

ДИНАМИКА БИОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕЛАГИАЛИ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В ПЕРВЫХ ДЕКАДАХ XXI ВЕКА

© 2023 г. С.А. Пионтковский*, #, И.М. Серикова**, И.А. Минский**,
Ю.А. Загородняя**, В.В. Суслин***, И.В. Ковалева**

*Севастопольский государственный университет, Университетская ул., 33, Севастополь, 299053, Россия

**ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»,
просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Россия

***ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», ул. Капитанская, 2, Севастополь, 299002, Россия

#E-mail: spiontkovski@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 19.04.2023 г.

Измерения параметров скорости ветра, температуры поверхности моря, концентрации хлорофилла-а (со спутников MODIS-Aqua/Terra), интенсивности биолюминесценции и биомассы зоопланктона (с борта научно-исследовательского судна), величин первичной продукции, индексов аномалий атмосферного давления и массопереноса вод (расчеты по модели) использованы для оценки современного состояния структуры пелагической экосистемы и ее функциональных характеристик. Показано, что за прошедшие два десятилетия (2000–2020 гг.), после экологических катаклизмов 1990-х годов, связанных с эвтрофикацией и трофическим прессом планктонных видов-вселенцев, экосистема открытых вод северной части Черного моря вступила в фазу относительной стабильности своей структуры и функционирования. Для этой фазы характерно отсутствие трендов межгодовой изменчивости ключевых параметров ее идентифицирующих. В более широком (глобальном) контексте обсуждается проблема региональных различий многолетних трендов физических и биологических параметров.

Ключевые слова: Черное море, хлорофилл-а, зоопланктон, биолюминесценция, планктон.

DOI: 10.31857/S0006302923030183, EDN: FSZQBB

Свойства многих биофизических характеристик пелагиали Черного моря предопределены влиянием на них биомассы и численности планктона. История его исследований уходит в описательный период начала 19 века, в котором появились первые заметки о морской фауне и флоре с описанием видов и их сезонной динамики. В дальнейшем эти сведения были дополнены количественными исследованиями пространственно-временной изменчивости численности, биомассы и биологической продуктивности планктонных сообществ в прибрежных и открытых районах [1]. В странах черноморского бассейна появились программы многолетнего сбора и обработки планктонных проб, что с годами привело к выявлению региональной многолетней изменчивости

структурных и функциональных характеристик пелагических экосистем [2, 3]. Эти оценки были и остаются экологически важными, поскольку позволяют учесть пространственную неоднородность динамических процессов, которые определяют особенности многолетней изменчивости характеристик в регионах.

Прибрежные воды, Основное черноморское течение (ОЧТ) и крупномасштабные циклонические круговороты (западный и восточный, формируемые этим течением), являются биотопами планктонных сообществ подверженных многолетней изменчивости, обусловленной физико-химическими, биологическими и антропогенными факторами [4]. На масштабах сезонной изменчивости (амплитуды которой высоки в умеренных широтах), физическая динамика вод имеет существенные различия по периметру ОЧТ. Здесь выделяется северная часть моря, где ОЧТ демонстрирует сильные сезонные колебания таких структурных характеристик и динамических процессов, как температура поверхности моря, ин-

Сокращения: ОЧТ — Основное черноморское течение, НИС — научно-исследовательское судно, БП — биолюминесцентный потенциал, NAO — индекс Северо-атлантического колебания (North Atlantic Oscillation), EAWR — Восточно-атлантический/западно-российский индекс (East Atlantic/West Russia index).

Таблица 1. Общая характеристика параметров, типов измерений и источников данных

Параметры	Типы измерений	Источники данных
Индексы атмосферных аномалий: NAO, EAWR		www.cpc.ncep.noaa.gov
Напряжение трения ветра о водную поверхность (зональная и меридианальная составляющие), $\text{н} \cdot \text{м}^{-2}$	Дистанционные измерения (MERRA-2 /M2TMNXOCN v.5.12.4)	https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/
Скорость ветра, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	Дистанционные измерения (MERRA-2 /M2TMNXOCN v.5.12.4)	https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/
Температура поверхности моря, $^{\circ}\text{C}$	Дистанционные измерения (MODIS-Aqua)	https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/
Массоперенос в слое 0–200 м, св	Результаты расчета по модели NEMO v.3.6	[12]
Концентрация хлорофилла- <i>a</i> , $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$	Дистанционные измерения (MODIS-Aqua/Terra)	https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/
Первичная продукция, $\text{мг} \cdot \text{С} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сутки}^{-1}$	Расчеты по данным дистанционных измерений	[11]
Биолюминесцентный потенциал, $10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{С}^{-2} \cdot \text{Д}^{-1}$	Зондирования в слое 0–50 м	Архивные материалы ИнБЮМ
Биомасса кормового зоопланктона, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$	Ловы в слое 0–100 м сетью Джели	Архивные материалы ИнБЮМ

тенсивность меандрирования геосторифических течений, количество и время существования синоптических вихрей, интенсивность обменных процессов (т.е. массопереноса) между прибрежными и открытыми водами [5, 6].

Исследованию сезонной динамики посвящено много работ, тогда как понимание многолетней изменчивости физических и биологических характеристик и их взаимосвязи заметно отстает. В связи с этим нашей целью было выявление трендов межгодовой изменчивости структурных и функциональных характеристик планктонного сообщества в северной [центральной] части моря. В первую очередь, нас интересовали тренды за последние двадцать лет, поскольку процессы, происходившие в предыдущие десятилетия, были освещены в ряде работ [1, 7–10 и др.]. В исходной рабочей гипотезе мы предположили, что тренды концентрации хлорофилла-*a* (индикатора биомассы фитопланктона), биолюминесценции и биомассы зоопланктона будут отрицательными в глубоководной части моря, поскольку их общая трофодинамическая основа – первичная продукция – показала уменьшение в 1998–2015 гг. [11].

МЕТОДЫ

При анализе межгодовых трендов двухтысячных годов (2000–2020 гг.) были использованы дистанционные измерения (со спутников MODIS-Aqua/Terra), контактные измерения (с борта научно-исследовательского судна (НИС) «Профес-

сор Водяницкий») и расчеты по моделям десяти параметров, характеризующих структуру пелагической экосистемы, ее функциональные характеристики и, в частности, биотоп планктонного сообщества (табл. 1).

Дистанционные измерения параметров поля ветра над поверхностью моря (на высоте 10 м) загружены из базы данных MERRA-2 для исследуемого региона. В отношении перечисленных биологических параметров следует отметить, что концентрация хлорофилла-*a* (как индикатора биомассы фитопланктона) и биомасса зоопланктона относятся к характеристикам структуры, а первичная продукция и биолюминесценция характеризуют функциональные свойства планктонного сообщества. Так, биолюминесцентный потенциал имеет двойственную природу, с одной стороны он является индикатором численности биолюминесцирующих организмов, прежде всего фитопланктона доминирующего в интегральной механически стимулированной биолюминесценции в Черном море, а с другой – индикатором функционального (физиологического) состояния этих организмов. Известно, что параметры биолюминесценции, на организменном уровне, зависят от температуры, солености, нефтяного загрязнения и других факторов среды [14, 15].

Чистую первичную продукцию фитопланктона в эвфотическом слое рассчитывали по изложенному ранее алгоритму [16], в котором ряд переменных (температура поверхностного слоя, фотосинтетически активная радиация, концен-

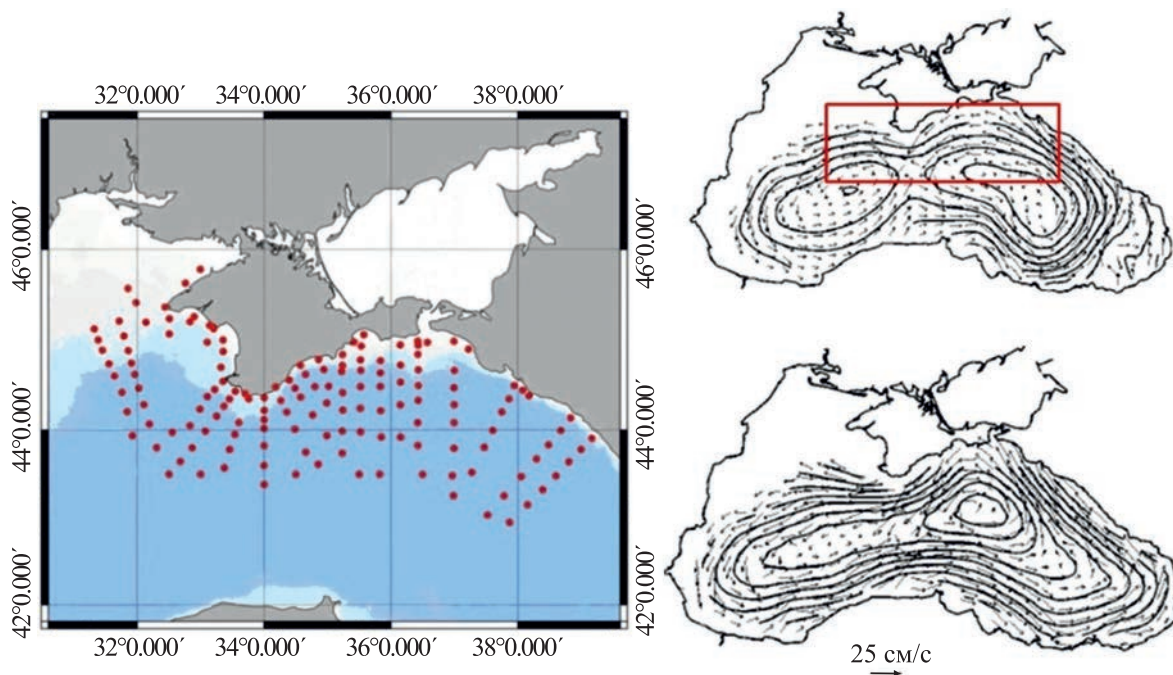


Рис. 1. Стандартная сетка океанографических станций, сформированная экспедициями НИС «Профессор Водяницкий» в 2010–2020 гг. (слева) и среднемесячная динамическая топография поверхности моря (справа сверху – в августе, справа внизу – в феврале) относительно 300 дб по данным TS-реанализа [13]. Прямоугольник на схеме оконтуривает район, для которого были построены пространственно усредненные месячные временные серии исследуемых характеристик пелагической экосистемы.

трация хлорофилла-*a*) были получены на основе дистанционных измерений (с MODIS-Aqua/Terra [17]).

Географические контуры района исследований соответствуют многолетней сетке океанографических станций, сформированной в экспедициях НИС «Профессор Водяницкий» (рис. 1).

Временная серия среднемесячных величин поверхностной температуры (осредненной для прямоугольника с координатами, указанными на рис. 1, была построена по данным дистанционных измерений параметров восходящего излучения спектрометрическим MODIS-Aqua на длинах волн 488, 531 и 547 нм. Восстановленная по этим данным временная серия среднемесячных значений концентрации хлорофилла-*a* (осредненных для прямоугольника с координатами на рис. 1) проходила коррекцию для разделения фракций хлорофилла и растворенного окрашенного вещества [17].

Измерения интенсивности биолюминесценции планктонного сообщества (биолюминесцентного потенциала – БП) выполнены с борта судна в летний период. Биолюминесцентный потенциал характеризует максимальную энергию высвечивания организмов:

$$БП = \int B(t)dt,$$

где $B(t)$ – интенсивность эмиссии света во время биолюминесцентной вспышки (Δt) [15]. Для измерений БП с борта судна использовали погружной приборный комплекс «Сальпа-М» (НПП «Аквастандарт-юг», Севастополь, Россия). Прибор позволяет проводить синхронные измерения биолюминесцентного потенциала механически стимулированной светимости планктонных организмов (в диапазоне 10^{-13} – 10^{-8} Вт·см $^{-2}$ ·л $^{-1}$ с точностью $\pm 10\%$), а также гидростатического давления, температуры, электропроводности, мутности и фотосинтетически активной радиации в режиме вертикального зондирования. Дискретность измерений комплексом при его погружении со скоростью $1.2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, составляет 0.25 м. Методика работы с прибором и его характеристики более детально описаны в соответствующих источниках и техническом руководстве производителя ([14, 15]; <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/complex-salpa-gbf>).

Биомассу зоопланктона вычисляли по результатам камеральной обработки проб в лаборатории. Во всех экспедициях использовали планктонную сеть Джеди с диаметром входного отверстия 38 см, оснащенную ситом с размером ячеек 140 мкм. На станциях в глубоководной части моря (с глубинами более 200 м) тотальные обловы выполняли до границы сероводородной зоны,

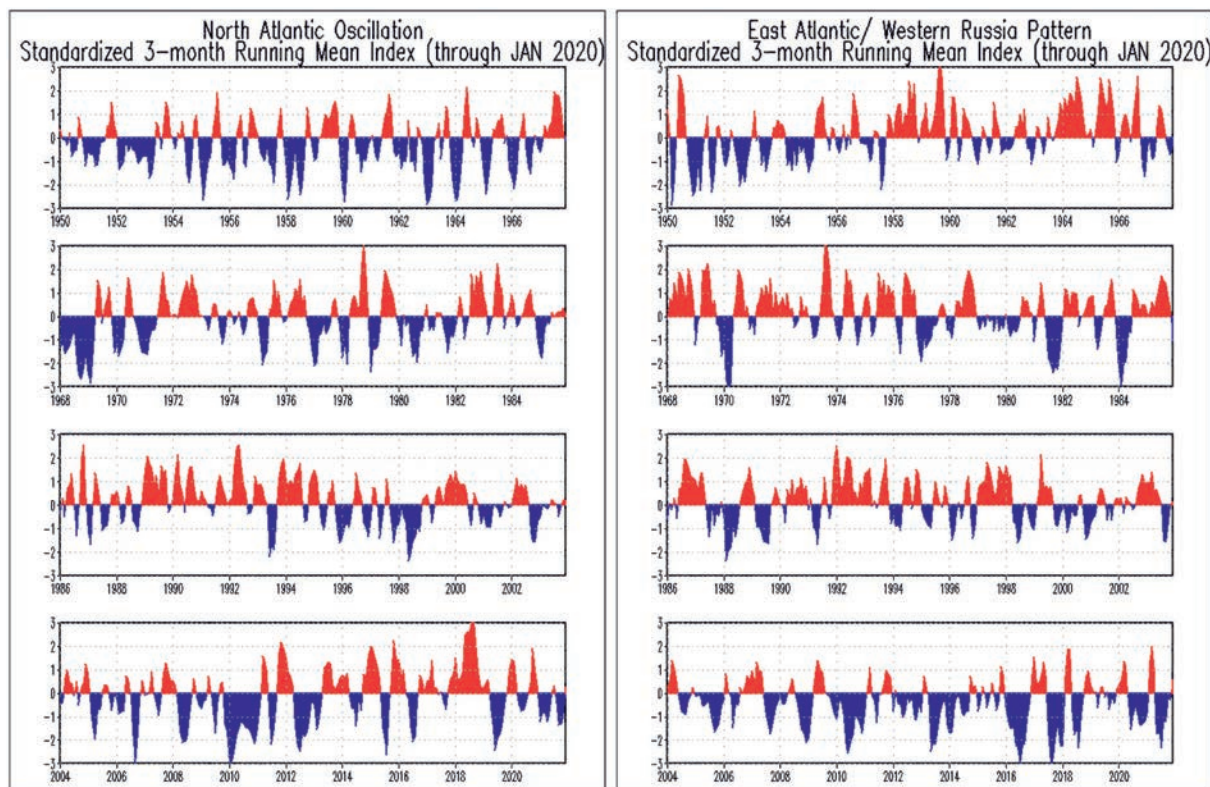


Рис. 2. Межгодовая изменчивость индекса NAO (а), и индекса EAWR (б) (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/eawruss_ts.shtml).

определяемой по изопикне $\delta_t = 16.2$ усл. ед. по данным вертикальных зондирований приборным комплексом SBE 911 Plus (Sea-Bird Electronics Inc., США). Фиксированные 4%-м формалином пробы зоопланктона обрабатывали в лаборатории стандартным счетно-порционным методом [18]. Определяли таксономический состав, возрастные стадии и размеры гидробионтов. Для перехода от размерных характеристик особей к единицам биомассы, использовали известные для черноморских видов размерно-массовые соотношения [19, 20].

В статистической обработке данных использованы программные продукты Statistica v.9 и PAST v.13. В частности, для проверки статистической значимости наличия или отсутствия монотонного многолетнего тренда во временных сериях параметров использовали непараметрический критерий Мэна–Кендалла применяемый при анализе временных серий в гидрофизике и гидрометеорологии [21]. 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 $a = 0.05$). Таким образом, при p -значении теста ниже принятого

уровня значимости во временной серии присутствует монотонный тренд.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Межгодовая изменчивость процессов на границе раздела атмосферы и океана имеет как прямое, так и опосредованное влияние на характеристики пелагических экосистем. Так, градиент атмосферного давления над северной Атлантикой и восточной частью России и его межгодовая изменчивость отражаются на пространственно-временных характеристиках поля ветра над акваторией Черного моря. Эти изменения трансформируются в изменения геострофических течений и термогалинной структуры вод и, в конечном итоге, в изменчивость структурных характеристик планктонных сообществ.

Крупномасштабные аномалии атмосферного давления принято характеризовать соответствующими индексами (рис. 2). Для черноморского региона наиболее часто используют два из них [4]; так, индекс Северо-атлантического колебания цитируемый в иностранной литературе как North Atlantic Oscillation (NAO), является доминирующей составляющей климатического масштаба в регионе и модулируется градиентом атмосферно-

го давления над северной Атлантикой. Чередование положительной или отрицательной фаз отражается на состоянии климата (например, холодных сухих или теплых дождливых зимах) над северной Америкой и восточной Европой. Приведенные на рис. 2 временные серии показывают, что периоды затяжных положительных или отрицательных фаз могут длиться около двух десятков лет (как это было с отрицательной фазой в 1950–1978 гг.). В этом плане двухтысячные годы характеризуются преобладанием отрицательной фазы NAO.

Восточно-атлантический/западно-российский индекс (цитируемый в иностранной литературе как East Atlantic/West Russia index EAWR), модулируется градиентом атмосферного давления над восточной частью североамериканского континента и восточной Европой. Как и NAO, этот индекс указывает на стабильное преобладание отрицательной фазы в двухтысячных годах. При этом отрицательная фаза EAWR сопровождается температурами воздуха выше нормы в восточной части России [22].

В аспекте опосредованного влияния на пелагические экосистемы характеристики поля ветра относят к экологически важным, поскольку они определяют интенсивность и направленность геострофических течений. В качестве примера, на рис. 3 приведены зональная и меридиональная составляющие напряжения трения ветра о водную поверхность.

Показаны временные серии построенные с месячным осреднением. Визуально, они свидетельствуют об отсутствии тренда межгодовой изменчивости в 2002–2020 гг. Это же подтверждается статистическим тестом Мэна–Кендалла (зональная составляющая: $S = -1160$, $Z = 1.01$, $p = 0.31$; меридиональная составляющая: $S = -560$, $Z = 0.49$, $p = 0.63$).

Над северной частью Черного моря преобладают ветры северного направления [23]. Межгодовую изменчивость скорости ветра анализировали по данным дистанционных измерений (рис. 4). Статистический анализ временных серий показал отсутствие тренда в многолетней изменчивости скорости ветра в 2002–2020 гг. ($S = -51$, $Z = 0.44$, $p = 0.66$).

Характеристики поля ветра модулируют геострофические течения, среди которых ОЧТ является самым энергоемким биотопом пелагической экосистемы (рис. 1 и 4). Своим пространственным положением течение идентифицируется над глубинами от 400 до 1800 м [24], при средней ширине потока около 75 км и средней скорости около $0.2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ у поверхности [13]. ОЧТ значительно меандрирует на масштабах межгодовой изменчивости и завершает свой цикл массопереноса (по периметру моря) за 90–180 суток [24]. Схемы ди-

намической топографии (приведенные в качестве примера для августа и февраля) показывают, что ОЧТ проявляется в поле динамических высот всесезонно.

Одним из важных экологических последствий меандрирования потока ОЧТ является поперечный массоперенос вод от шельфа в мористую часть и в обратном направлении, который перераспределяет биомассу планктона также приобретающую поперечный градиент от высоких величин на шельфе к меньшим – в мористой части. Оценки многолетней изменчивости поперечного массопереноса вод получены в рамках трехмерной циркуляционной модели NEMO v.3.6, имеющей 61 вертикальный слой, с зональным и меридиональным пространственным разрешением 3 км (рис. 5). Величины поперечного массопереноса (как крупномасштабного, так и с учетом вклада мезомасштабных вихрей) показали отсутствие тренда, т.е. его относительную стабильность (в частности, в аспекте многолетней динамики биотопа эпипелагического сообщества; тест Мэна–Кендалла для слоя 0–200 м: $S = 110$, $Z = 1.33$, $p = 0.18$). В районе наших исследований эпизоды регионального поперечного массопереноса очевидны на картах пространственного распределения концентрации хлорофилла-*a* (рис. 4).

Данные о межгодовой изменчивости поверхностной температуры моря представлены на рис. 6. Статистический анализ временных серий показал отсутствие тренда в многолетней изменчивости этого параметра в 2002–2020 гг. ($S = 1328$, $Z = 1.21$, $p = 0.23$).

В многолетних временных сериях данных по осредненной по месяцам биомассе хлорофилла-*a* тенденция межгодовой изменчивости мало заметна на фоне сезонной, которая является основной составляющей ее динамики в бореальных областях (рис. 6). Нижние экстремумы сезонных циклов хлорофилла-*a* на рис. 6 приходятся на летние месяцы (т.е. на периоды хорошо выраженной вертикальной плотностной стратификации эвфотического слоя), а верхние экстремумы соответствуют зимним месяцам, среди которых 84% пиков приходится на декабрь. При устраненной сезонной компоненте данные по межгодовой изменчивости концентрации хлорофилла-*a* также показали отсутствие многолетнего тренда ($S = 112$, $Z = 0.1$, $p = 0.92$).

При анализе межгодовой изменчивости биолюминесцентного потенциала использованы материалы батифотометрических зондирований, полученные за прошедшие 10 лет, преимущественно в летнее время, при этом в отдельные годы экспедиции на НИС «Профессор Водяницкий» не проводились по техническим причинам. Основной вклад в биолюминесценцию эвфотического слоя вносят динофитовые водоросли

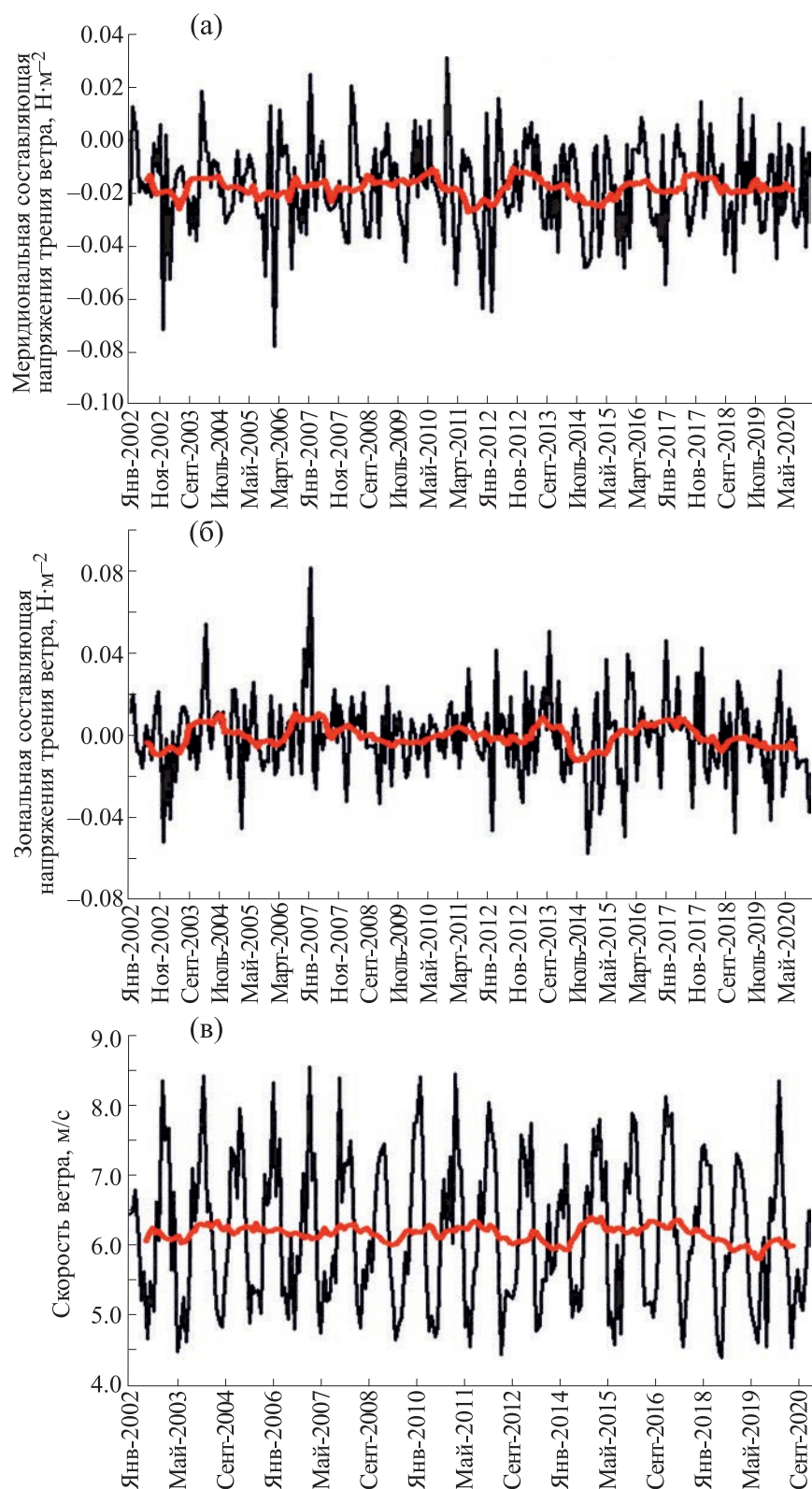


Рис. 3. Многолетняя изменчивость поля ветра в указанном на рис. 1 координатном пространстве: (а) — меридиональная и (б) — зональная составляющие напряжения трения ветра; (в) — скорость ветра. Кривая тренда характеризует тренд, полученный методом скользящей средней с окном в 12 месяцев.

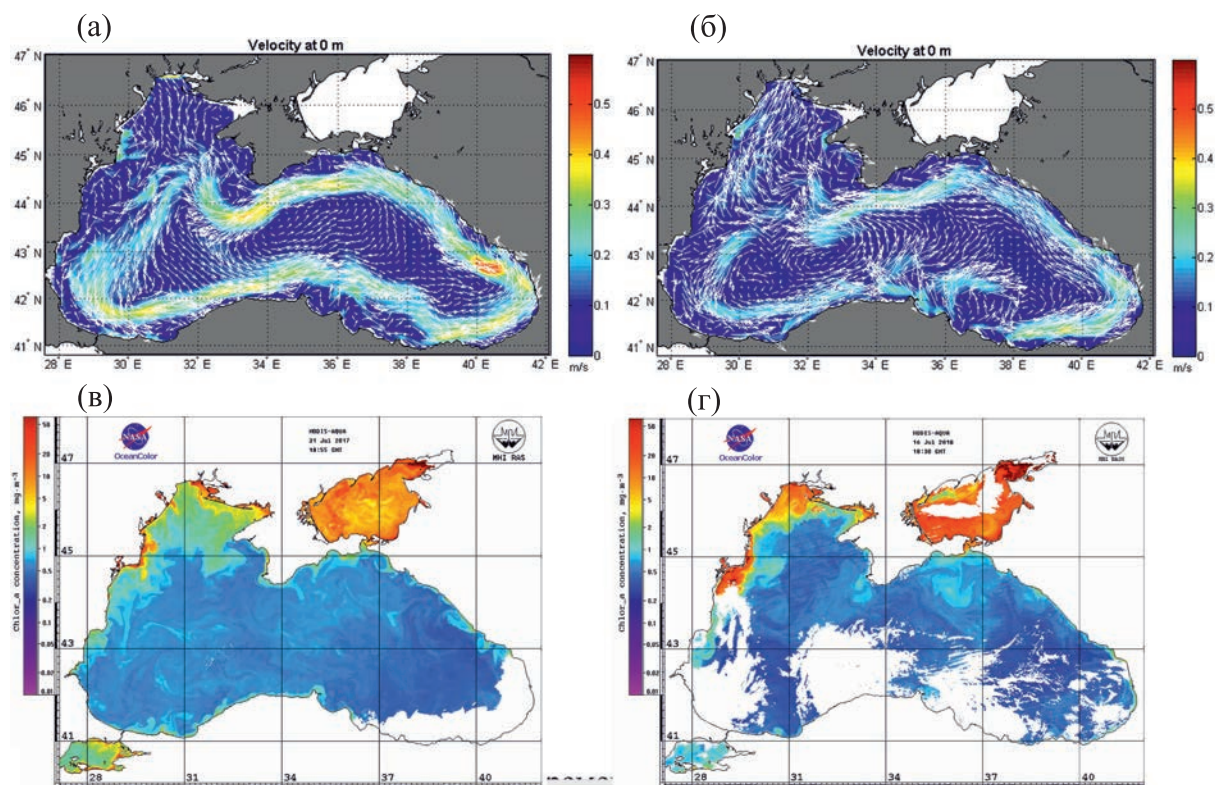


Рис. 4. Некоторые пространственно-временные характеристики биотопа пелагической экосистемы: направление и скорость геострофических течений в поверхностном слое: (а) — в декабре 2020 г., (б) — в июле 2020 г. (<https://deko-sim.ims.metu.edu.tr/BlackSeaModels/BlackSeaModels.shtml>); эпизоды распределения концентрации хлорофилла-а демонстрирующие поперечный массоперенос между шельфом и мористой частью: (в) — 31.07.2017 г., (г) — 16.07.2010 г.

представленные 42 видами с выявленной светимостью [25], среди которых наиболее интенсивным свечением обладает *Noctiluca scintillans* (Macartney) Kofoed & Swezy. Остальные виды светятся в 4–50 раз слабее, однако в связи с массовым развитием вносят основной вклад в суммарный эффект свечения (т.е. БП). Статистический анализ имеющихся измерений БП показал отсутствие тренда межгодовой изменчивости по среднегодовым данным (рис. 7; $S = -10$, $Z = 0.31$, $p = 0.18$).

Анализ межгодовой изменчивости биомассы зоопланктона основан на измерениях, выполненных в летнее время, поскольку поле биолюминесценции анализировали только по данным летних сборов. В этот период пробы зоопланктона в отдельные годы не отбирали, тем не менее, однотипные измерения биомассы зоопланктона в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» охватили период 2010–2021 гг. (рис. 8).

Желательные формы (медузы и гребневики) при обработке проб зоопланктона не учитывались. Основу его биомассы составлял так называемый кормовой зоопланктон (который является основой пищевого рациона мелких пелагических рыб). Статистический анализ показал отсутствие

тренда межгодовой изменчивости биомассы ($S = 10$, $p = 0.18$). В пробах, собранных в открытой части моря (за пределами 200-метровых глубин), две таксономические группы — копеподы и сагитты — составляли около 90% общей биомассы кормового зоопланктона.

Определенный интерес представляет собой многолетняя изменчивость структурно-функциональных соотношений, среди которых, одним из важных является отношение первичной продукции к биомассе кормового зоопланктона (Пп/Бз). Его интерпретируют как скорость оборота первичной продукции через зоопланктон [26, 27]. Оценке этого соотношения предшествовал расчет величин первичной продукции, который показал наличие двух периодов в ее многолетней динамике (рис. 8). Для первого периода (2002–2013 гг.), характерен монотонный ниспадающий тренд ($S = 39$, $Z = 2.96$, $p = 0.003$), для второго — стабилизация месячных колебаний первичной продукции и исчезновение ниспадающего тренда ($S = 11$, $p = 0.09$). Стабилизация первичной продукции приходится на 2014–2020-е годы. Большей частью этот период стабильности первичной продукции охватывает то время, в течение которого биомасса зоопланкто-

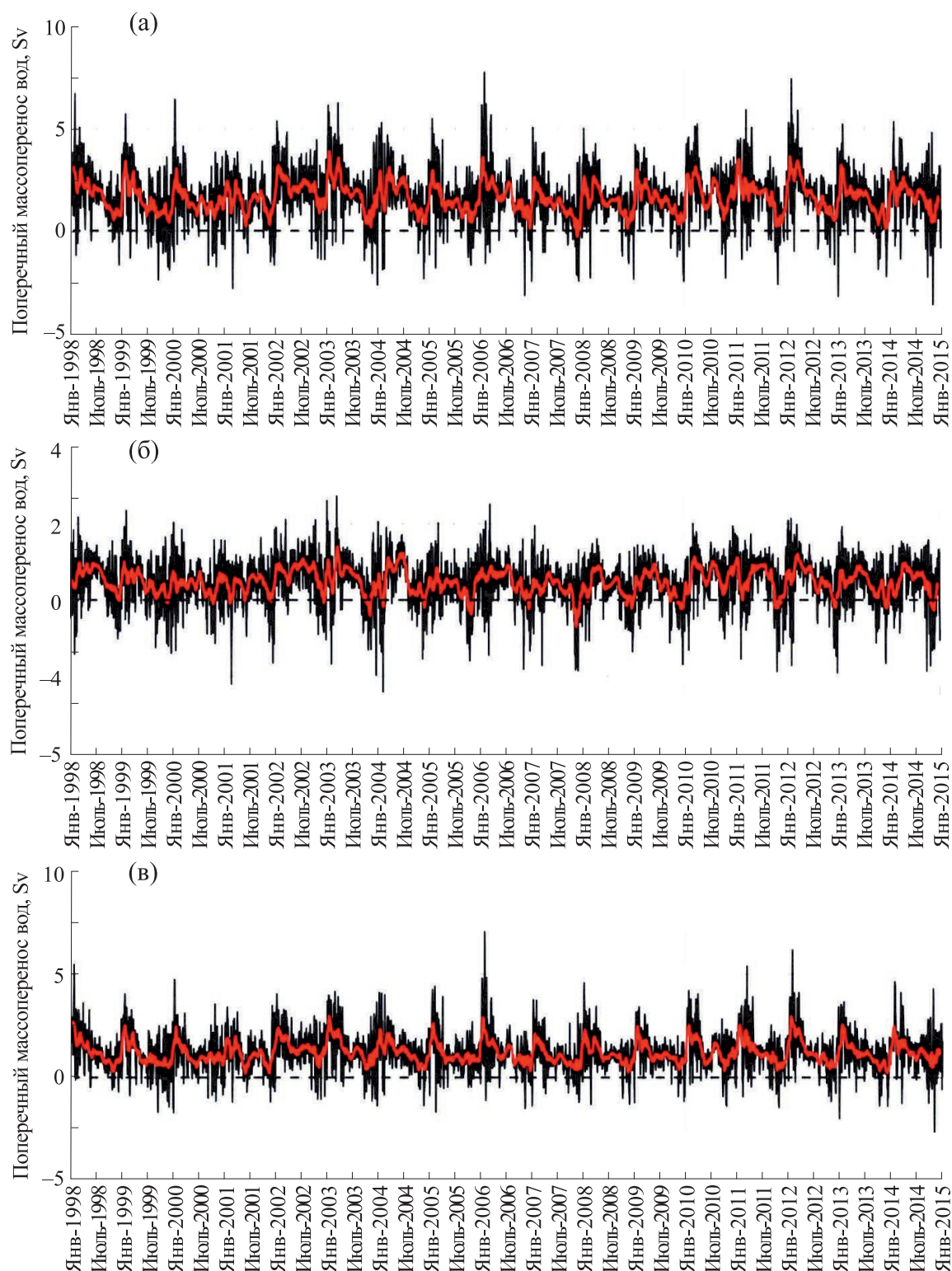


Рис. 5. Поперечный массоперенос вод (в свердрусах — Sv) в масштабе Черного моря. Положительные значения соответствуют массопереносу в направлении от шельфа в мористую часть, в слоях: (а) — 0–200 м, (б) — 0–50 м, (в) — 50–200 м. Серая кривая характеризует тренд, полученный методом скользящей средней с окном в 30 суток [12].

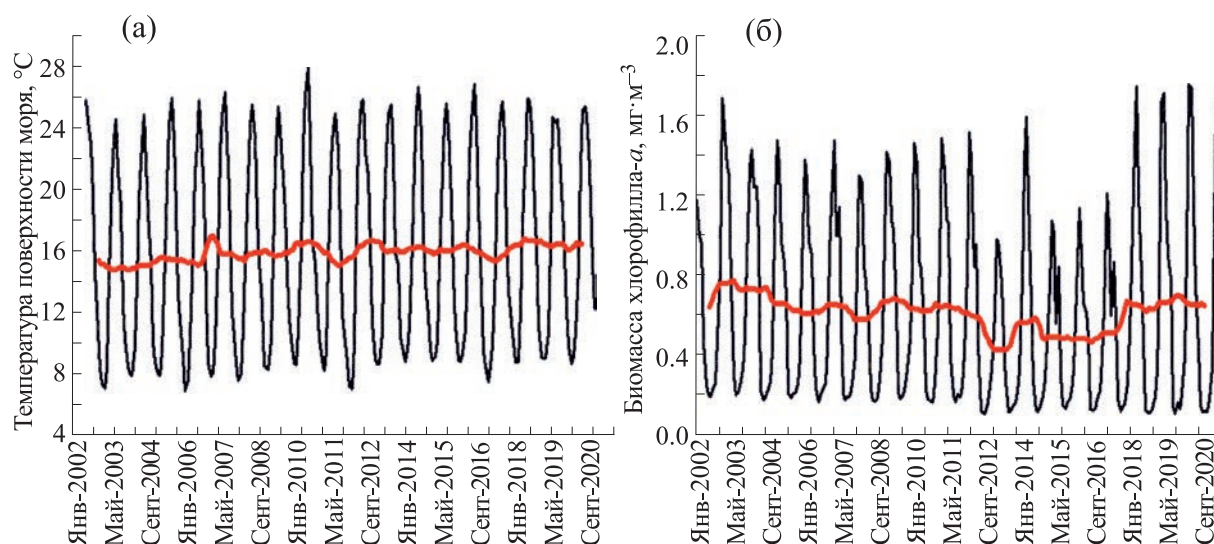


Рис. 6. Многолетняя изменчивость температуры поверхности моря (в °C) и биомассы хлорофилла-а (в мг·м⁻³) в указанном на рис. 1 координатном пространстве. Кривая тренда получена методом скользящей средней с окном в 12 месяцев.

на также достаточно постоянна (рис. 8). Расчет соотношения Пп/Бз (в единицах углерода) показал, что за прошедшее десятилетие (2010–2020 гг.), величина соотношения существенно не изменилась ($S = -6$, $p = 0.27$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты статистического анализа данных, представленных на рис. 3–8, показали отсутствие многолетних трендов, что можно считать характерным свойством состояния пелагической эко-

системы в начале XXI века в указанном регионе. С одной стороны, такая «фаза стабильности» может быть фрагментом нерегулярного характера динамических процессов в Черном море на масштабах межгодовой и декадной изменчивости, который был отмечен рядом исследователей [28–30]. С другой стороны, стабильность поперечного массопереноса вод (рис. 5) можно рассматривать как важную составляющую стабилизации многолетней изменчивости биомассы в эпипелагической экосистеме (рис. 7 и 9) в районах взаимодействия открытых и шельфовых вод. В крупномас-

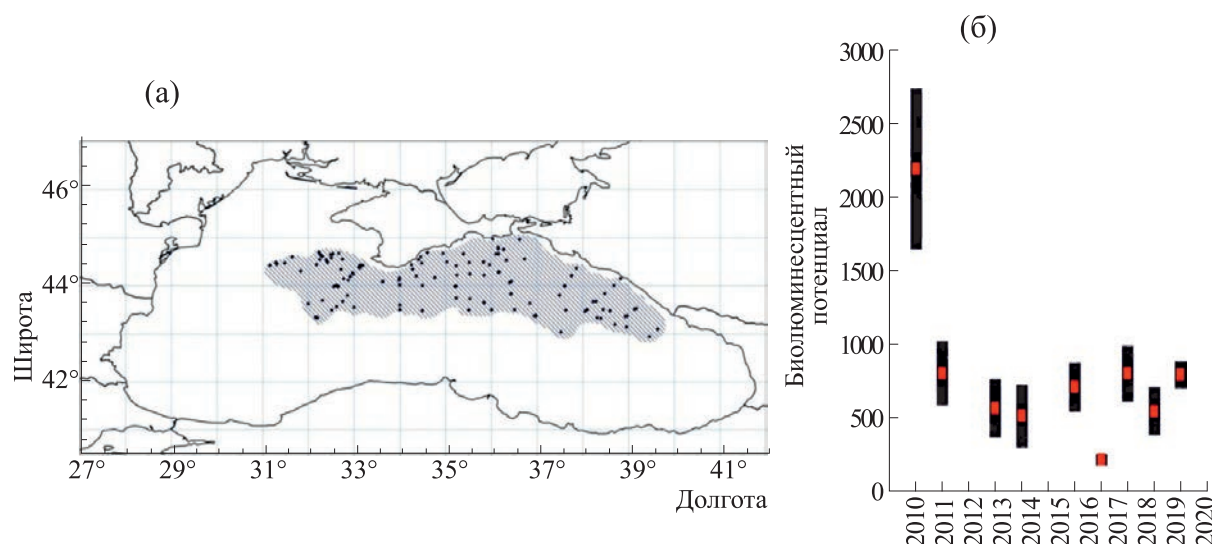


Рис. 7. Карта станций с батифотометрическими зондированиями (а), и осредненная для региона многолетняя изменчивость биолуминесцентного потенциала в слое 0–50 м (б). На рис. (б) серыми квадратами указаны средние величины, а вертикальными столбиками – 95%-е доверительные интервалы.

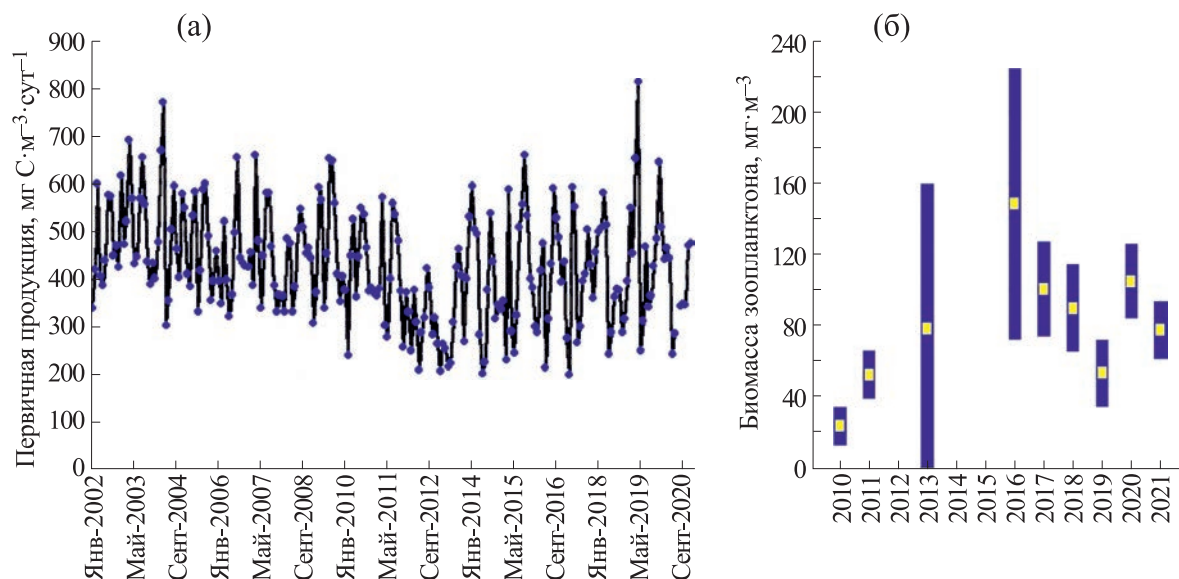


Рис. 8. Многолетняя изменчивость первичной продукции в эвфотическом слое в $\text{мг С} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ (а) и биомассы зоопланктона в $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (б) в открытых водах Черного моря в указанном на рис. 1 координатном пространстве. На рис. (б) серыми квадратами указаны средние величины, а вертикальными столбиками — 95%-е доверительные интервалы.

штабных круговоротах (западном и восточном), феномен поперечного массопереноса утрачивает свое влияние. Отсюда следует, что межгодовые тренды могут регионально различаться.

Для девяностых годов XX века (предыдущей фазы состояния) были характерны значительные изменения пелагической экосистемы северной части Черного моря; в частности, это касается видового состава, трофического пресса видов-вселенцев и антропогенной эвтрофикации [31, 32].

Как отмечено выше, при анализе многолетних трендов по отдельным регионам выявляется феномен их пространственной неоднородности, т.е. эти тренды могут качественно различаться — быть отрицательными, положительными либо «нулевыми». Наиболее масштабно это было показано на примере концентрации хлорофилла-*a* в мировом океане (https://marine.copernicus.eu/sites/default/files/wp-content/uploads/2020/02/GLOBAL_OMI_HEALTH_OceanColour_trend-hq.png). Выявленная нами фаза стабильности экосистемы также региональна, по характеру трендов. Проблема региональности климатической изменчивости гидрофизических характеристик Черного моря обсуждалась в литературе (см. [5] и др. работы).

В масштабах всего черноморского бассейна, наблюдается положительный тренд аномалий температуры поверхности (https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators/black-sea-surface-temperature-time-series-and-trend) и отрицательный тренд концентрации хлорофилла-*a* (https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators/black-sea-chlorophyll-

time-series-and-trend-observations). При этом в более обширной, чем исследованная нами акватория, глубоководной части моря статистически значимый тренд концентрации хлорофилла-*a* не выявлен за 18-летний период спутникового мониторинга (1998–2015 гг.) [11].

В структуре пелагической экосистемы Черного моря средний трофический уровень (зоопланктон) находится под воздействием мелких пелагических рыб среди которых хамса и шпрот доминируют по биомассе, и уловы которых могли бы служить (приблизительно) индикаторами этой наличной биомассы. Однако колебания последней обусловлены не столько природными факторами, сколько мощным антропогенным воздействием — хищническим промыслом [33] такого ресурса, как хамса, которая составляет около 75% всего рыбного промысла в исследованном регионе. Отсюда можно предположить, что интенсивное изъятие снижает трофический пресс мелких пелагических рыб на планктонное сообщество, и это наряду с другими факторами способствует формированию стабилизирующего эффекта в многолетней динамике биомассы зоопланктона (рис. 9).

В целом же современная экологическая ситуация, наблюдаемая в масштабах глубоководной части Черного моря, интересна в аспекте оценки устойчивости пелагической экосистемы: если многолетняя температура в поверхностных слоях растет, наряду с ростом теплозапаса во всем эвфотическом слое и солёности [34], плотностная (термогалинная) стратификация эвфотического слоя усиливается, концентрация кислорода в

аэробных слоях [35] и первичная продукция в поверхностном слое [11] снижаются, а биомасса продуцентов (т.е. фитопланктона) и консументов первого порядка (мезозoopланктона) достаточно постоянны (рис. 8), то где во времени находится тот порог, после которого наступят заметные изменения в структуре пелагического планктонно-го сообщества?

Нами показано, что в первых декадах XXI века в северной части моря эта структура находится в фазе относительной стабильности. Интересно, что при этом, биотоп планктонного сообщества (ОЧТ) подвержен значительным (30-процентным) межгодовым пульсациям скорости геострофического течения (т.е. скорости зонального массопереноса) на фоне возрастания этой скорости ($0.1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ за десятилетие), в 1993–2019 гг. [36].

ВЫВОДЫ

За прошедшие два десятилетия XXI века (2000–2020 гг.) после экологических катаклизмов 90-х годов прошлого столетия, связанных с эвтрофикацией и трофическим прессом планктонных вселенцев, пелагическая экосистема открытых вод северной части Черного моря вступила в фазу относительной стабильности своей структуры. Для этой фазы характерно отсутствие трендов межгодовой изменчивости по ряду ключевых структурных параметров ее идентифицирующих: биомассе фитопланктона, (оцененной по концентрации хлорофилла-*a*) и биомассе зоопланктона.

Поскольку в сложных системах структура предопределяет функцию, относительная стабильность биомассы предопределила отсутствие многолетних трендов в процессах, характеризующих функциональные свойства экосистемы, в частности, в первичной продукции, интенсивности биолюминесценции (биолюминесцентного потенциала планктонного сообщества), а также стабильность ключевых структурно-функциональных соотношений (таких как отношение первичной продукции к биомассе кормового зоопланктона).

БЛАГОДАРНОСТИ

Часть исследований была выполнена в Центре коллективного пользования НИС «Проф. Водяницкий» Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН».

Авторы благодарны Anil Akpınar (Middle East Technical University, Turkey), выполнившему расчеты и предоставившему данные по массопереносу вод.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-24-00007) и в рамках государственных заданий ФИЦ ИнБЮМ № 121040600178-6 «Структурно-функциональная организация, продуктивность и устойчивость морских пелагических экосистем» и № 121030100028-0 «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана», № 121041400077-1 «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом», а также ФИЦ МГИ FNNN-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы биологической продуктивности Черного моря (Наукова думка, Киев, 1979).
2. EMBLAS. *National Pilot Monitoring and Joint Open Sea Surveys in Georgia, Russian Federation and Ukraine, 2016. Final Scientific Report*, Ed. by Slobodnik et al. (EU, UNDP, 2017).
3. *State of the Environment of the Black Sea (2009-2014/5). Publications of the Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution BSC* (Istanbul, Turkey 2019).
4. T. Oguz, J. W. Dippner, and Z. Kaymaz, J. Marine Systems, **60**, 3–4 (2006).
5. Ю. В. Артамонов, Е. А. Скрипалева и А. В. Федирко, Метеорология и гидрология, **2** (2017).
6. А. А. Кубряков и С. В. Станичный, Океанология, **55**, 1 (2015).
7. A. V. Kovalev and S. A. Piontkovski, J. Plankton Res., **20**, 7 (1988).
8. A. Kovalev, U. Niermann, V. Melnikov, et al., in *Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea*, Ed. by L. I. Ivanov and T. Oguz (Kluwer Acad. Publ., 1998), vol. 1.
9. O. A. Yunev, V. I. Vedernikov, O. Basturk, et al., Marine Ecol. Progr. Ser., **230**, 11 (2002).

10. O. A. Yunev, J. Carstensen, S. Moncheva, et al., *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **74** (2007).
11. И. В. Ковалева, З. З. Финенко и В. В. Суслин, *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, **15**, 4 (2022).
12. A. Akpınar, E. Sadighrad, B. A. Fach, et al., *Remote Sensing*, **14** (2022).
13. В. Н. Белокопытов, Дис. ... д-ра геогр. наук (Морск. гидрофиз. инст., Севастополь, 2017).
14. Ю. Н. Токарев, *Основы биофизической экологии гидробионтов* («Экоси-Гидрофизика», Севастополь, 2003).
15. В. Н. Токарев, П. В. Евстигнеев и О. В. Машукова, *Планктонные биолуминесцентные мирового океана: видовое разнообразие, характеристики светового излучения в норме и при антропогенном воздействии* (Симферополь, 2016).
16. И. В. Ковалёва и В. В. Суслин, *Морской гидрофиз. журн.*, **38**, 4 (2022).
17. V. V. Suslin, and T. Ya. Churilova, *Int. J. Remote Sensing*, **37**, 18 (2016).
18. *Методика определения качественного и количественного состава зоопланктона* (Севастополь, СТП ИМБИ 020-2016, 2016).
19. Т. С. Петипа, *Труды Севастопольской биологич. станции*, **9** (1957).
20. Л. Л. Численко *Номограммы для определения веса водных организмов по размерам и форме тела (морской мезобентос и планктон)* (Наука, Ленинградское отделение, Л., 1968).
21. F. Wang, W. Shao, H. Yu, et al., *Front. Earth Sci.*, **8**, 14 (2020). DOI: 10.3389/feart.2020
22. A. G. Barnston and R. E. Livezey, *Monthly Weather Rev.*, **115** (1987).
23. В. А. Иванов и В. Н. Белокопытов, *Океанография Черного моря* (Морской гидрофизический институт, Севастополь, 2011).
24. P.-M. Poulain, R. Barbanti, S. Motyzhev, et al., *Deep-Sea Research I*, **52** (2005).
25. Э. П. Битюков, П. В. Евстигнеев и Ю. Н. Токарев, *Гидробиологич. журн.*, **29**, 4 (1993).
26. М. Е. Виноградов и Э. Л. Шушкина, *Функционирование планктонных сообществ эпипелагиали океана* (Наука, М., 1987).
27. Г. В. Зуев и С. А. Пионтковский, в сб. *Продуктивность экваториальной Атлантики*, под ред. Г. В. Зуева (Наукова думка, Киев, 1990).
28. A. I. Ginzburg, A. G. Kostianoy, and N. A. Sheremet, *J. Marine Systems*, **52** (2004).
29. T. Oguz, T. Cokacar, P. Malanotte-Rizzoli, et al., *Global Biogeochem. Cycles*, **17**, 3 (2003).
30. A. G. Zatsepin, N. N. Golenko, A. O. Korzh, et al., *Oceanology*, **47** (2007).
31. О. А. Юнев, С. К. Коновалов и В. Великова, *Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия* (ГЕОС, М., 2019).
32. T. Shiganova, E. Musaeva, E. Arashkevich, et al., *State of environmental Report 2001-2006/7. Corpus ID: 202591576, Chapter 6. The state of zooplankton. Environmental Science* (2012).
33. В. С. Латун, в сб.: *Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря*, под ред. В. Н. Еремеева и С. К. Коновалова (Морской гидрофизич. институт, Севастополь, 2012).
34. L. Lima, S. A. Ciliberti, A. Aydogdu, et al., *Front. Marine Sci.*, **8**, 710973 (2021).
35. А. В. Масевич и С. К. Коновалов, *Морской гидрофизич. журн.*, **38**, 1 (2022).
36. E. Peneva., E. Stanev, S. Ciliberti, et al., *J. Operational Oceanography*, **14** (sup. 1) (2021).

The Dynamics of Biophysical Characteristics of the Northern Black Sea Pelagic Ecosystem in the First Decades of the XXI Century

S.A. Piontkovski*, I.M. Serikova**, I.M. Minsky**, Yu.A. Zagorodnyaya**,
V.V. Suslin***, and I.V. Kovaleva**

*Sevastopol State University, Universitetskaya ul. 33, Sevastopol, 299053 Russia

**A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences,
prosp. Nakhimova 2, Sevastopol, 299011 Russia

***Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 2 Kapitanskaya ul. 2, Sevastopol, 299002 Russia

Wind speed, sea surface temperature chlorophyll-a concentration (satellite data such MODIS-Aqua/Terra), bioluminescence intensity and zooplankton biomass (data from the research vessel), the value of fish traded, the indices of lower-than-normal atmospheric pressure and water mass transfer (model calculations) are the factors used to estimate a modern state of the pelagic ecosystem and its functional characteristics. It has been shown that, in the last two decades (2000–2020), after natural cataclysms associated with eutrophication and trophic stress of invasive plankton species in the 1990s, the ecosystem of the open areas in the northern portion of the Black sea has reached a state of relative stability in its structure and functioning. This state is characterized by the absence of changes in the interannual variability of the factors particular for it. Concepts are discussed which concern regional differences in physical factors and biological interactions over many years.

Keywords: Black Sea, chlorophyll-a, zooplankton, bioluminescence, plankton