

УДК 591.148:574.52(262.5)

Е. Б. Мельникова, Н. В. Лямина

**ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛЯ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В
ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД**

Исследовано вертикальное распределение интенсивности поля биолюминесценции и рассмотрена его связь с гидродинамическими и гидрологическими характеристиками среды. Показано, что вертикальный профиль интенсивности поля биолюминесценции может быть аппроксимирован гладкой кривой функции гамма-распределения.

Ключевые слова: биолюминесцентные гидробионты, интенсивность поля биолюминесценции, Черное море, вертикальное распределение, гамма-распределение.

Известно, что интенсивность поля биолюминесценции (ИПБ) тесно коррелирует с концентрацией морских гидробионтов и отражает пространственно-временное распределение планктона, поэтому его изучение важно для понимания функционирования морских экосистем [2, 4]. В течение последних десятилетий накоплено достаточно большое количество сведений о вертикальном распределении биолюминесцентных организмов в Черном море и описаны региональные особенности вертикального изменения ИПБ [1, 4, 10, 11, 13]. Однако в этих исследованиях не уделено достаточного внимания изменению формы вертикального профиля ИПБ в зависимости от гидродинамических и гидрологических условий среды, в том числе в районах взаимодействия вод шельфовых и глубоководных акваторий вдоль Крымского побережья, а также отсутствует ее математическое описание.

Целью работы было установление особенностей вертикального распределения ИПБ в осенний период в прибрежных водах Крыма с учетом влияния циркуляции вод, а также нахождение его математической модели.

Материал и методика исследований. Исследования вертикальной структуры ИПБ проводили в осенний период (октябрь — ноябрь) 2010 г. в 67 и 68-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий». Основой работы были данные, полученные на 14 станциях, расположенных на мелководном шельфе западнее м. Тарханкут и в глубоководной северо-западной части моря на разрезе м. Херсонес — Босфор, а также на шельфе у юго-западного побережья Кры-

© Е. Б. Мельникова, Н. В. Лямина, 2015

ма в районе расположения антициклонических вихрей и в северо-восточной части Черного моря (рис. 1).

Пространственное распределение ИПБ исследовали методом многократного батифотометрического зондирования толщи воды с использованием гидробиофизического комплекса «Сальпа-М» [3]. С его помощью измеряли также температуру и электропроводность воды, которую пересчитывали в соленость. Дискретность измерений в режиме зондирования со скоростью $1,2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ составляла 1 м. Съёмки проводили в ночное время. На станциях выполнено по десять зондирований с интервалом 2 мин. Полученный массив данных позволил провести статистический анализ варибельности вертикальных профилей ИПБ в осенний период. Для оценки и сравнения их формы и ее связи с гидрологическими характеристиками определяли глубины верхнего квазиоднородного и холодного глубоководного слоя, в котором температура была относительно постоянной. Определяли слой с высокой ИПБ, в котором она была не меньше половины максимальной.

Для аппроксимации измеренных значений гладкой кривой использовали функцию плотности гамма-распределения [8], которая имеет вид:

$$f(x; a, b) = \begin{cases} \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-\frac{x}{b}}, & \text{при } 0 \leq x < \infty; \\ 0, & \text{при } x < 0, \end{cases} \quad (1)$$

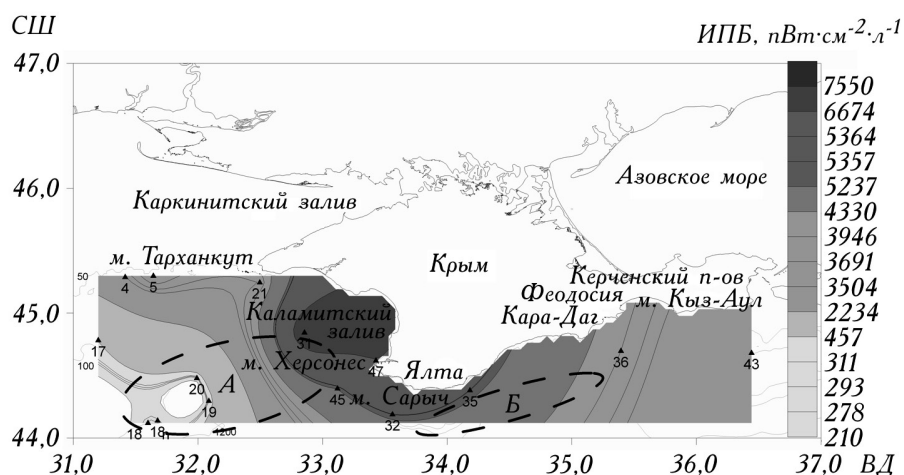
Где $\Gamma(a) = \int_0^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt$ — Г-функция Эйлера; a — параметр «форма», ($a > 0$); b — параметр «масштаб» ($b > 0$); $e = 2,71$ — число Эйлера.

Для проверки согласованности гамма-распределения с эмпирическими данными по вертикальному распределению ИПБ применили непараметрический критерий Колмогорова. Расчетную величину λ^2 находили по формуле [7]

$$\lambda^2 = D_n^2 \frac{n_1 n_2}{n_1 - n_2},$$

где λ^2 — критерий Колмогорова; n_1, n_2 — количество измерений в сравниваемых распределениях; $D_n = \max \left| \sum f_i - \sum f_i' \right|$ — расчетная статистика; $\sum f_i$ — измеренные значения вертикального распределения ИПБ; $\sum f_i'$ — значения функции гамма-распределения.

Далее сравнивали полученные значения λ^2 с критическим значением критерия Колмогорова для уровня значимости 0,05, равным $\lambda_{0,05}^2 = 1,84$ [7]. Если выполняется условие $\lambda^2 \leq \lambda_{0,05}^2$, то с вероятностью 95% нет значимых различий между характером измеренного распределения ИПБ и кривой функции плотности гамма-распределения.



1. Расположение станций, антициклонические вихри и интенсивность поля биоломинесценции в верхнем квазиоднородном слое: а — Севастопольский вихрь; б — Прибрежный вихрь.

Результаты исследований и их обсуждение

Измеренные значения интенсивности свечения гидробионтов в верхнем квазиоднородном слое приведены в таблице. Следует отметить, что определяющими факторами концентрации живых организмов и скорости протекания биологических процессов в толще воды являются температура и динамика водных масс [6, 14—18]. Установлены зависимости [6, 5, 12] между типом циркуляции последних и пространственным распределением общей биомассы планктона. Вдоль правого края Основного Черноморского течения образуется антициклоническая завихренность, представленная системой квазистационарных вихрей. Наибольшего развития они достигают вдоль Южного берега Крыма от Феодосии до Ялты и в северо-западной части моря [6, 12]. Наиболее крупные вихри — Севастопольский и Прибрежный (рис. 1).

Механизм влияния циркуляционных процессов на распределение планктона объясняется следующим. В центрах антициклонических круговоротов, являющихся конвергентными образованиями, происходит накопление поверхностных, как правило малопродуктивных, вод и их последующее опускание на глубину, в то время как на периферии этих круговоротов и прилегающих участках развивается компенсационный подъем обогащенных биогенными веществами глубинных вод, способствующих развитию фито- и зоопланктона [5, 6].

Мелководный шельф северо-западной части моря представляет собой область, не подверженную влиянию трансформированных речных вод [9]. Зимнее выхолаживание и летний прогрев определяют значительную изменчивость гидрологической структуры этого района. Поздней осенью происходит конвективное перемешивание водной толщи и наблюдается вертикальная гомотермия. На станциях в районе м. Тарханкут и ст. 47, расположен-

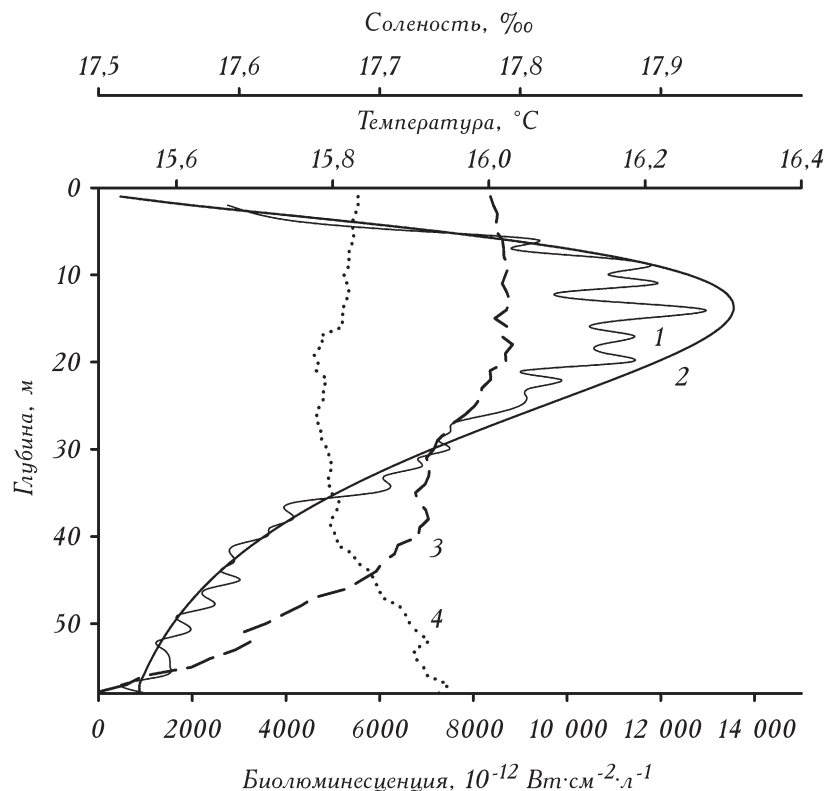
Интенсивность поля биолюминесценции (ИПБ) в верхнем квазиоднородном слое Черного моря и параметры функции плотности гамма-распределения

Станции	Глубина района, м	Верхний квазиоднородный слой				Параметры гамма-распределения		Критерий Колмогорова (λ^2)
		мощность, м	ИПБ, пВт·см ⁻² ·л ⁻¹	T, °C	S, ‰	a	b	
Мелководный шельф северо-западной части								
4	53	42	4253	15,6	17,75	2,5	8,7	0,454
5	52	41	4418	15,4	17,76	2,4	9,0	0,102
21	55	44	3925	17,1	17,72	2,7	8,9	0,114
47	64	58	6674	16,0	17,70	2,5	8,8	0,163
Центральная область антициклонических круговоротов								
18н	1870	25	311	14,6	18,00	5,0	3,5	0,231
18	1215	26	293	14,5	18,00	5,5	3,5	0,924
19	1470	27	272	15,2	17,84	4,0	4,0	0,888
20	1285	24	210	16,0	17,75	3,5	3,8	0,595
Периферийная область антициклонических круговоротов								
31	123	26	9766	15,4	17,77	2,5	5,0	0,049
32	163	27	6477	16,6	17,60	2,7	6,7	0,087
35	125	25	5481	16,3	17,53	2,5	6,4	0,786
36	93	23	4394	16,4	17,54	2,6	6,5	0,382
45	1250	30	5983	16,6	17,57	2,7	6,7	0,520
Северо-восточная часть								
43	79	18	2234	15,7	17,53	9,0	1,3	0,305

ной на траверсе бух. Круглой (глубины 50—65 м), верхний квазиоднородный слой составлял в среднем 80% общей глубины, а слой с высокой ИПБ — 30—40 м. На рисунке 2 изображены характерные для мелководного шельфа значения ИПБ, их аппроксимация функцией плотности гамма-распределения и вертикальные профили температуры и солёности.

Каламитский зал. характеризуется низкой интенсивностью волновых процессов и высокой концентрацией планктона, в том числе и светящегося [9, 10, 12]. Так, на ст. 31 ($h = 123$ м), расположенной в заливе на периферии квазистационарного антициклонического Севастопольского вихря, значение ИПБ было самым высоким в исследуемом районе (см. рис. 1, таблицу).

На станциях 32, 35, 36 ($h > 100$ м), расположенных на периферийных участках, занятых Прибрежным антициклоническим вихрем вдоль Южного берега Крыма от м. Сарыч до г. Феодосии, динамика вод была аналогичной.

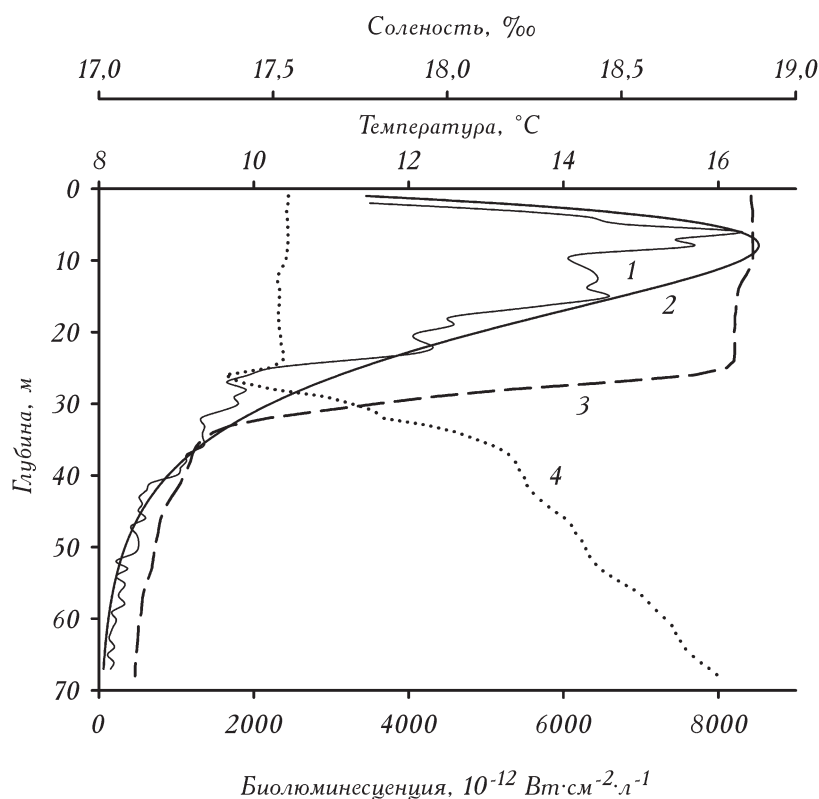


2. Интенсивность поля биолюминесценции (1), аппроксимирующая функция гамма-распределения (2) и вертикальные профили температуры (3) и солености (4) на ст. 47.

Верхний квазиоднородный слой составлял в среднем 20% общей глубины, и в нем были зарегистрированы высокие показатели ИПБ (см. рис. 1, таблицу). Характерный вертикальный профиль ИПБ станций в периферийных областях антициклонических вихрей имел вытянутую форму (рис. 3), при этом слой с высокой ИПБ достигал 20—26 м и располагался в квазиоднородном на глубине более 4 м. Холодный глубоководный слой составлял почти 80% общей глубины, ИПБ в нем не превышала 10% максимальной.

В центральной области антициклонических круговоротов на глубоководных станциях 18, 18н, 19, 20 ($h \approx 1500$ м) верхний квазиоднородный слой располагался до глубины 20—25 м и составлял в среднем 2% общей. Начиная с 20—25 м температура снижалась в среднем до 8°C и оставалась постоянной.

Интенсивность свечения гидробионтов на этих станциях была самой низкой и составляла 210—450 пВт·см⁻²·л⁻¹, что в десять раз и более меньше, чем на шельфе в северо-западной части моря и у юго-западного побережья Крыма (см. рис. 2, таблицу). Вертикальный профиль ИПБ на этих станциях имел сходный характер (рис. 4). Слой с высокой ИПБ составлял 17 м и

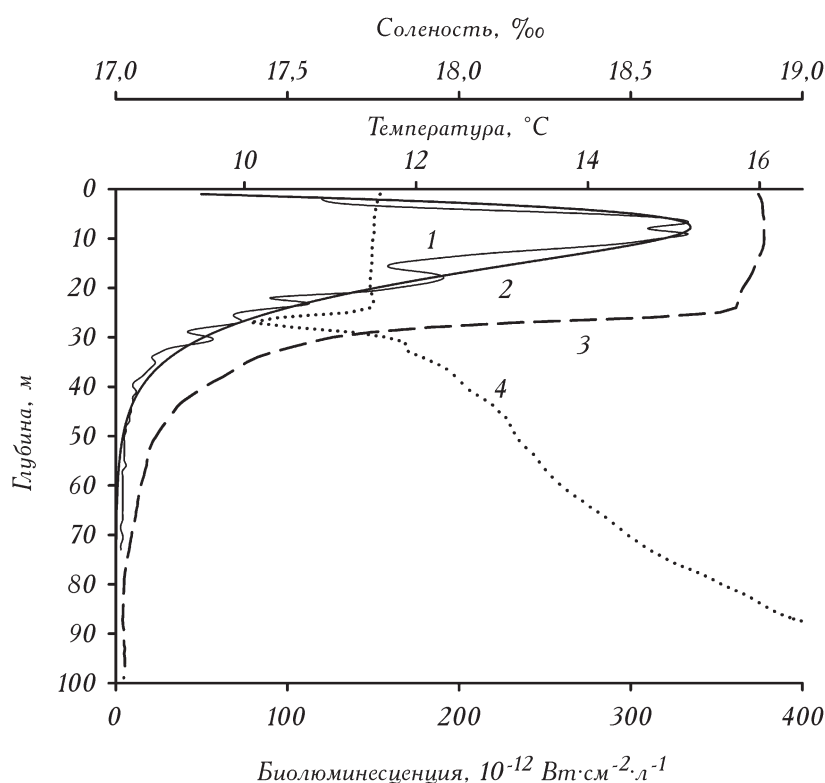


3. Интенсивность поля биоломинесценции (1), аппроксимирующая функция плотности гамма-распределения (2) и вертикальные профили температуры (3) и солености (4) на ст. 35.

располагался в квазиоднородном на глубине более 6 м. В холодном глубоководном слое ИПБ не превышала $20\text{--}30 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$.

Ст. 45 ($h = 1250 \text{ м}$) расположена в глубоководном районе юго-западнее м. Херсонес в месте подъема вод на периферии антициклонического Севастопольского вихря. Верхний прогретый квазиоднородный слой на этой станции составлял 2,4% общей глубины, а ИПБ в нем достигала $5983 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$, что в 20 раз больше, чем на глубоководных станциях, расположенных в центре антициклонического круговорота (см. таблицу). Вертикальный профиль ИПБ имел достаточно узкую вытянутую форму. Слой с высокой ИПБ располагался в верхнем квазиоднородном на глубине более 5 м и составлял 25 м. С увеличением глубины температура понижалась на $5\text{--}7^\circ\text{C}$ и далее ($h > 50 \text{ м}$) располагался холодный слой с постоянной температурой и низкой ИПБ (не более $125 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$).

Наименее мощный квазиоднородный слой (18 м) отмечен на ст. 43 напротив Керченского пролива ($h = 79 \text{ м}$). Слой с высокой ИПБ ($2234 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$) располагался на глубине более 8 м и составлял 7 м.



4. Интенсивность поля биоломинесценции (1), аппроксимирующая функция плотности гамма-распределения (2) и вертикальные профили температуры (3) и солёности (4) на ст. 20.

Анализ распределения солёности в верхнем квазиоднородном слое в исследованных акваториях Чёрного моря показал, что в позднесенний период характер ее изменчивости не имеет ярко выраженного тренда (см. таблицу). Более низкие показатели на станциях 32, 35, 36, 43 и 45 формируются в основном под влиянием азово-черноморских вод, приносимых Основным Черноморским течением [2]. Понижение солёности способствует некоторому уменьшению ИПБ.

Особенности вертикального профиля ИПБ в позднесенний период на станциях вдоль Крымского побережья определялись преимущественно динамикой водных масс, температурой и, в некоторой степени, солёностью. На станциях, расположенных на периферии антициклонических вихрей (см. рис. 1), ИПБ в верхнем квазиоднородном слое была в десять раз и более выше средней на станциях, расположенных в центре антициклонического вихря.

На всех исследованных станциях слой с высокой ИПБ в осенний период располагался в верхнем квазиоднородном, где ее значения вначале возрастали до максимальных, а затем с увеличением глубины снижались. В холодном глубоководном слое ИПБ не превышала 10% максимальной. Вертикальное распределение ИПБ имеет несимметричный характер с вытянутой ниж-

ней частью, на которую наложены незначительные хаотические отклонения (см. рис. 2—4).

Для подбора плавной функции, характеризующей вертикальное распределение ИПБ, необходимо было выяснить, какое из известных распределений наилучшим образом аппроксимирует измеренные значения. Было установлено, что этим целям отвечает функция гамма-распределения (см. выражение (1)). В качестве оценки схожести измеренных значений и аппроксимирующей кривой применили критерий Колмогорова (см. выражение (4), рис. 2—4, таблицу). Установлено, что для всех станций величина λ^2 , характеризующая значения критерия Колмогорова, меньше критического значения для уровня значимости 0,05, равного $\lambda_{0,05}^2$ (см. таблицу), следовательно, вертикальный профиль ИПБ в исследуемых районах в осенний период можно с вероятностью 95% описать функцией плотности гамма-распределения.

Заключение

Вертикальное распределение ИПБ в осенний период как на мелководном шельфе, так и в глубоководной части Черного моря имеет вид несимметричной кривой с максимумом в верхнем квазиоднородном температурном слое и постепенным уменьшением в более глубоких слоях. В холодном глубоководном слое суммарная ИПБ не превышала 10% максимального значения.

На глубину расположения слоя с высокой ИПБ и его мощность существенно влияют квазистационарные антициклонические вихри. Так, в центральной области антициклонических вихрей ИПБ была низкой (2102—450 пВт см⁻² л⁻¹), а на их периферии она возрастала в десять раз и более.

В осенний период в прибрежных водах Черного моря функция плотности гамма-распределения с вероятностью 95% может быть использована в качестве математической модели, описывающей вертикальные изменения ИПБ.

**

Досліджено вертикальний розподіл інтенсивності поля біоломінесценції та розглянуто її зв'язок з гідродинамічними та гідрологічними характеристиками середовища. Показано, що вертикальний профіль інтенсивності поля біоломінесценції може бути апроксимований кривою функції густини гама-розподілу.

**

The vertical structure of the bioluminescence field intensity and its relation with the hydrodynamic and hydrological features of the environment was investigated. The vertical profile of the bioluminescence field intensity can be approximated by a smooth curve function of the gamma distribution.

**

1. Битюков Э.П., Василенко В.И., Серикова И.М., Токарев Ю.Н. Результаты и перспективы исследования биоломинесценции в Черном море // Экология моря. — 1996. — Вып. 45. — С. 19—25.

2. Блатов А. С., Булгаков Н. Г., Иванов В. А. и др. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 240 с.
3. Бурмистрова Н.В., Токарев Ю.Н., Василенко В.И., Жук В.Ф. Организация и проведение биофизического мониторинга планктонного сообщества прибрежной акватории Севастополя: первые результаты // Тез. докл. Междунар. науч. конф. «Современные проблемы морской инженерной экологии (изыскания, ОВОС, социально-экономические аспекты)», Ростов н/Д, 9—11 июня 2008 г. — Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2008. — С. 59—62.
4. Гительзон И.И., Левин Л.А., Утюшев Р.Н. и др. Биолюминесценция в океане. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 283 с.
5. Зуев Г.В., Мельникова Е.Б. Внутривидовая неоднородность шпрота *Sprattus sprattus phalericus* Risso (Pisces: Clupeidae) в западной части Черного моря // Мор. экол. журн. — 2007. — Т. 6, № 4. — С. 31—41.
6. Ильин Ю.П., Белокопытов В.Н. Сезонная и межгодовая изменчивость параметров холодного промежуточного слоя в области Севастопольского антициклонического круговорота // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зоны и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2005. — Вып. 12. — С. 29—41.
7. Лемешко Б.Ю., Постовалов С.Н. Применение непараметрических критериев согласия при проверке сложных гипотез // Автометрия. — 2001. — № 2. — С. 88—102.
8. Орлов А.И. Математика случая: Вероятность и статистика — основные факты. — М.: МЗ-Пресс, 2004. — 110 с.
9. Совга Е.Е., Жоров В.А., Богуславский С.Г., Сигень В.П. Районирование акватории северо-западной части Черного моря при математическом моделировании шельфовых экосистем // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2005. — Вып. 12. — С. 421—428.
10. Токарев Ю.Н. Основы биофизической экологии гидробионтов. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. — 342 с.
11. Токарев Ю.Н., Битюков Э.П., Василенко В.И., Соколов Б.Г. Поле биолюминесценции — характерный показатель структуры планктонного сообщества Черного моря // Экология моря. — 2000. — № 53. — С. 20—25.
12. Токарев Ю.Н., Мельников В.В., Белокопытов В.Н. и др. Некоторые аспекты формирования синоптической изменчивости поля биолюминесценции и скоплений планктона в Черном море // Мор. экол. журн. — 2007. — Т. 6, № 4. — С. 69—79.
13. Черепанов О.А., Левин Л.А., Утюшев Р.Н. Связь биолюминесценции с биомассой и численностью светящегося и всего планктона. Баренцево и Норвежское море // Там же. — № 1. — С. 55—65.
14. Melnikova Ye.B., Tokarev Yu.N., Burmistrova N.V. Regularities of changes of the bioluminescence field in the Black Sea coastal waters // Hydrobiol. J. — 2013. — Vol. 49, N 3. — P. 105—111.
15. Soldatov A.A. On the issue of classification of the hypoxic states of the aquatic organisms // Ibid. — 2012. — Vol. 48, N 4. — P. 3—17.

16. *Soldatov A.A., Parfyonova I.A.* Oxygen binding by marine fish blood under hypothermic experimental conditions // *Ukr. Biokhim. Zh.* — 2011. — Vol. 83, N 1. — P. 77—82.
17. *Tokarev Yu.N., Melnikova E.B.* On the issue of effect of hydrophysical parameters on intensity of bioluminescence field in the Black Sea // *Hydrobiol. J.* — 2012. — Vol. 48, N 4. — P. 93—99.
18. *Zuyev G.V., Melnikova Ye.B., Gutsal D.K. et al.* Fish resources of the Black Sea (composition, state of stock, exploitation) // *Ibid.* — 2010. — Vol. 46, N 6. — P. 16—25.

Институт биологии южных морей, Севастополь

Поступила 19.11.14