
**БИОРАЗНООБРАЗИЕ ЭКОСИСТЕМ
И ЕГО СОХРАНЕНИЕ**

УДК [551.463-043.7:581.526.325]”450”(262.5)

DOI: [10.21072/eco.2023.27.01](https://doi.org/10.21072/eco.2023.27.01)

**МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ, ХЛОРОФИЛЛА А
И ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ СЕВАСТОПОЛЯ ***

**Минский И. А.¹, Серикова И. М.¹, Жук В. Ф.¹, Пионтковский С. А.²,
Евстигнеев В. П.², Суслин В. В.³**

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: ivansimfer@yandex.ru

²Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация,

³Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Российская Федерация.

Аннотация: На основе батифотометрических зондирований 60-метрового слоя с борта научно-исследовательского судна и спутниковых наблюдений, полученных с помощью трёх оптических сканеров SeaWiFS, MODIS Aqua/Terra и AVHRR Pathfinder, исследованы межгодовые изменения интенсивности стимулированной биолюминесценции, концентрации хлорофилла *a* и температуры воды в прибрежных водах г. Севастополя с 2008 по 2014 г. Выявлено уменьшение биолюминесцентного потенциала и концентрации хлорофилла *a* приповерхностного слоя на фоне стабильной температуры поверхности моря и средней температуры в слое 0–60 м.

Ключевые слова: биолюминесценция, температура, хлорофилл *a*, межгодовая изменчивость.

Введение

Известно, что межгодовая изменчивость природных факторов (температура, солёность, плотность, концентрация биогенных соединений, pH, содержание кислорода, интенсивность и меандрирование течений, турбулентность и др.) влияет на сезонную и межгодовую изменчивость структурных и функциональных характеристик прибрежных пелагических экосистем в различных районах Мирового океана [Belkin, 2009; Юнев, 2020]. На больших пространственно-временных масштабах изменчивость экосистемы модулируется глобальным потеплением и нарастающим антропогенным воздействием [Richardson, 2008].

В региональном аспекте многолетней изменчивости структурно-функциональных показателей прибрежных экосистем Чёрного моря посвящён ряд обобщений [Стельмах, Мансурова, 2020; Yunev et al., 2022; Финенко, Мансурова, Суслин, 2022]. В частности, показано, что в 70–80-х годах прошлого столетия поступление азота и фосфора на черноморский

*Работа выполнена в рамках тем государственных заданий: ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ №121040600178-6 «Структурно-функциональная организация, продуктивность и устойчивость морских пелагических экосистем», ФГБУН 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», а также при поддержке Российского научного фонда (проект СевГУ № 23-24-00007).

Проведённые исследования были выполнены в Центре коллективного пользования «НИС «Профессор Водяницкий» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН».

шельф, главным образом с речным стоком, приводило к увеличению первичной продукции и, соответственно, увеличению биомассы фитопланктона. Во второй половине 80-х и начале 90-х годов концентрации фосфатов и нитратов, поступающих с речным стоком, стабилизировались, но продолжился рост биомассы фитопланктона за счёт поступления в эвфотический слой биогенных веществ из донных отложений, накопленных за предыдущий период [Юнев, 2020], т. е. прибрежная экосистема одновременно не отреагировала на стабилизацию эвтрофикации.

За последние три десятилетия на фоне положительного тренда температуры воды отмечено заметное увеличение теплозапаса водных масс и ослабление вертикальных градиентов температуры, в том числе в области холодного промежуточного слоя, являющегося характерной гидрофизической особенностью Чёрного моря [Lima et al., 2021; Иванов, Белокопытов, 2011]. В то же время формирование выраженного сезонного термоклина в летний период препятствует поступлению биогенов из низлежащих слоёв к поверхности моря и, как следствие, приводит к ослаблению развития фитопланктонного сообщества [Стельмах, 2019]. Анализ региональной динамики состояния фитопланктона за последние годы показал присутствие достоверных отрицательных трендов концентрации хлорофилла *a* и продукции фитопланктона в некоторых районах шельфовой зоны, причём снижение первичной продукции выражено сильнее, чем концентрации хлорофилла [Финенко, Мансурова, Суслин, 2022; Ковалёва, Финенко, Суслин, 2022; Yunev et al., 2022].

Одним из индикаторов структуры и развития планктонного сообщества является биолюминесцентный потенциал (БП). В Чёрном море основной вклад в его формирование вносят динофитовые водоросли. Цель наших исследований состояла в выявлении тенденций межгодовой изменчивости БП в прибрежных водах в районе Севастополя и сопоставлении трендов межгодовой изменчивости БП, биомассы хлорофилла *a* и температуры.

Материал и методы

Материал был собран в ходе ежемесячного биофизического мониторинга (январь 2008 г. — декабрь 2014 г.) на стандартной станции (44°38'N, 33°27'E), расположенной в двух милях от берега, напротив б. Круглой (г. Севастополь) (рис. 1).



Рис. 1. Место проведения ежемесячного биофизического мониторинга в районе г. Севастополя (2008–2014 гг.)

Пространственно-временные характеристики поля биолюминесценции регистрировались с помощью гидробиофизического приборного комплекса (ГПК) «Сальпа-М». Используемый комплекс позволяет проводить синхронные измерения механически стимулированной биолюминесценции планктонных организмов (в диапазоне $10^{-13} \div 10^{-8}$ Вт·см²·л), а также гидростатического давления, температуры, электропроводности, мутности и фотосинтетически активной радиации в режиме вертикального зондирования. При погружении прибора в водную толщу со скоростью $1,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ дискретность измерения характеристик по глубине составляет около 20 см.

Регистрация информации по интерфейсу RS-232 выполняется на персональном компьютере. Методика сбора и обработки информации и технические характеристики ГПК «Сальпа-М» детально описаны ранее [Токарев, 2006] (<http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/complex-salpa-gbf>).

В результате обработки сигналов датчиков строились профили биолюминесценции, температуры, солёности и условной плотности с осреднёнными показаниями по глубине через каждый метр. Вертикальные зондирования ГПК «Сальпа-М» производились в ночной период в верхнем 60-метровом слое. Интенсивность поля биолюминесценции, измеренная в ночной период, служит индикатором обилия светящихся планктонных организмов. Биолюминесцентный потенциал — это максимальное количество лучистой энергии, излучаемой в данном объёме воды механически стимулированными планктонными организмами [Токарев, 2006], которое оценивается как $БП = \int B(t)dt$, где $B(t)$ — интенсивность свечения во время биолюминесцентной вспышки (Δt).

При анализе межгодовых трендов температуры поверхности моря (ТПМ) и хлорофилла a были использованы спутниковые продукты, полученные по данным измерений с помощью оптических сканеров AVHRR Pathfinder (<https://www.ncei.noaa.gov/products/avhrr-pathfinder-sst>), SeaWiFS и MODIS-Aqua/Terra (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). По данным спутниковых наблюдений рассчитывались среднемесячные (а затем среднесезонные и среднегодовые) значения ТПМ (T_0) и концентрации хлорофилла a , осреднённые для района проведения мониторинга на ст. 1 (рис. 1).

Временная серия среднемесячных значений концентрации хлорофилла a проходила коррекцию для разделения фракций хлорофилла и растворённого окрашенного вещества. Расчёт производился на основе регионального алгоритма Морского гидрофизического института РАН [Suslin, Churilova, 2016] для Чёрного моря с использованием коэффициента яркости моря в трёх спектральных каналах, который наиболее точно восстанавливает концентрацию хлорофилла a , что показано в работе [Суслин и др., 2018].

При статистической обработке данных использовались программные продукты RStudio и PASTv.13. В частности, для проверки статистической значимости наличия или отсутствия монотонного межгодового тренда во временных сериях параметров использовался непараметрический критерий Манна — Кендалла, применяемый при 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 $a = 0,1$). Таким образом, при p -значении теста ниже принятого уровня значимости во временной серии присутствует монотонный тренд.

Результаты

Анализируемый нами БП характеризует межгодовую и сезонную изменчивости средней интенсивности поля биолюминесценции 60-метрового слоя. Очевидно, что при таком подходе вертикальная неоднородность водной массы и всех её физико-биологических параметров сглажена и представлена их средними значениями. При этом основной вклад в осреднённые оценки параметров вносят заглублённые максимумы. В шельфовых водах Крыма эти максимумы лежат в пределах 60-метрового слоя. В качестве примера на рисунке 2 приведены типичные вертикальные профили БП, температуры и условной плотности для восьми месяцев 2014 г. Представленная сезонная изменчивость интегральных характеристик и вертикальной структуры поля биолюминесценции в верхнем деятельном слое моря в основном определяется динамикой биомассы и изменением видового состава светящихся динофлагеллят, представленных 38 видами, которые вносят основной вклад в поле биолюминесценции в фотическом слое Чёрного моря [Битюков, Евстигнеев, Токарев, 1993; Серикова, Брянцева, Василенко, 2013].

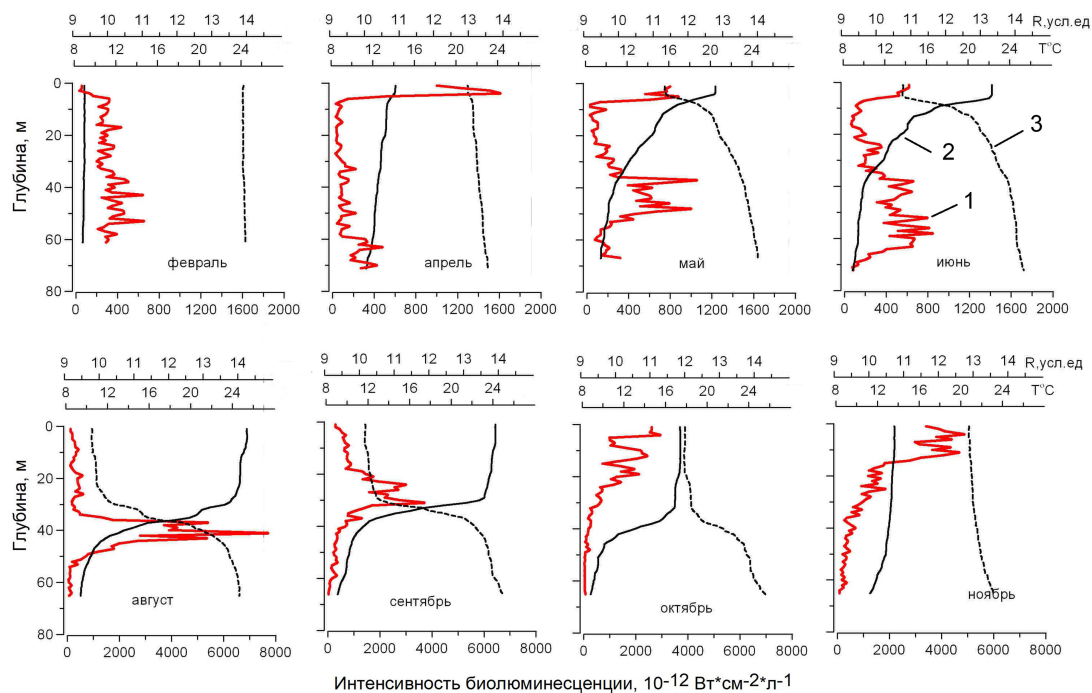


Рис. 2. Вертикальная структура биолюминесцентного потенциала (1 — красная линия), температуры (2 — черная сплошная линия) и условной плотности воды (3 — черная пунктирная линия) в годовом цикле в 2014 г. на ст. 1

Соответственно динамике развития динофитовых водорослей сезонная изменчивость БП в верхних слоях имела два максимума в весенний и осенний периоды (рис. 3). Следует отметить, что изменения количественных характеристик и видового состава фитопланктона зависят от температурных условий предыдущего осенне-зимнего периода [Маштакова, Роухияйнен, 1979; Evstigneev et al., 2023]. В нашем случае в «тёплые» годы (2010 и 2013 гг.) наибольшим развитием среди динофлагеллят отличались виды рода *Prorocentrum*: *P. aporum* (Schiller) Dodge, *P. micans* Ehrenberg, *P. cordatum* (Ostenfeld) Dodge и самый мелкоклеточный светящийся вид — *Scrippsiella acuminata* (Ehrenberg) Kretschmann, Elbrächter, Zinssmeister, S. Soehner, Kirsch, Kusber & Gottschling, достигший максимальной биомассы в апреле 2010 г. [Брянцева, 2021].

В годы с «умеренным» предшествующим осенне-зимним периодом (2009 и 2011 гг.) наибольшего развития и видового разнообразия (28 видов) динофлагелляты достигали в мае, максимумы биомассы при этом составили 105,7 и 108,6 мг·м³ соответственно. Доминировал в этот период *P. micans* (65,3 и 25,4 мг·м³), а среди светящихся форм — *S. acuminata* (23,9 мг·м³). В эти годы также на май приходились весенние максимумы БП в верхних слоях. В «холодные» годы (2012 и 2014 гг.) из фитоценоза весеннего фитопланктона выпал целый ряд видов динофитовых, среди которых мелкоклеточный светящийся вид *S. acuminata*, который в большей степени обуславливает развитие весеннего максимума поля биолюминесценции [Брянцева, 2021].

За весь период исследований различия между минимальными и максимальными значениями БП могли варьировать от одного до трёх порядков. Сезонные максимумы БП, зарегистрированные в разные годы, могли смещаться на один-два месяца, что определялось температурными условиями и временем наступления соответствующего сезона, однако в большинстве случаев они приходились на май и ноябрь (рис. 3). Таким образом, выделялась полугодовая периодичность в процессе развития поля биолюминесценции и, соответственно, сообщества динофитовых водорослей в верхних слоях.

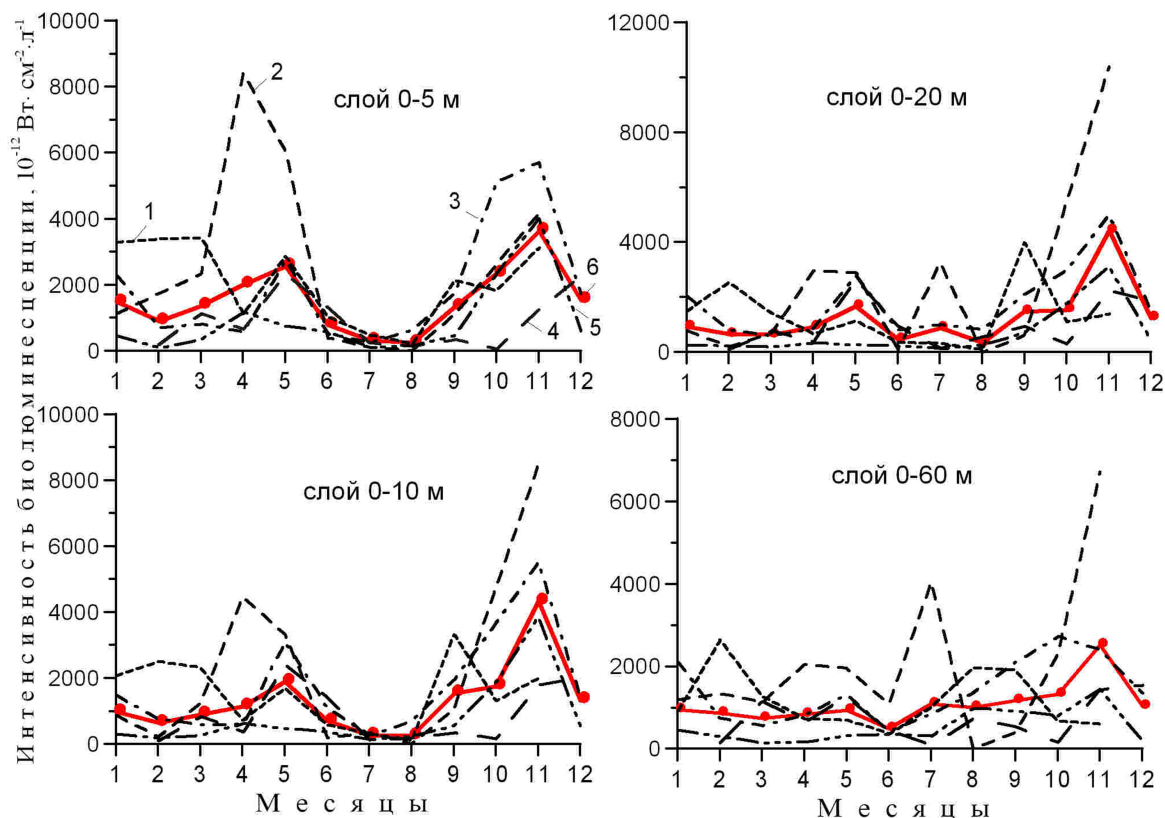


Рис. 3. Сезонная изменчивость среднего уровня биолуминесцентного потенциала в слоях разной протяжённости в 2009 (1 — мелкий пунктир), 2010 (2 — средний пунктир), 2011 (3 — пунктир с точкой), 2013 (4 — крупный пунктир) и 2014 (5 — пунктир с тремя точками) годах и осреднённый его сезонный ход за все годы (6 — красная линия)

В более широких слоях, охватывающих слой термоклина и нижележащие слои, не наблюдается такой строгой полугодовой периодичности в сезонной динамике развития поля биолуминесценции (рис. 3). Это связано с тем, что в июне — июле наступает период летней стагнации в развитии фитопланктона в верхнем перемешанном слое (ВПС) и усиливается его развитие в термокline и нижележащих слоях [Серикова, Брянцева, Василенко, 2013], в связи с чем максимум в вертикальных профилях биолуминесценции заглубляется, хотя может достигать довольно высокой интенсивности (рис. 2).

Сезонная изменчивость БП в поверхностных водах прибрежных акваторий отличается от таковой концентрации хлорофилла *a* и рассчитанной по её показателям биомассы фитопланктона, максимумы которой зарегистрированы в зимний и ранний весенний периоды [Финенко, Мансурова, Суслин, 2022]. Однако в расчёте биомассы фитопланктона по соответствующей методике не учитываются гетеротрофы, вносящие основной вклад в генерирование поля биолуминесценции. Различие в сезонном ходе БП и хлорофилла *a* в поверхностных водах связано с сезонной сукцессией фитопланктона. Детально сезонная сукцессия фитопланктона в районе наших исследований была описана ранее [Брянцева, 2021]. В целом же для всего периода наблюдений в сукцессии хорошо различимы две фазы — длительная весенне-летняя и более короткая осенне-зимняя. Каждая начинается с интенсивного развития диатомовых водорослей, а затем динофлагеллят. Замещение диатомей, чувствительных к снабжению биогенными элементами, перидиниями, большинство из которых способны к гетеротрофии, характерно для весенне-летней фазы сукцессии. Таким образом, в расчёте биомассы суммарного фитопланктона по биофизическим параметрам, помимо концентрации хлорофилла *a*, следовало бы учитывать величину БП.

В верхнем 60-метровом слое максимальный уровень поля биоломинесценции был зарегистрирован в летние месяцы с 2009 по 2011 г., за которым следовало его снижение (рис. 4). В то же время как раз на летний период приходились минимумы концентрации хлорофилла *a*.

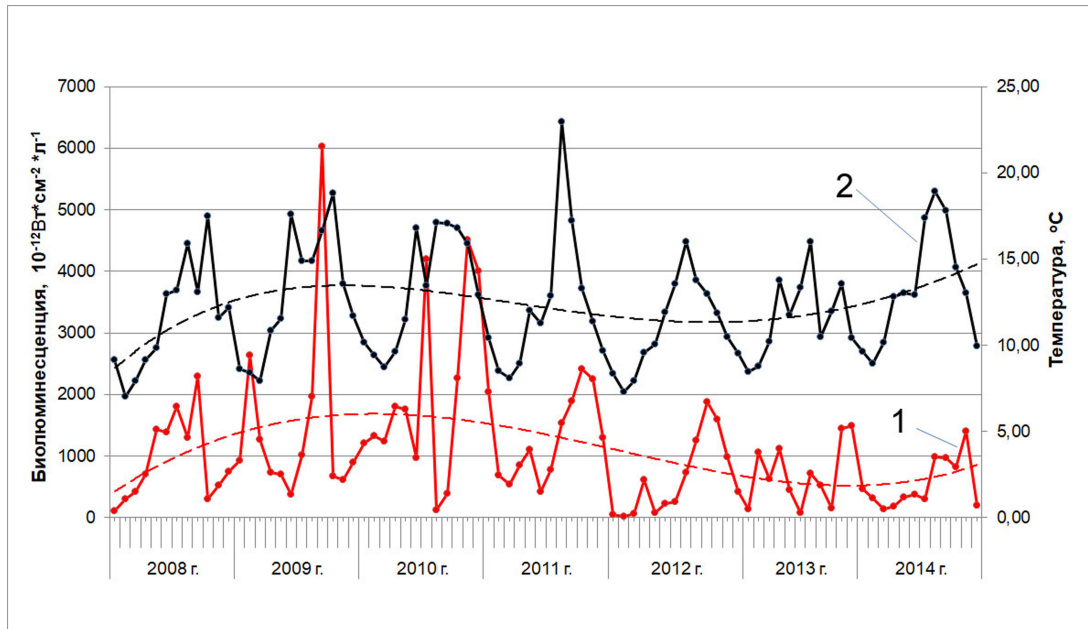


Рис. 4. Межгодовая изменчивость среднего уровня биоломинесцентного потенциала (1) и средней температуры (2) в слое 0–60 м и тренды изменчивости этих параметров (пунктирные линии)

Трёхкратное снижение среднего уровня БП ($БП_{0-60}$) наблюдалось со второй половины 2011 г., что, возможно, было связано с резкими изменениями температуры водной толщи (T_{0-60}). Так, необычно высокий прогрев верхней 60-метровой толщи наблюдался в августе 2011 г. (до $22,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), превысив показатели других лет более чем на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в октябре 2011 г. температура снизилась до $13,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, оказавшись на несколько градусов ниже относительно предшествующих лет. Резкое понижение температуры вплоть до февраля 2012 г., когда была зарегистрирована максимальная отрицательная температурная аномалия как во всей толще, так и у поверхности моря ($dT = 1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) [Serikova et al., 2016], привело к перестройке видового состава и функционального состояния планктонного сообщества, что сказалось на интенсивности поля биоломинесценции в последующий весенне-летний период.

На рисунке 4 приведены сглаженные тренды изменчивости параметров $БП_{0-60}$ и T_{0-60} полиномом 4-й степени (пунктирные линии). Очевидна синхронность хода кривых изменчивости этих параметров с января 2008 г. по декабрь 2014 г., связь между которыми подтверждается на уровне значимости $p = 0,001$, $r^2 = 0,77$. В то же время заметно расхождение трендов с 2013 г.: если сглаженная кривая температуры выходит на прежний уровень и затем превышает его, то тренд изменчивости БП практически снижается до минимального уровня. При этом рассчитанный линейный тренд температуры за весь период наблюдений отсутствует (по критерию Манна — Кендалла: $S = 186$, $Z = 0,89$, $p = 0,37$), а для БП он оказывается отрицательным ($S = -554$, $Z = -2,68$, $p = 0,007$).

В многолетних временных сериях среднемесячных величин биомассы хлорофилла *a* тенденция межгодовой изменчивости малозаметна на фоне сезонной, которая является основной составляющей её динамики (рис. 5).

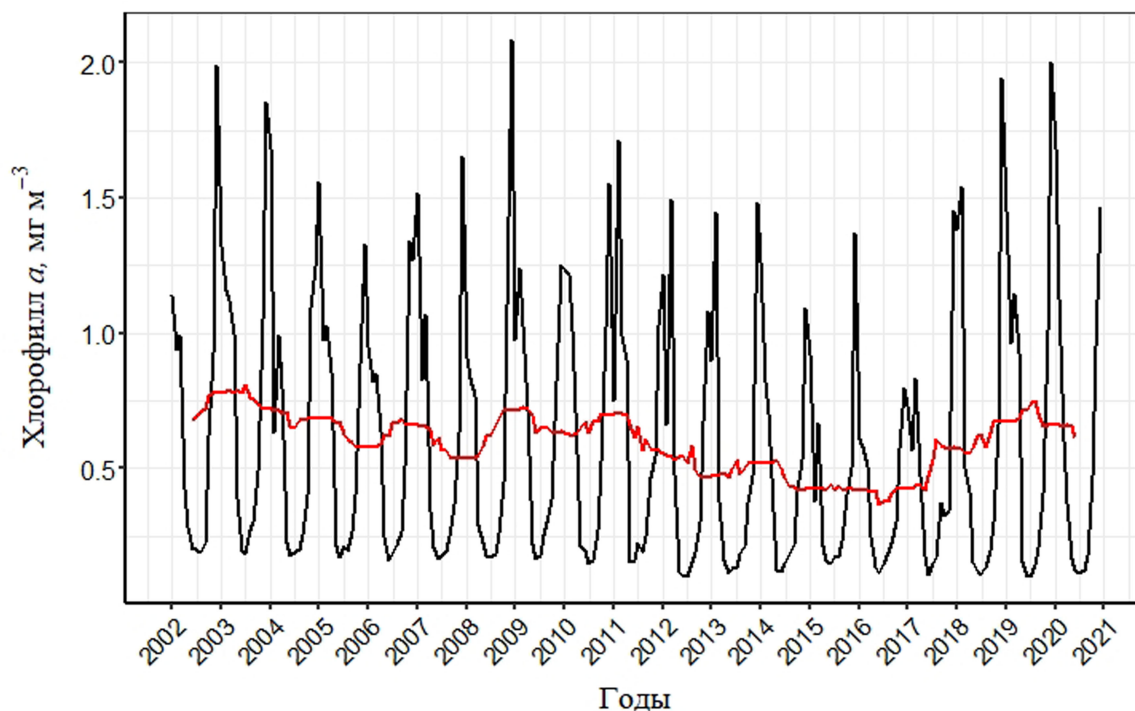


Рис. 5. Многолетняя изменчивость концентрации хлорофилла *a* на ст. 1. Красная кривая показывает тренд, полученный методом скользящего среднего с окном 12 месяцев

Нижние экстремумы сезонных циклов концентрации хлорофилла *a* 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 осреднении сезонной компоненты методом скользящего среднего с окном 12 месяцев (красная линия на рис. 5) количественные показатели концентрации хлорофилла *a* также показали существенный ниспадающий тренд как для предыдущего 20-летнего периода: ($S = -8491$, $Z = -8,36$, $p = 2,2 \cdot 10^{-16}$), так и для периода с 2008 по 2014 г. ($S = -1889$, $Z = -7,29$, $p = 3 \cdot 10^{-13}$).

Проверка значимости трендов по средним годовым показателям концентрации хлорофилла *a* в такие же временные интервалы показала значимые отрицательные тренды на уровне $p \leq 0,004$. При этом если в зимний период не отмечено достоверных трендов ($S = -22$, $Z = -0,73$, $p = 0,46$), то летом они были существенными ниспадающими ($S = -108$, $Z = -3,7$, $p = 10^{-4}$).

Обсуждение результатов

Схожие результаты по межсезонным показателям биомассы фитопланктона у берегов Крыма и Кавказа были получены Финенко З. З. с соавторами [Финенко, Мансурова, Суслин, 2022] за период 1998–2015 гг., которые наблюдали отрицательный достоверный тренд ($p \leq 0,06$) в летний период и его отсутствие зимой.

Для отдельных районов Севастопольского побережья [Стельмах, Мансурова, 2020] приводятся результаты, показывающие снижение концентрации хлорофилла *a* и биомассы фитопланктона в летний сезон в 2000–2014 гг. Анализ проб фитопланктона показал снижение доли диатомовых и, соответственно, увеличение динофитовых в общей биомассе фитопланктона.

В области крымского шельфа по данным спутниковых наблюдений, скорректированных на флуориметрические измерения содержания хлорофилла *a* и органического углерода в клетках

микроводорослей, было выявлено снижение биомассы фитопланктона ($r = 0,85$, $p < 0,0001$) в течение 20-летнего периода с конца 90-х годов [Yunev et al., 2022; Stelmakh, Gorbunova, 2018]. К основным факторам, вызывающим снижение биомассы фитопланктона, авторы относят как негативное влияние повышения температуры, отразившееся на скорости роста диатомовых водорослей, так и снижение концентраций критически важных для диатомовых водорослей нитратов и кремния. Отрицательное воздействие повышения температуры также проявляется в усилении летней термохалинной стратификации и, как следствие, ослаблении притока биогенов к верхним слоям обитания водорослей. Кроме того, в период с 2010 по 2014 г. наблюдалось повышенное образование соединений аммонийного азота, которое подавляет усвоение микроводорослями и без того дефицитных нитратов.

Различие «зимних» и «летних» трендов косвенно указывает на различие таксономического состава фитопланктонного сообщества, которое обусловлено разными фазами и стадиями его сукцессии [Брянцева, 2021]. В первой половине года в большинстве случаев в феврале доминировала I стадия, в марте — II, в мае — июне — III; завершающая стадия доминировала в августе. Первая и вторая стадии сукцессии характеризуются развитием мелких (< 1000 мкм³), а затем крупных (> 1000 мкм³) диатомовых водорослей, третья стадия — комплексов видов динофитовых [Виноградова, Маштакова, Дерзюк, 1986]. При этом в зависимости от температурных условий года доминировали те или иные комплексы. На завершающей стадии доминирующими становятся представители прочих таксонов, главным образом примезиевых водорослей, представленных преимущественно *Emiliana huxley* (Lohmann) Hay & Mohler.

Среди месяцев выделяются самые показательные, когда на протяжении всего периода исследований стадии развития фитопланктона совпадали. Так, в мае — июне почти всегда отмечается III стадия, за исключением 2012 г., когда происходило прерывание сукцессии и возвращение групп на ранние стадии развития. В июле всегда доминировала II стадия в результате развития «вредоносных» диатомовых видов — *Proboscia alata* (Brightwell) Sundström и *Pseudosolenia calcaravis* (Schultze) Sundström, которые не достигали высокой численности, но имели максимальную биомассу [Брянцева, 2021].

Существенным фактором является поступление биогенов, интенсивность которого в летний период снижается по мере выстраивания сезонного термоклина, а в зимний период, наоборот, усиливается за счёт интенсивного конвективного перемешивания.

Период смены стадий совпадает с формированием сезонного термоклина и перестройкой термохалинной структуры на летний тип. Осенняя «вспышка» (в сентябре) диатомовых I и II стадий также связана с началом разрушения сезонного термоклина, которая в октябре — ноябре завершается доминированием динофлагеллят (III стадия) [Брянцева, 2021].

Таким образом, различия в сезонной динамике концентрации хлорофилла *a* и БП можно объяснить чередованием фаз и стадий развития доминирующих по биомассе таксонов фитопланктона.

Первостепенным фактором в развитии фитопланктона, обитающего большей частью в верхнем слое фотосинтеза (в среднем до 34–37 м) [Финенко, Мансурова, Суслин, 2022], является температура поверхности Чёрного моря (ТПМ). Особенностью вод Чёрного моря является различие характера изменчивости теплозапаса в верхнем 50-метровом и более глубинном слое. В верхнем слое моря хорошо выражены декадные колебания температуры, в то время как в глубинных слоях достаточно чётко проявляется монотонный тренд, характеризующий нагревание, модулируемое средиземноморскими водами, поступающими через Босфорский пролив [Lima et al., 2021].

Многолетняя изменчивость температуры поверхности Чёрного моря характеризуется постепенным увеличением в последние три десятилетия (рис. 6).

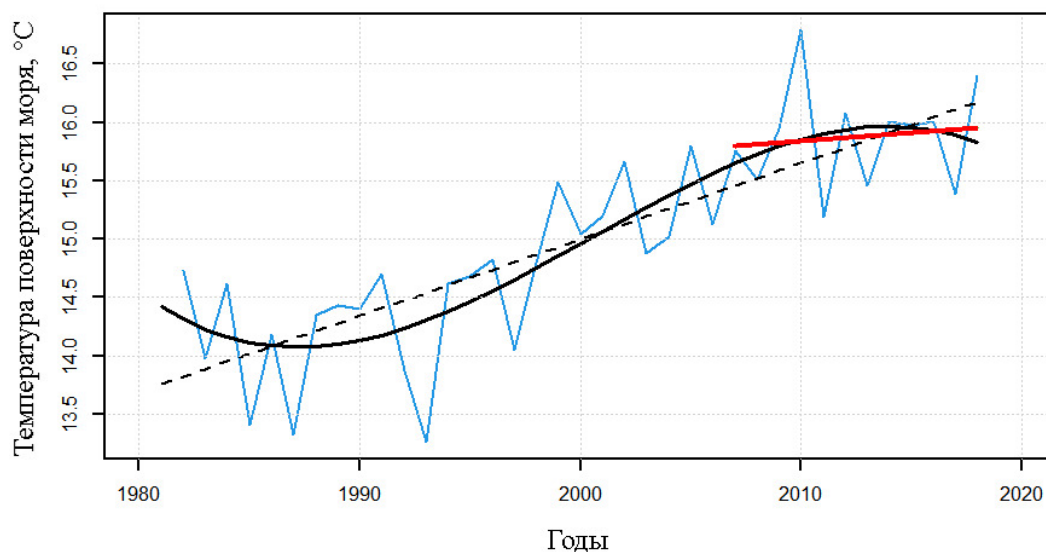


Рис. 6. Многолетняя изменчивость средней температуры поверхности Чёрного моря (ТПМ) за период 1982–2018 гг., сопровождаемая линейной (штриховая линия) и полиномиальной 3-й степени (сплошная линия) аппроксимациями. Красная линия характеризует линейный тренд, рассчитанный для 2007–2018 гг.

Согласно данным AVHRR Pathfinder (1982–2021 гг.) средняя скорость потепления ТПМ в масштабе Черноморского бассейна составляет $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие ($p < 0,001$). Считается, что интенсивный нагрев Чёрного моря вызывает более выраженные погодные аномалии в регионе, что, в свою очередь, может повлиять на прибрежную морскую экосистему. Тренд ТПМ может быть аппроксимирован линейной функцией с возрастающим трендом (по критерию Манна — Кендалла: $S = 56$, $Z = 2,28$, $p = 0,02$), но более точно его можно описать полиномом 3-й степени, как показано на рисунке 6. Следует отметить интересную особенность последнего десятилетия — квазистабильную изменчивость среднегодовой ТПМ. Частичный линейный тренд (см. красную линию на рис. 6), рассчитанный только для последних лет (2007–2018 гг.), становится незначимым ($S = 13$, $Z = 0,82$, $p = 0,41$). Следовательно, период с 2007 г. можно считать квазистабильным.

Таким образом, в прибрежных водах Севастополя в период с 2008 по 2014 г. выявлено уменьшение БП в верхнем 60-метровом слое и биомассы хлорофилла *a* в приповерхностном слое на фоне установившегося периода квазистабильности межгодовой ТПМ и средней температуры в слое 0–60 м. В то же время большую роль на развитие планктонного сообщества играет сезонная динамика ТПМ и особенности её режима в осенне-зимний период [Маштакова, Роухияйнен, 1979; Mikaelyan et al., 2018]. В связи с тем что на заключительном этапе мониторинга (в 2012 и 2014 гг.) зимние периоды были наиболее холодными, это отразилось на развитии отдельных видов биолюминесцентных организмов. Так, в «холодные» годы отмечалось слабое развитие динофитовых, как светящихся, так и несветящихся форм, из фитоценоза выпали виды: *Lingulodinium polyedra* (Stein) Dodge, *Tripos muelleri* Bory de Saint-Vincent, *Protoperidinium depressum* (Bailey) Balech, *Protoperidinium crassipes* (Kofoid) Balech. На начальном же этапе работ на полигоне (особенно 2009–2010 гг.) зимние температурные условия были либо «умеренными», либо «тёплыми», что положительно сказалось на развитии светящихся динофлагеллят и фитопланктона в целом. Такой вид, как *S. acuminata*, дающий основной вклад в развитие весеннего пика биолюминесценции, в мае 2010 г. по биомассе в 69 раз превосходил таковой в другие года [Брянцева, 2021].

Выводы

Полученные оценки межгодовой изменчивости концентрации фитопланктона (по дистанционным зондированиям) и поля биолюминесценции (по контактными измерениям) выявили их ниспадающие тренды за семилетний период (2008–2014 гг.) на фоне относительно стабильной температуры поверхностного слоя в прибрежных водах г. Севастополя.

Список литературы

1. Битюков Э. П., Евстигнеев П. В., Токарев Ю. Н. Светящиеся Dinoflagellata Черного моря и влияние на них антропогенных факторов // Гидробиологический журнал. – 1993. – Т. 29, № 4. – С. 27–34.
2. Брянцева Ю. В. Особливості сезонної сукцесії фітопланктону в прибережній зоні Криму (Чорне море) у різні за кліматичними умовами роки (2009–2014) // Algologia. – 2021. – Т. 31, № 4. – С. 365–381. – <https://doi.org/10.15407/alg31.04.365>
3. Виноградова Л. А., Маштакова Г. П., Дерзюк Н. В. Сукцессионные изменения в фитопланктоне северо-западной части Черного моря // Исследования пелагиали Черного моря : (материалы междунар. симп. «Антропоген. эвтрофикация и изменчивость экосистем Черного моря», Москва, 16–19 окт. 1984 г.) / АН СССР, Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова, Координац. центр стран-чл. СЭВ по пробл. «Изучение хим. ... освоения его ресурсов». – Москва : ИОАН, 1986. – С. 170–176.
4. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря / Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины. – Севастополь : МГИ, 2011. – 212 с.
5. Ковалёва И. В., Финенко З. З., Суслин В. В. Тренды изменения первичной продукции фитопланктона по данным дистанционного зондирования в глубоководной области Черного моря в 1998–2015 годы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2022. – Т. 15, № 4. – С. 42–53. – <https://doi.org/10.59887/fpg/dfbm-t6da-5rvb>
6. Маштакова Г. П., Роухийнен М. И. Сезонная динамика фитопланктона // Основы биологической продуктивности Чёрного моря / под общ. ред. В. Н. Грезе. – Киев : Наук. думка, 1979. – С. 85–88.
7. Серикова И. М., Брянцева Ю. В., Василенко В. И. Особенности сезонной динамики структуры поля биолюминесценции и её сопряжённость с параметрами динофлагеллят // Морской экологический журнал. – 2013. – Т. 12, № 4. – С. 87–95.
8. Стельмах Л. В. Влияние температуры на сезонную и межгодовую изменчивость некоторых структурно-функциональных характеристик фитопланктона прибрежных вод Черного моря (район Севастополя) // Вопросы современной альгологии. – 2019. – № 1. – С. 46–56. – [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-1\(19\)-46-56](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-1(19)-46-56)
9. Стельмах Л. В., Мансурова И. М. Многолетняя динамика биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое прибрежных вод Черного моря (район Севастополя) // Вопросы современной альгологии. – 2020. – Т. 22. – С. 66–81. – [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2020-1\(22\)-66-81](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2020-1(22)-66-81)
10. Суслин В. В., Чурилова Т. Я., Ли М. Е., Мончева С., Финенко З. З. Концентрация хлорофилла *a* в Черном море: сравнение спутниковых алгоритмов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 64–72. – <https://doi.org/10.7868/S2073667318030085>

11. Токарев Ю. Н. Основы биофизической экологии гидробионтов. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 342 с.
12. Финенко З. З., Мансурова И. М., Суслин В. В. Временная динамика биомассы фитопланктона в поверхностном слое Черного моря по данным спутниковых наблюдений // *Океанология*. – 2022. – Т. 62, № 3. – С. 416–427. – <https://doi.org/10.31857/S0030157422030042>
13. Юнев О. А. Вторичная эвтрофикация черноморского шельфа // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. – 2020. – № 2. – С. 80–91. – <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-2-80-91>
14. Belkin I. M. Rapid warming of large marine ecosystems // *Progress in Oceanography*. – 2009. – Vol. 81, iss. 1/4. – P. 207–213. – <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.04.011>
15. Evstigneev V., Serikova I., Piontkovski S., Zhuk V., Minsky I. Fall-winter sea surface temperature anomalies affect subsequent spring-summer phytoplankton succession and bioluminescence patterns in the Black Sea coastal waters near Crimea // *Marine Environmental Research*. – 2023. – Vol. 192. – Art. ID 106251 (12 p.). – <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106246>
16. Lima L., Ciliberti S. A., Aydoğdu A., Masina S., Escudier R., Cipollone A., Azevedo D., Causio S., Peneva E., Lecci R., Clementi E., Jansen E., Ilicak M., Cretì S., Stefanizzi L., Palermo F., Coppini G. Climate signals in the Black Sea from a multidecadal eddy-resolving reanalysis // *Frontiers in Marine Science*. – 2021. – Vol. 8. – Art. ID 710973 (17 p.). – <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.710973>
17. Mikaelyan A. S., Kubryakov A. A., Silkin V. A., Pautova L. A., Chasovnikov V. K. Regional climate and patterns of phytoplankton annual succession in the open waters of the Black Sea // *Deep Sea Research. Pt I: Oceanographic Research Papers*. – 2018. – Vol. 142. – P. 44–57. – <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2018.08.001>
18. Richardson A. J. In hot water: zooplankton and climate change // *ICES Journal of Marine Science*. – 2008. – Vol. 65, iss. 3. – P. 279–295. – <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn028>
19. Serikova I. M., Briantseva Yu. V., Tokarev Yu. N., Stanichniy S. V., Suslin V. V., Vasilenko V. I. Response of phytoplankton of the Sevastopol coastal zone to climate peculiarities of the years 2009–2012 // *Hydrobiological Journal*. – 2016. – Vol. 52, iss. 1. – P. 39–48. – <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v52.i1.40>
20. Stelmakh L. V., Gorbunova T. I. Carbon-to-chlorophyll-a ratio in the phytoplankton of the Black Sea surface layer: variability and regulatory factors // *Ecologica Montenegrina*. – 2018. – Vol. 17. – P. 60–73. – <https://doi.org/10.37828/em.2018.17.8>
21. Suslin V., Churilova T. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners // *International Journal of Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 37, iss. 18. – P. 4380–4400. – <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>
22. 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. ID 00014. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2020.00014/full>. – Дата публикации: 06.02.2020.
23. Yunev O., Carstensen J., Stelmakh L., Belokopytov V., Suslin V. Temporal changes of phytoplankton biomass in the western Black Sea shelf waters: evaluation by satellite data (1998–2018) // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2022. – Vol. 271. – Art. ID. 107865 (11 p.). – <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107865>

**INTERANNUAL VARIABILITY OF BIOLUMINESCENCE, CHLOROPHYLL
AND TEMPERATURE IN COASTAL WATERS OF SEVASTOPOL**

**Minsky I. A.¹, Serikova I. M.¹, Juk V. F.¹, Piontkovski S. A.²,
Evstigneev V. P.², Suslin V. V.³**

¹*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
e-mail: ivansimfer@yandex.ru*

²*Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation,*

³*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russian Federation.*

Abstract: Interannual changes of the stimulated bioluminescence, chlorophyll *a* concentration and water temperature, based on bathyphotometric casts carried out in the 60-m layer on board of the research vessel and remote sensing (AVHRR Pathfinder, SeaWiFS and MODIS ocean color scanners) in coastal waters of Sevastopol in 2008–2014 were investigated. A decrease of bioluminescence potential and sea surface chlorophyll *a* concentration against stable sea surface temperature and averaged 60-m temperature were revealed.

Keywords: bioluminescence, chlorophyll *a*, temperature, interannual variability.

Сведения об авторах

Минский Иван Александрович	аспирант, ведущий инженер, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация; e-mail: ivansimfer@yandex.ru
Серикова Ирина Михайловна	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация; e-mail: irasimwin@gmail.com
Жук Владимир Федорович	научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация; e-mail: vfzhuk@mail.ru
Пионтковский Сергей Александрович	доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация; e-mail: spiontkovski@gmail.com
Евстигнеев Владислав Павлович	кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация; e-mail: vald_e@ Rambler.ru
Суслин Вячеслав Владимирович	кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН», ул. Капитанская, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация; e-mail: slava.suslin@mhi-ras.ru

*Поступила в редакцию 03.07.2023 г.
Принята к публикации 30.11.2023 г.*