УДК 574.5

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ В РЯД ФУРЬЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РИТМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МОРСКИХ ПЕЛАГИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ

Е.Б. Мельникова, А.В. Мельников*

Институт природно-технических систем
г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: helena_melnikova@mail.ru
* Севастопольский государственный университет
г. Севастополь, ул. Университетская, 33

В статье найдены параметры ритмических изменений интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток, обусловленных биологическими ритмами пелагических сообществ прибрежных вод на траверзе б. Круглая (Черное море).

Введение. В Черном море, как и в других морях, расположенных в умеренных широтах, интенсивность поля биолюминесценции является важным элементом функционирования планктонного сообщества и подвержена периодическим изменениям [1–4]. Биомасса светящихся организмов тесно коррелирует с биомассой планктона и других обитателей пелагиали и поэтому является весьма важной информационной характеристикой процессов жизнедеятельности морских сообществ [5]. Для изучения миграций, пространственного и временного распределения гидробионтных сообществ, в состав которых входят биолюминесцентные организмы, могут быть применены методы экспрессной оценки, основанных на использовании быстродействующих биофизических приборов.

На распределение светящихся гидробионтов в толще воды и процессы их жизнедеятельности влияют биотические факторы (возраст, пол, размножение, миграции и т.д.) и абиотические факторы (степень освещенности, температура, соленость, течение, наличие пищи и т.д.).

Как показывает анализ литературных данных, в жизненных циклах большинства видов святящихся гидробионтов можно выделить несколько повторяющихся через определенные промежутки времени процессов, называемых биологическими ритмами.

В частности, эндогенные суточные ритмы проявляются во многих физиологических процессах микроводорослей: питании, дыхании, росте, образовании пигментов и др. Известно, что большинство физиологических и биохимических процессов изменяются в течение суток. Некоторые из процессов активизируются в темное время суток, другие – в дневное. Суточная смена дня и ночи, фиксируемая фитопланктоном за счет работы фитохром и криптохром подобных фоторецепторам, обеспечивает возможность фитопланктону точно распределять во времени светозависимые и темновые процессы (в частности, рост и репродукцию).

В последнее время все более широкое распространение получают методы исследования жизненных процессов, происходящих в биологических системах, на основе измерения параметров физических полей, возникающих в процессе жизнедеятельности биологических систем, в частности, морских сообществ. При этом использование биофизических приборов позволяет проводить изучение процессов жизнедеятельности пелагических сообществ в естественных условиях в реальном масштабе времени без нарушения структуры и межвидовых связей гидробионтов. В сочетании с аналитико-математическими методами обработки амплитудно-временной изменчивости интенсивности поля биолюминесценции, создаваемого пелагическими сообществами, появляется возможность не только выявить биологические ритмы пелагических сообществ, но и оценить их параметры и рассмотреть особенности межвидовых взаимоотношений.

Цель работы – определение влияния ритмических процессов морских пелагических сообществ на интенсивность поля биолюминесценции в темное время суток в прибрежных водах Черного моря.

Материал и методы. Материалом для исследования послужили данные, полученные в октябре 2010 г. в темное время суток в прибрежных водах г. Се-

вастополя в районе 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». Каждый час проводили по 10 зондирований с интервалом 2 мин. Затем эти данные усреднялись. Дискретность измерений по глубине – 1 м.

Измерения интенсивности поля биолюминесценции проводили в диапазоне глубин 0–60 м. При анализе полученных результатов была проведена разбивка указанного диапазона глубин на пятиметровые слои по глубине. Затем был найден 5-метровый слой с максимальным значением интенсивности поля биолюминесценции и диапазон глубин, в котором интенсивность поля биолюминесценции превышала $0{,}5P_{макс}$. То есть был выделен диапазон глубин с высоким уровнем поля биолюминесценции. Это оказался диапазон глубин от 0 до 35 м. Для этого слоя проводился дальнейший анализ.

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 приведены найденные средние значения интенсивности поля биолюминесценции в течение темного времени суток.

Из табл. 1 видно, что интенсивность поля биолюминесценции на протяжении темного времени суток подвержена флюктуациям. На фоне общей тенденции нарастания интенсивности поля биолюминесценции с наступлением темного времени суток и ее уменьшения (падения) к утру, наблюдается постепенное нарастание к 19 часам, затем незначительное падение к 20 часам, потом увеличение интенсивности поля биолюминесценции к 23-24 часам, уменьшение к 1 часу ночи и новое нарастание к 3 часам с падением к 6 часам утра.

Процессы нарастания и спада интенсивности поля биолюминесценции повторяются в одно и то же время каждое темное время суток. Это связано с тем, что смена светлого и темного времени суток является синхронизирующим фактором, дающим старт темновым процессам.

Таблица 1

Средние значения интенсивности поля биолюминесценции на траверзе б. Круглая

Номер по порядку	Время суток, час	Интенсивность поля биолюминесценции, $пВт \cdot см^{-2} \cdot л^{-1}$
1	17	267±17
2	18	2050±199
3	19	3350±253 – макс.
4	20	2730±218 – мин.
5	21	3030±130
6	22	3700±94
7	23	4880±214 – макс
8	24	4300±228
9	1	3010±91 – мин.
10	2	3760±122
11	3	4800±94 – макс.
12	4	4012±182
13	5	3530±245
14	6	2890±124 – мин.

Примечание. Количество зондирований по каждому часу – 10, количество измерений по каждому часу в верхнем слое – 350.

Этот факт дает основание считать их периодически повторяющимися процессами и поэтому к ним применимо дискретное преобразование Фурье.

Дискретное преобразование Фурье позволяет разложить экспериментально найденный временной ряд изменения интенсивности поля биолюминесценции на конечное число гармонических функций (спектральных составляющих) отличающихся периодами и амплитудами и дающих представление о структуре циркадных ритмов, происходящих в гидробионтных сообществах. Представим ряд Фурье в следующем виде [6].

$$I(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{N/2} A_n \cos(\frac{2\pi \cdot nt}{T} + \varphi_n), \quad (1)$$

где $I(t)$ – интенсивность поля биолюминесценции в момент времени t;

$a_0 = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} x_0(t)$ – постоянная составляющая или нулевая гармоника; $x_0(t)$ – значения исходного временного ряда; N – количество экспериментальных точек исходного временного ряда; $N/2$ – количество гармоник ряда Фурье; A_n – амплитуда n-й гармоники; $n = 1, 2, ... N/2$ – номер гармоники; T – период первой гармоники; φ_n – начальная фаза n-й гармоники.

Исходный временной ряд значений интенсивности поля биолюминесценции (см. табл. 1) был разложен в ряд Фурье.

Было получено, что наибольшие амплитуды имеют первая, третья и пятая гармонические составляющие. Амплитуды этих гармонических составляющих соответственно равны: 931, 725 и 656 пВт·см$^{-2}$л$^{-1}$. Эти три существенные гармонические составляющие (три биологических ритма) вносят основной вклад в изменения интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток. Остальными гармоническими составляющими (вторая, четвертая, шестая и седьмая) при моделировании происходящих процессов будем пренебрегать, считая их амплитуды малыми и незначительно влияющими на изменение интенсивности поля биолюминесценции.

Для существенных гармонических составляющих получено:

– период первой (основной) гармонической составляющей равен длине временного ряда – 14 часов;

– период третьей гармонической составляющей равен – 4,7 часа;

– период пятой гармонической составляющей равен – 2,8 часа.

При этом процессы, формирующие первую спектральную составляющую с периодом 14 часов, ответственны за медленные изменения интенсивности поля биолюминесценции, а процессы, формирующие третью и пятую спектральные составляющие – за быстрые изменения (рис. 1).

Р и с. 1. Вклад основных биологических ритмов в изменение интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток: *а* – постоянная составляющая, *б* – биологический ритм с периодом, равным длительности темного времени суток, *в* – биологический ритм с периодом 4,7 часа, *г* – биологический ритм с периодом 2,8 часа

Аналитические выражения первой, третьей и пятой гармоник, вносящих основной вклад в изменения интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток, полученные на основе разложения в ряд Фурье, имеют следующий вид:

$$y_1(t) = 930{,}6\cdot\cos(0{,}449t - 2{,}959);$$
$$y_3(t) = 725{,}1\cdot\cos(1{,}337t - 2{,}119); \quad (2)$$
$$y_5(t) = 655{,}7\cdot\cos(2{,}244t - 3{,}096).$$

Тогда с учетом принятых предположений в осенний период изменение интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток в прибрежных водах на траверзе б. Круглая может быть рассчитано в соответствии со следующим выражением:

$$I_{расч}(t) = a_0 + y_1(t) + y_3(t) + y_5(t)\,, \quad (3)$$

где a_0 = 3147 пВт·см$^{-2}$·л$^{-1}$ – постоянная составляющая; $y_1(t)$, $y_3(t)$, $y_5(t)$ – определяются из выражений (2).

Расчеты показали, что коэффициент корреляции между теоретическими, рассчитанными в соответствии с выражением (3), и измеренными значениями изменения интенсивности поля биолюминесценции (см. табл. 1) составляет r = 0,906. Это свидетельствует о том, что изменения, описываемые совместным влиянием первой, третьей и пятой спектральными составляющими, достаточно хорошо характеризуют процессы, вызывающие изменения интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток.

При разложении в ряд Фурье изменений интенсивности поля биолюминесценции происходящих в темный период суток (с 17-00 до 6-00 утра следующего дня), было получено 7 гармонических составляющих. Периоды полученных гармонических составляющих кратны периоду первой гармоники, однако они не кратны продолжительности суток.

Для того, чтобы изменить дискретность периодов гармоник и сделать их кратными длительности суток, добавим к экспериментальным значениям такое количество нулевых значений, чтобы общая продолжительность временного ряда была равна 24 часам. В этом случае спектральное разрешение гармонического ряда повышается, что позволяет уточнить периоды полученных существенных гармонических составляющих.

Результаты разложения в ряд Фурье дополненного нулями исходного временного ряда приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры гармонических составляющих ряда Фурье при дополнении нулями исходного временного ряда

Номер гармоники	Период, час	Амплитуда, пВт·см$^{-2}$·л$^{-1}$
1	24	2216
2	12	45
3	8	529
4	6	218
5	4,8	450
6	4,0	355
7	3,43	181
8	3,0	297
9	2,67	315
10	2,4	99
11	2,18	110
12	2,0	7

Результаты сравнения периодов биологических ритмов, полученных при разложении в ряд Фурье временной последовательности характеризующей изменения поля биолюминесценции только в темный период суток, и для полных суток, показывает, что основная спектральная составляющая в обоих разложениях описывает процесс постепенного нарастания интенсивности поля биолюминесценции в течение темного времени суток и падения в утренние часы. Этот цикл обусловлен сменой и продолжительностью светового и темнового периодов.

При разложении в ряд Фурье 24 часовой последовательности появилась гармоника с периодом 8 часов, которая отсутствовала при исследовании процессов только для темного периода суток. По нашему мнению, эта гармоника, как не имеющая физического смысла, является ложной, обусловленной введением дополнительных нулей в исследуемую последовательность.

Что касается амплитуд гармонических составляющих с периодами 4,7 и 2,8 часа, то за счет «сгущения» спектра (при N = 24) амплитуды этих гармоник несколько уменьшились, а амплитуды рядом расположенных гармоник — несколько возросли, что уменьшило отличие амплитуд основных и побочных гармоник. Однако периоды наибольших амплитуд гармонического ряда попрежнему равны 4,7 и 2,8 часа.

Анализ биологических процессов, происходящих в планктонных сообществах, показывает, что характерной чертой высокочастотных спектральных составляющих с периодами 4,7 и 2,8 часа являются процессы, связанные с количественным развитием планктона в течение суток. В работах (Т.С. Петипа, С.А. Пионтковского, Л.А. Ланской, А.В. Ковалева, Н.Г. Столбовой и др.) показано, что количественное развитие морского фитопланктона зависит, прежде всего, от скорости деления клеток и от интенсивности выедания их зоопланктоном.

Изменения интенсивности поля биолюминесценции с периодами 4,7 и 2,8 часа обусловлены эндогенными суточными ритмами питания зоопланктона и деления клеток фитопланктона в темное время суток. Полный процесс прохождения пищи по кишечнику у всех 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.

Л.А. Ланская, 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 часов) и ночное время. Следовательно, быстрые изменения интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток обусловлены эндогенными суточными ритмами зоо- и фитопланктона.

Заключение. Показано, что изменение интенсивности поля биолюминесценции в темное время суток может быть описано тремя ритмическими процессами с периодами 14 часов, 4,7 и 2,8 часа, обусловленными биологическими ритмами. Эти процессы приводят к изменению интенсивности поля биолюминесценции, создаваемого пелагическими сообществами, с амплитудами 931, 725 и 656 пВт·см$^{-2}$·л$^{-1}$. Коэффициент корреляции между измеренными значениями и расчетными по трем гармоникам равен r = 0,906, что подтверждает правильность принятых предположений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Биолюминесценция* в океане / И.И. Гительзон, Л.А. Левин, Р.Н. Утюшев [и др.]. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 283 с.
2. *Мельникова Е.Б.* Биолюминесценция в функционировании экосистем пелагиали Черного моря. – Киев: Фитосоциоцентр, 2014. – 175 с.
3. *Mel'nikova E.B.* Factors affecting change in bioluminescence field intensity at night / E.B. Mel'nikova, N.V. Lyamina // Inland Water Biology. – 2014. – V. 7. – No. 4. – P. 307–312.
4. *Melnikova E.B.* Regularities of Changes of the Bioluminescence Field in the Black Sea Coastal Waters / E.B. Melnikova, Yu.N. Tokarev, N.V. Burmistrova // Hydrobiological Journal. – 2013. – V. 49. No 3. – P. 105–111.
5. *Черепанов О.А., Левин Л.А., Утюшев Р.Н.* Связь биолюминесценции с биомассой и численностью светящегося и всего планктона. Баренцево и Норвежское море // Мор. экол. журн. – 2007. – Т. 6. – Вып. 1. – С. 55–65.
6. *Дженкинс Г.М.* Спектральный анализ и его приложения / Г.М. Дженкинс, Д.Г. Ваттс. – М.: Мир, 1972. – Вып. 2. – 287 с.