



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 1 (43). Март, 2022

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugolek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов
J. B. Jakovlev
R. Krasnov
J. P. Kurhinen

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





УДК 58.035.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РИТМИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПЕЛАГИЧЕСКОГО СООБЩЕСТВА МЕТОДОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

МЕЛЬНИКОВА
Елена Борисовна

*к. б. н., Институт природно-технических систем ФГБНУ, г. Севастополь, г. Севастополь, ул. Ленина, 28,
helena_melnikova@mail.ru*

МЕЛЬНИКОВ
Анатолий Викторович

к. т. н., доцент, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, mel.anat@mail.ru

Ключевые слова:
функционирование
пелагической системы
биологические ритмы
гидробионтные
сообщества
преобразование
Фурье
математическая
модель
интенсивность
свечения

Аннотация: Рассмотрено изменение интенсивности свечения пелагического сообщества в прибрежных водах на юго-западном шельфе Крыма. Установлено, что нарастания и спады интенсивности свечения гидробионтных сообществ, связанные с функционированием пелагической системы, периодически повторяются в одно и то же время. Отмечено, что биомасса светящихся организмов тесно коррелирует с биомассой планктона и других обитателей пелагиали, включая промысловые пелагические виды рыб, поэтому интенсивность свечения гидробионтов является весьма важной информативной характеристикой биологических процессов жизнедеятельности морских сообществ. Измерения интенсивности свечения организмов могут производиться быстродействующими биофизическими приборами в природных условиях без нарушения структуры и межвидовых связей гидробионтных сообществ. Использование метода преобразования Фурье позволило найти параметры основных биологических ритмов планктонных сообществ, приводящих к изменению интенсивности свечения гидробионтов. Показано, что изменение интенсивности свечения организмов с периодом 14 часов характеризует циркадные ритмы светового и темного периодов. Изменения интенсивности свечения организмов с периодом 4.7 и 2.8 часа обусловлены ультрадианными эндогенными ритмами пелагического сообщества, связанными с интенсивностью деления клеток фитопланктона и скоростью их выедания зоопланктоном. Приведены графики изменения интенсивности свечения организмов в темное время суток, построенные по найденной модели, а также экспериментальные данные и погрешности их определения. Расчеты показали, что коэффициент корреляции между измеренными значениями интенсивности свечения организмов и расчетными по полученной математической модели с учетом влияния трех основных биологических ритмов составляет $r = 0.906$, что подтверждает правильность принятых предположений.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 03 марта 2022

Подписана к печати: 26 марта 2022

Введение

В морях, расположенных в умеренных широтах, в том числе и в Черном море, интенсивность свечения гидробионтных организмов является важным фактором функционирования пелагического сообщества и подвержена периодическим циркадным и ультрадианным изменениям (Tett, 1971; Meeson, 1977; Krasnow et al., 1980; Gitel'son and Levin, 1989; Akimoto et al., 2004; Токарев, 2006; Заворуев и др., 2012; Tokarev and Melnikova, 2012).

Светящиеся организмы являются активными участниками функционирования пелагической системы (их биомасса тесно коррелирует с биомассой планктона и других обитателей пелагиали), и поэтому интенсивность свечения гидробионтов является весьма важной информационной характеристикой биологических процессов жизнедеятельности морских сообществ (Tett, 1971; Lapota et al., 1989; Ondercin et al., 1995; Черепанов и др., 2007; Moline et al., 2009). Для изучения миграций, пространственного и временного распределения гидробионтных сообществ в естественных природных условиях обитания без нарушения структуры гидробионтных сообществ, в состав которых входят биолюминесцентные организмы, могут быть применены методы экспрессной оценки, основанные на использовании быстросрабатывающих биофизических приборов (Widder et al., 2002; Токарев и др., 2009).

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.) (Hastings, 2007; Widder, 2010; Polonsky, Mel'nikova et al., 2018).

Как показывает анализ литературных данных, в жизненных циклах большинства видов светящихся гидробионтов можно выделить несколько повторяющихся через определенные промежутки времени процессов, которые являются циркадными и ультрадианными ритмами (Meeson, 1977; Krasnow et al., 1980; Sullivan and Swift, 1994; Akimoto et al., 2004; Titlyanov et al., 2004). В частности, эндогенные ритмы проявляются во многих физиологических процессах микроводорослей: питании, дыхании, росте, образовании пигментов и др. (Ondercin et al., 1995; Titlyanov et al., 2004; Tokarev and Melnikova, 2012). Известно, что большинство физиологических и биохимических процес-

сов 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) (Li et al., 1996; Hamman et al., 1981; Hastings, 2007).

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 функционирования биологических систем, в частности морских пелагических сообществ (Токарев, 2006; Tokarev, Melnikova, 2012; Polonsky et al., 2018). 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 (Widder et al., 2002; Токарев и др., 2009). Если обработку амплитудно-временной изменчивости интенсивности свечения, создаваемого пелагическими сообществами, провести с использованием аналитико-математических и статистических методов обработки информации, то появляется возможность не только выявить биологические ритмы пелагических сообществ, но и оценить их параметры и рассмотреть особенности межвидовых взаимоотношений.

Целью работы является моделирование процессов функционирования пелагической системы и определение параметров биологических ритмов, приводящих к изменению интенсивности свечения гидробионтных сообществ.

Материалы

Материалом для исследования послужили данные, полученные в Институте биологии южных морей (ИнБЮМ) им. А. О. Ковалевского на суточной станции в 77-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (02.09–08.09.2014 г) в прибрежных водах г. Севастополя в районе б. Круглая. Для исследования временной изменчивости пространственного и вертикального распределения интенсивности свечения организмов в верхнем 100-метровом слое использовали метод многократного батифотометрическо-

го зондирования толщи воды с помощью измерительного гидробиофизического комплекса «Сальпа-М» (Токарев и др., 2009). Каждый час проводили по 10 зондирований с интервалом 2 мин. Затем эти данные усреднялись. Наблюдения проводились в течение суток. При анализе временных изменений интенсивности свечения организмов были использованы усредненные по каждому часу значения. Дискретность измерений в режиме зондирования составляла 1 м.

Вертикальное зондирование интенсивности свечения организмов проводили в диапазоне глубин 0–60 м. Далее определялся диапазон глубин с высоким уровнем интенсивности свечения организмов. Для этого при анализе полученных результатов была проведена разбивка диапазона глубин, на которых производились измерения, на 5-метровые слои. Затем был найден 5-метровый слой с максимальным значением интенсивности свечения организмов и диапазон глубин, в котором интенсивность свечения гидробионтов превышала уровень 0.5 от максимального. Таким образом был выделен диапазон глубин с высоким уровнем интенсивности свечения организмов. Это оказался диапазон глубин от 0 до 35 м. Дальнейший анализ проводился для этого слоя.

Синхронизирующим фактором, дающим старт темновым процессам, является смена светлого и темного времени суток, поэтому изменения интенсивности биолюминесценции повторяются каждые последующие сутки в одно и то же время. Это дает основание делать расчеты на основе измерений, проводимых в течение одних суток. Поэтому в расчетах использовался ряд значений длиной 24 отсчета, охватывающий одни сутки.

Методы

Наблюдаемые процессы нарастания и спада интенсивности биолюминесценции планктонных организмов повторяются в одно и то же время суток. Этот факт дает основание считать их периодически повторяющимися процессами, и поэтому к ним применимо дискретное преобразование Фурье (Дженкинс и Ваттс, 1972; Marple-ml., 1990; Кривошеев, 2006). Представим изменения интенсивности свечения гидробионтов в виде конечного числа гармонических функций (спектральных составляющих), различающихся по периодам и амплитудам и дающих представление о циркадных и ультрадианных ритмах, существующих в пелагических системах, в следующем виде:

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

где $I(t)$ – интенсивность свечения организмов в момент времени t ;

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_0(t)$$

– постоянная составляющая или нулевая гармоника, $x_0(t)$ – экспериментально измеренное значение интенсивности биолюминесценции в момент времени t , N – количество точек экспериментально измеренного временного ряда, $N/2$ – количество гармоник ряда Фурье, A_n – амплитуда n -й гармоники, $n = 1, 2, \dots, N/2$ – номер гармоники, T – период первой гармоники, φ_n – начальная фаза n -й гармоники.

Спектральные составляющие, полученные в результате разложения исходной временной последовательности в ряд Фурье, могут быть использованы при моделировании процессов функционирования пелагической системы.

Количественная обработка выполнена с использованием пакетов программ Microsoft Excel 7.0, MathCAD 14.0, Statistica 6.0, SigmaPlot 12.5 and Surfer 13.0.

Результаты

На рис. 1 приведены средние значения интенсивности свечения организмов в течение темного времени суток.

Из рис. 1 видно, что интенсивность свечения организмов на протяжении темного времени суток подвержена флуктуациям. Во-первых, с наступлением темного времени суток наблюдается нарастание интенсивности свечения организмов, которая уменьшается (падает) к утру. Во-вторых, наблюдается изменение интенсивности свечения гидробионтных сообществ в темное время суток. В 19, 23–24 и 3 часа наблюдаются увеличения интенсивности свечения обитателей пелагиали, а в 20 часов, а также к 1 часу ночи и к 6 часам утра – уменьшения интенсивности свечения гидробионтных сообществ.

Синхронизирующим фактором, дающим старт темновым процессам, является смена светлого и темного времени суток. Однако наблюдаемые уменьшения интенсивности свечения в 20 часов и к 1 часу ночи свидетельствуют о том, что кроме циркадного ритма, синхронизируемого сменой светлого и темного периода суток, на изменения

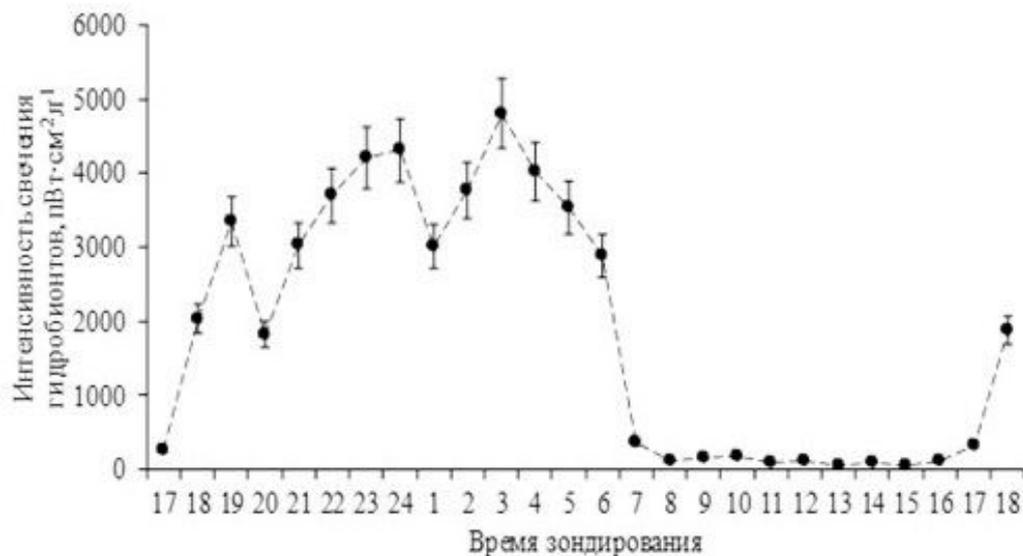


Рис. 1. Средние значения интенсивности свечения организмов

Fig. 1. Diurnal changes in the intensity of bioluminescence of planktonic communities

интенсивности свечения планктонного сообщества влияют также некоторые другие ультрадианные ритмы.

В результате разложения в ряд Фурье исходного временного ряда значений интенсивности свечения гидробионтных сообществ (см. рис. 1) 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.

Вклад каждой гармоники (биологического ритма) в суммарные изменения интенсивности свечения планктонных сообществ определяется ее амплитудой. Чем больше амплитуда гармоники, тем существеннее ее вклад, и наоборот: вклад гармоник с малыми амплитудами незначителен. Вследствие этого можно считать, что первая, третья и пятая гармоники являются существенными и вносят основной вклад в изменения интенсивности свечения гидробионтных сообществ. Влиянием второй, четвертой, шестой и седьмой гармоник при моделировании функционирования пелагической системы будем пренебрегать, считая их амплитуды малыми. Эти три существенных гармонических колебания (три биологических ритма) вносят основной вклад в изменения интенсивности свечения планктонных сообществ в темное время суток. Остальными гармоническими колебаниями (вторая, четвертая, шестая и седьмая гармоники) при моделировании происходящих процессов будем

пренебрегать, считая их амплитуды малыми и незначительно влияющими на изменение интенсивности свечения организмов.

Для существенных гармонических колебаний получено:

- период основного гармонического колебания равен длине временного ряда – 14 часов, он характеризует циркадный ритм изменения интенсивности свечения гидробионтных сообществ;

- 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 свечения организмов и характеризуют циркадный ритм, а процессы, формирующие третью и пятую спектральные составляющие, – за быстрые изменения, которые характеризуют ультрадианные биологические ритмы (рис. 2).

Уравнения для основных гармонических составляющих (первая, третья и пятая), характеризующихся наибольшими амплитудными значениями, полученные в результате разложения в ряд Фурье, запишем в тригонометрическом виде:

$$y_1(t) = 930.6 \cdot \sin(0.449t - 1.3882);$$

$$y_3(t) = 725.1 \cdot \sin(1.337t - 0.5482); \quad (2)$$

$$y_5(t) = 655.7 \cdot \sin(2.244t - 1.5252).$$

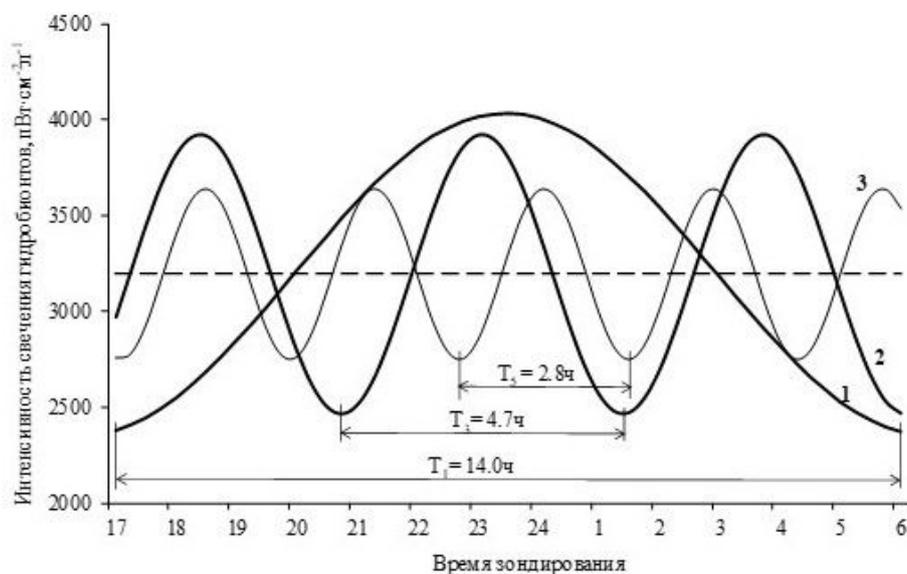


Рис. 2. Вклад основных биологических ритмов (1 – с периодом 14 часов; 2 – с периодом 4.7 часа; 3 – с периодом 2.8 часа) в изменение интенсивности свечения гидробионтных сообществ в темное время суток. Постоянная составляющая обозначена пунктирной линией

Fig. 2. The contribution of basic biological rhythms to the change in the intensity of the luminescence of hydrobiont communities in the dark (1 – with a period of 14 hours; 2 – with a period of 4.7 hours; 3 – with a period of 2.8 hours). The constant component is indicated by the dotted line

Тогда с учетом принципа суперпозиции и принятых предположений относительно малости амплитуд второй, четвертой, шестой и седьмой гармонических составляющих интенсивность свечения гидробионтных сообществ в темное время суток на юго-западном шельфе Крыма может быть рассчитана по формуле:

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

где $a_0 = 3147 \text{ пВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$ – постоянная составляющая; $y_1(t)$, $y_3(t)$, $y_5(t)$ – значения первой, третьей и пятой гармоник, определяемые из выражений (2).

На рис. 3 изображены изменения интенсивности свечения организмов в темное время суток, построенные суммированием всех семи гармонических составляющих в соответствии с уравнением (1) (сплошная линия), суммированием трех наибольших гармонических составляющих (пунктирная линия), а также экспериментальные данные и погрешности их определения.

Из рис. 3 видно, что рассчитанная теоретическая кривая изменения интенсивности свечения гидробионтных сообществ в пределах погрешности эксперимента совпадает с измеренными значениями.

Обсуждение

Анализ литературных источников свидетельствует, что одним из факторов суточного изменения интенсивности свечения

морских организмов является интенсивность солнечной радиации. Анализ значений интенсивности дневной и ночной биолюминесценции планктона на различной глубине показал, что свечение гидробионтных сообществ ночью значительно выше, чем днем (Gitel'son and Levin, 1989; Токарев, 2006; Заворуев и др., 2012). Так, Ю. Н. Токарев отмечал, что вследствие изменения освещенности в течение суток интенсивность биолюминесценции в темное и светлое время суток изменяется в 30–100 раз (Токарев, 2006). Вследствие этого можно установить, что в наших исследованиях первая гармоника характеризует процесс нарастания интенсивности свечения организмов в течение темного времени суток и падения в утренние часы. Этот цикл обусловлен сменой и продолжительностью светового и темного периодов. Из выражения (2) для $y_1(t)$ видно, что амплитуда первой гармонической составляющей равна $931 \text{ пВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$, это характеризует ее вклад в изменение интенсивности свечения гидробионтного сообщества в течение темного времени суток.

Причиной появления высокочастотных колебаний (третья и пятая гармонические составляющие) с периодом 4.7 и 2.8 часа являются биологические процессы, связанные с количественным развитием фитопланктона в течение суток и взаимоотношениями в пищевой цепи обитателей пелагиали.

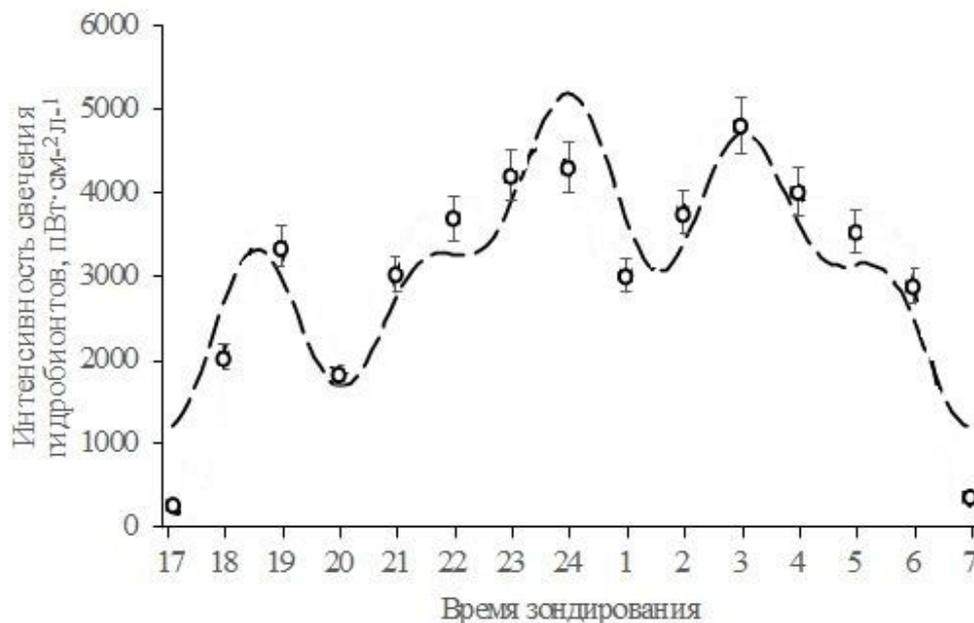


Рис. 3. Моделирование процессов функционирования пелагической системы на основе расчета изменения интенсивности свечения гидробионтов

Fig. 3. Modeling the processes of functioning of the pelagic system based on the calculation of changes in the luminescence intensity of hydrobiont communities

В ряде работ, посвященных развитию фитопланктона (Ланская, 1967; White, 1979; Sullivan and Swift, 1994; Akimoto et al., 2004; Titlyanov et al., 2004), отмечено, что количество и биомасса фитопланктонных организмов в пелагиали зависит прежде всего от скорости деления клеток и интенсивности выедания их зоопланктоном.

В работе С. А. Пионтковского и Т. С. Петипа, посвященной изучению суточного изменения в интенсивности питания у копеподиты *Acartia (Acartiura) clausi* (Giesbrecht, 1889), показано, что интенсивность питания ночью и днем у рачков разного возраста различна, что связано с их различной способностью к интенсивности миграции (Пионтковский, Петипа, 1975). При увеличении интенсивности миграции, которая наблюдается ночью, интенсивность их питания возрастает. Так, например, половозрелые самцы и самки вне периода размножения, а также *Acartia clausi* стадии V мигрируют активнее других стадий, совершая большие перемещения по глубине и придерживаясь в дневное время более глубоких водных слоев. Ночью, поднимаясь из глубинных водных слоев к поверхности, эти группы рачков питаются со значительно большей интенсивностью по сравнению с остальными группами. Младшие копеподиты и науплиусы, наоборот, совершают небольшие перемещения на глу-

бине, амплитуда их миграций невелика, они постоянно обитают в самых верхних слоях воды и питаются с наибольшей интенсивностью в дневное время. Существование различных суточных интенсивностей и ритмов питания обуславливается, вероятно, различной приспособленностью возрастных групп к солнечной радиации. Также отмечено, что самцы при высокой солнечной радиации выживают хуже, чем при слабом солнечном освещении (Пионтковский, Петипа, 1975).

На суточный ритм интенсивности питания влияет также вид пищи, потребляемой зоопланктоном. Так, полный процесс прохождения пищи по кишечнику у всех возрастных стадий *Acartia clausi*, а также у многих других видов копепод при преобладании в пище фитопланктона длится в среднем 3 часа, при питании дополнительно животной пищей продолжительность процесса пищеварения увеличивается в среднем до 5 часов (Пионтковский, Петипа, 1975). Следовательно, периоды нарастания интенсивности питания рачков зависят от вида пищи и близки к трем или пяти часам.

В отношении темпа деления клеток планктонных организмов на протяжении суток существуют разные мнения. Исследованием скорости деления клеток черноморского фитопланктона в культурах занималась Л. А. Ланская. В результате исследований она

пришла к выводу, что деление большинства видов динофлагеллят происходит круглосуточно, но максимальное количество делящихся клеток приходится на вечерние часы (18–19) и ночное время (Ланская, 1967). А. В. Ковалев и Н. Г. Столбова с соавторами для максимальной репродукции планктонных водорослей также выделяли ночные часы (Ковалев, 1993; Столбова и др., 1982)

Изложенные особенности деления клеток фитопланктона на протяжении темного времени суток позволяют предположить, что наблюдаемые в наших исследованиях нарастания интенсивности свечения гидробионтных сообществ в 19, 23–24 и к 3 часам утра являются результатом превалирования скорости деления светящихся клеток динофлагеллят над интенсивностью их выедания зоопланктоном в это время.

Циклический характер изменчивости интенсивности свечения гидробионтных сообществ с амплитудами 725 и 656 пВт·см⁻²·л⁻¹ и, соответственно, периодами 4.7 и 2.8 часа свидетельствует о том, что третья и пятая спектральные составляющие разложения в ряд Фурье являются существенными и обусловлены ультрадианными эндогенными суточными ритмами обитателей пелагиали.

Моделирование процессов функциони-

рования пелагической системы, приводящее к изменению интенсивности свечения гидробионтных сообществ, проводили по уравнениям (2) и (3).

Коэффициент корреляции между теоретическими значениями, рассчитанными по трем гармоникам, и измеренными значениями интенсивности свечения гидробионтов составляет $r = 0.906$.

Заключение

Показано, что на изменения интенсивности свечения гидробионтных сообществ пелагической системы в темное время суток оказывают влияние циркадный и ультрадианные биологические ритмы обитателей пелагиали с периодами 14, 4.7 и 2.8 часа. Эти биологические ритмы приводят к периодическому изменению интенсивности свечения, создаваемого пелагическими сообществами, с амплитудами 931, 725 и 656 пВт·см⁻²·л⁻¹. Использование метода преобразования Фурье позволило определить характеристики циркадного и ультрадианных биологических ритмов пелагического сообщества. Изменение солнечной радиации является синхронизирующим фактором, дающим начало как циркадным, так и ультрадианным биологическим ритмам планктонного сообщества.

Библиография

- Дженкинс Г. М., Ваттс Д. Г. Спектральный анализ и его приложения : В 2 т. Т. 2. М.: Мир, 1972. 287 с.
- Заворуев В. В., Заворуева Е. Н., Крум С. П. Распределение планктона в районах фронтальных зон водных экосистем . Красноярск: СФУ, 2012. 292 с.
- Ковалев А. В. Мезозоопланктон // Планктон Черного моря / Под. ред. А. В. Ковалева и З. З. Фененко. Киев: Наукова думка, 1993. С. 144–165.
- Кривошеев В. И. Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ) . Н. Новгород, 2006. 117 с.
- Ланская Л. А. Суточный ход деления некоторых видов планктонных водорослей Черного моря в культурах // Биология и распределение планктона южных морей / Под ред В. Н. Грезе. М.: Наука, 1967. С. 16–21.
- Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. О. И. Хабарова, Г. А. Сидоровой; Под ред. И. С. Рыжака. М.: Мир, 1990. 584 с.
- Пионтковский С. А., Петипа Т. С. Элективность в питании *Acartia clausi* (Giesbr.) // Биология моря. 1975. № 33. С. 3–10.
- Столбова Н. Г., Ведерников В. И., Микаэлян А. С. Суточный ритм деления динофлагеллят в Черном море // Океанология. 1982. Т. 22, № 3. Р. 492–495.
- Токарев Ю. Н. Основы биофизической экологии гидробионтов . Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 342 с. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/9076>.
- Токарев Ю. Н., Василенко В. И., Жук В. Ф. Новый гидробиофизический комплекс для экспрессной оценки состояния прибрежных экосистем // Современные методы и средства океанологических исследований: Материалы XI междунар. науч.-техн. конф., 25–27 нояб. 2009 г., Москва. М.: Изд-во РАН, 2009. С. 23–27.
- Черепанов О. А., Левин Л. А., Утюшев Р. Н. Связь биолюминесценции с биомассой и численностью светящегося и всего планктона. 2. Черное море // Морской экологический журнал. 2007. Т. 6, № 3. С. 84–89.
- Akimoto H. Wu. C., Kinumi T. and Ohmiya Y. Biological rhythmicity in expressed proteins of the marine dinoflagellate *Lingulodinium polyedrum* demonstrated by chronological proteomics // Biochem.

- Biophys. Res. Commun. 2004. Vol. 315, No 2. P. 306–312.
- Gitel'son I. I. and Levin L. A. Bioluminescence in oceanology // J. Biolumin Chemilumin. 1989. Vol. 4, No 1. P. 555–562.
- Hamman J. P., Biggley W. H. and Seliger H. H. Photoinhibition of stimuable bioluminescence in marine dinoflagellates // Photochem. Photobiol. 1981. No 33. P. 909–914.
- Hastings J. W. The Gonyaulax clock at 50: Translational control of circadian expression // Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol. 2007. No 72. P. 141–144.
- Krasnow R., Dunlap J. C., Taylor W., Hastings J. W., Vetterling W. and Gooch V. J. Circadian spontaneous bioluminescent glow and flashing of Gonyaulax polyedra // Comp. Physiol. 1980. Vol. 138, No 1. P. 19–26.
- Lapota D., Geiger M. L., Stiffey A. V., Rosenberger D. E. and Young D. K. Correlations of planktonic bioluminescence with other oceanographic parameters from a Norwegian fjord // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1989. No 55. P. 217–227. DOI: 10.3354/MEPS055217.
- Li Y. Q., Swift E. and Buskey E. J. Photoinhibition of mechanically stimuable bioluminescence in the heterotrophic dinoflagellate *Protoperdinium depressum* (Pyrrophyta) // J. Phycol. 1996. No 32. P. 974–982.
- Meeson B. M. Circadian rhythmicity in the marine dinoflagellate *Ceratium furca* // J. Phycol. 1977. Vol. 13, No 2. P. 45–50.
- Moline M. A., Blackwell S. M., Case J. F., Haddock S. H. D., Herren C. M., Orrico C. M., and Terrill E. Bioluminescence to reveal structure and interaction of coastal planktonic communities // Deep Sea Res. Part II. 2009. No 56. P. 232–245. DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.08.002.
- Ondercin D., Atkinson C. A., Kiefer D. A. The distribution of bioluminescence and chlorophyll during the late summer in the north Atlantic: maps and a predictive model // J. Geophys Res. 1996. No 10. P. 6575–6590.
- Polonsky A. B., Mel'nikova E. B., Serebrennikov A. N. and Tokarev Yu. N. Regional Peculiarities of Hydrobiotic Bioluminescence Intensity and Chlorophyll a Concentration in Black Sea Waters // Atmospheric and Oceanic. 2018. Vol. 31, No 4. P. 365–371.
- Sullivan J. M. and Swift E. Photoinhibition of mechanically stimulated bioluminescence in the autotrophic dinoflagellate, *Ceratium fusus* (Pyrrophyta) // J. Phycol. 1994. No 30. P. 633–637.
- Tett P. B. The relation between dinoflagellates and the bioluminescence of Sea water // J. Mar. Biol. Assoc. U. K. 1971. Vol. 51, No 1. P. 183–206.
- Titlyanov E. A., Titlyanova T. V., Kalita T. L. and Yakovleva I. M. Rhythmicity in division and degradation of symbiotic dinoflagellates in the hermatypic coral *Stylophora pistillata* // Symbiosis. 2004. No 36. P. 211–224.
- Tokarev Yu. N., Melnikova E. B. The influence of hydrophysical parameters on intensity of bioluminescence field in the Black Sea // Hydrobiological journal. 2012. Vol. 48, No. 4. P. 93–99. DOI: 10.1615/HydrobJ.v48.i4.70
- White H. H. Effects of dinoflagellate bioluminescence on the ingestion rates of herbivorous zooplankton // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 1979. № 36. P. 217–224.
- Widder E. A. Bioluminescence and the pelagic visual environment. Mar. freshw // Behav. Physiol. 2002. No 35. P. 1–26.
- Widder E. A. Bioluminescence in the ocean: Origins of biological, chemical, and ecological diversity // Science. 2010. No 328. P. 704–708.

DETERMINATION OF RHYTHMIC PATTERNS OF PELAGIC COMMUNITY FUNCTIONING BY THE FOURIER TRANSFORM METHOD

MELNIKOVA
Elena Borisovna

*PhD, Institute of Natural and Technical Systems,
helenamelnikova@mail.ru*

MELNIKOV
Anatolii Viktorovich

PhD, Sevastopol State University, mel.anat@mail.ru

Keywords:

functioning of pelagic system
biological rhythms
hydrobiont communities
Fourier transform
mathematical model
intensity of luminescence

Summary: The change in the luminescence intensity of the pelagic community in coastal waters on the south-western shelf of the Crimea is considered. It was found that the increases and decreases in the luminescence intensity of hydrobiont communities associated with the functioning of the pelagic system were periodically repeated at the same time. It was noted that the biomass of luminous organisms closely correlated with the biomass of plankton and other inhabitants of the pelagic zone, including commercial pelagic fish species. Therefore the intensity of the luminescence of aquatic organisms is a very important information characteristic of biological processes associated with the life of marine communities. Measurements of the luminescence intensity of the pelagic community can be carried out by high-speed biophysical devices in natural conditions without disturbing the structure and interspecific relationships of hydrobiont communities. Using the Fourier transform method, it was possible to find the parameters of the main biological rhythms of plankton communities that lead to a change in the intensity of the luminescence of hydrobionts. It was shown that the change in the intensity of the luminescence of organisms with a period of 14 hours characterized the circadian rhythms of the light and dark periods. Changes in the intensity of the luminescence of organisms with a period of 4.7 and 2.8 hours are due to the ultradian endogenous rhythms of the pelagic community associated with the intensity of cell division of phytoplankton and the rate of their eating by zooplankton. Graphs of changes in the intensity of the luminescence of organisms in the dark, constructed according to the found model, as well as experimental data and errors in their determination are given. Calculations showed that the correlation coefficients between the measured values of the luminescence intensity of organisms and those calculated using the obtained mathematical model was $r = 0.906$, taking into account the influence of the three main biological rhythms, This confirms the correctness of the accepted propositions.

Received on: 03 March 2022

Published on: 26 March 2022

References

- Akimoto H. Wu. C., Kinumi T. and Ohmiya Y. Biological rhythmicity in expressed proteins of the marine dinoflagellate *Lingulodinium polyedrum* demonstrated by chronological proteomics, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2004. Vol. 315, No 2. P. 306–312.
- Cherepanov O. A. Levin L. A. Utyushev R. N. Relationship of bioluminescence with biomass and abundance of luminous and total plankton. 2. Black Sea, *Morskoy ekologicheskiy zhurnal*. 2007. T. 6, No. 3. C. 84–89.
- Digital spectral analysis and its applications, *Per. s angl.* O. I. Habarova, G. A. Sidorovoy; Pod red. I. P. Ryzhaka. M.: Mir, 1990. 584 p.
- Dzhenkins G. M. Vatts D. G. Spectral analysis and its applications: V 2 t. T. 2. M.: Mir, 1972. 287 p.
- Gitel'son I. I. and Levin L. A. Bioluminescence in oceanology, *J. Biolumin Chemilumin.* 1989. Vol. 4, No 1. P. 555–562.
- Hamman J. P., Biggley W. H. and Seliger H. H. Photoinhibition of stimutable bioluminescence in marine dinoflagellates, *Photochem. Photobiol.* 1981. No 33. P. 909–914.
- Hastings J. W. The *Gonyaulax* clock at 50: Translational control of circadian expression, *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 2007. No 72. P. 141–144.

- Kovalev A. V. Mesozooplankton, Plankton Chernogo morya, Pod. red. A. V. Kovaleva i Z. Z. Fenenko. Kiev: Naukova dumka, 1993. P. 144–165.
- Krasnow R., Dunlap J. C., Taylor W., Hastings J. W., Vetterling W. and Gooch V. J. Circadian spontaneous bioluminescent glow and flashing of *Gonyaulax polyedra*, *Comp. Physiol.* 1980. Vol. 138, No 1. P. 19–26.
- Krivosheev V. I. Modern methods of digital signal processing (digital spectral analysis). N. Novgorod, 2006. 117 p.
- Lanskaya L. A. Daily course of division of some species of planktonic algae of the Black Sea in cultures, *Biologiya i raspredelenie planktona yuzhnyh morey*, Pod red V. N. Greze. M.: Nauka, 1967. P. 16–21.
- Lapota D., Geiger M. L., Stiffey A. V., Rosenberger D. E. and Young D. K. Correlations of planktonic bioluminescence with other oceanographic parameters from a Norwegian fjord, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1989. No 55. P. 217–227. DOI: 10.3354/MEPS055217.
- Li Y. Q., Swift E. and Buskey E. J. Photoinhibition of mechanically stimuable bioluminescence in the heterotrophic dinoflagellate *Protoperidinium depressum* (Pyrrophyta), *J. Phycol.* 1996. No 32. P. 974–982.
- Meeson B. M. Circadian rhythmicity in the marine dinoflagellate *Ceratium furca*, *J. Phycol.* 1977. Vol. 13, No 2. R. 45–50.
- Moline M. A., Blackwell S. M., Case J. F., Haddock S. H. D., Herren C. M., Orrico C. M., and Terrill E. Bioluminescence to reveal structure and interaction of coastal planktonic communities, *Deep Sea Res. Part II.* 2009. No 56. P. 232–245. DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.08.002.
- Ondercin D., Atkinson C. A., Kiefer D. A. The distribution of bioluminescence and chlorophyll during the late summer in the north Atlantic: maps and a predictive model, *J. Geophys Res.* 1996. No 10. P. 6575–6590.
- Piontkovskiy S. A. Petipa T. S. Electivity in nutrition of *Acartia clausi* (Giesbr.), *Biologiya morya*. 1975. No. 33. P. 3–10.
- Polonsky A. B., Mel'nikova E. B., Serebrennikov A. N. and Tokarev Yu. N. Regional Peculiarities of Hydrobiont Bioluminescence Intensity and Chlorophyll a Concentration in Black Sea Waters, *Atmospheric and Oceanic*. 2018. Vol. 31, No 4. P. 365–371.
- Stolbova N. G. Vedernikov V. I. Mikaelyan A. S. Diurnal rhythm of division of dinoflagellates in the Black Sea, *Okeanologiya*. 1982. T. 22, No. 3. P. 492–495.
- Sullivan J. M. and Swift E. Photoinhibition of mechanically stimulated bioluminescence in the autotrophic dinoflagellate, *Ceratium fusus* (Pyrrophyta), *J. Phycol.* 1994. No 30. P. 633–637.
- Tett P. B. The relation between dinoflagellates and the bioluminescence of Sea water, *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 1971. Vol. 51, No 1. R. 183–206.
- Titlyanov E. A., Titlyanova T. V., Kalita T. L. and Yakovleva I. M. Rhythmicity in division and degradation of symbiotic dinoflagellates in the hermatypic coral *Stylophora pistillata*, *Symbiosis*. 2004. No 36. P. 211–224.
- Tokarev Yu. N. Vasilenko V. I. Zhuk V. F. New hydrophysical complex for express assessment of the state of coastal ecosystems, *Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy: Materialy XI mezhdunar. nauch. tehn. konf., 25–27 noyab. 2009 g., Moskva. M.: Izd-vo RAN, 2009. P. 23–27.*
- Tokarev Yu. N. Fundamentals of Biophysical Ecology of Hydrobionts. Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2006. 342 p. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/9076>.
- Tokarev Yu. N., Melnikova E. B. The influence of hydrophysical parameters on intensity of bioluminescence field in the Black Sea, *Hydrobiological journal*. 2012. Vol. 48, No. 4. P. 93–99. DOI: 10.1615/HydrobJ.v48.i4.70
- White H. H. Effects of dinoflagellate bioluminescence on the ingestion rates of herbivorous zooplankton, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1979. No. 36. P. 217–224.
- Widder E. A. Bioluminescence and the pelagic visual environment. *Mar. freshw, Behav. Physiol.* 2002. No 35. P. 1–26.
- Widder E. A. Bioluminescence in the ocean: Origins of biological, chemical, and ecological diversity, *Science*. 2010. No 328. P. 704–708.
- Zavoruev V. V. Zavorueva E. N. Krum S. P. Distribution of plankton in areas of frontal zones of aquatic ecosystems. Krasnoyarsk: SFU, 2012. 292 c.