

УДК 577.472(262)(262.5):591.148:574.52

Ю.Н. ТОКАРЕВ, Э.П. БИТЮКОВ, В.И. ВАСИЛЕНКО, Б.Г. СОКОЛОВ

ПОЛЕ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ - ХАРАКТЕРНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ СТРУКТУРЫ ПЛАНКТОННОГО СООБЩЕСТВА ЧЕРНОГО МОРЯ

Представлены материалы исследования характеристик поля биолюминесценции, полученные в 35 рейсе НИС "Профессор Водяницкий" осенью 1991 г. в Черном море на 100-мильном разрезе от Каламитского залива в точку с координатами 43°48' с. ш. - 31° 32' в.д. Показано различие структурных показателей поля биолюминесценции в различных водных массах и соответствие количественного развития фитопланктона интенсивности биолюминесценции, которое с высоким коэффициентом корреляции описывается уравнениями линейной регрессии.

Инструментальная оценка интенсивности поля биолюминесценции (ПБ), формируемого планктоном и тесно коррелирующего с количественными показателями его развития, широко применяется для выяснения пространственно-временной неоднородности планктонного сообщества [1, 5, 6]. В Черном море этот метод используется более 30 лет [2]. В результате выявлены основные черты сезонной динамики ПБ и его крупномасштабной неоднородности. Однако региональные особенности этих характеристик, особенно в районах взаимодействия вод шельфовых и глубоководных акваторий, не определялись. Такие исследования в условиях высоких градиентов гидрологического режима Черного моря важны для верификации выводов о распределении планктона и экспрессных оценок его пространственно-временной изменчивости и функционального состояния [5].

Материал и методика. Исследования вертикальной структуры и горизонтального распределения ПБ были проведены в летнее, осеннее и зимнее время с 1979 по 1993 гг. на 107 станциях (рис. 1).

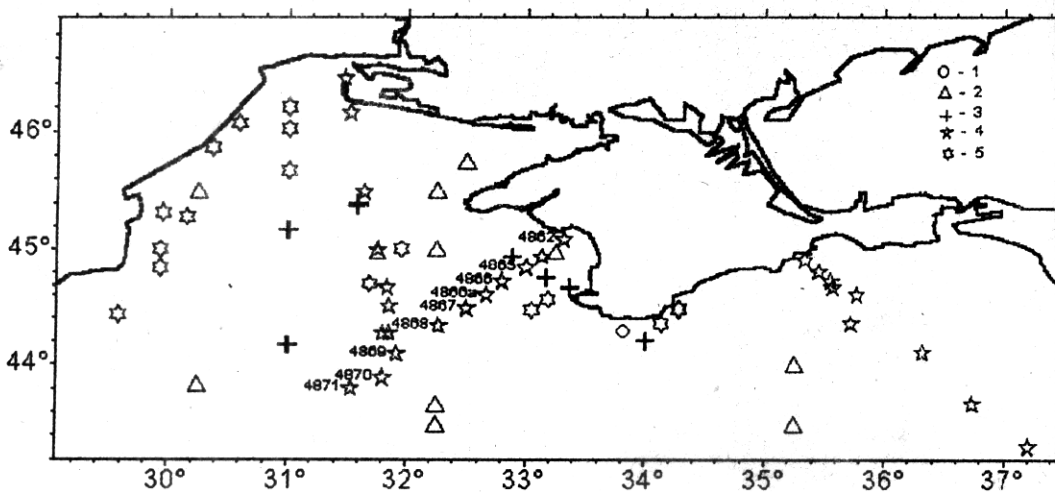


Рис. 1 Географическое распределение станций с измерением поля биолюминесценции в феврале (1), июле (2), октябре (3), ноябре (4) и декабре (5)

Fig. 1 The geographical distribution of stations with bioluminescence field measurement in February (1), July (2), October (3), November (4) and December (5)

В данной работе представлены материалы изучения структурных характеристик ПБ, полученные осенью 1991 г. в 35 рейсе НИС "Профессор Водяницкий". На 100-мильном разрезе через 10 миль от Каламитского залива в точку с координатами 43°48' с. ш. - 31° 32' в.д. выполнено 10 станций. Пространственную структуру ПБ исследовали методом многократного батифотометрического зондирования [5], используя гидробиофизический комплекс "Сальпа" [7]. Комплекс измеряет интенсивность ПБ, температуру и электропроводность воды на глубине нахождения прибора. Дискретность измерений в режиме зондирования "вниз" со скоростью 1,2 м с⁻¹ составляла 1 м. На большинстве станций выполнено по 30 зондирований с интервалом в 3 мин. Это дало возможность составить по трансекте ветрового дрейфа двумерную матрицу мелкомасштабного распределения биоломинесцентного и гидрологических полей и определить их статистические характеристики.

Анализу подвергали данные всех серий измерений, в которых наряду со стандартными слоями рассматривали слои, соответствующие естественной структуре термохалинного или биоломинесцентного полей. Измерениям биоломинесценции предшествовали сборы фитопланктона для сопоставления с результатами измерений светового поля.

Результаты и обсуждение. Биоломинесценты Черного моря, формирующие ПБ, представлены 42 видами динофитовых водорослей и 4 видами редко встречающихся кишечнополостных [3]. Светоизлучение отдельного организма происходит в виде островершинного импульса с коротким фронтом нарастания (10-40 мс) и пологим спадом (100-1000 мс). У разных видов динофлагеллят интенсивность и продолжительность этого процесса отличаются. Длительные и интенсивные сигналы свойственны более крупным перидинеям родов *Noctiluca* и *Pyrocystis*. Свечение мелких *Ceratium* менее продолжительно и менее интенсивно. Характеристики ПБ изменяются по сезонам, определяющим видовой состав и количество водорослей. Качественно новые для Черного моря химические факторы антропогенного происхождения, прежде всего агротехнические и бытовые сбросы, существенно влияют на динамику фитопланктона. Например, в районах, подверженных такому воздействию, роль массового биоломинесцента переходит от *Noctiluca scintillans* к *Ceratium fusus*.

Характерной чертой вертикального распределения черноморского планктона является резкая стратификация, проявляющаяся в формировании слоя или слоев повышенных концентраций. В этих слоях ПБ образует зону сливного свечения, тогда как в слоях с незначительным развитием планктона регистрируются небольшие сливные или отдельные вспышки света, обусловленные нахождением разрозненных биоломинесцентов. При этом наблюдается общая сопряженность вертикального распределения биоломинесценции с распределением температуры как наиболее показательного фактора гидрофизической ситуации, определяющей структуру планктона [4].

Интегрирование мелкомасштабной структурированности ПБ выявило его мезомасштабную неоднородность. Вертикальная структура ПБ на большей части исследуемой акватории характеризовалась формированием одного или двух слоев повышенной светимости, разделенных толщey с пониженной биоломинесценцией. Такая стратификация наблюдалась практически на всех станциях, не подверженных активному антропогенному воздействию, хотя уровень ПБ на них значительно различался.

На основании данных по термохалинной структуре и по положению верхней границы слоя температурного скачка (рис. 2 "а", кривая 7), на трансекте следует выделить несколько водных масс. Узкую полосу прибрежных вод характеризует ст. 4862. Заглубленная на 12-16 м верхняя граница термоклина и более высокая температура поверхностного слоя свидетельствуют о том, что очередные две станции (4864 и 4865) соответствуют Основному черноморскому течению (ОЧТ). Следующие ст. 4866 и ст. 4866 А, расположенные в 30-40 милях от берега, соответствуют области свала глубин. В связи с характерным для таких районов интенсивным турбулентным перемешиванием, изотермический слой становится тоньше на 5-7 м, а температура поверхностного слоя

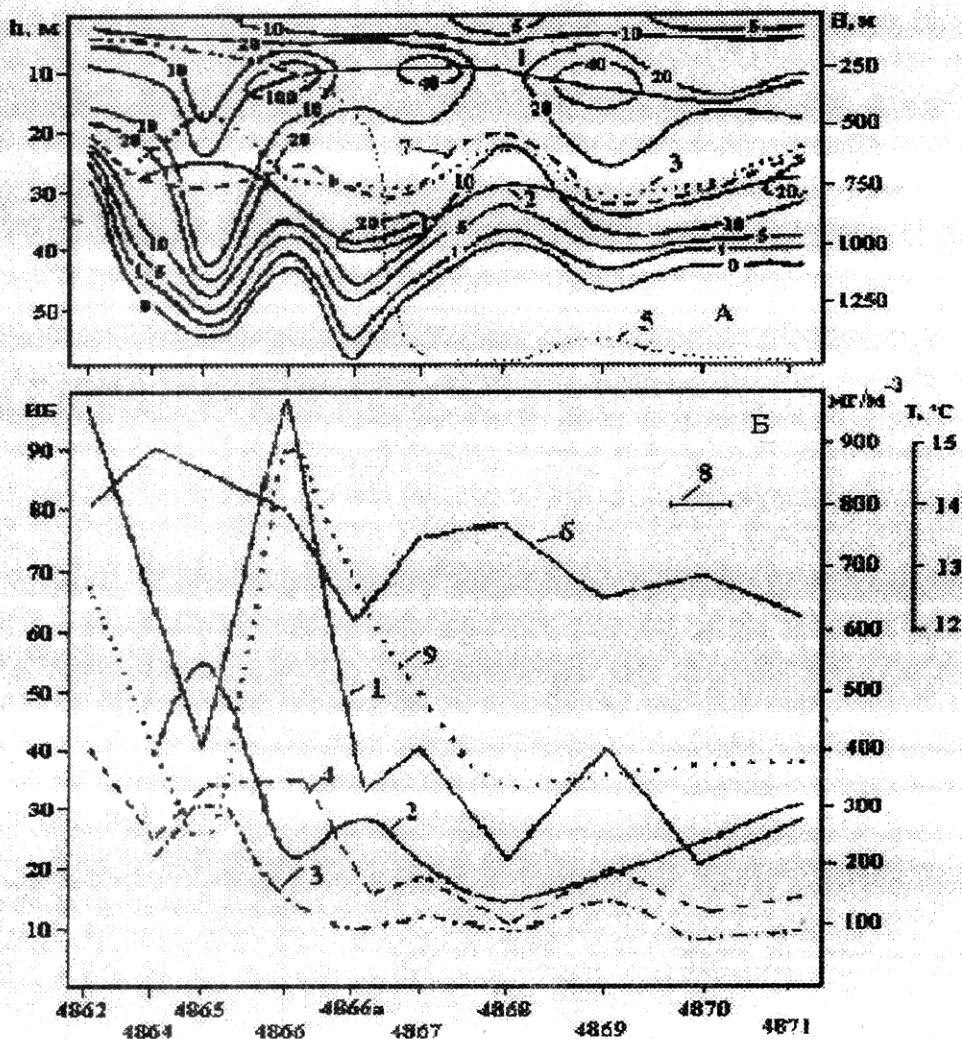


Рис. 2 Топография изолуменов интенсивности биолуминесценции ($\bullet 10^{-4} \mu W \cdot cm^{-2} \cdot l^{-1}$), верхней границы термоклина и рельефа дна (А), а также изменение интенсивности биолуминесценции (ИБ), биомассы фитопланктона и температуры (Б) на разрезе от Каламитского залива: 1 и 2 – горизонты максимальной биолуминесценции в верхнем (1) и нижнем (2) слоях повышенной светимости; 3 – горизонт минимальной биолуминесценции; 4 – биолуминесцентный потенциал слоя 0–50 м; 5 – изменение рельефа дна (H, м); 6 – температура поверхностного слоя ($T, ^\circ C$); 7 – положение верхней границы термоклина; 8 – масштаб расстояния между станциями (10 миль); 9 – биомасса фитопланктона на глубине 10 м.

Fig. 2 Topography of isolumens of bioluminescence intensity ($\bullet 10^{-4} \mu W \cdot cm^{-2} \cdot l^{-1}$), of the upper margin of thermocline and the bottom relief (A), as well as change in bioluminescence intensity (IB), phytoplankton biomass and temperature (B) at the Kalamita Gulf section: 1 and 2 – the maximum bioluminescence horizons in the upper (1) and lower (2) layers with increased bioluminescence; 3 – the minimum bioluminescence horizon; 4 – 0–50 m layer bioluminescent potential; 5 – change in bottom relief (H, m); 6 – the surface layer temperature ($T, ^\circ C$); 7 – location of the thermocline upper margin; 8 – the scale of distances between stations (10 miles); 9 – phytoplankton biomass at the 10 m depth.

снижается до минимальной величины. Юго-западная часть разреза – это глубоководная акватория с достаточно стабильной термохалинной структурой, соответствующей циклоническому круговороту.

На прибрежных станциях, расположенных до глубины 25 м, наблюдалось резкое снижение интенсивности свечения в придонном 3-5-метровом слое. Мористее с увеличением глубины низкий уровень биолуминесценции в слое 18-25 м сохранился. Горизонт минимальной интенсивности оказался приуроченным к верхней границе термоклина. Глубже начиналось формирование второго слоя повышенной светимости, который отчетливо фиксировался на протяжении очередных 70 миль. На станциях, располагающихся в центральной части циклонического круговорота, вертикальная структура ПБ усложнилась. В толще формировались 3-5 слоев повышенной светимости с вертикальной протяженностью около 5 м, интенсивность биолуминесценции в которых примерно в 1,7 раза отличалась от таковой промежуточных слоев.

В юго-западном направлении, начиная со ст. 4869, наблюдалась тенденция уменьшения толщины верхнего слоя повышенной светимости и снижения его интенсивности. Нижний слой повышенной светимости также деградировал, и над глубоководными участками ПБ имело одноксимумную структуру. Ее слоистый тип сменился на облачно-слоистый, который характеризовался локальными зонами повышенной светимости, ограниченными преимущественно 3-6 последовательными зондированиями, т.е. 60-100 м. И наконец, на юго-западных станциях (4870 и 4871), при сохранении облачно-слоистого типа распределения планктона в верхней гомотермной толще воды, в термоклине и несколько ниже него вновь формировались слои повышенной светимости, интенсивность которых отличалась от таковой рядом расположенных слоев на 15-20%.

В ситуации, когда наблюдались слои повышенной светимости, характерной чертой ПБ оказывалась также топография горизонта с минимальной величиной биолуминесценции. В ОЧТ этот горизонт находился в изотермическом слое примерно на равном расстоянии от горизонтов с максимальным свечением. На протяжении остальной части разреза он располагался над термоклином, т.е. находился в 5-7 м выше горизонта максимальной интенсивности биолуминесценции нижнего слоя повышенной светимости. Абсолютные показатели свечения на этом горизонте динамично изменялись в шельфовой зоне, оставаясь сходными на протяжении остальной части разреза.

Необходимо подчеркнуть значимость выделения и сопоставления именно количественных оценок экстремумов вертикальной структуры ПБ. Так, показатели ПБ горизонтов максимальной биолуминесценции верхнего слоя повышенной светимости на рядом расположенных станциях оказались либо адекватными средней интенсивности ПБ в слое 0-50 м (ст.4865), либо отличались почти в 3 раза (ст.4866). На первой станции, расположенной в ОЧТ, это свидетельствовало о достаточно равномерном распределении планктонных биолуминесцентных по всей толще. На второй станции, находящейся в области резкого свала глубин, это указывало на формирование узкого, толщиной 10-14 м, слоя повышенной концентрации планктона (рис. 2). Поэтому информативность горизонтов с экстремальными характеристиками ПБ существенно выше, чем интегральных оценок по слоям различной протяженности.

Приведенная информация свидетельствует о дифференциации структурных показателей ПБ в различных водных массах. Так, в области ОЧТ и над зоной резкого свала глубин нижняя граница ПБ находилась на глубине около 60 м, оказываясь выше на 10-15 м между этими областями и над глубоководной акваторией. Наблюдалась также идентичность тенденций изменения глубины нахождения верхней границы термоклина и нижней границы ПБ (рис. 2).

В толще воды формировался облачно-слоистый тип распределения ПБ. Если рассматривать расположение изолумен $20.0 \cdot 10^{-4}$ мквт·см⁻²·л⁻¹, то обращает на себя внимание постепенное уменьшение толщины слоя между ними от 45 м в прибрежной области до 3-5 м над глубоководной акваторией. На таком фоне, за исключением прибрежной станции над глубиной 28 м, в толще формировалось два слоя повышенной све-

тимости. Однако положение в них горизонтов максимальной биоломинесценции не было однозначным.

Глубина нахождения горизонта максимальной интенсивности биоломинесценции верхнего слоя повышенной светимости на всем протяжении разреза соответствовала 10 ± 4 м, однако абсолютные показатели свечения на этом горизонте сильно отличались. Так, на прибрежной станции и над областью свала глубин биоломинесценция достигала $10.0 \cdot 10^{-4}$ мквт·см⁻²·л⁻¹. В ОЧТ и особенно в его центральной части интенсивность свечения существенно (до 3 раз) уменьшилась. Над глубоководной акваторией на всех станциях уровень биоломинесценции на горизонте с максимальной величиной свечения был сходным.

Положение нижнего слоя повышенной светимости и горизонта максимальной биоломинесценции в нем более динамично. На ст. 4864 и ст. 4865, расположенных в 10-20 милях от берега, горизонт с максимальным свечением находился на 3-5 м выше верхней границы термоклина, в то время как на остальной части разреза зоной его нахождения был термоклин. Диапазон его глубины на разрезе составил 20 м.

Энергетические характеристики ПБ на горизонте с максимальной светимостью в нижнем слое повышенной светимости также существенно изменились, причем наиболее динамично - над шельфом. Тенденция изменения здесь интенсивности свечения оказалась противоположной той, которая выявлена в верхнем слое повышенной светимости. Так, в ОЧТ интенсивность ПБ даже превышала аналогичные характеристики верхнего слоя. На глубоководной акватории отличия между этими слоями оказались незначительными.

Выполненные одновременно сборы фитопланктона показали высокую корреляцию биоломинесценции верхнего слоя с количественными показателями фитопланктона на глубине 10 м. По данным Л.Г. Сеничкиной (устн. сообщ.), его максимальное развитие пришлось на те же станции, где наблюдалась наиболее высокая интенсивность биоломинесценции (рис 2 "б"). В этом районе таксономический состав фитопланктона представлен почти 100 видами и разновидностями, из которых более половины составляли перидинии. Однако около трети общего количества видов встречены единично. Массовыми оказались 11 видов, в числе которых *Ceratium fusus*, достигавший численности $13,0 \cdot 10^3$ кл.л⁻¹, и *Peridinium trochoideum* - широко распространенные биоломинесценты Черного моря в период его современного экологического состояния. При этом от 30 до 90% биомассы перидиниевых водорослей приходилось на *C. fusus*, биомасса которого в среднем составляла $0,9$ мг.л⁻¹. Это предопределило высокий коэффициент корреляции между биомассой фитопланктона и интенсивностью биоломинесценции на станциях этого разреза ($0,903$ при уровне значимости $0,05$). По полученным данным установлена зависимость ПБ от количественного развития фитопланктона. Эта связь описывается регрессиями вида:

$$Y_1 = 117,7 + 6,77 X_1;$$

$$Y_2 = 246,1 + 6,53 X_2,$$

где: X_1 - суммарная биомасса фитопланктона (мг·л⁻¹);

X_2 - общая численность его клеток в 1 л;

Y - интенсивность ПБ в 10^{-4} мквт·см⁻²·л⁻¹.

Выводы. 1. Параметры ПБ визуализируют детали вертикальной и горизонтальной структурированности планктонного сообщества. Показано однозначное соответствие изменения абсолютных показателей количественного развития фитопланктона и интенсивности биоломинесценции, которое с высоким коэффициентом корреляции описывается уравнениями линейной регрессии. 2. Структурные показатели ПБ различаются в различных водных массах. Так, в области ОЧТ и над зоной резкого свала глубин нижняя граница ПБ находилась на глубине около 60 м, оказываясь выше на 10-15 м между этими областями и над глубоководной акваторией.

1. Битюков Э.П. Горизонтальная неоднородность биолюминесцентного поля как показатель агрегированного распределения планктона // Гидробиол. журн. - 1984. - 20, №5. - С. 24 - 31.
2. Битюков Э.П., Василенко В.И., Токарев Ю.Н. и др. Результаты и перспективы биолюминесцентных исследований в Черном море // Экология моря. - 1996. - Вып. 45. - С. 19 - 25.
3. Битюков Э.П., Евстигнеев П.В., Токарев Ю.Н. Светящиеся Dinoflagellata Черного моря и влияние на них антропогенных факторов // Гидробиол. журн. - 1993. - 29, №4. - С. 27 - 34.
4. Геттнер М.В. Опыт построения типологии вертикального распределения океанического зоопланктона // Журн. общ. биол. - 1996. - 57, №1. - С. 44 - 66.
5. Гительзон И.И., Левин Л.А., Утюшев Р.Н. и др. Биолюминесценция океана. - СПб: Гидрометеоиздат, 1992. - 284 с.
6. Piontkovski S.A., Tokarev Yu.N., Bityukov E.P. et al. The bioluminescent field of the Atlantic Ocean // Mar.Ecol.Prog.Ser. - 1997. - 156. - P. 33 - 41.
7. Vasilenko V.I., Bityukov E.P., Tokarev Yu.N. et al. Hydrobiophysical device "Salpa" of the Institute of Biology of the Southern Seas used for bioluminescent investigation of the upper layers of the ocean. - J.W.Hastings, L.J.Kricka & P.E. Stanley (eds). Bioluminescence and Chemiluminescence. Molecular reporting with photons // Proc. 9th Intern. Symp., Woods Hole, October 1996.- Chichester, 1997. - P. 549 - 552.

Институт биологии южных морей НАНУ,
г. Севастополь

Получено 15. 09. 2000

Yu. N. TOKAREV, E. P. BITYUKOV, V. I. VASILENKO, B. G. SOKOLOV

THE BIOLUMINESCENCE FIELD AS A CHARACTERISTIC INDEX OF THE BLACK SEA PLANKTON COMMUNITY STRUCTURE

Summary

The materials on investigation of the bioluminescence field characteristics, received during 35-th cruise of the R/V "Professor Vodyanitsky" in autumn 1991, at 100-miles section from the Kalamita Gulf to the point with coordinates 43°48' N and 31°32' O are present. A difference in structural indices of the bioluminescence field in different water masses is shown. A tendency for a decrease in thickness of the upper layer of an increased luminescence and lowering of its intensity in the south-west direction was observed. Lower layer of an increased luminescence also degraded and over the deep-water parts the bioluminescence field had a one-maximum structure. A correspondence of quantitative development of phytoplankton and bioluminescence intensity, described with high coefficient of correlation by linear regression equations was registered. Moreover, in the regions undergoing anthropogenic effect the role of a mass bioluminescent passes from *Noctiluca scintillans* to *Ceratium fusus*.