



УДК 591.148:574.52:[574.583+556](262.5)

Ю. Н. Токарев, д.б.н., проф., **В. И. Василенко**, вед. инж., **В. Ф. Жук**, н.с., **Ю. Б. Белогурова**, вед. инж

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной академии наук, Севастополь

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ С ПОМОЩЬЮ БУКСИРУЕМОГО ГИДРОБИОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «САЛЬПА-М»

Исследованы особенности пространственного распределения поля биолюминесценции (ПБ), созданного скоплениями светящихся планктонных организмов. Результаты спектрального анализа позволяют предположить, что цикличность распределения ПБ («пятнистость» светящихся организмов) может рассматриваться как показатель оценки функционального состояния планктонного сообщества.

Ключевые слова: Чёрное море, биолюминесценция, планктон, спектральный анализ (Фурье)

Среди существующих методов измерения сигналов биолюминесценции в толще воды (буксировка фотометров, вывешивание на заданном горизонте, зондирование определённых слоёв, установка фотометров на дне с помощью специальных ферм и т.д.) уже многие годы наиболее перспективными и точными признаются методы буксировки и зондирования [6, 11, 21]. Суть этих методов состоит в регистрации биолюминесценции движущимся с постоянной скоростью батифотометром. При этом только метод буксировки может использоваться в приповерхностных горизонтах водной толщи и на малых глубинах, испытывающих максимальный антропогенный пресс и подверженных наибольшей изменчивости ряда биологических и физических параметров [7, 11]. К другим достоинствам метода буксировки следует отнести:

- постоянный уровень вносимого возмущения в среду и, следовательно, раздражения биолюминесцентной системы организмов;
- достаточно простое решение вопроса о выделении астрономической составляющей регистрируемого свечения, поскольку законы её ослабления с глубиной известны;
- возможность исследования мозаичности пространственного распределения ПБ и фоновых характеристик среды на сколь угодно больших расстояниях.

Отдел биофизической экологии ИнБЮМ активно использовал и использует этот метод изу-

чения биолюминесценции [3, 13, 16]. Благодаря достаточно простым и надёжным буксируемым фотометрам удалось провести сравнительный анализ интенсивности биолюминесценции приповерхностного слоя Атлантического и Индийского океанов, морей Средиземноморского бассейна.

Вместе с тем, несмотря на важность и перспективность методики буксировки фотометра для экспресс-оценки пространственного распределения биолюминесценции и некоторых связанных с нею биологических характеристик пелагиали [11, 14], ряд присущих этому методу недостатков накладывает определённые ограничения на его использование. Речь идёт, в первую очередь, о зависимости уровня возбуждения светоизлучения гидробионтов от скорости судна, воздействие кильватерной струи буксировщика на пространственную структуру изучаемых характеристик, а также влияние волнения моря (качки судна) на «рыскание» (внезапное изменение горизонта буксировки) прибора в приповерхностном слое. Поэтому важно было оценить соотношение перечисленных выше достоинств метода буксировки и указанных его недостатков для целей выявления масштабов пространственной неоднородности биофизических и гидроэкологических характеристик при экспресс-мониторинге прибрежных акваторий с помощью нового комплекса буксируемой измерительной аппаратуры на базе батифотометра «САЛЬПА-М» [13].

Материал и методы. Биофизический мониторинг акватории бухты Севастополя и 2-мильной зоны от него выполняется отделом биофизической экологии ИнБЮМ с августа 2007 г. (рис. 1). В основе метода лежат инструментальные измерения *in situ*

в реальном масштабе времени амплитудно-частотных параметров биолюминесценции, а также выяснение их пространственной сопряженности с биологическими и гидрофизическими характеристиками водных масс.

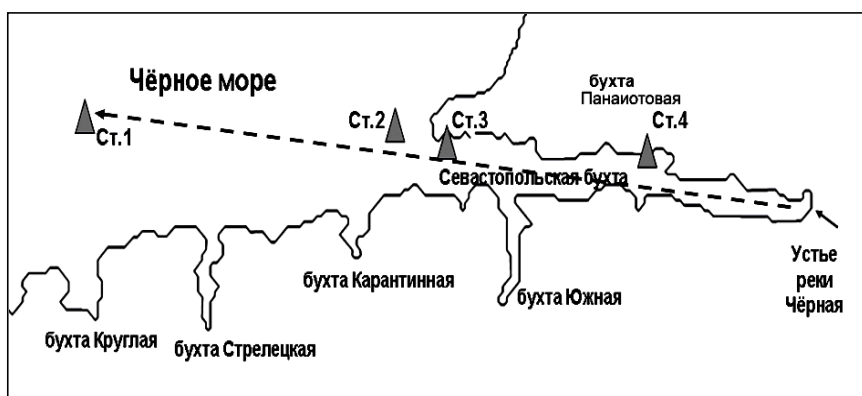


Рис. 1 Схема станций биофизического мониторинга в прибрежье Севастополя. Пунктирной линией обозначен маршрут буксировки, знаком Δ – точки выполнения вертикальных зондирований комплексом «Сальпа-М»

Fig. 1 Scheme of biophysical monitoring stations in Sevastopol coastal zone. The dashed line shows a route of towage, Δ sign designates points of performance of vertical soundings by "Salpa-M" complex

Из числа физических параметров водной толщи в любое время суток на горизонте нахождения прибора исследуют солёность и температуру, а также биооптические характеристики (биолюминесценция и мутность). В дневное время, кроме того, измеряют фотосинтетически активную радиацию (ФАР).

Опыт двухлетних исследований показал, что работы, проведенные на фиксированных станциях, расстояния между которыми несколько километров, не позволяют исследовать структуру планктонного сообщества в диапазоне малых пространственных масштабов: метры – сотни метров. Между тем, именно эти масштабы имеют наибольшую экологическую значимость для функционирования морских экосистем [18, 20], определяя, в частности, трансформацию вещества до высших трофических уровней через агрегированную часть их компонентов [17]. Для решения этой проблемы в отделе биофизической экологии в феврале 2009 г. разработано и смонтировано малогабаритное буксируемое устройство (МБУ), регистрирующие в реальном масштабе времени большие объёмы информации о биофизических, оптических и гидрологических параметрах водной среды в верхнем 0.5 – 10 м слое. Комплекс оснащён системой спутниковой навигации и эхолотом. Основным компонентом буксируемого устройства является зондирующий биофизический комплекс «Сальпа-М», оснащённый измерительными каналами биолюминесценции, температуры, мутности, электропроводности и фотосинтетически активной радиации [13]. Частота опроса изме-

рительных каналов соответствует 5 Гц, что при оптимальной скорости буксировки 3.5 узлов позволяет делать полный цикл измерений через каждые 0.4 м пройденного пути. Все измерительные каналы МБУ позволяют проводить обработку информации в режиме реального времени с выводом на дисплей и корректировать процесс измерения (табл. 1).

Комплекс «Сальпа-М» размещен на буксируемом (несущем) устройстве, представляющим собой буксируемый на тресе моноплан с верхнерасположенным поворотным крылом (рис. 2). Длина несущего крыла МБУ равна 0.75 м, ширина – 0.45 м. Специальные регулирующие устройства, расположенные на поворотном крыле и на узле крепления троса, позволяют аппарату опускаться на горизонты от 0.5 до 10 метров. Устойчивое движение МБУ на выбранной глубине обеспечивается гидродинамической формой несущего крыла. Буксировка МБУ может выполняться с маломерных судов, не оснащенных электропитанием и лебедочными устройствами.

Известно, что методика работы с буксируемыми комплексами заключается либо в их установке на дне вертикальной шахты судна [5, 19], либо в буксировке на несущем тресе в кильватерной струе [3] или на специальных выносных устройствах с борта судна [16]. Поскольку в данной статье используются материалы второго из перечисленных способов буксировки фотометра, необходимо привести некоторые теоретические положения, связанные, в частности, с величиной его пространственного разрешения.

Табл. 1 Технические характеристики измерительных каналов МБУ «Сальпа-М»
Table 1 Characteristics of "Salpa-M" measuring channels

Измерительный канал	Диапазон измерений:
Мутность, по формазину, ЕМФ	0.2 – 50
Биолюминесценции, Вт·см ⁻² ·л ⁻¹	0.7·10 ⁻¹² – 14·10 ⁻⁸
Гидростатического давления, Па	0·10 ⁶ – 2·10 ⁶
Температуры, °С	-2 – +35
Электропроводность См/м	1.5 – 6.5
Фотосинтетически активной радиации, μEinsteins/m ² ·sec	0.002 – 2000
Цена единицы наименьшего разряда, не более:	
Мутность, по формазину, ЕМФ	0.1
Биолюминесценции, Вт·см ⁻² ·л ⁻¹	0.7·10 ⁻¹²
Гидростатического давления, Па	0.002·10 ⁶
Температуры, °С	0.05
Электропроводность См/м	0.03
Фотосинтетически активной радиации, μEinsteins/m ² ·sec	0.002

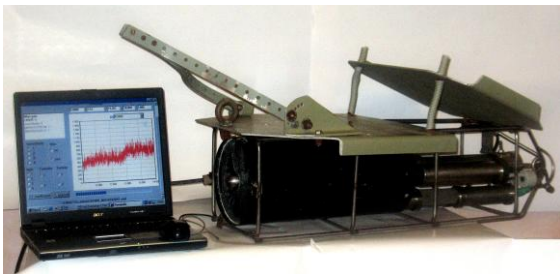


Рис. 2 Общий вид малогабаритного буксируемого устройства «Сальпа-М»

Fig. 2 General view of small-sized towed device "Salpa-M"

Действительно, ключевым для оценки неоднородностей пространственного поля биолюминесценции является пространственно-временное усреднение одиночных всплесков при регистрации их движущимся прибором [5, 19]. При этом необходимо принять во внимание такие факторы, как ослабление (затухание) света из-за процессов рассеяния и поглощения, угловую чувствительность датчика биолюминесценции, а также интегрирование во времени сигналов биолюминесценции интегрирующими схемами прибора с неким постоянным временем T . Так, связь амплитудного спектра поля биолюминесценции $S_{\omega}(\omega)$ и выходного сигнала $S(\omega)$ при установке люминометра в вертикальной шахте НИС «Академик Вернадский» была представлена как [19]:

$$S(\omega) = V_0^{-1} S_{\omega}(\omega/V_0) |G(\omega/V_0)|^2 (1 + \omega^2 T^2)^{-1} \quad (1),$$

где: V_0 – скорость перемещения датчика; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота.

$|G(\omega/V_0)|^2$ – квадрат модуля амплитудно-частотных характеристик датчика биолюминесценции, который имеет следующее определение:

$$|G(\omega/V_0)|^2 = 4p^2(\sin\theta_0)^4 [0.25p^2 \ln^2(1 + p^2) + (p \cdot \arctg p^{-1} - 1)^2] \quad (2),$$

где: $p = \varepsilon V_0 \cdot \omega^{-1}$; θ_0 – угол зрения биолюминесцентного датчика.

Очевидно (2), что спектральные характеристики датчика биолюминесценции определяются прозрачностью морской воды (ε) и углом зрения датчика биолюминесценции (θ_0). В чистых водах, когда пространственное осреднение покрывает большие расстояния, мелкомасштабная неоднородность менее регистрируема, чем в мутных водах, где усреднение требует меньшей протяженности буксировки. Например, при $\varepsilon = 0.1 \text{ м}^{-1}$, полоса прозрачности соответствует волне $0.1 \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1}$, а при $\varepsilon = 1.0 \text{ м}^{-1}$, полоса расширяется до $1.0 \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1}$. Иными словами, чувствительность к неоднородностям разных размеров в значительной мере определяется углом зрения датчика и резко уменьшается с его уменьшением.

Вместе с тем, спектральные характеристики датчика биолюминесценции зависят от времени интеграции (T). Оптимальное состояние для конкорданса между пространственным и временным усреднением неоднородностей биолюминесценции наступает, когда составляющие сигнала фильтрованы. Граничная частота фильтрации $\omega_0 = 2\pi/T$ соответствует волновому числу $k_0 = 2\pi/V_0 T$ [6]. Из уравнения (2) может быть установлено, что когда измерения проводятся в прозрачных водах ($\varepsilon < 0.1 \text{ м}^{-1}$), полоса прозрачности для движущегося датчика биолюминесценции - $k_0 = 0.05 \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1}$. Это соответствует $T = 2\pi/k_0 V_0 = 25.12 \text{ с}$ при скорости датчика $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Таким образом, при измерении ПБ на горизонтальных трансектах минимально обнаруживаемые размеры неоднородностей биолюминесценции при закреплении датчика в шахте НИС «Академик Вернадский» составляли 125.6 м [19].

Иначе обстояло дело при буксировке бати-фотометра на тресе в нашем случае. Дело в том, что конструктивные особенности темновой камеры комплекса «Сальпа-М» (рис. 3) изначально делали фиксированным объем возбуждаемого и «просматриваемого» прибором пространства. Поэтому, при известном времени интеграции всплесков регистрируемыми схемами аппаратуры, размер минимально

обнаруживаемых при буксировке неоднородностей определялся, прежде всего, геометрическими параметрами темновой камеры батифотометра, скоростью судна и особенностями высвечивания биолюминесцентных, обладающих различными размерами и разным латентным периодом светоизлучения, в темновой камере МБУ.

При этом необходимым условием регистрации полной энергии световой вспышки является выполнение следующего соотношения [6]:

$$t_{\text{тк}} = (L_{\text{тк}} \cdot \omega^{-1}) \geq \tau \quad (3),$$

где: $t_{\text{тк}}$ – время нахождения организмов в темновой камере; $L_{\text{тк}}$ – протяжённость темновой камеры; ω – скорость относительного движения организма и прибора; τ – длительность светоизлучения организма.

Исходя из полученных соотношений, с учётом видового состава черноморских фитопланктонных биолюминесцентных, определяющих не менее 90% биолюминесцентного потенциала пелагиали Чёрного моря [14], постоянной времени интегрирующего фильтра (1.2 с) и используемых оценок исходных величин ($\varepsilon = 0.08 \text{ м}^{-1}$, $V_0 = 1.5-1.8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $T = 1.2 \text{ с}$, $\theta_0 = 22^\circ$ и $k_0 = 0.55-0.46 \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1}$), реальный интервал дискретности измерения неоднородностей биолюминесценции при буксировке фотометра составлял около 2 м.

Известно, что статистически значимые результаты анализа обеспечивает, прежде всего, правильность выбора соотношения интервалов дискретности и продолжительности наблюдений. Обычно полагают [9], что минимальный анализируемый временной (пространственный) интервал определяется соотношением:

$$4 t(1) \leq P \quad (4),$$

где: $t(1)$ – интервал дискретности наблюдений во времени или пространстве; P – период изучаемых колебаний.

Поскольку в нашем случае интервал дискретности измерений составлял около 2 м, все пики спектральной мощности, находящиеся ниже величины $4 t(1)$, т.е. 8 м, отбрасывались как зашумлённость истинного процесса, вызванная искажением от колебаний с периодом меньшим P [9]. Таким образом, минимальный размер регистрируемых данной аппаратурой размеров неоднородностей свечения моря составлял $\geq 8 \text{ м}$, что существенно меньше, чем при работе с аппаратурой на НИС «Академик Вернадский» (125.6 м [19]).

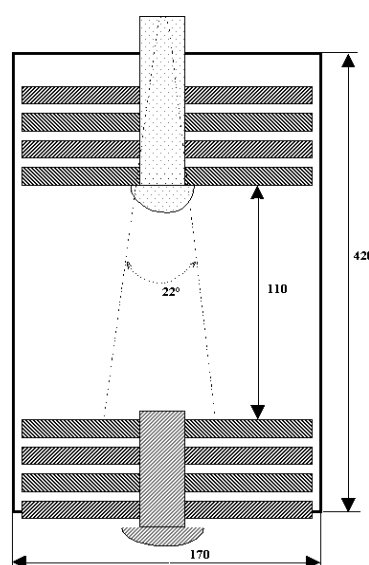


Рис. 3 Конфигурация и основные размеры (мм) темновой камеры гидробиофизического комплекса «САЛЬПА-М»
Fig. 3 Configurations and the basic sizes (mm) of dark chambers of "Salpa-M" hydrobiophysical complex

Нами проанализирован массив данных, полученных при буксировке, проведённой 13 июня 2012 г. Всего выполнено 26 буксировок по Севастопольской бухте и прилегающей акватории. Измерения проводили в дневное и ночное время, произведено 460000 замеров каждого параметра. Общая протяжённость всех буксировок составила более 160 км. Определение горизонта буксировки в каждом конкретном случае проводили после выявления вертикальной структуры поля биолюминесценции, для чего выполняли несколько зондирований водной толщи в определённых точках маршрута. Исследовательские работы, как правило, начинались на ст. 1 (траверс бухты Круглая), где в режиме вертикального зондирования определяли параметры вертикальной структуры биолюминесценции и отбирали пробы планктона. После определения глубины приповерхностного максимума биолюминесценции выставляли режимы заглубляющих рулей МБУ на выбранный горизонт. Прибор буксировали на скорости 3.0 – 3.5 узлов до станции ст. 4 (Панаиотова бухта), или до Нефтегавани в Севастопольской бухте. Иногда работы проводили в обратном направлении – от Нефтегавани до ст. 1.

Эксплуатационные характеристики прибора при его испытаниях на устойчивость при движении на заданной глубине полностью подтвердили расчётные: прибор принимал устойчивое положение на любом горизонте буксировки, при любой протяжённости трансекты и на любой скорости судна. Дальнейшие испытания МБУ в режиме глубокого моря при скорости судна до 4.5 узлов и глубине буксировки до 20 м подтвердили высокие эксплуатационные характеристики МБУ.

Всю акватория по трассе следования поделили на участки: условно чистый (акватория на траверсе бухты Круглая), умеренно загрязнённый (бухта Артиллерийская), сильно загрязнённый (район бухты Панайотовая) и очень сильно загрязнённый (бухта Южная и кутовая часть Севастопольской бухты). Для более детального исследования неоднородностей билюминесценции выделенные участки поделены на секторы, границы которых определяли с учётом уровня загрязнения и рельефа береговой полосы.

Результаты и обсуждение. Анализ вертикальных профилей поля билюминесценции на станциях, выполненных в некоторых точках по маршруту съёмки в прибрежье Севастополя (А – траверс бухты Круглая, В – вход в Севастопольскую бухту, С – район бухты Панайотовая), показывает, что на ст. 1 вертикаль-

ная структура ПБ представлена тремя максимумами (рис. 4). В приповерхностном слое на глубине 3 – 5 м располагался первый пик билюминесценции с низкой интенсивностью, не превышавшей $470 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$. Второй пик на глубине 30 м и третий – на глубине 60 м имели более высокий потенциал: соответственно $8000 \cdot 10^{-12}$ и $6000 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$ (рис. 4). Глубина нахождения первого максимума билюминесценции была определяющей для выбора горизонта буксировки, учитывая небольшие глубины Севастопольской бухты, а также сохранение приповерхностного максимума по всему маршруту.

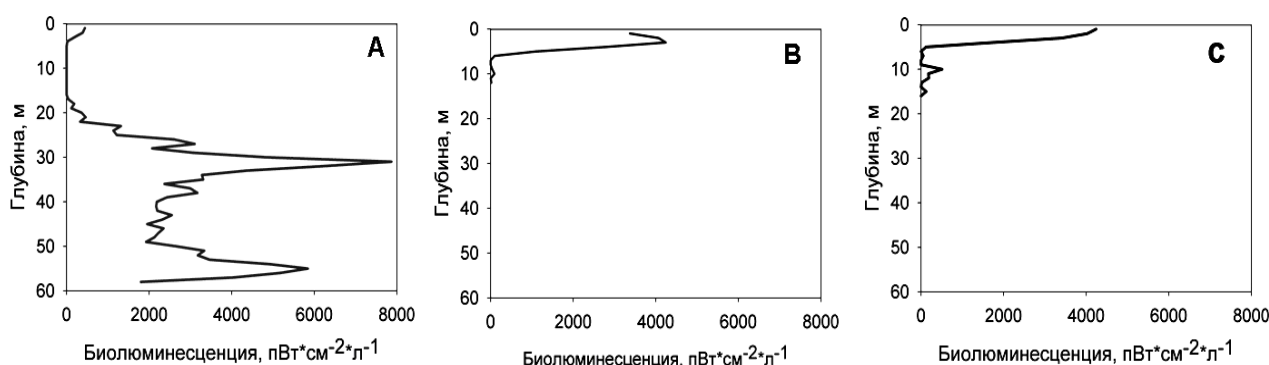


Рис. 4 Структура билюминесценции в прибрежье Севастополя: А – траверс бухты Круглая, В – вход в Севастопольскую бухту, С – район бухты Панайотовая

Fig. 4 Structure of a bioluminescence at the coastal zone of Sebastopol: A - a beam of a Kruglaya bay, B – an entrance to the Sebastopol bay, C – area of Panayotova bay

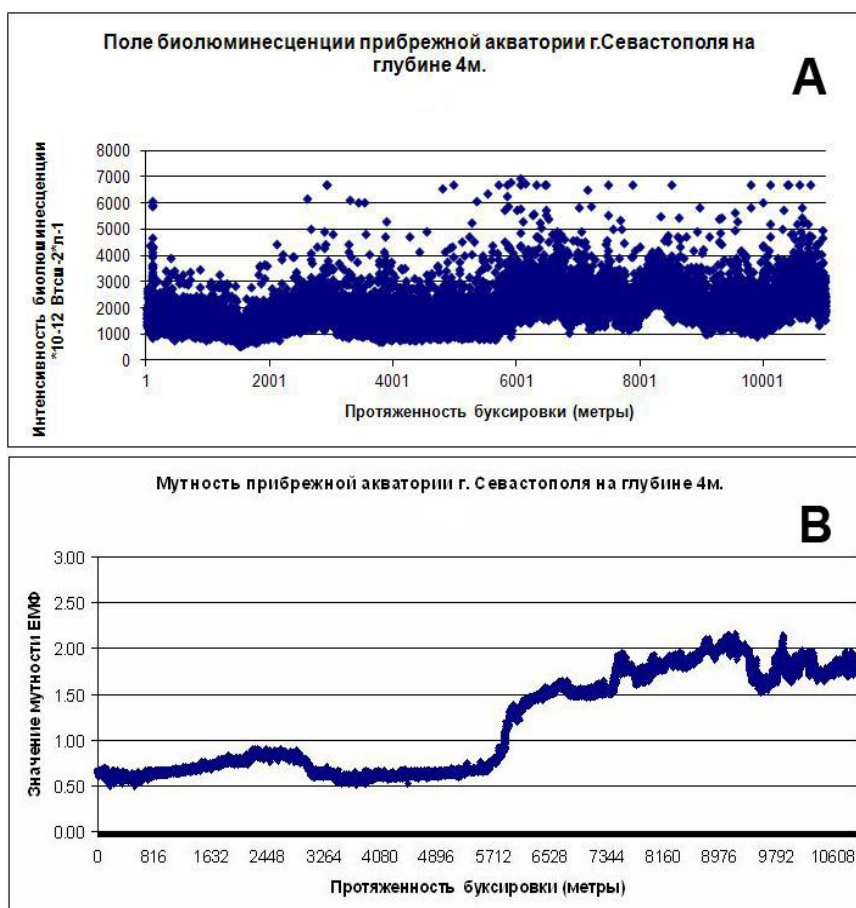
Трасса буксировки проходит через акватории с различной гидрологической структурой вод и многочисленными локальными источниками загрязнений. Уровень загрязнения по трассе буксировки можно проследить по показаниям канала мутности, определяемой взвесью содержащейся в морской воде на момент буксировки (рис. 5). В прибрежной акватории в условиях антропогенной нагрузки формируется многокомпонентная по структуре взвесь из комплексов неорганических и органических (клетки фитопланктона, бактерии, детрит и т. д.) составляющих.

Результаты измерения поля билюминесценции рассматривали как дискретный вре-

менной ряд, зависящий от непрерывного аргумента (времени), который модулировался нерегулярными случайными воздействиями. Нами не предполагалось построение модели, описывающий исследуемый ряд, а преследовалась цель с помощью спектрального анализа найти периодические составляющие временного ряда для экспресс-оценки пространственного распределения ПБ. Комплексный анализ результатов измерений проводился программами статистического анализа обработки данных Statistica 6. Затем, для определения пространственной изменчивости исследованных характеристик применены методы спектрального анализа

Фурье [2, 8], которые позволили представить временные ряды в виде циклических составляющих, описываемых функцией синусов и косинусов различной частоты с произвольным значением длин волн.

Рис. 5 Значения биолюминесценции (А) и мутности (В) прибрежной акватории г. Севастополя зарегистрированные на глубине 4 м 13 июня 2012г. при буксировке комплексом «Сальпа» от траверза бухты Круглая до бухты Панайотовая



Перед началом статистического анализа временного ряда важно определить форму его распределения. Принадлежность наблюдаемых данных конкретному закону распределения является необходимой предпосылкой для корректного применения большинства классических методов математической статистики, используемой в задачах обработки измерений [2, 8]. С этой целью строили гистограммы (разбиение производили по 40 классам) распределения биолюминесцентного сигнала в каждом секторе исследования и буксировки в целом (рис. 6). Затем были рассчитаны основные описательные статистики: среднее, дисперсия, стандартное отклонение, асимметрия и эксцесс; соответствие данных нормальному закону распределения определялось критерием согласия Колмогорова-Смирнова (табл. 2). Анализируя взаимное расположение структур гистограмм и наложенной кривой, отражающей закон нормального распределения, можно сделать предположение, что распределение интенсивности

ПБ близко к нормальному закону, но по ряду статистических параметров отличается от него, поскольку построенные гистограммы имеют незначительную правостороннюю асимметрию (значения асимметрии изменяются в пределах 1.293 – 3.1346) и обладают острой вершиной эмпирического распределения (значения эксцесса положительны).

После определения природы распределения анализируемых данных, используя процедуры преобразования и сглаживания ряда, был проведён полный спектральный (Фурье) анализ. Для уменьшения проблем рассеивания применяли косинус сглаживания, а также дополнительное сглаживание периодограммы с помощью метода Хемминга [8]. Эти преобразования позволили определить основные спектральные плотности, которые существенно влияют на цикличность поведения ряда.

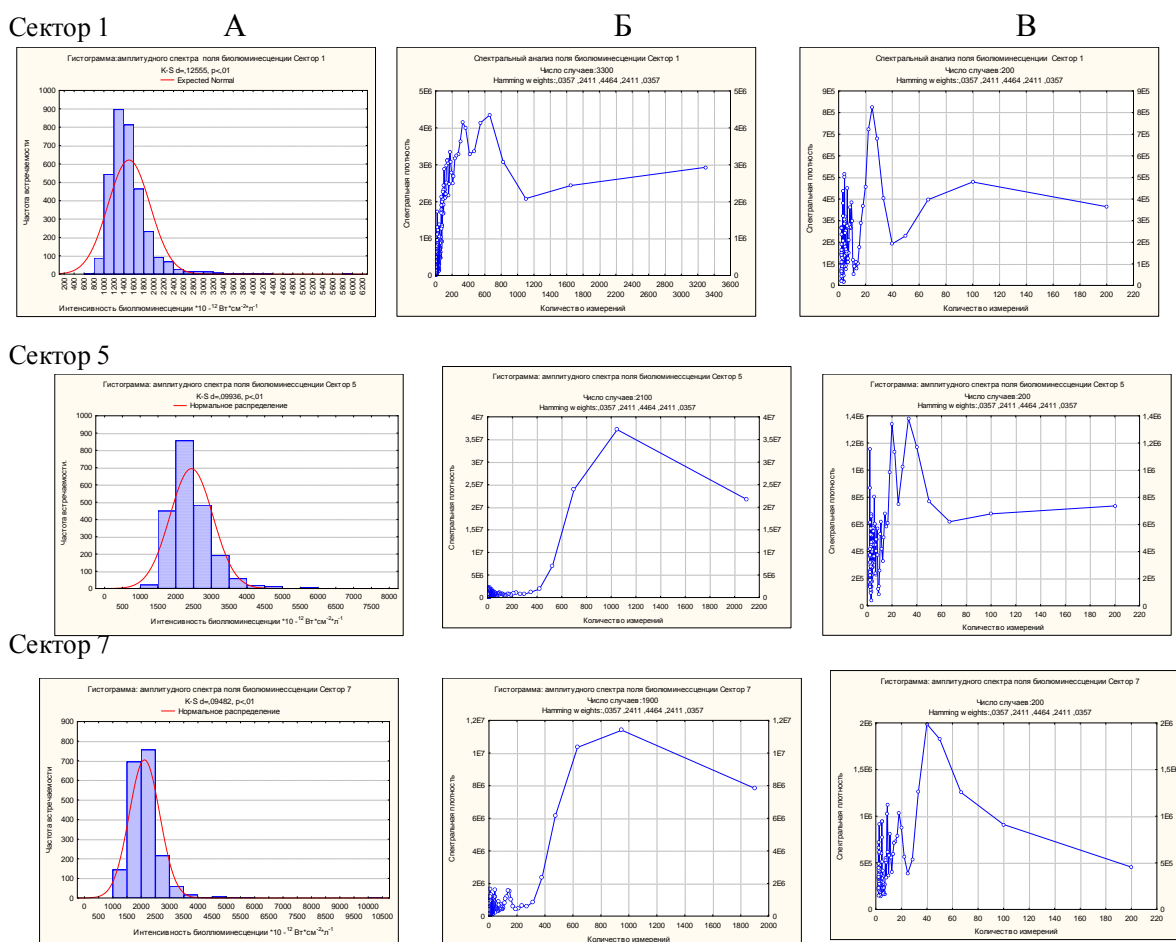


Рис. 6 Гистограммы амплитудного спектра поля биолюминесценции (А) и периодограммы пространственной мезомасштабной (Б) и мелкомасштабной (В) неоднородности поля биолюминесценции от траверза бухты Круглая до бухты Панаиотова построенные по секторам трассы буксировки

Fig. 7 Histograms of a peak spectrum of a field of bioluminescence (A) and periodograms of spatial mesoscale (B) and small-scale (C) heterogeneity of a field of bioluminescence from a beam of a bay Kruglaya up to bay Panayotova constructed by sectors of towing trace

Построенные периодограммы исследуемого массива данных позволили определить разные масштабы неоднородностей ПБ. Для исследования мелкомасштабной неоднородности дополнительно проанализированы выборки по 200 измерений ПБ в каждом секторе, что соответствует, учитывая скорость судна и цикличность измерений, 80-метровым отрезкам измерения. Получено более 230 периодограмм, (см. рис 6). При обработке периодограмм Фурье циклы с периодом более половины длины исследуемого ряда отбраковывались; не рассматривались также размерности неоднородностей меньше 8 м.

Характер изменения интенсивности ПБ в исследуемых участках описывается различными периодами колебаний. Отличие термохалинных, топографических (глубины) и экологических параметров исследованного региона (уровня загрязнённости) предопределило различие пространственных спектров исследованных полей в этих регионах. Так, для условно чистой акватории (траверс бухты Круглая – сектор 1, значения мутности не превышали 0.49 ЕМФ) на фоне неоднородностей, достигающих 100 м интервалов, минимальные масштабы изменчивости интенсивности ПБ составили 8 – 13 м. По мере продвижения по трассе буксировки, при входе в Севастопольскую бухту

(сектор 5) с увеличением значений загрязнений до 1.65 ЕМФ цикличность неоднородностей увеличилась до 310-метровых интервалов, соответственно возросли и минимальные масштабы изменчивости интенсивности ПБ, составившие от 13 до 25 м. Наконец, в районе сильного загрязнения (срединная часть Севасто-

польской бухты, сектор 8, где значения загрязнения увеличились до 2.31 ЕМФ) цикличность неоднородностей ПБ возросла до уровня 600 м, что, несомненно, повлияло и на минимальные масштабы изменчивости интенсивности ПБ, которые возросли до 17 – 28 м (рис. 7).

Табл. 2 Некоторые статистические характеристики и размеры выявленных неоднородностей поля биолюминесценции, измеренного при буксировке 13 июня 2012 г.

Table 2 Statistical characteristics of a field of bioluminescence measured at towage, June 13.2012.

Расположение трассы буксировки по секторам	Координаты		Количество изменений	Среднее значение биолюминесценции	Стандартное отклонение	Асимметрия	Экцесс	Критерий нормальности Колмогорова-Смирнова	Типичные разницы мезомасштабных неоднородностей	Доминирующая мелкомасштабная неоднородность (м)
	Начало сектора	Окончание сектора								
Ск 1	44°37.836 с.ш. 33°26.398 в.д.	44°37.669 с.ш. 33°27.114 в.д.	3300	1504	423.6	3.09	19.16	0.104	80	8-13
Ск 2	44°37.669 с.ш. 33°27.114 в.д.	44°37.507 с.ш. 33°28.122 в.д.	4401	1556	515	2.62	27.13	0.060	160	9-14
Ск 3	44°37.507 с.ш. 33°28.122 в.д.	44°37.468 с.ш. 33°29.177 в.д.	3801	1490	474.8	2.65	13.85	0.130	280	13-25
Ск 4	44°37.468 с.ш. 33°29.177 в.д.	44°37.429 с.ш. 33°30.015 в.д.	4101	1829	720.1	2.95	25.08	0.101	280	9-14
Ск 5	44°37.429 с.ш. 33°30.015 в.д.	44°37.391 с.ш. 33°30.540 в.д.	2101	2439	603.6	1.91	8.50	0.089	270	13-25
Ск 6	44°37.391 с.ш. 33°30.540 в.д.	44°37.334 с.ш. 33°31.260 в.д.	3201	2305	544.5	1.29	5.74	0.051	320	13-20
Ск 7	44°37.334 с.ш. 33°31.260 в.д.	47°37.306 с.ш. 33°31.723 в.д.	1901	2116	537.9	3.13	33.10	0.094	240	16-20
Ск-8	47°37.306 с.ш. 33°31.723 в.д.	44°37.267 с.ш. 33°32.898 в.д.	4263	2166	661.7	2.72	21	0.087	280	17-28

Такой метод обработки анализируемого ряда снизил влияние случайной составляющей и представил информацию в таком виде, который позволил визуально определить цикличность пространственной изменчивости биолюминесцентного сигнала. Достаточно чётко, в частности, прослеживается цикличность с шагом 300 м. Одновременно хорошо просматриваются отдельные однородные участки, где размах амплитуд биолюминесценции не превышают $500 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$.

Эти образования отделены друг от друга интервалами, где значения амплитуд биолюминесценции значительно превышают или гораздо ниже указанного предела размаха амплитуд. Таких образований на 100-метровых

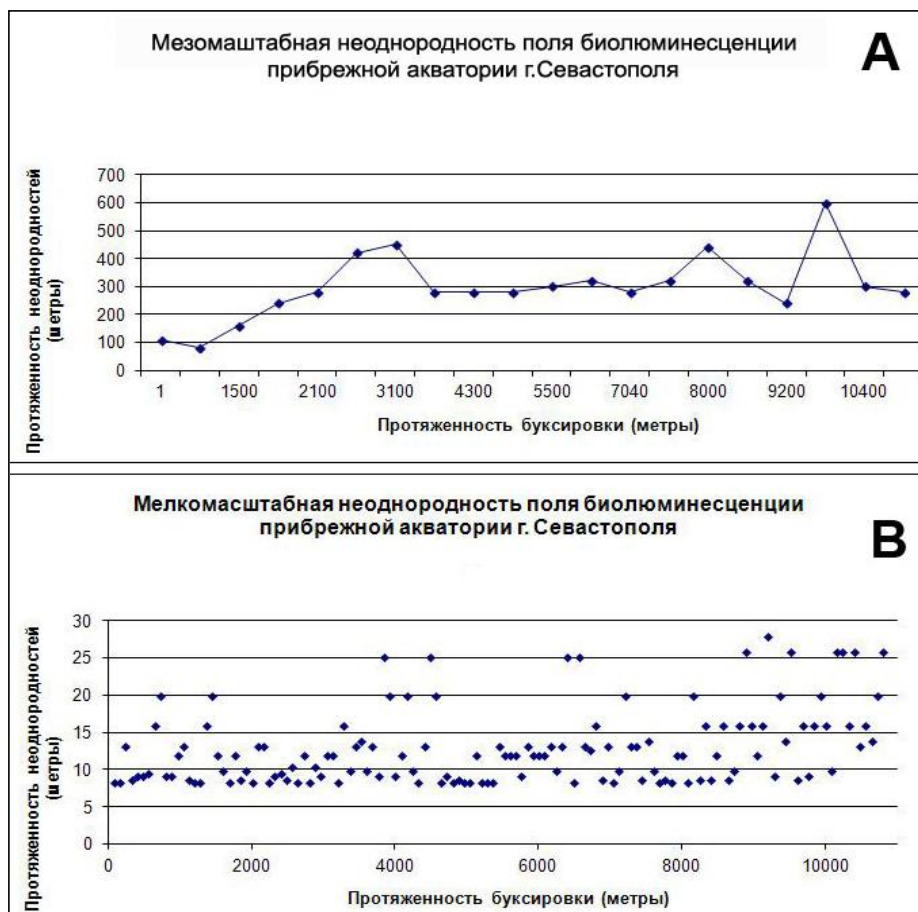
отрезках выявлено от 4 до 7, т.е. напрашивается вывод, что в анализируемом секторе буксировки наряду с мезомасштабной цикличностью ПБ в 300 м, наблюдаются и мелкомасштабные образования протяженностью от 16 до 25 м. При исследовании цикличности изменения ПБ на разных масштабах буксировки (табл. 3) выяснилось, что спектральная плотность периодичности изменяется по степенному закону, т.е. спектральная плотность оказалась обратно пропорционально частоте. Это, на наш взгляд, позволяет сделать предположение, что процесс изменения биолюминесценции можно с определённой вероятностью отнести к фликкер-шуму [4].

Рис. 7 Мезомасштабная (А) и мелкомасштабная (В) структура неоднородностей поля биолюминесценции при буксировке от траверза бухты Круглая (сектор Ск1) до бухты Панаютовая (сектор Ск8) 13 июня 2012г.

Fig. 7 Mesoscale (A) and small-scale (B) structure of heterogeneities of the fields of bioluminescence at towage from a beam of the bay Kruglaya (sector Ск1) up to bay Panayotova (sector Ск8) in June 13, 2012

Фликкер-шум – это флуктуационный процесс, спектральная плотность которого $S(f)$ растёт с понижением частоты по закону близкому к $1/f^\gamma$, в котором показатель γ близок к 1 ($0.8 \div 1.2$). Необходимо отметить, что фликкер-шум, хоть и играет важную роль в вариабельности рассматриваемого процесса, но не является определяющим, поскольку изменчивость ПБ происходит и дискретно, и непрерывно [1]. Известно, что фликкер-шумы являются частным случаем немарковского процесса, т.е. случайного процесса, изменение которого после любого заданного значения времени зависит от его эволюции, предшествующей этому моменту [10]. Немарковский процесс – это процесс с памятью: характер эволюции процесса в прошлом определяет его статистические характеристики в будущем. К качественным особенностям немарковских процессов следует отнести, в частности, наличие определённых временных циклов, что может быть использовано при исследовании биологических ритмов, наблюдаемых во всех уровнях организации от внутриклеточной до биосферной. Ритмы отдельных организмов, тканей, клеток, внутриклеточных компонент

Морський екологічний журнал, № 2, Т. XIII. 2014



участвуют в создании временной упорядоченности биологических явлений и составляют основу интеграции процессов в живых организмах. Из-за наличия большого числа налагающих структурных ритмов каждое последующее колебание несёт определённое отличие от предыдущего. Внешние воздействия могут сдвигать фазу и менять амплитуду биологических ритмов, которые способны адаптироваться (подстраиваться) к изменениям цикличности внешней среды [11]. Возможно, что дальнейшие исследования пространственной неоднородности ПБ, где будут учтены его суточные, сезонные и межгодовые изменения, а также метеорологические, гидрофизические и гидробиологические параметры среды, позволят выявить природу этих воздействий.

Наши результаты существенно отличаются от полученных ранее в открытой части Чёрного моря [15, 23].

Табл. 3 Основные линии в спектре Фурье биолюминесцентного поля, зарегистрированного на участках различной протяжённости

Table 3 The basic lines in spectrum Fourier of the bioluminescent field registered at sites of various extension.

Протяжённость буксировки (м)	Частота ω	Период (м)	Спектральная плотность A
80	0.0672	11.4	12
160	0.0125	80	80
240	0.0082	121.2	120
320	0.0092	108	112
400	0.0075	133.2	132
560	0.0090	110.8	150
720	0.0042	235.2	240
880	0.0170	58.8	60
1040	0.0037	266.4	272
1200	0.0067	148	160
1360	0.0017	571.2	520
1520	0.0060	166.4	168
1680	0.0015	664.4	620
1840	0.0012	800	680
2000	0.0010	1000	800
2160	0.0005	2000	1600
2320	0.0010	1000	800
2480	0.0005	2000	1640
2640	0.0005	2000	1680
2800	0.0012	800	640

Действительно, размеры минимально зарегистрированных неоднородностей полей планктона и биолюминесценции в Чёрном море, по [15, 23], составили соответственно 164 и 171 м. Однако, во-первых, необходимо учитывать различные сезоны проведения экспериментов и экологические особенности исследо-

ванных регионов. Во-вторых, что ещё более существенно, эти данные получены при использовании иной методики биологических и биофизических исследований, предусматривающей исключительно многократные зондирования водной толщи с параллельным отбором проб планктона. Поскольку используемый интервал измерений составлял при такой методике 2.5 – 3 мин, размер регистрируемых неоднородностей существенно превышал полученные нами при мониторинге побережья Севастополя.

Таким образом, результаты спектрального анализа подтверждают, что процесс пространственно-временной изменчивости биолюминесценции имеет сложный характер. Вместе с тем, прослеживается связь этой вариабельности с регионом исследований и экологическим состоянием продуцентов ПБ, в данном случае, планктонного сообщества. Следовательно, цикличность распределения биолюминесцентного поля (масштаб его изменчивости) может рассматриваться как важный элемент функционирования планктонного сообщества и использоваться для экспресс-оценки его структурированности и функционального состояния [12, 22].

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам отдела биофизической экологии ИнБЮМ за критические замечания при обсуждении рукописи.

1. *А. ван дер Зил.* Шумы при измерениях. – М.: Мир, 1979. – 293 с.
2. *Афифи А., Эйзен С.* Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. – М.: Мир, 1982. – 488 с.
3. *Битюков Э. П.* Биолюминесценция в кильватерной струе судна в Атлантическом океане, Средиземном и Черном морях // *Океанология.* – 1971. – **11**, 1. – С. 127 – 133.
4. *Бочков Г. Н., Кузовлев Ю. Е.* Новое в исследованиях 1/f-шума // *Успехи физических наук.* – 1983. – **141**, 1. – С. 151 – 176.
5. *Владимиров В. Л., Урденко В. Л., Неуймин Г. Г., Парамонов А. И., Земляная Л. А.* Исследования биолюминесцентного поля // *Морс. гидрофиз. исс.* – 1972. – **№2.** – С. 187 – 196.
6. *Гительзон И. И., Левин Л. А., Утюшев Р. Н., Черепанов О. А., Чузунов Ю. В.* Биолюминесценция в океане. – С.-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. – 283 с.
7. *Израэль Ю. А., Цыбань А. Б., Попов П. В.* Об экологической ситуации в морях России // *Метеорология и гидрология.* – 1993. – **№ 4.** – С. 15 – 21.
8. *Марпл С. Л. мл.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 582 с.
9. *Монин А. С., Каменкович В. М., Корт В. Г.* Изменчивость Мирового океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 262 с.
10. *Портенко Н. И., Скороход А. В., Шуренков В. М.* Марковские процессы. – М.: ВИНТИ, 1989. – 248 с.

11. Токарев Ю. Н. Основы биофизической экологии гидробионтов. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 342 с.
12. Токарев Ю. Н., Битюков Э. П., Соколов Б. Г. Мелкомасштабная пространственная структура акустического поля верхнего продуктивного слоя Атлантического океана // Гидробиол. журн. – 1995. – **31**, 1. – С. 79 – 86.
13. Токарев Ю.Н., Василенко В.И., Жук В.Ф. Новый гидробиофизический комплекс для экспрессной оценки состояния прибрежных экосистем // Современные методы и средства океанологического исследований: Мат. XI Международной научно-технич. Конф. (25 – 27 ноября 2009 г., Москва). – Часть 3. – М.: РАН, 2009. – С. 23 - 27.
14. Токарев Ю. Н., Серикова И. М., Нарусевич Т. Ф., Евстигнеев П. В. Роль некоторых фракций планктона в формировании поля билюминесценции в морях Средиземноморского бассейна // Мор. гидрофиз. журн. – 2002. - №3. – С. 51 – 60.
15. Токарев Ю. Н., Соколов Б. Г. Влияние физических и биологических факторов на формирование мелкомасштабной структуры билюминесцентного и акустического полей в Черном и Средиземном морях // Гидробиол. журн. – 2001. – **37**, 2. – С. 3 – 13.
16. Токарев Ю. Н., Шайда В. Г. Исследование поверхностной билюминесценции тропической Атлантики / В кн.: Результаты исследований северной части тропической зоны Атлантического океана по программе Декалант. – Севастополь: МГИ НАНУ, 1975. – С. 187 – 195.
17. Федоров В. Н. Устойчивость экологических систем и её измерение // Изв. АН СССР. Сер. Биол. – 1974. – № 3. – С. 402 – 415.
18. Fasham M. J. R., Angel M. V., Roe H. S. J. An investigation of the spatial pattern of zooplankton using the Longhurst-Hardy plankton recorder // J. exp. mar. Biol. Ecol. – 1974. – **16**, № 2. – P. 93 – 112.
19. Kushnir V. M., Tokarev Yu. N., Williams R., Piontkovski S. A., Evstigneev P. V. Spatial heterogeneity of the bioluminescence fields of the tropical Atlantic Ocean and its relationship with internal waves // Mar. Ecol. Prog. Ser. – 1997. – **160**. – P. 1 – 11.
20. Mackas D. L., Denman K. L., Abbott M. R. Plankton patchiness: biology in the physical vernacular // Bull. Mar. Sci. – 1986. – **37**, 2. – P. 652 – 674.
21. Seliger H. H., Fastie W. G., McElroy W. D. Towable photometer for rapid area mapping of concentration of bioluminescent marine dinoflagellates // Limnol. Oceanogr. – 1969. – **14**, 5. – P. 806 – 813.
22. Tokarev Yu. N., Bityukov E. P., Williams R. et al. The bioluminescence field as an indicator of the spatial structure and physiological state of the planktonic community at the Mediterranean sea basin. - In: P. Malanotte-Rizzoli and V.N. Eremeev (eds.). The eastern Mediterranean as a laboratory basin for the assessment of contrasting ecosystems. – The Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 1999. – P. 407 – 416.
23. Tokarev Yu. N., Williams R., Piontkovski S.A. The small-scale plankton patchiness in the Black Sea photic layer // Hydrobiologia. – 1998. - **375/376**. – P. 363 – 367.

Поступила 09 сентября 2013 г.
После доработки 14 марта 2014 г.

Визначення просторової неоднорідності поля білюмінесценції за допомогою буксированого гідробіофізического гідробіофізического комплексу «Сальпа-М». Ю. М. Токарев, В. І. Василенко, В. Ф. Жук, Ю. Б. Білогурова. Досліджені особливості просторового розподілу параметрів поля білюмінесценції (ПБ), створеного скупченнями планктонних організмів, що світяться. Результати спектрального аналізу дозволяють передбачити, що циклічність розподілу сигналу ПБ («плямистість» організмів, що світяться) може розглядатися як показник оцінки функціонального стану планктонного угруповання.

Ключові слова: Чорне море, білюмінесценція, планктон, спектральний аналіз (Фур'є)

Determination of the bioluminescence field spatial heterogeneity by means of the hydrobiophysical complex “Salpa-M”. Yu. N. Tokarev, V. I. Vasilenko, V. F. Zhuk, Yu. B. Bilogurova. The features of the bioluminescence field (BF) spatial distribution, created by the luminous plankton accumulations, were investigated. Results of the spectral analysis allow to suppose that recurrence of the BF distribution (“patchiness” of the luminous organisms) can be considered as an index of plankton communities functional state estimation.

Keywords: Black Sea, bioluminescence, plankton, spectral analysis (Fourier)