчивость биомассы зоопланктона не обнаружила статистически значимого тренда (рис. 4). В обоих регионах в пробах доминировали мелкоразмерные копеподы родов *Clausocalanus* и *Oithona*. Что касается характеристик фитопланктона, то для разных районов моря Альборан в целом характерен нулевой или слабоотрицательный межгодовой тренд концентрации «спутникового» хлорофилла [Copernicus Marine ... ].

### Обсуждение результатов

Результаты статистического анализа трендов по регионам не противоречат нашей рабочей гипотезе. В её основе лежат известные факты стрессового влияния нефтяных углеводородов различной концентрации как на физиологию организмов зоопланктона, так и на динамику их популяций через повышенную смертность: ароматические углеводороды (бензол, этилбензол, толуол и др.) растворимы в воде и быстро проникают в живые клетки, разрушая клеточные мембраны. При концентрациях нефтяных углеводородов, превышающих 50 мкг л<sup>-1</sup> (которая в российской государственной программе мониторинга стандартизирована как ПДК), отмечены снижение скорости роста и репродукции зоопланктонных организмов, а при больших концентрациях — сублетальные и летальные эффекты [Патин, 2017; Avila, Bersano, Fillmann, 2010].

Из регионов, выбранных для сравнительного анализа, высокие концентрации нефтяных углеводородов характерны для Персидского залива, Мексиканского залива и южной части Каспийского моря. Отрицательные тренды биомассы характерны для всех трёх регионов. В Чёрном море (на крымском шельфе в районе г. Ялты) и Средиземноморском бассейне (в море Альборан), где фоновые концентрации нефти меньше, отрицательных трендов биомассы зоопланктона отмечено не было.

Вместе с тем следует отметить и факт совокупного действия природных и антропогенных факторов, что затрудняет оценку их отдельного влияния. Так, многолетний стресс нефтяного загрязнения существует на фоне многолетнего увеличения температуры в верхних слоях океана, которое влияет как на физиологические процессы [Машукова, Силаков, 2020], так и (опосредованно) на динамику численности организмов зоопланктона через их смертность [Avila, Bersano, Fillmann, 2010]. Влияние температуры может быть опосредованным и через концентрацию растворённого кислорода, которая уменьшается во всех трёх названных регионах, где отмечен отрицательный тренд биомассы [Lachkar et al., 2022; Rabalais, Turner, 2019; Tuzhilkin, Katunin, Nalbandov, 2005]. При этом, как известно, увеличение температуры уменьшает растворимость кислорода в воде [Корякин и др., 2015].

В исследованных регионах на фоне глобальных многолетних трендов температуры поверхности очевидны и её значительные межгодовые колебания (рис. 1). Они модулируются атмосферными аномалиями, трансформирующими своё влияние (через поле ветра) в межгодовую динамику течений в верхнем слое океана, в изменчивость термогалинной структуры



и в конечном итоге в межгодовую изменчивость биомассы зоопланктона. Это находит отражение в корреляции биомассы с индексами крупномасштабных атмосферных аномалий. Например, для северной части Атлантического океана и Черноморского региона часто используют индекс Северо-Атлантического колебания, известный в иностранной литературе как North Atlantic Oscillation [Oguz, Dippner, Kaymaz, 2006].

Положительные и отрицательные фазы этого колебания отражают чередование холодных сухих и тёплых дождливых зим в Северной Америке и Восточной Европе. Для корреляции межгодовых колебаний биомассы зоопланктона и этого индекса характерны временные лаги, вызванные опосредованным характером их связи [Piontkovski et al., 2006].

Для понимания комплексного характера влияния на зоопланктон к абиотическим факторам следует добавить биотические, регулирующие это промежуточное структурное звено экосистемы «снизу» и «сверху». При этом добавляется фактор обеспеченности зоопланктона пищей (т. е. фитопланктоном) и трофический пресс «верхних» хищников (мелких пелагических рыб).

Таким образом, влияние природных факторов в совокупности с антропогенными может разнопланово регулировать качественный характер трендов многолетней изменчивости биомассы зоопланктона (их положительный или отрицательный наклон) в зависимости от соотношения силы влияния этих факторов в данном регионе. Проблема оценки доминирующих факторов обычно решается методами многофакторного анализа, но в данном случае формирование временных серий было лимитировано недостатком многолетних измерений ряда экологически значимых характеристик в регионах.

## Выводы

Ретроспективный сравнительный анализ данных по межгодовой изменчивости биомассы зоопланктона (с 1970-х годов до первых декад 21-го века) показал наличие монотонных отрицательных трендов в регионах с высокой фоновой концентрацией нефтяных углеводородов и отсутствие таких трендов в регионах со сравнительно низкими концентрациями углеводородов. Основу биомассы в исследованных регионах составляли мелкие ракообразные.

## Список литературы

1. Загородняя Ю. А., Темных А. В., Морякова В. К. Сезонные изменения голопланктона в прибрежной зоне Чёрного моря в 2002 г. // Морской экологический журнал. – 2007. – Т. 6, № 1. – С. 31–42.
2. Качество морских вод по гидрохимическим показателям : Ежегодник, 2021 / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Гос. океаногр. ин-т им. Н. Н. Зубова ; под общ. ред. Н. Н. Коршенко. – Москва : ГОИН. 2023. – 248 с.
3. Коршенко А. Н., Костылева А. В., Жохова Н. В., Долгова А. О., Мезенцева И. В., Мальченко Ю. А., Дьяков Н. Н., Зайцева О. И., Брайко О. И., Фурник Д. В., Алексеенко А. И., Дербичева Т. И., Кобец С. В. Черное море // Качество морских вод по гидрохимическим показателям : Ежегодник, 2021 / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Гос. океаногр. ин-т им. Н. Н. Зубова ; под общ. ред. Н. Н. Коршенко. – Москва : ГОИН. 2023. – Гл. 3. – С. 70–105.
4. Корякин А. Ю., Колесникова И. М., Кильянова М. Ю., Колесников С. И. Содержание кислорода в водных системах и его влияние на состояние систем // Территория Нефтегаз. – 2015. – № 3. – С. 70–74.

5. Машукова О. В., Силаков М. И. Сравнительная характеристика воздействия нефтепродуктов на биолюминесценцию черноморских гребневиков-вселенцев *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 и *Beroe ovata* Mayer, 1912 // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН. – 2020. – № 4. – С. 58–67. – <https://doi.org/10.21072/eco.2021.16.06>
6. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год // Росгидромет : [сайт]. – 2022. – URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?year=2021&ID=90> (дата обращения: 18.12.2023).
7. Патин С. А. Нефть и экология континентального шельфа. В 2 т. Т. 2. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ВНИРО, 2017. – 284 с.
8. Пионтковский С. А., Минский И. А., Мегер Я. В. Соотношение биомассы желтелого и кормового зоопланктона в Мировом океане // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2023. – Т. 8, № 1. – С. 93–98.
9. Al-Rashidi T. B., El-Gamily H. I., Amos C. L., Rakha K. A. Sea surface temperature trends in Kuwait Bay, Arabian Gulf // Natural Hazards. – 2009. – Vol. 50. – P. 73–82. – <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9320-9>
10. Al-Yamani F., Al-Rifaie K., Al-Mutairi H., Ismail W. Post-spill spatial distribution of zooplankton in the ROPME sea area // Offshore Environment of the ROPME Sea Area after the War-Related Oil Spill / eds A. Otsuki [et al.]. – Tokyo : Terra Sci. publ. co, 1998. – P. 193–202.
11. Avila T. R., Bersano J. G. F., Fillmann G. Lethal and sublethal effects of the water-soluble fraction of a light crude oil on the planktonic copepod *Acartia tonsa* // Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology. – 2010. – Vol. 5, iss. 1. – P. 19–25.
12. Behrenfeld M. J., O'Malley R. T., Boss E. S., Westberry T. K., Graff J. R., Halsey K. H., Milligan A. J., Siegel D. A., Brown M. B. Revaluating ocean warming impacts on global phytoplankton // Nature Climate Change. – 2016. – Vol. 6, iss. 3. – P. 323–330. – <https://doi.org/10.1038/nclimate2838>
13. Bejarano A. C., Chandler G. T., He L., Coull B. C. Individual to population level effects of South Louisiana crude oil water accommodated hydrocarbon fraction (WAF) on a marine meiobenthic copepod // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. – 2006. – Vol. 332, iss. 1. – P. 49–59. – <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2005.11.006>
14. Boyce D. G., Lotze H. K., Tittensor D. P., Carozza D. A., Worm B. Future ocean biomass losses may widen socioeconomic equity gaps // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11. – Art. 2235. – <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15708-9>
15. Copepod. Interactive time-series explorer // Copepod. The Global Plankton Database project : [site] / Nat. Oceanic and Atmospheric Administration. – URL: <https://www.st.nmfs.noaa.gov/copepod/toolkit/overview.html> (access date: 07.12.2023).
16. Copernicus Marine Data Store : [site]. – URL: <https://data.marine.copernicus.eu/products> (accessed date: 18.02.2024).
17. Daly K. L., Remsen A., Outram D. M., Broadbent H., Kramer K., Dubickas K. Resilience of the zooplankton community in the northeast Gulf of Mexico during and after the Deepwater Horizon oil spill // Marine Pollution Bulletin. – 2021. – Vol. 163. – Art. 111882. – <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111882>
18. Dwiwedi R., Priyaja P., Baliarsingh S. K., Kumar T. S., Shenoi S. S. C. Basin-Scale Retrieval of Zooplankton Using Split Algorithm and MODIS Data in the Arabian Sea : techn. report : ESSO/INCOIS/ASG/TR/07 / Ind. Nat. Centre for Ocean Inform. Services [et al.]. – Hyderabad, India : INCOIS, 2016. – 18 p.
19. Elshobargy W. Overview of marine pollution in the Arabian Gulf with emphasis on pollutant transport modeling // Arabian Coast – 2005, Dubai, 15 Oct. 2005 : [conference]. – URL: [https://www.academia.edu/2595870/Overview\\_of\\_marine\\_pollution\\_in\\_the\\_Arabian\\_Gulf\\_with\\_emphasis\\_on\\_pollutant\\_transport\\_modeling](https://www.academia.edu/2595870/Overview_of_marine_pollution_in_the_Arabian_Gulf_with_emphasis_on_pollutant_transport_modeling) (access date: 20.02.2024).

20. *Fernandes de Puellas M. L., Valencia J., Vicente L.* Zooplankton variability and climatic anomalies from 1994 to 2001 in the Balearic Sea (Western Mediterranean) // ICES Journal of Marine Science. – 2004. – Vol. 61, iss. 4. – P. 492–500. – <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2004.03.026>
21. Giovanni. The Bridge Between Data and Science : [database] / Nat. Aeronautics and Space Administration. – URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov> (access date: 12.12. 2023).
22. *Gregg W. W., Rousseaux C. S.* Global ocean primary production trends in the modern ocean color satellite record (1998–2015) // Environmental Research Letters. – 2019. – Vol. 14, nr 12. – Art. 124011. – <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4667>
23. Gulf State Fisheries commission. Southeast Area Monitoring and Assessment Program (SEAMAP). – URL: <https://www.gsmfc.org/seamap> (accessed date: 18.02.2024).
24. *Gyllenburg G.* Ingestion and turnover of oil and petroleum hydrocarbons by two planktonic copepods in the Gulf of Finland // Annales Zoologici Fennici. – 1981. – Vol. 18. – P. 225–228.
25. HadISST1.1 – Global Monthly Mean Gridded SSTs (1870–2015) / Hadley Centre for Climate Prediction and Research // CEDA. Archive : [database] / The Centre for Environmental Data Analysis. – 2007. – URL: <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/542291c0956a3e4ea2c5085f1a31b94a> (access date: 08.12.2023).
26. *Hallare A. V., Lasafin K. J. A., Magallanes J. R.* Shift in phytoplankton community structure in a tropical marine reserve before and after a major oil spill event // International Journal of Environmental Research. – 2011. – Vol. 5, iss. 3. – P. 651–660. – <https://doi.org/10.22059/ijer.2011.372>
27. *Halpern B. S., Longo C., Hardy D., McLeod K. L., Samhoury J. F., Katona S. K., Kleisner K., Lester S. E., O’Leary J., Ranelletti M., Rosenberg A. A., Scarborough C., Selig E. R., Best B. D., Brumbaugh D. R., Chapin F. S., Crowder L. B., Daly K. L., Doney S. C., Elfes C., Fogarty M. J., Gaines S. D., Jacobsen K. I., Karrer L. B., Leslie H. M., Neeley E., Pauly D., Polasky S., Ris B., Martin K. S., Stone G. S., Sumaila U. R., Zeller D.* An index to assess the health and benefits of the global ocean // Nature. – 2012. – Vol. 488, iss. 7413. – P. 615–620. – <https://doi.org/10.1038/nature11397>
28. *Hamza W., Aljunaibi M., Piontkovski S., Al Hashmi K.* Comparative plankton dynamics in Arabian Gulf and Sea of Oman at opposite sides of the strait of Hormuz // GEOLINKS International Conference, Plovdiv, 2020, 05–07 Oct. – Plovdiv : SAIMA CONSULT LTD, 2020. – Bk. 2, vol. 2. – <https://doi.org/10.32008/geolinks2020/b2/v2/01>
29. *Hebert R., Poulet S. A.* Effect of modification of particle size of emulsions of venezuelan crude oil on feeding, survival and growth of marine zooplankton // Marine Environmental Research. – 1980. – Vol. 4, iss. 2. – P. 121–134. – [https://doi.org/10.1016/0141-1136\(80\)90050-1](https://doi.org/10.1016/0141-1136(80)90050-1)
30. *Isukul A. O., Ideozu R. U., Udom G. J.* The effect of crude oil spill on plankton abundance in Santa Barbara River, Nembe, Bayelsa State // International Journal of Agriculture and Environmental Research. – 2023. – Vol. 9, iss. 3. – P. 289–304. – <https://doi.org/10.51193/IJAER.2023.9303>
31. *Jiang Z., Huang Y., Xu X., Liao Y., Shou L., Liu J., Chen Q., Zeng J.* Advance in the toxic effects of petroleum water accommodated fraction on marine plankton // Acta Ecologica Sinica. – 2010. – Vol. 30, iss. 1 – P. 8–15. – <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2009.12.002>
32. *Kröncke I., Neumann H., Dippner J. W., Holbrook S., Lamy T., Miller R., Padedda B. M., Pulina S., Reed D. C., Reinikainen M., Satta C. T., Sechi N., Soltwedel T., Suikkanen S., Lugliè A.* Comparison of biological and ecological long-term trends related to northern hemisphere climate in different marine ecosystems // Nature Conservation. – 2019. – Iss. 34. – P. 311–341. – <https://doi.org/10.3897/natureconservation.34.30209>
33. *Lachkar Z., Mehari M., Lévy M., Paparella F., Burt J. A.* Recent expansion and intensification of hypoxia in the Arabian Gulf and its drivers // Frontiers in Marine Science. – 2022. – Vol. 9. – Art. 891378. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.891378/full> – Publication date: 07.09.2022.

34. Lee R. F., Köster M., Paffenhöfer G.-A. Ingestion and defecation of dispersed oil droplets by pelagic tunicates // *Journal of Plankton Research*. – 2012. – Vol. 34, iss. 12. – P. 1058–1063. – <https://doi.org/10.1093/plankt/fbs065>
35. Mityagina M., Lavrova O. Satellite survey of inner seas: oil pollution in the Black and Caspian seas // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8, iss. 10. – Art. 875. – <https://doi.org/10.3390/rs8100875>
36. Monthly Reanalysis Time Series // *Climate Reanalyzer* : [database] / Climate Change Inst., Univ. of Maine. – URL: [https://climatereanalyzer.org/research\\_tools/monthly\\_tseries](https://climatereanalyzer.org/research_tools/monthly_tseries) (access date: 23.12.2023).
37. Murawski S. A., Fleeger J. W., Patterson III W. F., Hu C., Daly K., Romero I., Toto-Farmer G. A. How did the Deepwater Horizon oil spill affect coastal and continental shelf ecosystems in the Gulf of Mexico? // *Oceanography*. – 2016. – Vol. 29, nr 3. – P. 161–173. – <https://doi.org/10.5670/oceanog.2016.80>
38. Noirungsee N., Hackbusch S., Viamonte J., Bubenheim P., Liese A., Müller R. Influence of oil, dispersant, and pressure on microbial communities from the Gulf of Mexico // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10. – Art. 7079. – <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63190-6>
39. O'Brien T. D. COPEPOD: A Global Plankton Database : NOAA Technical Memorandum, NMFS-F/SPO-73 / U. S. Department of Commerce, Nat. Oceanic and Atmospheric Administration. – USA : NOAA, 2005. – 136 p.
40. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // *Journal of Marine Systems*. – 2006. – Vol. 60, iss. 3/4. – P. 235–254. – <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.11.011>
41. Piontkovski S. A., Hamza W. M., Al-Abri N. M., Al-Busaidi S. Z., Al-Hashmi K. A. A comparison of seasonal variability of Arabian Gulf and the Sea of Oman pelagic ecosystems // *Aquatic Ecosystem Health & Management*. – 2019. – Vol. 22, nr 2. – P. 108–130. – <https://doi.org/10.1080/14634988.2019.1621133>
42. Piontkovski S. A., O'Brien T. D., Umani S. F., Krupa E. G., Stuge T. S., Balymbetov K. S., Grishaeva O. V., Kasymov A. G. Zooplankton and the North Atlantic oscillation: a basin scale analysis // *Journal of Plankton Research*. – 2006. – Vol. 28, iss. 11. – P. 1039–1046. – <https://doi.org/10.1093/plankt/fbl037>
43. Piontkovski S. A., Serikova I. M. Fading bioluminescence of the tropical Atlantic Ocean // *Luminescence*. – 2022. – Vol. 37, iss. 3. – P. 514–519. – <https://doi.org/10.1002/bio.4188>
44. Polinov S., Boorman R., Levin N. Spatial and temporal assessment of oil spills in the Mediterranean Sea // *Marine Pollution Bulletin*. – 2021. – Vol. 167. – Art. nr 112338. – <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112338>
45. Rabalais N. N., Turner R. E. Gulf of Mexico hypoxia: past, present and future // *Limnology and Oceanography Bulletin*. – 2019. – Vol. 28, iss. 4. – P. 117–124. – <https://doi.org/10.1002/lob.10351>
46. Ratnarajah L., Abu-Alhaija R., Atkinson A., Batten S., Bax N. J., Bernard K. S., Canonico G., Cornils A., Everett J. D., Grigoratou M., Ishak N. H. A., Johns D., Lombard F., Muxagata E., Ostle C., Pitois S., Richardson A. J., Schmidt K., Stemmann L., Swadling K. M., Yang G., Yebra L. Monitoring and modelling marine zooplankton in a changing climate // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14. – Art. 564. – <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36241-5>
47. Roohi A., Kideys A. E., Jolodar M. N., Bandpei M. A., Rostami A. M. Long-term changes in gelatinous zooplankton, mesozooplankton and kilka fish in the Southern Caspian Sea: environmental controls and trophic webs interactions // *Journal of Oceanography and Marine Science*. – 2021. – URL: <https://hdl.handle.net/11511/101110>. – Publication date: 01.12.2021.



48. Roxy M. K., Modi A., Murtugudde R., Valsala V., Panickal S., Kumar S. P., Ravichandran M., Vichi M., Lévy M. A reduction in marine primary productivity driven by rapid warming over the tropical Indian Ocean // *Geophysical Research Letters*. – 2016. – Vol. 43, iss. 2. – P. 826–833. – <https://doi.org/10.1002/2015GL066979>
49. Sallée J.-B., Pellichero V., Akhoudas C., Pauthenet E., Vignes L., Schmidtko S., Garabato A. N., Sutherland P., Kuusela M. Summertime increases in upper-ocean stratification and mixed-layer depth // *Nature*. – 2021. – Vol. 591, iss. 7851. – P. 592–598. – <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03303-x>
50. Seamap: Texas/Louisiana shelf central. Gulf of Mexico : Related Copepod plankton data collections // Copepod. The Global Plankton Database project : [site] / Nat. Oceanic and Atmospheric Administration. – URL: <https://www.st.nmfs.noaa.gov/copepod/time-series/us-50202/> (access date: 16.12.2023).
51. Sheppard C. R. C. Physical environment of the Gulf relevant to marine pollution: an overview // *Marine Pollution Bulletin*. – 1993. – Vol. 27. – P. 3–8. – [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(93\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0025-326X(93)90003-3)
52. Sheppard C., Al-Husiani M., Al-Jamali F., Al-Yamani F., Baldwin R., Bishop J., Benzoni F., Dutrieux E., Dulvy N. K., Durvasula S. R. V., Jones D. A., Loughland R., Medio D., Nithyanandan M., Pilling G. M., Polikarpov I., Price A. R. G., Purkis S., Riegl B., Saburova M., Zainal K. The Gulf: a young sea in decline // *Marine Pollution Bulletin*. – 2010. – Vol. 60, iss. 1. – P. 13–38. – <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.10.017>
53. Sherman K. Toward ecosystem-based management (EBM) of the world's large marine ecosystems during climate change // *Environmental Development*. – 2014. – Vol. 11. – P. 43–66. – <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.04.006>
54. State of the Marine Environment Report : ROPME/GC-11/003 / Reg. Org. for the Protection of the Marine Environment. – Kuwait : ROPME, 2003. – 217 p.
55. Steinberg D. K., Lomas M. W., Cope J. S. Long-term increase in mesozooplankton biomass in the Sargasso Sea: linkage to climate and implications for food web dynamics and biogeochemical cycling // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2012. – Vol. 26, iss. 1. – Art. 1004. – <https://doi.org/10.1029/2010GB004026>
56. Tuzhilkin V. S., Katunin D. N., Nalbandov Y. R. Natural chemistry of Caspian Sea waters // *The Caspian Sea Environment* / eds: Kostianov A. G. and Kosarev A. N. – Berlin [et al.] : Springer, 2005. – P. 83–108. – (The Handbook of Environmental Chemistry ; pt. P). – [https://doi.org/10.1007/698\\_5\\_005](https://doi.org/10.1007/698_5_005)
57. Wang F., Shao W., Yu H., Kan G., He X., Zhang D., Ren M., Wang G. Re-evaluation of the power of the Mann – Kendall test for detecting monotonic trends in hydrometeorological time series // *Frontiers in Earth Science*. – 2020. – Vol. 8. – Art. 14. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2020.00014/full>. – Publication date: 06.02.2020.
58. Yebra L., Puerto M., Valcarcel-Perez N., Putzeys S., Gómez-Jakobsen F., García-Gómez C., Mercado J. M. Spatio-temporal variability of the zooplankton community in the SW Mediterranean 1992–2020: linkages with environmental drivers // *Progress in Oceanography*. – 2022. – Vol. 203. – Art. 102782. – <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102782>
59. Zsolnay A. Hydrocarbons in the Mediterranean Sea, 1974–1975 // *Marine Chemistry*. – 1979. – Vol. 7, iss. 4. – P. 343–352. – [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(79\)90020-3](https://doi.org/10.1016/0304-4203(79)90020-3)



**LONG-TERM VARIABILITY OF ZOOPLANKTON BIOMASS AND OIL POLLUTION  
IN SOME REGIONS OF THE WORLD OCEAN**

**Piontkovski S. A.<sup>1</sup>, Minsky I. A.<sup>1,2</sup>, Meger Ya. V.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation,  
e-mail: [spiontkovski@mail.ru](mailto:spiontkovski@mail.ru)

<sup>2</sup>A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation

**Abstract:** Zooplankton act as an important structural constituent of matter and energy transfers in marine ecosystems. Structural and functional properties of zooplankton communities are subjected to multiple scale spatio-temporal variability modulated by natural factors. An increasing anthropogenic impact on pelagic ecosystems acts as the addition to natural factors. A retrospective analysis of data on zooplankton biomass (from the 1970s through first decades of the 21<sup>st</sup> century), was carried out across the regions (namely the Persian Gulf, the Mexican Gulf, the Caspian, Black and Mediterranean seas). These regions were ranked by the oil pollution, respectively. Published papers and international COPEPOD database were employed, to set up time series on the total zooplankton biomass of the upper 200 m layer, across regions for the time range from 1971 to 2020. Sea surface temperature and chlorophyll *a* concentration act as the background characteristics. Small sized copepods set up the base of zooplankton biomass across regions. Inter-annual negative trends were associated with highly polluted regions, while no trends were observed in regions with relatively low pollution.

**Keywords:** zooplankton, oil pollution, inter-annual variability, chlorophyll *a*, sea surface temperature

Сведения об авторах

Пионтковский Сергей Александрович	доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация, <a href="mailto:spiontkovski@mail.ru">spiontkovski@mail.ru</a>
Минский Иван Александрович	аспирант, ведущий инженер, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, <a href="mailto:ivansimfer@yandex.ru">ivansimfer@yandex.ru</a>
Мегер Яков Васильевич	магистрант, младший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация, <a href="mailto:megeer@mail.ru">megeer@mail.ru</a>

Поступила в редакцию 11.12.2023 г.

Принята к публикации 28.02.2024 г.