

УДК 591.148:574.52(262.5)

ВЫЯВЛЕНИЕ МЕТОДОМ РАЗЛОЖЕНИЯ В РЯД ФУРЬЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ РИТМОВ ГИДРОБИОНТНЫХ СООБЩЕСТВ

Мельникова Е.Б., Лямина Н.В.

*Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского НАН Украины, Севастополь,
Украина
E-mail: helena_melnikova@mail.ru*

По результатам экспериментальных исследований установлено, что поле биолюминесценции, формируемое гидробионтными сообществами в темное время суток в прибрежных водах Черного моря, подвержено периодическим изменениям. Методом разложения в ряд Фурье выделены основные гармонические составляющие изменения поля биолюминесценции и рассчитаны их характеристики. Показано, что гармонические составляющие обусловлены биологическими ритмами гидробионтного сообщества.

Ключевые слова: поле биолюминесценции, анализ Фурье, гармонические составляющие, биологические ритмы, Черное море.

ВВЕДЕНИЕ

Биолюминесцентное поле Черного моря отражает пространственно-временную структуру гидробионтных сообществ и подвержено периодическим изменениям, связанным с особенностями их развития [1, 2, 3]. При этом на распределение гидробионтов в толще воды и их развитие влияют биотические факторы (эндогенные ритмы, возраст, пол, размножение, миграции и т.д.) и абиотические факторы (фотопериодизм, степень освещенности, температура, соленость, течение, наличие пищи и т.д.). Эндогенные суточные ритмы проявляются во многих физиологических процессах гидробионтов и обеспечивают возможность точно распределять во времени как светозависимые и темновые процессы, так и интенсивность питания, рост, репродукцию и др. [4, 5].

Целью настоящей работы является выделение методом разложения в ряд Фурье основных биологических ритмов гидробионтных сообществ и оценка их влияния на изменения интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток в прибрежных водах Черного моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения изменчивости интенсивности поля биолюминесценции использовали экспериментальные данные, полученные осенью 2010 года в темное время суток (с 17 ч. до 6 утра следующего дня), в прибрежных водах г. Севастополя на траверсе б. Круглая. Глубина моря в районе исследования около 70 м.

Пространственную структуру интенсивности поля биолюминесценции исследовали методом многократного батифотометрического зондирования толщи воды, используя гидробиофизический комплекс «Сальпа-М» [6]. Было проведено по 10 зондирований каждый час с интервалом 2 мин, что позволило получить временной ряд усредненных данных интенсивности поля биолюминесценции по каждому часу темного времени суток. Анализ амплитудно-временных характеристик изменения биолюминесценции проводили в верхнем слое воды, в котором хорошо выражена периодичность нарастания и убывания интенсивности поля биолюминесценции [7, 8].

В качестве метода определения продолжительности периодов и амплитудно-фазовых характеристик интенсивности поля биолюминесценции использовали быстрое преобразование Фурье. Преобразование Фурье позволяет исходный временной процесс, представить в виде совокупности гармонических функций (спектральных составляющих) с различными периодами и амплитудами, в которых слагаемые расположены по убыванию их периодов. Полученные спектральные составляющие образуют частотный спектр исходного временного ряда [9, 10, 11]:

$$y(t) = a_0 + \sum_{j=1}^m \left(a_j \cos \frac{2\pi}{T_j} t + b_j \sin \frac{2\pi}{T_j} t \right) = a_0 + \sum_{j=1}^m c_j \sin \left(\frac{2\pi t}{T_j} + \varphi_j \right), \quad (1)$$

где $a_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y_0(t)$ – постоянная составляющая или нулевая гармоника; $y_0(t)$ – значения исходного временного ряда; $T_j = N/j$ – период j -го гармонического колебания; N – количество данных исходного временного ряда; $m = N/2$ – количество гармоник; a_j, b_j – коэффициенты ряда Фурье; $c_j = (a_j^2 + b_j^2)^{1/2}$

амплитуда j -ой гармоники; $j = 1, 2, \dots, N/2$ – номер гармоники; $\varphi_j = \arctg \frac{a_j}{b_j}$ – начальная фаза j -ой гармоники.

Статистическую обработку результатов экспериментальных исследований производили с помощью пакетов программного статистического анализа *Microsoft Excel 7.0*, *SPSS*, *Statistica 6.0*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для нахождения биологических ритмов, лежащих в основе процесса изменения интенсивности поля биолюминесценции в течение темного времени суток, использовали временной ряд экспериментально найденной зависимости интенсивности поля биолюминесценции (см. рис 1).

Для нахождения спектральных составляющих характеризующих изменения интенсивности поля биолюминесценции использовали преобразование Фурье. Были найдены периоды гармонических составляющих, коэффициенты a_j и b_j ряда Фурье, амплитуды гармоник и их начальные фазы (см. формулу (1)). Результаты спектрального анализа представлены в табл. 1. Физический смысл нулевой гармоники – среднее значение интенсивности поля биолюминесценции за исследуемый период времени.

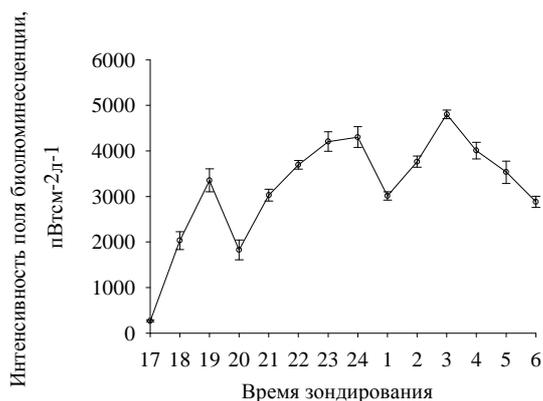


Рис. 1. Изменение интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток.

Таблица 1
Результаты спектрального анализа экспериментальных данных

Номер гармоники	Период, ч	Коэф., a_j	Коэф., b_j	Амплитуда гармоники, пВт·см ⁻² ·л ⁻¹	Начальная фаза, рад
0	—	—	—	3194,4	—
1	14,0	-813,7	202,7	838,6	-1,237
2	7,0	-308,8	91,1	322,0	-1,284
3	4,7	-224,0	693,0	728,3	-0,313
4	3,5	-187,9	-94,1	210,1	1,107
5	2,8	-437,1	-89,2	446,1	1,369
6	2,3	108,3	-131,0	170,0	-0,691
7	2,0	129,6	0	129,6	1,563

По полученным данным была построена спектрограмма (рис. 2). Видно, что амплитуды разных спектральных составляющих отличаются до 6 раз. Наибольшие амплитуды имеют первая, третья и пятая гармоники. Амплитуды этих гармоник соответственно равны: 839, 728 и 446 пВт·см⁻²·л⁻¹.

Эти три гармонические составляющие (три биологических ритма) вносят основной вклад в изменения интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток. Поэтому остальные гармоники (биологические ритмы) вследствие их малой амплитуды не учитывали в дальнейшем анализе.

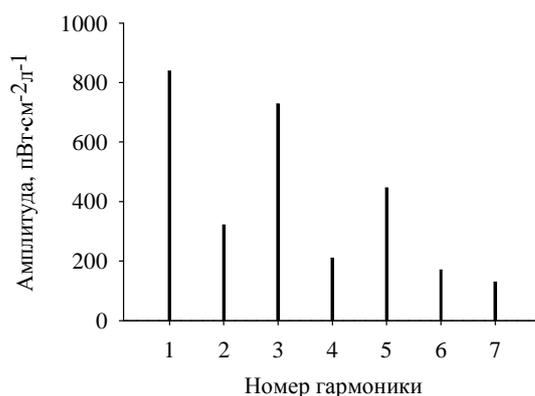


Рис. 2. Спектрограмма изменения интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток.

Аналитические выражения первой, третьей и пятой гармоник, полученные на основе выражения (1) и расчетных характеристик этих гармоник (см. табл. 1), имеют вид:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= 838,6 \cdot \sin(0,449t - 1,327); \\ y_3(t) &= 728,3 \cdot \sin(1,337t - 0,313); \\ y_5(t) &= 446,1 \cdot \sin(2,244t + 1,369). \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 3 построены графики изменения интенсивности поля биолюминесценции, обусловленные процессами описываемыми уравнениями (2), с учетом постоянной составляющей (постоянная составляющая обозначена на рис. 3 пунктиром).

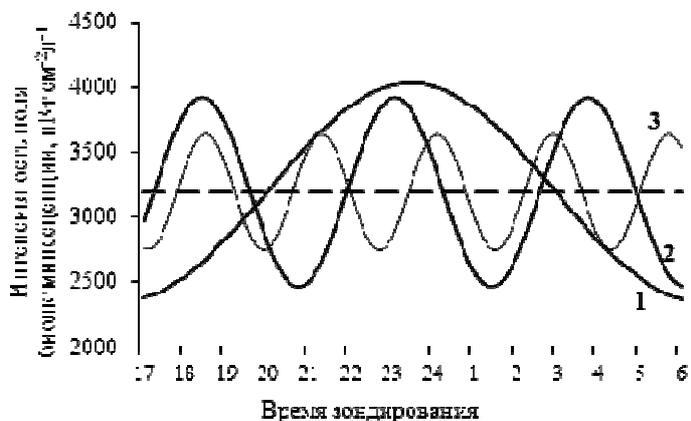


Рис. 3. Основные гармонические составляющие (1 – первая гармоника, 2 – третья гармоника, 3 – пятая гармоника) изменения интенсивности поля биолюминесценции.

Видно, что с наступлением темного времени суток все три гармоники увеличивают свое значение. Отсюда можно сделать вывод, что смена светового и темного периодов являются синхронизирующим фактором, дающим начало биологическим процессам, протекающим более активно в темный период суток. При этом процессы, формирующие первую гармонику спектра, ответственны за медленные изменения интенсивности поля биолюминесценции, а процессы, формирующие третью и пятую гармоники спектра, — за быстрые изменения.

Первая гармоника характеризует процесс нарастания интенсивности поля биолюминесценции в течение темного времени суток и падения в утренние часы. Этот цикл обусловлен сменой и продолжительностью светового и темного периодов. Анализ литературных источников показал, что одним из факторов суточного ритма интенсивности свечения биолюминесцентных организмов является солнечный свет. Вследствие суточного хода солнца интенсивность биолюминесценции изменяется в 30–100 раз [2, 12]. В работе Ю.Н. Токарева с соавторами [13] приводятся вертикальные профили дневной и ночной биолюминесценции черноморского планктона. Показано, что в октябре-ноябре суммарное свечение в шестидесятиметровом слое воды ночью выше, чем днем.

Нами получено, что амплитуда первой гармоники равна $839 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$, это характеризует ее вклад в изменение интенсивности поля биолюминесценции в течение темного времени суток.

Характерной чертой высокочастотных колебаний (третья и пятая гармоники) с периодом 4,7 и 2,8 ч являются процессы, связанные с количественным развитием планктона в течение суток. В работах [14, 15] показано, что количественное развитие морского фитопланктона зависит, прежде всего, от скорости деления клеток и от интенсивности выедания их зоопланктоном. В работе С.А. Пионтковского и Т.С. Петипа [16], посвященной изучению суточного ритма в питании у *Acartia clausi*, показано, что зависимость между ночной и дневной интенсивностью питания у рачков разного возраста связана с их различной способностью к миграциям. Чем интенсивнее мигрирует рачки, тем интенсивнее питаются они ночью. Так, например, половозрелые самцы и самки вне периода размножения, а также копеподиты *Acartia clausi* стадии V мигрируют активнее других стадий, придерживаясь в дневное время более глубоких водных слоев. Ночью, поднимаясь к поверхности, они питаются со значительно большей интенсивностью, чем днем по сравнению с остальными группами. Младшие копеподиты и науплиусы, наоборот, обладают меньшими амплитудами миграций, постоянно обитают в самых верхних слоях воды и питаются с наибольшей интенсивностью в дневное время. Существование различных суточных ритмов питания обуславливается, вероятно, различной приспособленностью возрастных групп к освещенности. В работе [16] также отмечено, что самцы на ярком свете выживают хуже, чем при слабом освещении.

Полный процесс прохождения пищи по кишечнику у всех стадий возрастных стадий *Acartia clausi* и у многих других видов копепод в период относительно интенсивного питания фитопланктоном длится в среднем 3 часа, при питании дополнительно животной пищей продолжительность процесса пищеварения

увеличивается в среднем до 5 часов, что влияет на суточный ритм интенсивности питания.

В отношении суточной ритмики деления клеток планктонных водорослей существуют разные мнения. Так, Л.А. Ланская [17], исследуя скорость деления клеток черноморского фитопланктона в культурах, пришла к выводу, что деление большинства видов динофлагеллят происходит круглосуточно, но максимальное количество делящихся клеток приходится на вечерние часы (18—19) и ночное время. Вместе с тем, А.В. Ковалёв [18] и Н.Г. Столбова с соавторами [19] выделяли для максимальной репродукции клеток ночные часы.

Изложенные закономерности деления клеток фитопланктона на протяжении темного времени суток позволяют предположить, что появление в наших исследованиях нарастаний интенсивности поля биолюминесценции в 19 ч, 23 – 24 ч и к 3 ч утра является результатом превалирования скорости деления светящихся клеток динофлагеллят над интенсивностью их выедания зоопланктоном в это время.

Такой характер изменчивости интенсивности поля биолюминесценции свидетельствует о том, что третья и пятая гармоники с периодами 4,7 и 2,8 ч, и амплитудами 728 и 446 пВт·см⁻²·л⁻¹, соответственно, вносящие значительный вклад в периодические изменения интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток, обусловлены эндогенными суточными ритмами планктонного сообщества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Интенсивность поля биолюминесценции в темное время суток подвержена периодическим изменениям.
2. Методом разложения в ряд Фурье выделены гармонические составляющие изменения интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток в прибрежных водах г. Севастополя и рассчитаны их амплитудно-фазовые характеристики.
3. Найдено, что основной вклад в изменения интенсивности поля биолюминесценции вносят первая, третья и пятая гармоники.
4. Установлено, что первая гармоника характеризует нарастание интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток и убывание его в утренние часы, а третья и пятая гармоники характеризуют периодические изменения интенсивности поля биолюминесценции, вызванные эндогенными циркадными ритмами светящегося планктона в темное время суток

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела биофизической экологии за содействие в обеспечении проведенных исследований.

Список литературы

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

2. Гительзон И.И., Левин Л.А., Утюшев Р.Н., Черепанов О.А., Чугунов Ю.В. БиOLUMИнесценция в океане. — С.-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. — 283 с.
3. Черепанов О.А., Левин Л.А., Утюшев Р.Н. Связь биOLUMИнесценции с биомассой и численностью светящегося и всего планктона. Баренцево и Норвежское море // Мор. экол. журн. — 2007. — Т. 6, Вып. 1. — С. 55 — 65.
4. Halberg F., Reinberg A. Rythmes circadian a rythmes de basses frequences en physiologie humaine // J. Physiol. — Paris, 1967. — No 59. — P. 117 — 202.
5. Mizoguchi, T., K. Wheatley, Y. Hanzawa, L.Wright, M. Mizoguchi et al. LHY and CCA1 are partially redundant genes required to maintain circadian rhythms in Arabidopsis // Dev. Cell. — 2002. — No 2. — P. 629 — 641.
6. 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.
7. Мельникова Е.Б., Бурмистрова Н.В. Применение кластерного анализа для структуризации сообществ биOLUMИнесцентных гидробионтов // Ученые записки ТНУ. Серия «Биология, химия». — Симферополь, 2011. — Т. 24(63) № 4. — С. 156 — 165.
8. Мельникова Е.Б., Токарев Ю.Н., Лямина Н.В. Закономерности изменения интенсивности поля биOLUMИнесценции прибрежных водах Чёрного моря // Гидробиол. журн. — 2013. — Т. 49, № 1. — С. 112 — 120.
9. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление: / Пер. с англ. — М.: Мир, 1974. — 408 с.
10. Дженкинс Г.М., Ваттс Д.Г. Спектральный анализ и его приложения. — М.: Мир, 1972 — Вып. 2. — 287 с.
11. Кей С.М., Марпл С.Л. Современные методы спектрального анализа: Обзор. // ТИИЭР. — 1981. — Т. 69, № 11. — С. 5 — 51.
12. Sullivan J. M., Swift E. Photoinhibition of mechanically stimulated bioluminescence in the autotrophic dinoflagellate, *Ceratium fusus* (Pyrophyta) // J. Phycol. — 1994. — V. 30. — P. 633 — 637.
13. Tokarev Yu.N., Williams R., Piontkovski S.A. Small-scale plankton patchiness in the Black Sea euphotic layer // Hydrobiologia. — 1998. — V. 375/376. — P. 363 — 367.
14. Ведерников В.И., Микаелян А.С., Столбова Н.Г. Суточные изменения фитопланктона в прибрежных водах северо-восточной части Черного моря // Исследования океанического фитопланктона. — М.: Наука, 1985. — С. 77 — 93.
15. 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.
16. Пионтковский С.А., Петипа Т.С. Элективность в питании *Acartia clausi* (Giesbr.) // Биология моря. — Киев: Наук. думка, 1975. — Вып. 33. — С. 3 — 10.
17. 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.
18. Ковалев А.В. Зоопланктон. 1. Мезозоопланктон // Планктон Черного моря / Под. ред. А.В. Ковалева. — Киев: Наук. думка, 1993. — С. 144 — 165.
19. Столбова Н.Г., Ведерников В.И., Микаелян А.С. Суточный ритм деления динофлагеллят в Черном море // Океанология. — 1982. — Т. 22, № 3. — С. 492 — 495.

Мельникова О.Б. Выявления методом розкладання у ряд Фур'є біологічних ритмів гідробіотних спільнот / **О.Б. Мельникова, Н.В. Лямина** // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія „Біологія, хімія”. — 2013. — Т. 26 (65), № 2. — С. 133-140.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що поле біOLUMИнесценції, сформоване гідробіотними спільнотами в темний час доби в прибережних водах Чорного моря схильне періодичним змінам. Методом розкладання в ряд Фур'є виділені основні гармонійні складові зміни поля біOLUMИнесценції і розраховані їх характеристики. Показано, що гармонійні складові обумовлені біологічними ритмами гідробіотного спільноти.

Ключові слова: поле біOLUMИнесценції, аналіз Фур'є, гармонійні складові, біологічні ритми, Чорне море.

Melnikova E.B. Revelation by the Fourier series expansion of the biological rhythm hydrobiont communities / E.B. Melnikova, N.V. Lyamina // Scientific Notes OF Taurida V.Vernadsky National University. – Series: Biology, chemistry. – 2013. – Vol. 26 (65), No. 2. – P. 133-140.

According to the results of experimental studies have established that the field of bioluminescence, formed hydrobiont communities in the dark in the coastal waters of the Black Sea is subject to periodic changes. The method of Fourier series highlights the major harmonic components of change in the field of bioluminescence and calculate their performance. It is shown that the harmonic components caused by biological rhythms hydrobiont community.

Keywords: field of bioluminescence, Fourier analysis, the harmonic components, the biological rhythms of the Black Sea.

Поступила в редакцию 16.05.2013 г.