

Метод оценки продуктивности морских акваторий по интегральной интенсивности биолюминесценции сообщества планктонных организмов

© 2021. Е. Б. Мельникова¹, к. б. н., с. н. с.,
А. Н. Серебренников¹, н. с.,
А. В. Мельников², к. т. н., доцент,

¹Институт природно-технических систем,
299011, Россия, г. Севастополь, ул. Ленина, д. 28,

²Севастопольский государственный университет,
299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33,
e-mail: helena_melnikova@mail.ru

Знания о продуктивности морских акваторий и общей биомассе планктонных организмов служат основой для разработки мероприятий по рациональному использованию природных ресурсов. В статье предложен метод оценки продуктивности морских акваторий, основанный на измерении интенсивности физических излучений, создаваемых в процессе жизнедеятельности живых организмов (явление биолюминесценции). Интенсивность биолюминесцентного излучения пропорциональна концентрации планктонных организмов и поэтому может быть использована для сравнительной оценки биологической продуктивности вод. Измерения интенсивности свечения гидробионтов производили в режиме *in situ* с помощью быстродействующего гидробиофизического прибора «Сальпа-М». Достоинствами предложенного метода оценки продуктивности вод являются: быстродействие и отсутствие необходимости проведения продолжительной во времени и дорогостоящей лабораторной обработки биологического материала. В результате проведённых исследований в прибрежных водах Крыма выделено 5 районов, различающихся по общей биомассе и численности организмов планктонных сообществ. Для выделенных районов проведён расчёт интегральной интенсивности свечения гидробионтов (ИИСГ). Сравнительная оценка продуктивности вод выделенных районов показала, что наибольшая ИИСГ (составляющая 37830 пВт/(см²·л)) наблюдалась на юго-западном шельфе Крыма. В Керченском предпроливном районе ИИСГ была в 1,24 раза меньше, а в западной глубоководной части Чёрного моря в 5–8 раз меньше, чем на высокопродуктивном юго-западном шельфе Крыма.

Ключевые слова: биолюминесценция, фитопланктонное сообщество, продуктивность акваторий, Чёрное море.

A method for assessing the productivity of marine areas by the integrated intensity of bioluminescence of the planktonic community

© 2021. E. B. Mel'nikova¹ ORCID: 0000-0001-7988-2541¹
A. N. Serebrennikov¹ ORCID: 0000-0002-8650-8168¹
A. V. Melnikov² ORCID: 0000-0002-3732-0791¹

¹Institute of Natural and Technical Systems,
28, Lenina St., Sevastopol, Russia, 299011,

²Sevastopol State University,
33, Universitetskaya St., Sevastopol, Russia, 299053,
e-mail: helena_melnikova@mail.ru

A method for the comparative assessment of the productivity of marine water areas based on an analysis of the vertical distribution of the glow intensity (bioluminescence) of the community of planktonic organisms is presented. It is noted that planktonic communities that have a quick response to changes in the ecosystem can serve as an operational indicator of the effects of various environmental factors on it. Bioluminescence intensity measurements do not require laboratory processing of samples and are carried out in real time.

A methodology for calculating the integral intensity of bioluminescence of hydrobionts (ИИСГ), which characterizes the total biomass, the number of aquatic organisms, and the biological productivity of water, is described. As a result of

the studies carried out in the coastal waters of the Crimea, 5 regions were distinguished, differing in total biomass and number of organisms of planktonic communities. For selected areas, ПВН calculation was performed. A comparative assessment of the water productivity of the selected areas showed that the highest ПВН (an average of 37830 pW/(cm²·L)) was observed on the southwestern shelf of Crimea. In the area of the Kerch Strait, ПВН was 1.2 times less than on the highly productive south-western shelf of Crimea. In the north-western deepwater part of the sea, stable stratification of the waters promoted the formation of two layers with a high concentration of hydrobionts located at depths of 8–14 m and 40–45 m. At the same time, ПВН of the upper layer was the smallest in the study area and was 8 times lower than the value on the south-western shelf of Crimea. The results obtained on the productivity of water areas and the total biomass of plankton communities serve as the basis for the development of measures for the rational use of natural resources.

Keywords: bioluminescence, phytoplankton community, water productivity, Black Sea.

Происходящие климатические изменения и хозяйственная деятельность приводят к изменению экологического состояния морских акваторий, изменению структуры ихтиоценозов и необходимости оперативной сравнительной оценки продуктивности вод для рационального планирования объёмов вылова и районов промысла. Основную часть первичной продукции Мирового океана создает фитопланктон. Он составляет основу всех последующих этапов продукционного процесса и, вследствие этого, определяет функционирование всех звеньев пищевой цепи и биологическую продуктивность морских экосистем в целом [1]. Знания о продуктивности акваторий и общей биомассе планктонных сообществ, связанных с разнообразием гидрологической структуры вод, служат основой для разработки региональных мероприятий по рациональному использованию природных ресурсов.

Известно [2–6], что суммарное свечение фитопланктона (биоломинесценция) отражает пространственную структуру и коррелирует с количеством и концентрацией организмов планктонного сообщества [6]. При этом функциональное состояние и, как следствие этого, интенсивность биоломинесцентного излучения организмов планктонного сообщества, обладая быстрым реагированием на изменения в экосистеме, могут служить оперативным индикатором действия на неё различных факторов среды обитания [7–11] и, как следствие этого, показателем происходящих изменений биологической продуктивности вод и кормовой базы рыбных запасов. Измерения интенсивности биоломинесценции проводят в режиме *in situ* с помощью быстродействующих гидробиофизических приборов, они не требуют лабораторной обработки проб и проводятся в реальном масштабе времени.

Целью работы является сравнительная оценка биологической продуктивности прибрежных вод Крыма на основе анализа интегральной интенсивности биоломинесценции сообщества планктонных организмов.

Материалы и методы исследования

Исследования вертикального распределения интенсивности свечения планктонных сообществ проводили в летний период (июль–август) 2010, 2011 и 2013 гг. в 64, 65, 70, 73, 74, 77 рейсах научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий». Основной массив данных получен на 31 станции (рис. 1), которые расположены от мыса Тарханкут на западе до Керченского предпроливного района на востоке, в шельфовой и глубоководной зонах Крыма.

Вертикальное распределение интенсивности свечения планктонного сообщества исследовали методом многократного батифотометрического зондирования толщи воды с использованием гидробиофизического комплекса «Сальпа-М», разработанного Гидрооптик-Ltd, НПП «Аквастандарт-Юг» (г. Севастополь, Россия) [12]. С его помощью измеряли также температуру и электропроводность воды, которую пересчитывали в солёность. Дискретность измерений в режиме зондирования со скоростью 1,2 м/с составляла 1 м. Съёмки проводили в ночное время.

Для сравнительной оценки продуктивности акваторий вначале проводили группировку станций по схожести вертикального распределения интенсивности биоломинесценции с использованием кластерного анализа [13]. Для этого был образован 31 монокластер, каждый из которых характеризовал вертикальное распределение интенсивности свечения гидробионтов на исследуемых станциях и проводилась группировка кластеров агломеративно-иерархическим методом.

Для оценки биологической продуктивности морских акваторий введено понятие интегральной интенсивности свечения гидробионтов (ИИСГ), которую находили по следующей методике. При обработке результатов вертикального зондирования сначала находили значение максимальной интенсивности биоломинесценции для данного зондирования. Затем выделяли диапазон глубин, в пределах

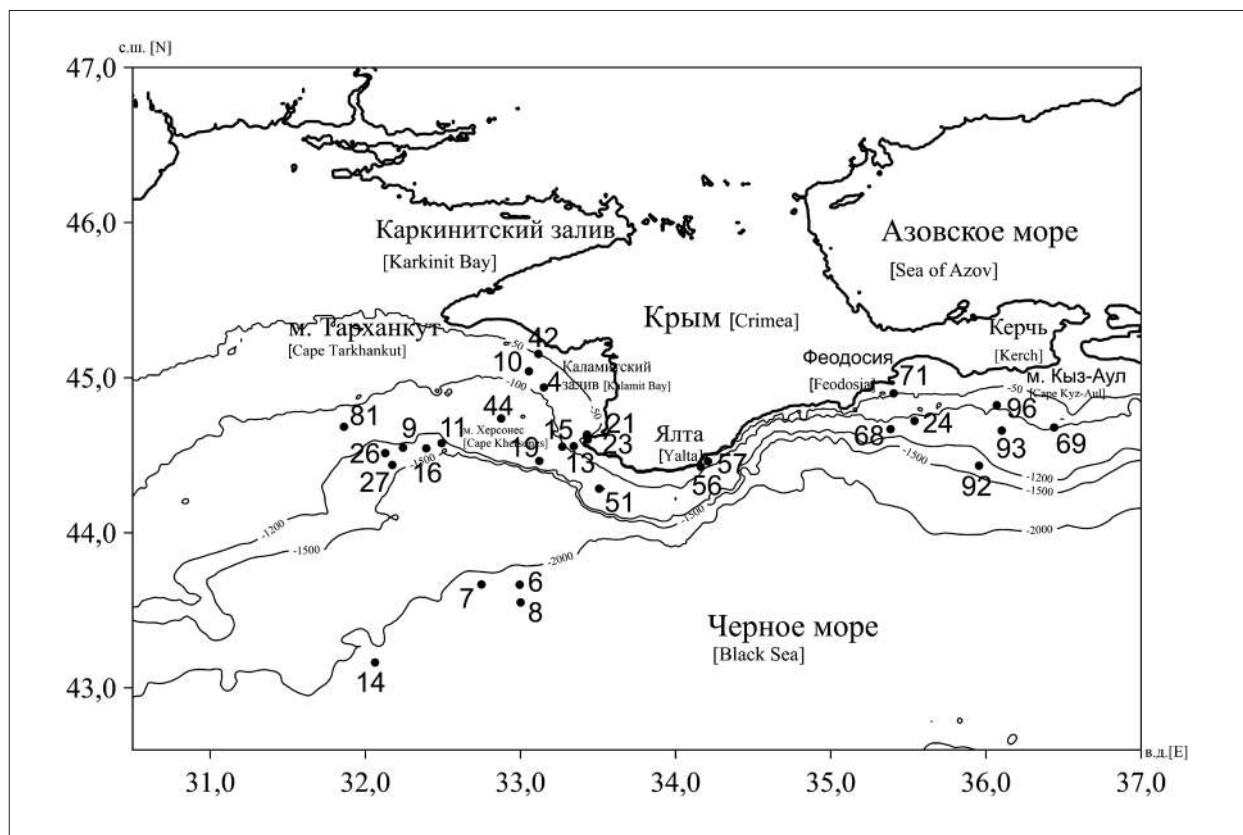


Рис. 1. Схема расположений станций / Fig. 1. The scheme of location of stations

которого интенсивность биолюминесценции изменялась от максимального значения до уровня 0,5 от максимального значения. Этот диапазон глубин называли слоем с высоким уровнем интенсивности биолюминесценции. Далее для выделенного диапазона глубин суммировали все измеренные значения интенсивности свечения организмов (шаг дискретности измерения 1 м) и полученное значение назвали интегральной интенсивностью свечения гидробионтов. Полученное значение ИИСГ пропорционально как интенсивности свечения гидробионтов, так и ширине слоя с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов. С учётом высокой корреляции интенсивности свечения и концентрации гидробионтов [2, 4, 6, 14], полученное значение ИИСГ позволяет оценить общую биомассу и численность гидробионтов, характеризующих биологическую продуктивность вод.

Математическую обработку результатов проводили с использованием программ Microsoft Excel 7.0, Statistica 6.0, SigmaPlot 12.5, Surfer 13.0.

Результаты и обсуждение

Результаты группировки станций показаны на рисунке 2. Анализ результатов

агломерации (рис. 2) позволяет выделить 5 независимых групп (районов), характеризующихся близкими значениями вертикального распределения интенсивности биолюминесценции, и, как следствие этого, близкими значениями биологической продуктивности вод выделенных районов.

Группу 1 образуют станции 4, 10, 13, 17, 18, 21, 23, 42, 56 и 57, расположенные в районе мелководного юго-западного шельфа Крыма; группу 2 образуют станции 24, 68, 69, 71, 92, 93, 96, расположенные в акватории Керченского предпроливного района и района Феодосийского залива; группу 3 образуют станции 15, 19, 44 и 51, расположенные в районе свала глубин; группу 4 образуют глубоководные станции 6, 7, 8 и 14, расположенные в западной части моря; группу 5 образуют станции 9, 11, 16, 26, 27 и 81, расположенные в районе мыс Херсонес – мыс Фиолент.

Дальнейший сравнительный анализ особенностей выделенных районов мы производили по усреднённым для сравниваемых районов характеристикам вертикального распределения интенсивности свечения гидробионтов и ИИСГ. При этом учитывали, что черноморские воды вдоль крымского побережья в целом характеризуются высокой

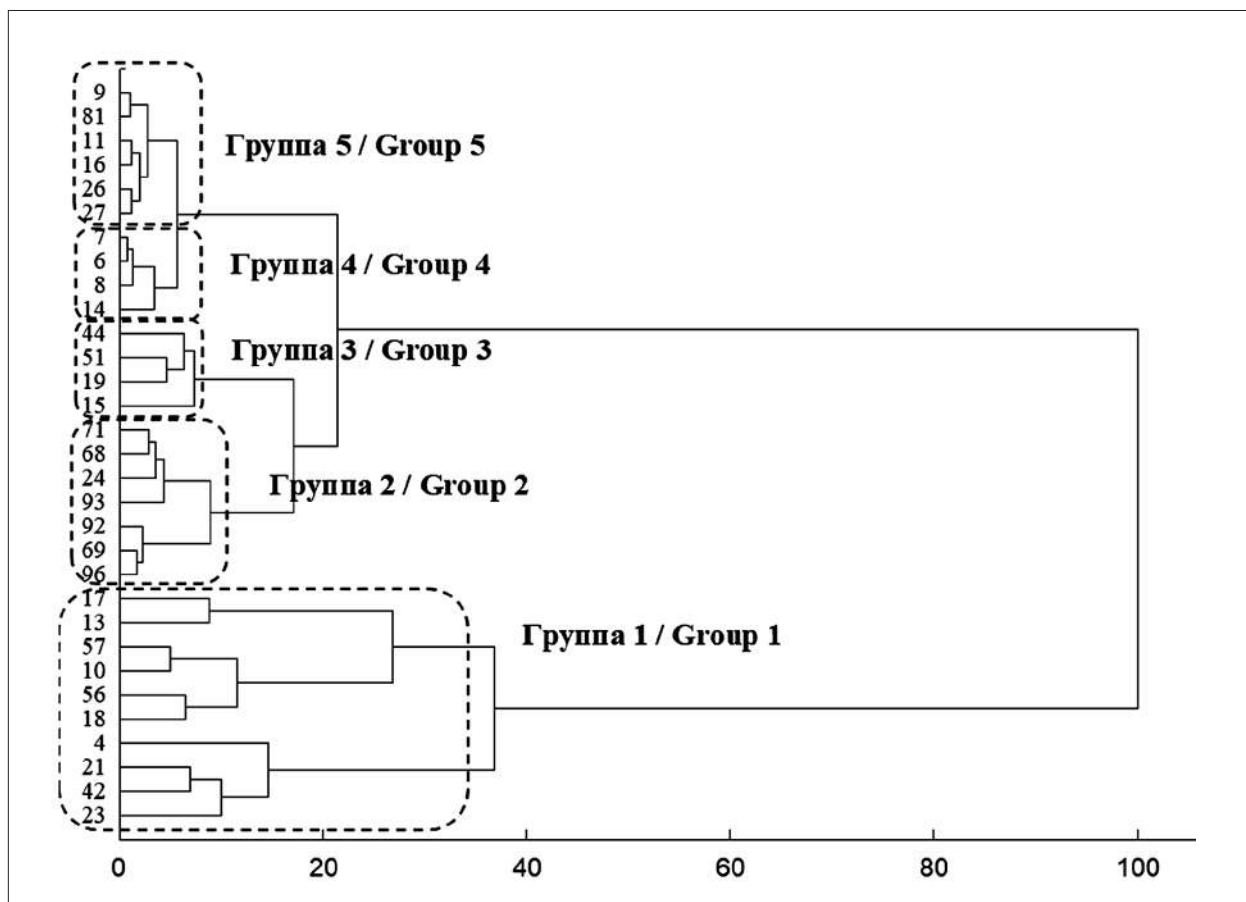


Рис. 2. Группировка станций в прибрежных водах Крыма
 Fig. 2. Grouping of stations in the coastal waters of Crimea

динамической активностью, связанной с близостью Основного Черноморского течения (ОЧТ) [15–17], оказывающего существенное влияние на экологическое состояние прибрежных вод и вертикальное распределение интенсивности свечения фитопланктонного сообщества [9].

На рисунке 3 изображено типичное вертикальное распределение интенсивности свечения гидробионтов в рассматриваемых регионах.

Первую группу (рис. 3а) образуют станции 4, 10, 13, 17, 18, 21, 23, 42, 56 и 57, расположенные на мелководном юго-западном шельфе Крыма с глубинами, не превышающими 100 м. Близость дна и вертикальные перемешивания водных масс приводят к подъёму придонных вод, обогащённых биогенными веществами. Поэтому этот район характеризуется высокой биологической продуктивностью вод.

В летний период происходит массовое развитие мелкоклеточных теплолюбивых представителей светящихся динофлагеллят; это виды рода *Goniaulax* – *G. apiculate*, *G. digitale*, рода *Scrippsiella* – *S. trochoidea*, рода

Protoperidinium – *P. claudicans*, *P. conicum*, *P. globules*, *P. pellucidum*, *P. solidicorne*, *Lincolodinium polyedrum* [12]. Эти виды в летний период характеризуются увеличением численности и биомассы в верхнем слое. Однако следует отметить, что в районе проведения исследований при высоких температурах (более 23 °С) интенсивность свечения теплолюбивых видов в приповерхностном слое уменьшалась и увеличивалась в термоклине и/или под ним. Так слой с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов, характеризующим плотность популяции, располагался в нижней части сезонного термоклина и даже частично в холодном промежуточном слое (ХПС) на глубинах от 15 до 23 м (рис. 3а).

Расчёты показали, что на мелководном юго-западном шельфе Крыма интегральная интенсивность свечения гидробионтов была самой высокой для всего района проведения исследований и в среднем составляла 37830 пВт/(см²·л), что подтвердило измеренную предложенным методом биOLUMИнесцентных измерений высокую продуктивность вод этого района.

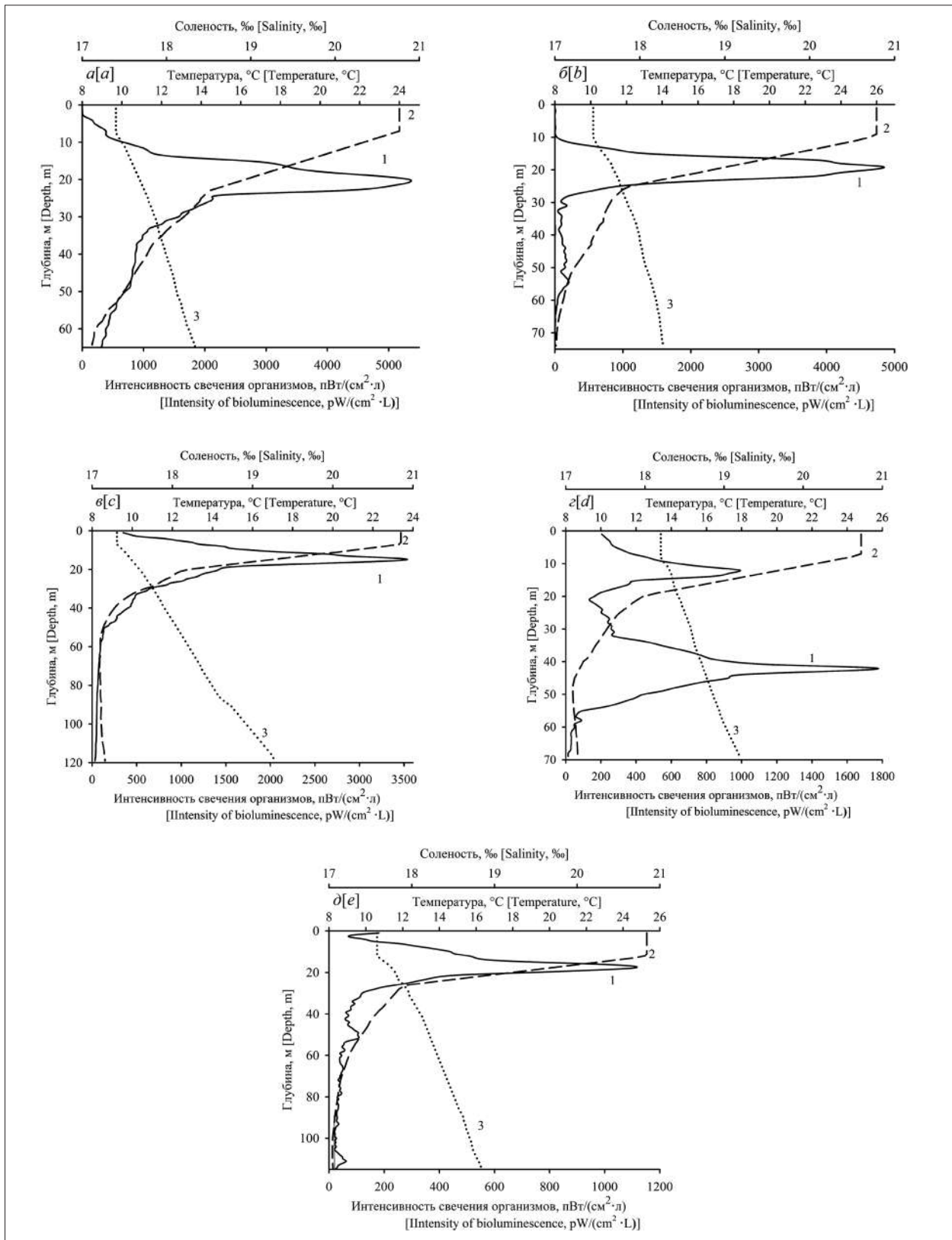


Рис. 3. Средние вертикальные распределения интенсивности свечения гидробионтов (1), температуры (2), солёности (3) в летний период: а) мелководный юго-западный шельф Крыма; б) район Феодосия-Керчь; в) свал глубин;

г) глубоководные станции; д) район мыс Херсонес – мыс Фиолент
Fig. 3. Average vertical distributions of the bioluminescence intensity of hydrobionts (1), temperature (2), salinity (3) in the summer period: а) shallow South-Western shelf of the Crimea; б) Feodosia-Kerch area; в) the region of falling depth; д) deep-water stations; е) Cape Khersones – Cape Fiolent area

Вторую группу образуют станции 24, 68, 69, 71, 92, 93 и 96 с глубинами от 100 до 1300 м, расположенные в акватории Керченского предпроливного района и Феодосийского залива. В этом районе значительное влияние на гидрологические параметры среды и стратификацию вод оказывают прогретые воды Азовского моря, способствующие повышению температуры, а также вдольбереговые течения, связанные с ОЧТ. В районе Керченского предпроливного района верхний перемешанный слой (ВПС) был прогрет в среднем до температуры 26 °С, что было самым высоким, а слой с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов находился глубже, чем на других станциях района проведения исследований (рис. 3б). ИИСГ в среднем составляла 30530 пВт/(см² · л), что свидетельствует о достаточно высокой биологической продуктивности вод, при этом биомасса фитопланктонного сообщества уступала лишь (примерно на 20–25%) биомассе фитопланктона, обитающего на высокопродуктивном юго-западном шельфе.

Третью группу образуют станции 15, 19, 44 51 с глубинами от 100 до 500 м, расположенные в районе свала глубин в юго-западной и южной части прибрежных вод Крыма. В этом районе ВПС был прогрет в среднем до температуры 23,4 °С, слой с высокой интенсивностью свечения гидробионтов находился в сезонном термоклине (рис. 3в) на глубинах от 10 до 18 м. ИИСГ в среднем составляла 23680 пВт/(см² · л), что было в 1,6 раза меньше, чем на юго-западном шельфе Крыма.

Четвёртую группу образуют станции 6, 7, 8 и 14, расположенные в глубоководной ($h \geq 2000$ м) северо-западной части моря. Отдалённость от берега и большие глубины – основные факторы, влияющие на гидрологические особенности и вертикальную термическую структуру вод. В районе расположения этих станций термохалинная структура вод была хорошо сформирована. Верхний перемешанный слой был прогрет до 24,8 °С, а его толщина составляла 7 м. Глубже залегал сезонный термоклин, ширина которого достигала 11 м с типичным вертикальным градиентом температуры 1,0 °С/м, что было самым высоким в районе проведения исследований (рис. 3г). Устойчивость водной массы в глубоководных районах приводит к разделению теплолюбивых и глубоководных холодолюбивых фитопланктонных комплексов. В верхнем слое, как и в других районах, происходит массовое развитие теплолюбивых

мелкоклеточных светящихся динофлагеллят, приводящее к увеличению численности и биомассы. Это представители рода *Goniaulax* и рода *Protoperdinium*. В глубоководном слое преобладали крупноклеточные холодолюбивые виды, которые вносили основной вклад в суммарную интенсивность свечения организмов. Это представители рода *Neoceratium* – *N. furca*, *N. fusus*, *N. tripos* и рода *Protoperdinium* – *P. divergens*, *P. pallidum*, *P. steinii*, *P. crassipes* [12].

Глубоководные виды фитопланктона создают повышенные концентрации в ХПС, а теплолюбивые виды – в верхнем слое. В соответствии с этим наблюдалось два слоя с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов (рис. 3г). Первый слой размещался в верхней части сезонного термоклина на глубине от 9 до 14 м, при средней температуре в этом слое – 20,7 °С, солёности – 18,29‰. В верхнем слое ИИСГ составляла в среднем 4700 пВт/(см² · л), что является самым низким значением для района проведения исследований и было в 8 раз меньше, чем на юго-западном шельфе. Второй слой с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов размещался в ХПС на глубинах от 40 до 45 м при средней температуре 8,8 °С и солёности – 18,96‰. Средняя ИИСГ в нижнем слое составляла 7325 пВт/(см² · л), что более чем в 1,5 раза превышало значение, наблюдавшееся в верхнем слое.

Пятую группу образуют станции 9, 11, 16, 26, 27, расположенные в районе мыс Херсонес – мыс Фиолент с глубинами от 1200 до 1400 м и ст. 81 с глубиной 770 м. В период проведения исследований эти станции находились в зоне конвергенции, характеризующейся накоплением поверхностных малопродуктивных вод и их опусканием. Слой с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов, характеризующий распределение по глубине биомассы планктона, располагался в термоклине на глубинах от 14 до 20 м (рис. 3д). С учётом опускания малопродуктивных поверхностных вод среднее значение ИИСГ в этом районе было незначительным и составляло 6100 пВт/(см² · л), что было в 6,2 раза меньше, чем на юго-западном шельфе Крыма.

Выводы

1. Предложен метод сравнительной оценки биологической продуктивности морских акваторий, основанный на расчёте интегральной интенсивности свечения гидробионтов.

2. Сравнительная оценка биологической продуктивности выделенных 5 районов прибрежных вод Крыма, проведенная предложенным методом, показала, что наибольшая ИИСГ ($37830 \text{ пВт}/(\text{см}^2 \cdot \text{л})$) в летний период наблюдалась на юго-западном шельфе Крыма, что характеризует этот район как высокопродуктивный.

3. В районе Керченского предпроливного района и районе Феодосийского залива ИИСГ уступала на 20–25% значению на высокопродуктивном мелководном юго-западном шельфе.

4. В северо-западной части моря устойчивая стратификация вод способствовала формированию двух слоёв с высокой концентрацией гидробионтов, расположенных на глубинах 8–14 м и 40–45 м. При этом ИИСГ верхнего слоя была наименьшей в районе проведения исследования и уступала значению на юго-западном шельфе Крыма в 8 раз.

Полученные результаты могут быть использованы в рыбопромысловой отрасли при планировании объёмов вылова и районов промысла.

References

- Zavoruev V.V., Zavorueva E.N., Krum S.P. Plankton distribution in areas of frontal zones of aquatic ecosystems. Krasnoyarsk: Sibirskiy federalnyy universitet, 2012. 292 p. (in Russian).
- Gitelson I.I., Levin L.A. Bioluminescence in oceanology // *J. Biolumin. Chemilumin.* 1989. V. 4. No. 1. P. 555–562. doi: 10.1002/bio.1170040173
- Haddock S.H.D., Moline M.A., Case J.F. Bioluminescence in the Sea // *Annual Review of Marine Science.* 2010. V. 2. P. 443–493. doi: 10.1146/annurev-marine-120308-081028
- Tokarev Yu.N., Bitjukov E.P., Vasilenko V.I., Sokolov B.G. Bioluminescence field – a characteristic indicator of the structure of the plankton community of the Black Sea // *Ekologiya morya.* 2000. No. 53. P. 20–25 (in Russian).
- Herren C.M., Alldredge A.L., Case J.F. Coastal bioluminescent marine snow: fine structure of bioluminescence distribution // *Continental Shelf Research.* 2003. V. 24. P. 413–442. doi: 10.1016/j.csr.2003.10.008
- Cherepanov O.A., Levin L.A., Utyushev R.N. The relationship of bioluminescence with biomass and number of the luminous and total plankton. 2. The Black Sea // *Marine Ecological Journal.* 2007. V. 6. No. 3. P. 84–89 (in Russian).
- Tokarev Yu.N., Melnikova E.B. The influence of hydrophysical parameters on intensity of bioluminescence field in the Black Sea // *Hydrobiol. J.* 2012. V. 48. No. 4. P. 93–99. doi: 10.1615/HydrobJ.v48.i4.70
- Melnikova E.B. The spatial variability of the intensity of the bioluminescence field in coastal waters of the Crimean Peninsula in the spring period // *Inland Water Biology.* 2016. V. 9. No. 2. P. 135–141. doi: 10.1134/S1995082916010120
- Polonsky A.B., Mel'nikova E.B., Serebrennikov A.N., Tokarev Yu.N. Regional peculiarities of hydrobiont bioluminescence intensity and chlorophyll a concentration in Black Sea waters // *Atmospheric and Oceanic.* 2018. V. 31. No. 4. P. 365–371. doi: 10.1134/S1024856018040085
- Shemshedinova E.Sh., Abduramanova E.R., Morozkina E.V., Katsev A.M. Luminescent whole-cell biosensors in detection of environmental contaminants (review) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 2. P. 6–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-006-013
- Zhavoronkov V.I., Zakharov V.Yu., Reznik E.N., Sabashny D.V. Electronic optics methods for studying the effects of anthropogenic factors on biological objects // *Theoretical and Applied Ecology.* 2011. No. 1. P. 29–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-1-029-030
- Tokarev Yu.N., Evstigneev P.V., Mashukova O.V. Planktonic bioluminescent of the World Ocean: species diversity, characteristics of light emission in normal conditions and under anthropogenic impact. Simferopol: N. Orianda, 2016. 340 p.
- Mandel' I.D. Cluster analysis. Moskva: Finansy i statistika, 1988. 176 p. (in Russian).
- Moline M.A., Blackwell S.M., Case J.F., Haddock S.H.D., Herren C.M., Orrico C.M., Terrill E. Bioluminescence to reveal structure and interaction of coastal planktonic communities // *Deep Sea Res II.* 2009. V. 56. P. 232–245. doi: 10.1016/j.dsr2.2008.08.002
- Dzhiganshin G.F., Polonsky A.B. Kinematic structure and mesoscale variability of the rim current near the coast of Crimea (according to the data of instrumental measurements in September 2008) // *Physical Oceanography.* 2011. V. 21. No. 1. P. 23–32. doi: 10.1007/s11110-011-9101-y
- Polonsky A.B., Lovenkova E.A. Long-term tendencies in the variability of characteristics of the Black Sea pycnocline // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2006. V. 42. No. 3. P. 386–396. doi: 10.1134/S000143380603012
- Tuzhilkin V.S. Thermochaline structure of the sea. The Black Sea environment // *The handbook of environmental chemistry.* Berling, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5. Part Q. P. 217–253. doi: 10.1007/698_5_077