

УДК 591.148:574.52(262.5)

Е. Б. Мельникова, Ю. Н. Токарев, Н. В. Лямина

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ
ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛЯ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
ПРИБРЕЖНЫХ ВОД ЧЁРНОГО МОРЯ**

Исследовано изменение вертикального профиля интенсивности поля биолюминесценции в ночное время в прибрежных водах Черного моря. Показано, что по характеру динамики биолюминесценции толщу воды можно разбить на два слоя: верхний (0—35 м) и глубоководный (35—60 м). Отмечены особенности процессов в этих слоях. Выявлено, что основной причиной вариабельности поля биолюминесценции являются жизненные ритмы планктонных сообществ.

Ключевые слова: биолюминесценция, Чёрное море, водные слои, факторы, кластерный анализ, планктонные сообщества.

Исследование суточной динамики жизненных ритмов биолюминесценто-в имеет важное значение для выявления общих закономерностей в суточном ритме интенсивности поля биолюминесценции, а также причин, вызывающих эти изменения. Известно, что различные фракции планктона (бактерио-, фито-, мезозоо- и макрозоопланктон) играют разную роль в изменении интенсивности поля биолюминесценции в течение суток [18, 20]. Так, Э. П. Битюков [1] отметил флюктуации характеристик поля биолюминесценции различных горизонтов на протяжении ночи по количеству и интенсивности составляющих его вспышек. Однако какой-либо информации о закономерностях отмеченных изменений приведено не было. Возможно, это было связано с тем, что измерения не охватывали весь темный период суток и всю водную толщу, а также были проведены с большим временным интервалом между измерениями.

Целью данной работы явилось исследование закономерностей интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток, а также анализ и оценка факторов, влияющих на эти процессы в прибрежных водах Черного моря.

Материал и методика исследований. Экспериментальные материалы получены в 67-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» 19—20 октября 2010 г. Исследования вертикальной структуры интенсивности поля биолюминесценции проводили методом многократного батифотометрического зондирования толщи воды, используя гидробиофи-

© Е. Б. Мельникова, Ю. Н. Токарев, Н. В. Лямина, 2013



1. Схема района исследования (треугольником отмечено место отбора проб).

зический комплекс «Сальпа-М» [3]. С его помощью также определяли температуру, мутность и солёность воды на горизонте измерения. Глубина в открытой акватории Черного моря у западных берегов Крыма на траверзе бух. Круглой, где проводились исследования, составляла около 70 м (рис. 1).

На станции с 17 ч 19.10.2010 г. до 6 ч 20.10.2010 г. проведено по 10 зондирований каждый час с интервалом в 2 мин, что позволило получить усредненные данные интенсивности поля биолюминесценции по каждому часу темного времени суток.

Статистическая обработка результатов исследований производилась согласно разработанной нами методике, основанной на кластерном анализе [2]. Её суть состоит в том, что для оценки характера изменения интенсивности поля биолюминесценции на разных водных горизонтах в темное время суток и ее связи с биотическими и абиотическими факторами всю толщу воды от 0 до 60 м разбили на 5-метровые слои. В результате было выделено двенадцать отдельных монокластеров, образованных выделенными слоями 0—5 м, 5—10 м, ... , 55—60 м.

Далее для каждого из слоев (кластеров) была определена суточная динамика интенсивности поля биолюминесценции с последующей группировкой кластеров агломеративно-иерархическим методом. Этот метод группировки кластерного анализа был выбран потому, что он позволяет проводить последовательное объединение водных слоев в кластеры по степени их близости друг к другу. Кластерное решение в этом случае представляет собой иерархическую структуру «вложенных» друг в друга кластеров.

В качестве меры сходства характера изменений интенсивности поля биолюминесценции, происходящих в различных слоях водной толщи, использовали манхэттенское расстояние, определяемое по формуле [12]

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|, \quad (1)$$

где d_{ij} — расстояние между i -той и j -той группами; x_{ik} — численное значение k -той переменной для i -той группы; x_{jk} — численное значение k -той переменной для j -той группы.

При проведении кластеризации использовали метод Варда [22], позволяющий представить в виде отдельных кластеров параметры биолюминесценции в различных слоях водной толщи. В качестве расстояния $dis(Y, X)$ между кластерами X и Y использовали прирост суммы квадратов расстояний объектов до центров кластеров, получаемый в результате их объединения [12, 22]:

$$dis(X, Y) = \frac{n_x n_y}{n_x + n_y} (\bar{X} + \bar{Y})^T (\bar{X} + \bar{Y}), \quad (2)$$

где \bar{X} , \bar{Y} — радиус-векторы центров кластеров; n_x , n_y — количество элементов в кластерах. Верхний индекс T означает транспонирование.

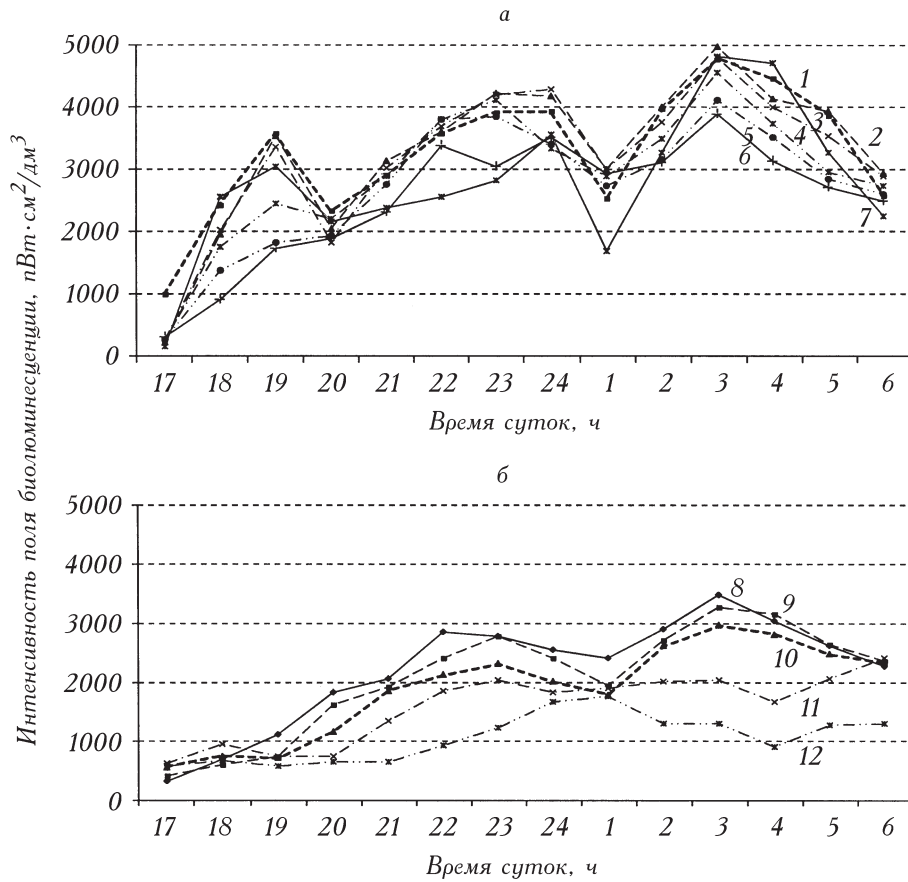
Это позволило минимизировать внутригрупповую сумму квадратов расстояний для любых двух вновь формируемых кластеров, так как на каждом шаге объединяются такие два близко расположенные кластера, которые приводят к минимальному увеличению внутригрупповой суммы квадратов расстояний. Математическую обработку результатов проводили с использованием программ Microsoft Excel 7.0, SPSS, Statistica 6.0.

Результаты исследований и их обсуждение

На рисунке 2 изображена последовательность группировки водных слоев агломеративно-иерархическим методом с использованием соотношения (2). На дендрограмме репрезентативно представлен процесс агломерации (слияние отдельных водных слоев в единый окончательный кластер). Для каждого узла в дендрограмме (там, где формируется новый кластер) указана внутригрупповая сумма квадратов расстояний, при которой соответствующие водные слои связываются в новый объединяющий кластер.

В результате агломерации получено два независимых кластера: — верхний, объединяющий слои 0—35 м и глубоководный — 35—60 м. На последнем шаге итерации большое расстояние между двумя итоговыми кластерами (внутригрупповая сумма квадратов расстояний более чем в три раза превышает расстояния объединения на предыдущем шаге итерации) показывает их несхожесть, что исключает целесообразность дальнейшего объединения кластеров.

Экспериментальные результаты по динамике интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток в выделенных кластерах показаны на рисунке 3. Интенсивность поля биолюминесценции изображена послойно, с толщиной слоя 5 метров. Из представленного иллюстративного материала видно, что динамика интенсивности поля биолюминесценции верхнего кластера (0—35 м) достоверно отличается от глубоководного (35—60 м).

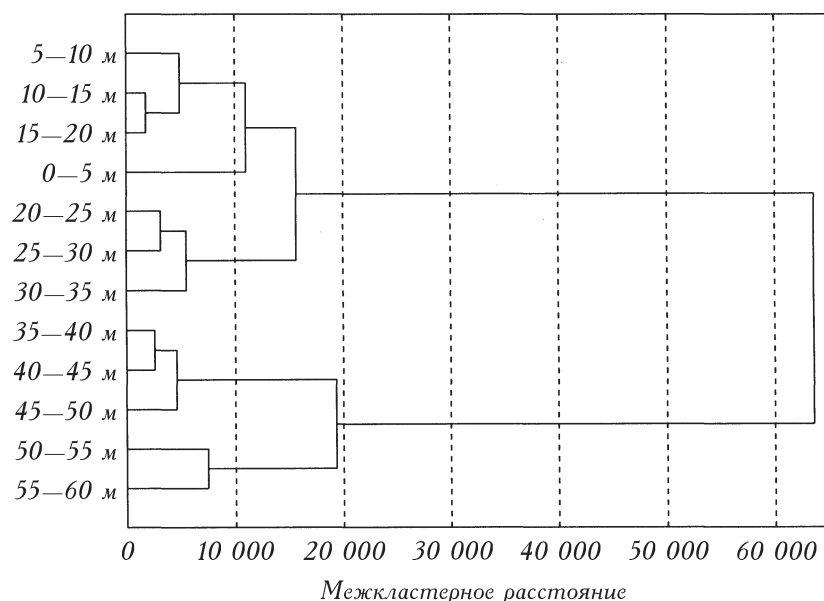


2. Дендрограмма кластеризации водных слоев и межкластерные расстояния.

Рассмотрение изменения интенсивности поля биолуминесценции в верхнем слое показало хорошо выраженную периодичность нарастания и убывания интенсивности свечения биолуминесцентных организмов (рис. 3, а). Колебания интенсивности поля биолуминесценции в верхнем слое имеют характер трехвершинной кривой с максимумами в 19, 24 и 3 ч при минимумах в 20, 1 и 5 ч. Следует отметить, что интенсивность поля биолуминесценции в 3 ч утра была в 1,5 раз выше, чем в 19 ч вечера, и в 1,2 раза выше, чем в 24 ч ночи.

В глубоководном слое (рис. 3, б) динамика интенсивности поля биолуминесценции имеет значительно менее выраженные экстремумы интенсивности свечения. Интенсивность поля биолуминесценции на глубине более 35 м в исследуемый период была в 1,5—2 раза меньше, чем в верхнем 35-метровом слое.

Расчеты показали, что статистическая вероятность достоверности различий суточных изменений интенсивности поля биолуминесценции в верхнем и нижнем слоях составляет 89% [17].



3. Суточные изменения интенсивности поля биолюминесценции: *a* — в верхнем слое: 1 — 0–5 м; 2 — 5–10 м; 3 — 10–15 м; 4 — 15–20 м; 5 — 20–25 м; 6 — 25–30 м; 7 — 30–35 м; *б* — в глубоководном слое: 8 — 35–40 м; 9 — 40–45 м; 10 — 45–50 м; 11 — 50–55 м; 12 — 55–60 м.

Резкие изменения интенсивности поля биолюминесценции в верхнем слое, по нашему мнению, связаны с особенностями функционирования планктонных сообществ, в частности зоопланктона, этих глубин. Действительно, исследованная нами динамика изменений интенсивности поля биолюминесценции в течение темного времени суток во многом совпадает с суточным ритмом питания зоопланктона. Рядом авторов [5–7, 11, 13–15] установлено, что в суточных изменениях численности фито- и зоопланктона в Чёрном море существует определенная периодичность, зависящая от комплекса факторов.

Отсюда можно предположить связь ночного ритма интенсивности поля биолюминесценции с питанием зоопланктона. Согласно данным Т. С. Петипа [15], в слое 10–25 м все стадии *Calanus euxinus* и *Calanus helgolandicus* потребляли основную часть суточного рациона в ночное время. Проведенные ранее наблюдения в разных районах Черного моря в различные сезоны и годы, при весьма разнообразных гидрологических и метеорологических условиях, выявили схожие особенности в суточном ритме количественных изменений планктона [4, 6, 7, 9, 11, 13, 14, 16, 18, 20].

Наблюдения за питанием копепод *Acartia clausi* и *A. latisetosa* показали, что в интенсивности питания этих видов на протяжении суток выделяются два максимума [15, 16]. Е. П. Делало [6] и Е. В. Павлова [14], изучая питание *Paracalanus parvus* и *Penilia avirostris*, выявили, что у этих рачков также наблюдается хорошо выраженная суточная ритмика питания, описываемая

двухвершинной кривой. При этом у *Paracalanus parvus* пик интенсивности питания регистрировали в темное время суток (20—21 ч), а у *Penilia avirostris* — в предутреннее время — в 5—6 ч.

Сравнение результатов наших исследований с исследованиями этих авторов показывает, что на глубинах от 5—10 м до 25—30 м как ритм питания зоопланктона, так и интенсивность поля биолюминесценции характеризуются четко выраженными спадами и нарастаниями. В глубоководных слоях ритм питания зоопланктона и интенсивность поля биолюминесценции в темное время суток отличаются менее значительными колебаниями.

Таким образом, с учетом приведенных выше результатов исследований суточной динамики питания зоопланктона, совпадение полученных нами результатов по вариабельности интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток с биологическими ритмами питания копепод не выглядит случайным.

Что касается суточной динамики численности фитопланктона, в том числе и светящегося, то она, по мнению многих исследователей [1, 4, 10, 11, 13], определяется, в первую очередь, соотношением темпа деления клеток фитопланктона и интенсивности выедания их зоопланктоном. Оба эти процесса протекают одновременно, их влияние практически равнозначно, и поэтому они в значительной степени маскируют друг друга. Однако достаточно незначительного нарушения равнозначности этих процессов, как это сразу отражается на численности фитопланктона и, соответственно, интенсивности поля биолюминесценции.

В отношении суточной ритмики деления клеток планктонных водорослей существуют разные мнения. Так, Л. А. Ланская [11], исследуя скорость деления клеток черноморского фитопланктона, пришла к выводу, что деление большинства видов динофлагеллят происходит круглосуточно, но максимальное количество делящихся клеток приходится на вечерние часы (18—19 ч) и ночное время. Вместе с тем, А. В. Ковалёв [8] и Н. Г. Столбова с соавторами [19] отмечали максимальную репродукцию клеток в ночные и предутренние часы.

Изложенные закономерности деления клеток фитопланктона на протяжении суток позволяют предположить, что появление в наших исследованиях первого пика интенсивности поля биолюминесценции в 19 ч, нарастание его интенсивности к 24 ч и образование третьего максимума биолюминесценции пелагиали в 3 ч (см. рис. 3) являются результатом превалирования скорости деления светящихся клеток динофлагеллят над интенсивностью их выедания зоопланктоном в это время. Это согласуется с ранее высказанным предположением [21] о механизмах образования ночных максимумов поля биолюминесценции в морях Средиземноморского бассейна, с той лишь разницей, что в условиях неритической зоны Черного моря влиянием вертикальных миграций зоопланктона можно пренебречь.

На это указывает и анализ гидрологических условий в период проводимых измерений. В октябре на траверзе бух. Круглой еще сохранялась теп-

лая погода со слабыми ветрами и небольшим волнением. Ветер носил бризовый характер и скорость его составляла около $2\text{--}3\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Гидрологические условия в районе станции были относительно устойчивыми. Температура и соленость воды на глубинах от 0 до 60 м сохранялись неизменными на протяжении суток. Наибольшая амплитуда колебаний температуры воды в темное время суток составляла 1°C (от $16,2$ до $17,3^\circ\text{C}$). Колебания солености на протяжении суток были ещё меньшими ($\pm 0,08\text{‰}$), при средней солености $17,73\text{‰}$.

Таким образом, причиной выявленных нами особенностей variability поля биолюминесценции в прибрежье г. Севастополя в темный период суток являются ритмы суточных биологических процессов в планктонных сообществах.

Заключение

В течение темного времени суток в неритической зоне Черного моря выявлены 2 кластера демонстрирующих различия в динамике интенсивности поля биолюминесценции. В диапазоне глубин $0\text{--}35\text{ м}$ поле биолюминесценции характеризуется резкими нарастаниями интенсивности (в 19, 24 и 3 ч) и её спадами (в 20, 1 и 5 ч).

Основными биотическими факторами, определяющими периодичность экстремумов в интенсивности поля биолюминесценции в неритической зоне Черного моря, являются интенсивность деления клеток фитопланктона в темное время суток и скорость выедания его зоопланктоном.

**

Досліджено зміну вертикального профілю інтенсивності поля біолюмінесценції в нічний час в прибережних водах Чорного моря. Показано, що за характером динаміки біолюмінесценції товщу води можна розбити на два шари: верхній ($0\text{--}35\text{ м}$) і глибоководний ($35\text{--}60$). Відзначено особливості процесів у цих шарах. З'ясовано, що основною причиною варіабельності поля біолюмінесценції є життєві ритми планктонного угруповання.

**

The change of the vertical profile of the field intensity of bioluminescence at night in the coastal waters of the Black Sea. It is shown that the nature of the dynamics of the water column bioluminescence can be divided into two layers: the upper ($0\text{--}35\text{ m}$) and deep ($35\text{--}60$). The peculiarities of the processes in these layers. Revealed that the main cause of variability in the intensity of the bioluminescence field are vital rhythms of the plankton community.

**

1. Битюков Э.П., Рыбасов В.П., Шайда В.Г. Годовые изменения интенсивности биолюминесцентного поля в неритической зоне Чёрного моря // Океанология. — 1967. — Т. 7, № 6. — С. 1089–1099.
2. Боровиков В.П. Популярное введение в программу STATISTICA. — М.: КомпьютерПресс, 1998. — 267 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. Современные проблемы морской инженерной экологии (изыскания, ОВОС, социально-экономические аспекты) // Междунар. науч. конф.: Тез. докл., Ростов н/Д, 9—11 июня 2008 г. — Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2008. — С. 59—62.
4. Грезе В. Н. Суточные изменения фитопланктона в Черном море // Основы биологической продуктивности Черного моря / Под ред. В.Н. Грезе. — Киев: Наук. думка, 1979. — С. 79—85.
5. Губанова А.Д., Поликарпов И.Г., Сабурова М.А., Прусова И.Ю. Многолетняя динамика мезозoopланктона в Севастопольской бухте (1976—1996) на примере Сорерода // Океанология — 2002. — Т. 42, № 3. — С. 1—9.
6. Делало Е.П. О суточном ритме в питании *Pseudocalanus elongatus* (Воеск) // Тр. Севастоп. биол. ст. АН УССР. — 1961. — Т. 15. — С. 94—100.
7. Загородняя Ю.А. Оценка величины суточного выедания фитопланктона веслоногим рачком *Pseudocalanus elongatum* (Воеск) на основе физиологического расчета его рациона // Биология моря. — Киев, 1977. — Вып. 42 — С. 95—100.
8. Ковалев А.В. Структура зоопланктонных сообществ Атлантики и Средиземноморского бассейна. — Киев: Наук. думка, 1991. — 144 с.
9. Ковалев А.В. Зоопланктон. 1. Мезозoopланктон // Планктон Черного моря / Под ред. А.В. Ковалева. — Киев: Наук. думка, 1993. — С. 144—165.
10. Кондратьева Т.М. Суточные изменения фитопланктона в Чёрном море // Тр. Севастоп. биол. ст. АН УССР. — 1963. — Т. 6. — С. 53—70.
11. Ланская Л.А. Суточный ход деления некоторых видов планктонных водорослей Черного моря в культурах // Биология и распределение планктона южных морей. — М.: Наука, 1967. — С. 16—21.
12. Мангель И.Д. Кластерный анализ. — М.: Финансы и статистика, 1988. — 176 с.
13. Маштакова Г.П. Суточная динамика фитопланктона в Черном море // Тр. Азово-Черномор. ин-та рыб. хоз-ва и океанографии. — 1968. — Вып. 27. — С. 60—72.
14. Павлова Е.В., Сорокин Ю.И. Бактериальное питание планктонного рачка *Penilia avirostris* Dana из Черного моря // Биология моря. — Киев, 1970. — Вып. 19. — С. 182—199.
15. Петина Т.С. Трофодинамика копепод в морских планктонных сообществах. — Киев: Наук. думка, 1981. — 242 с.
16. Пионтковский С.А., Петина Т.С. Элективность в питании *Acartia clausi* (Giesbr.) // Биология моря. — Киев: Наук. думка, 1975. — Вып. 33. — С. 3—10.
17. Рокицкий П.Ф. Основы вариационной статистики для биологов. — Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 1961. — 221 с.
18. Серикова И.М., Токарев Ю.Н., Загородняя Ю.А., Василенко В.И. Биоломисценция как показатель пространственных измерений планктонных полей // Екологічні проблеми Чорного моря: Міжнар. наук.-практ. конф. — Одеса, 2009. — С. 207—209.

19. *Столбова Н.Г., Вегерников В.И., Микаэлян А.С.* Суточный ритм деления динофлагеллят в Черном море // *Океанология*. — 1982. — Т. 22, № 3. — С. 492—495.
20. *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.
21. *Токарев Ю.Н., Соколов Б.Г.* Влияние физических и биологических факторов на формирование мелкомасштабной структуры биолюминесцентного и акустического полей в Черном и Средиземном морях // *Гидробиол. журн.* — 2001. — Т. 37, № 2. — С. 3—13.
22. *Ward J.H.* Hierarchical grouping to optimize an objective function // *J. of the Amer. Statist. Assoc.* — 1963. — 236 p.

Институт биологии южных морей
НАН Украины, Севастополь

Поступила 18.06.12