

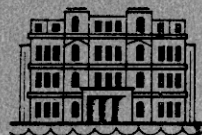
АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР

ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ ИМ. А. О. КОВАЛЕВСКОГО

ISSN 0203—4646

ЭКОЛОГИЯ МОРЕЯ

1871



ИНБЮМ

34

1990

**COMPARISON OF CHLOROPHYLL CONTENT MEASURED
BY THE STANDARD SPECTROPHOTOMETRIC
AND EXTRACTLESS METHODS IN THE EQUATORIAL ZONE
OF THE INDIAN OCEAN**

Summary

Specific index of chlorophyll absorption (K_{680}) whose values depend on the species and size composition, as well as on the ratio between different groups of algae in the total phytoplankton is of great significance in determination of the chlorophyll concentration by the proximate method using differential spectrophotometer without extraction of pigments. An increase of the small Flagellata and Coccolithophoridae biomass exerts the highest effect on K_{680} values, while that of Peridineophyta and Diatomophyta — the less one.

УДК 591.148:574.52(261)

П. В. ЕВСТИГНЕЕВ, О. К. ВОРОНОВА,
П. В. ЩЕРБАТЕНКО, Р. К. БОЧАРОВА

**ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТРОПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ**

Работа выполнена в 34-м рейсе нис «Академик Вернадский» в северо-западной части Тропической Атлантики в августе—ноябре 1986 г. Рассмотрены характеристики интегрального свечения поверхностного планктона. Методом адаптивного спектрального оценивания установлены основные масштабы неоднородностей биолюминесцентного поля (1—1,5 км, 350 и 170 м). Показаны связи уровня его развития с биологическими (численностью фитопланктона, концентрацией его пигментов, биомассой и численностью зоо- и бактериопланктона) и гидрофизическими (температурой и соленостью) характеристиками. Установлены основные виды биолюминесцентных.

Биолюминесцентное поле океана является результатом совокупной деятельности люминесцирующих организмов. Установлено, что пространственно-временная изменчивость интенсивности этого поля зависит от состава излучателей, их концентрации, а также воздействия на эти параметры самых различных абиотических факторов. Несмотря на множество публикаций по вопросу о свечении моря, мало известно о конкретных связях амплитудно-временных характеристик биолюминесценции океана с показателями биотической и абиотической его компонент. Исследование этих связей необходимо для построения прогностических моделей среды и для ее мониторинга.

Задачами настоящего исследования стали выявление основных люминесцирующих видов для северо-западного района Тропической Атлантики, а также установление корреляционных связей биолюминесцентного потенциала поверхностного слоя океана с такими биологическими и гидрофизическими факторами, как концентрация пигментов, численность бактерио-, фито- и зоопланктона, температура и соленость.

Работа выполнена в 34-м рейсе нис «Академик Вернадский» в августе—ноябре 1986 г.

Материал и методы исследований. Биолюминесценцию регистрировали по ходу судна (скорость 12 ± 1 узлов) с помощью фотометра, установленного в шахте судна на глубине 5 м. Возникающие при буксировке фотометра возможные искажения среды, например многочисленные пузырьки воздуха, по-видимому, незначительно влияли на интегральный сигнал, так как возможный шумовой эффект от светорассеяния, как правило, представленный непрерывным фоном, отсутствовал в наших аналоговых записях.

Схема фотометра соответствовала ранее описанной [4]. Регистрацию вели на шлейфовом осциллографе НО-44. Незначительная инерционность системы шлейфов позволяла вести подсчет числа импульсов

свечения в единицу времени. Эту характеристику использовали в качестве показателя степени развития биолюминесцентного поля.

Регистрацию биолюминесценции проводили от 30 мин до 2 ч в темное время суток, что соответствовало 6—24 милям на пространственной шкале. Скорость протяжки бумаги самописца составляла $2,5 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$.

Одновременно с регистрацией биолюминесценции проводили сбор зоо-, фито- и бактериопланктона. Зоопланктон собирали с помощью судового насоса производительностью $400 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$. Поступающую на палубу воду фильтровали через сито (газ № 49) в течение 20 мин. Полученный осадок взвешивали (сырая биомасса) и определяли видовой состав зоопланктона. Фито- и бактериопланктон собирали с помощью батометров. Определение численности и видового состава бактерио- и фитопланктона проводили по стандартным методикам [7, 8]. Нахождение концентрации хлорофилла и продукта его распада — феофитина — в батометрических пробах осуществляли флюоресцентным методом [10]. Статистическая обработка была выполнена на судовой ЭВМ ЕС 1033.

Результаты исследований и их обсуждение. Частота импульсов биолюминесценции в районе исследований варьировала от 1 до 43 ед. за минуту буксировки, в пространстве соответствовавшую приблизительно 350 м. В зависимости от района исследований коэффициент вариации частоты вспышек в пределах времени регистрации составлял 24—47%. Аналоговая запись представлена в виде отдельных вспышек организмов по ходу буксировки фотометра (рис. 1). Запись более длинных рядов визуально показала наличие определенной цикличности в появлении участков, например, с повышенной частотой световых сигналов. Относительно большой ряд значений частоты вспышек на пространственной шкале от сотен метров до нескольких километров позволил обработать данные методом адаптивного спектрального оценивания (методом максимальной энтропии) для выявления наиболее характерных масштабов ее неоднородностей (рис. 2). На рисунке видны достоверные пики на масштабах 1—1,5 км, 350 и 170 м (порядок модели=10). Ранее были получены близкие к указанным размерам неоднородностей величины при регистрации интегральной интенсивности биолюминесценции поверхностного слоя [5, 6]. Двумерная картина неоднородностей биолюминесцентного поля, полученная методом многократных батифотометрических зондирований, также свидетельствует о наличии агрегации источников свечения указанных масштабов [3]. Иными словами, ответственные за светоизлучение биолюминесцирующие организмы распределены в пространстве достаточно неравномерно, причем масштабы таких неоднородностей могут быть различными. Причина их формирования, существования и распада может быть понята лишь при наличии информации о видовом статусе источников светоизлучения.

Светящиеся виды, входящие в состав планктонных сообществ, относятся к различным таксонам [1]. Однако доминирующими являются, как правило, один или несколько близких видов. Отмеченная выше пятнистость есть в сущности пространственным распределением светящихся организмов. Поэтому для корректной интерпретации результатов анализа структуры биолюминесцентного поля и его флюктуаций важными являются установление связи показателя биолюминесценции с количественным и качественным развитием продуцентов света, определение таксонов, оказывающих доминирующее влияние на уровень биолюминесцентного потенциала.

Для исследованного региона, по нашим данным, между величинами биолюминесценции и численности клеток фитопланктона, а также концентрацией хлорофилла наблюдались максимальные коэффициенты корреляции (0,861 и 0,860). Аналитические выражения для данных зависимостей могут быть представлены в виде уравнений линейной регрессии. Для численности фитопланктона

$$y = ae^{bx},$$

где x — число клеток, экз.·л⁻¹,
 y — частота биолюминесцентных
 всплеск, ед.·мин⁻¹; a и b — ко-
 эффициенты, соответственно рав-
 ные 39,410 и 0,006. Для концен-
 трации хлорофилла a

$$y = a \log x + b,$$

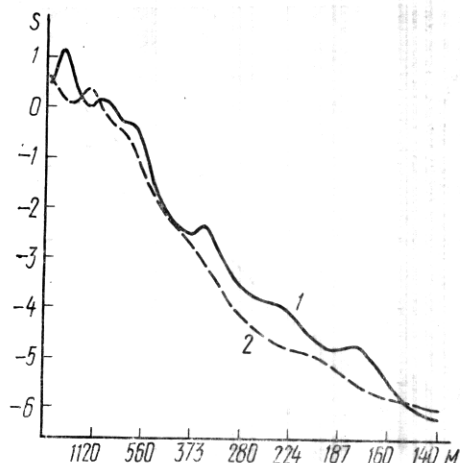
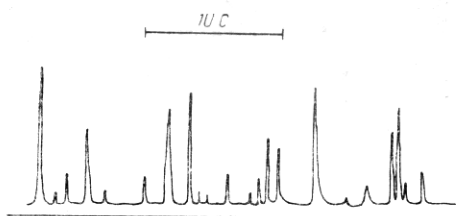


Рис. 1. Образец аналоговой записи биолюминесцентных всплеск в поверхностном слое океана (самописец НО-44). По оси ординат — относительная амплитуда сигналов

Рис. 2. Спектральное распределение частоты биолюминесцентных всплеск на масшта-
 бах от 140 м до 3 км (ось абсцисс). По оси ординат — спектральная плотность:
 1 — ст. 5637; 2 — ст. 5590

где x — концентрация хлорофилла a , мг·м³; y — частота биолюминес-
 центных всплеск, ед.·мин⁻¹; a и b — коэффициенты, соответственно
 равные 24,50 и 18,59. Эмпирические значения и теоретические линии ре-
 грессии приведены на рис. 3.

По-видимому, в поверхностном слое данного района именно фито-
 планктон вносит основной вклад в создание биолюминесцентного поля
 при возмущении внешней среды. Известно, что при этом биолюминесци-
 руют лишь динофитовые водоросли [1]. Ниже приведены пределы кон-
 центрций доминирующих таксонов из фито- и зоопланктона, способных
 к биолюминесценции и содержащихся в поверхностном слое исследо-
 ванного района:

Доминирующие таксоны	Пределы concentra- ций, экз.·л ⁻¹	Доминирующие таксоны	Пределы концент- траций, экз.·л ⁻¹
Фитопланктон		Зоопланктон	
<i>Gonyaulax</i> Dies.	20—1850	Радиолярии	20
<i>Exuviaella</i> Cienk.	1500—25000	<i>Corycaeus</i> Dana.	0—5
<i>Phalacroma</i> Stein.	0—1250	<i>Oikopleura</i> Mert.	0—18
<i>Oxytoxum</i> Stein.	500—1250	Науплии копепоид	
<i>Gyrodinium</i> Kof.	10—2100	<i>Pleuromamma</i> Giesb.	0—23
<i>Peridinium</i> Ehrbg.	0—5300	<i>Lucicutia</i> Giesb.	0—6
<i>Glenodinium</i> Ehrbg.	6300—58000	<i>Oncaea</i> Phil.	0—29

Общее их количество в районе исследований варьировало от 5 до
 77 тыс. кл.·л⁻¹. При этом они присутствовали на всей акватории по-
 лигона. Следует отметить, что некоторые светящиеся виды, не отмечен-
 ные выше, особенно из родов *Ceratium* Schrank., *Polycrinos* Ehrbg., *Pro-*
gocentrum Büt., *Pirocystis* Murr., встречались в меньших количествах
 (единицы, десятки экземпляров на литр), но при этом могли влиять на
 частоту биолюминесцентных всплеск.

Попутно с измерениями концентрации хлорофилла a определяли
 содержание его фотосинтетически неактивной формы — феофитина a .
 Анализ связи частоты биолюминесцентных всплеск с относительным
 содержанием феофитина (% суммы пигментов) показал достаточно вы-

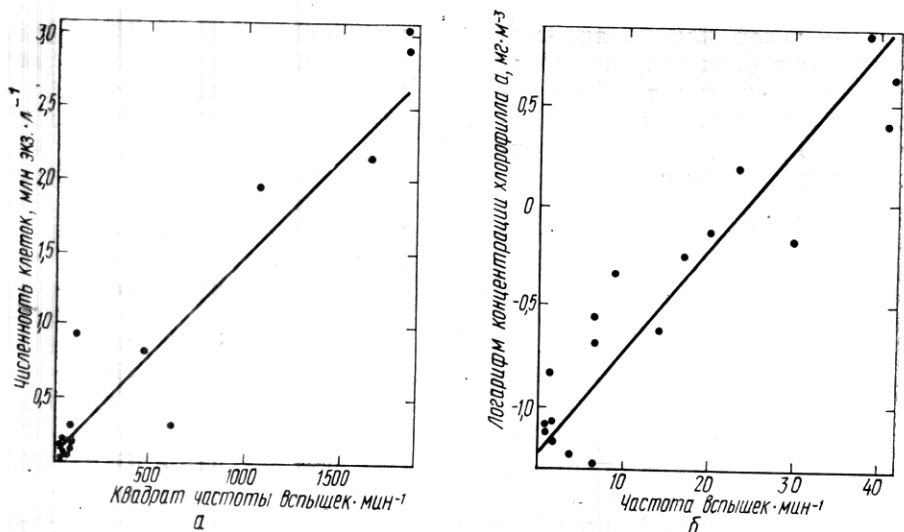


Рис. 3. Теоретические линии регрессии и эмпирические значения частоты биолюминесцентных вспышек в зависимости от численности клеток фитопланктона (а) и концентрации хлорофилла (б)

сокий и отрицательный коэффициент корреляции ($-0,72$). Эту зависимость можно аппроксимировать выражением

$$y = a + b \log x,$$

где x — процент феофитина; y — частота биолюминесцентных вспышек; a и b — коэффициенты, соответственно равные 28,43 и 15,70.

Таким образом, при увеличении доли фотосинтетически неактивного пигмента снижался уровень биолюминесценции. Известно, что распад активного хлорофилла и возрастание содержания его неактивной формы происходят в достаточно неблагоприятных для клеток условиях [2], наличие которых одновременно определяло снижение уровня биолюминесценции.

Корреляционная связь с суммарной биомассой сестона, основу которого в данном районе составляли веслоногие ракообразные, оказалась статистически недостоверной. Анализ видового состава зоопланктона, который в некоторых регионах может быть доминирующим генератором биолюминесцентного потенциала, не дает оснований отнести его представителей к числу существенно влиявших на биолюминесценцию поверхностного слоя исследованного района. Преобладавшие по численности в пробах планктона *Microsetella rosea* Dana., *Farranula gracilis* Dana., *Clausocalanus* Giesb. не известны в литературе как биолюминесцирующие. Из приведенных в выводе данных об изменении концентрации видов зоопланктона, отмеченных в качестве биолюминесцентных [6], видно, что количество их в общей численности потенциальных биолюминесцирующих единиц мало и несравнимо с величиной, вносимой в свечение фитопланктонными клетками. Помимо этого, например, виды родов *Lucicutia* Giesb., *Pleuromamma* Giesb. зарегистрированы лишь на 11 и 22% станций соответственно, *Oncaea mediterranea* Claus. — на 67, радиоларии — на 17% станций.

Несмотря на значимую корреляционную связь с численностью бактериопланктона¹ ($r=0,45$), частота биолюминесцентных вспышек, по-видимому, не зависит непосредственно от нее. Во-первых, количество светящихся бактерий в поверхностном слое открытого океана незначи-

¹ Авторы выражают благодарность А. Н. Бучачийской за данные о распределении численности поверхностного бактериопланктона.

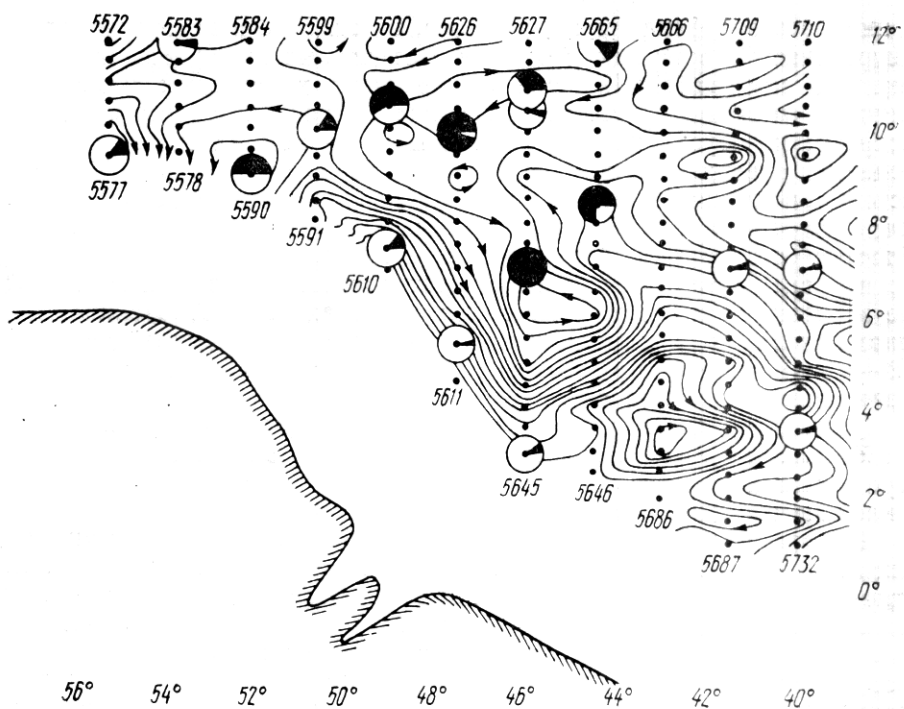


Рис. 4. Распределение показателей частоты биолюминесцентных вспышек (круговые диаграммы) в поверхностном слое исследованного полигона. Изолинии отражают динамическую топографию поверхностных вод

тельно или же они отсутствуют совсем, во-вторых, бактериальное свечение в случае большого количества излучателей выглядит как общее повышение светового фона при отсутствии отдельных импульсов [1]. Такая картина иногда отмечается в прибрежных районах с застойной водой [9]. Коэффициент корреляции, по-видимому, отражал приуроченность бактериального населения к зонам концентрации фитопланктонных организмов и соответственно продуктов их деструкции, экзометаболитов, биогенных элементов.

Таким образом, уровень биолюминесцентного потенциала на исследованной акватории был обусловлен преимущественно динофитовыми водорослями, при этом клетки родов *Exuviaella* Cienk., *Glenodinium* Ehrbg. и *Peridinium* Ehrb. обеспечивали основной вклад в развитие биолюминесцентного поля.

Наличие положительной связи частоты биолюминесцентных вспышек с концентрацией хлорофилла и общей численностью фитопланктонных клеток определяло уровень биолюминесценции в водах той или иной трофности. Основная площадь полигона характеризовалась низкими значениями частоты биолюминесцентных вспышек порядка единиц за минуту буксировки. Однако на олиготрофном фоне полигона существовали районы с повышенным биолюминесцентным потенциалом, приуроченные в северо-западной и центральной областях региона к зонам распреснения и подъема вод в циклонических круговоротах (рис. 4). Так, максимальные величины частоты биолюминесцентного потенциала были зарегистрированы на ст. 5603, 5622, 5637, характеризовавшихся максимальными на полигоне значениями концентраций хлорофилла *a* и клеток фитопланктона. Эти станции располагались в линзе распресненных вод, локально совпадавшей с одним из крупномасштабных циклонических круговоротов¹. Величины частоты биолюминесцентных вспышек здесь составляли соответственно 24,5; 40,5; 42,5 ед. · мин⁻¹. Несколько

¹ Данные о динамической топографии поверхностных вод предоставлены сотрудником МГИ АН УССР Ю. Н. Горячкиным.

ко ниже эти значения были, например, на ст. 5590 и некоторых других, приуроченных к зонам подъема вод в отдельных циклонических вихрях меньшего масштаба. Для них также были характерны повышенные величины указанных биологических параметров. По-видимому, именно распреснение обусловило и характер корреляционных связей биолюминесценции поверхностного слоя с соленостью и температурой. Так, связь частоты биолюминесцентных вспышек с величинами солености составляла 0,32, свидетельствуя о повышении значений биолюминесценции в областях распреснения. Положительная корреляция ($r=0,50$) в поверхностном слое установлена и с температурой воды, имевшей более высокие значения также в распресненных участках (сток Амазонки). В районах отдельных циклонических вихрей уровень биолюминесценции был в 2—3 раза ниже, чем в районах распреснения, хотя его величины были значительно выше фоновых.

По-видимому, наблюдаемый заток трансформированных пресных амазонских вод, локализованных в слое 0—20 м, в значительно большей мере влиял на уровень биолюминесценции, чем отмеченные вихревые циклонические образования.

Выводы. Экспресс-анализ распределения частоты биолюминесцентных вспышек в поверхностном слое северо-западной части Тропической Атлантики показал, что оно в целом отображает картину основных динамических процессов, обуславливающих количественное развитие одноклеточных водорослей и соответственно уровни продуктивности данного района. Таким образом, распределение поверхностного биолюминесцентного потенциала было неравномерным, преобладали скопления повышенных его значений размером от сотни метров до десятков километров, что и отражало пространственное распределение биолюминесцирующих организмов. Доминирующими биолюминесцентами в поверхностном слое региона являлись динофитовые водоросли, относящиеся к родам *Glenodinium* Ehrbg., *Peridinium* Ehrbg. и *Exuviaella* Cienk. Распределение величин биолюминесценции по акватории полигона отражало распределение районов с повышенным уровнем продуктивности, обусловленным распреснением и местным подъемом вод в циклонических вихрях.

1. Биолюминесценция моря / Под ред. И. И. Гительсона. — М.: Наука, 1969. — 183 с.
2. Берсенева Г. П., Шалопенко А. А. Определение феофитинов и хлорофиллидов в морских одноклеточных водорослях // Океанология. — 1986. — 26, вып. 3. — С. 481—486.
3. Битюков Э. П. Горизонтальная неоднородность биолюминесцентного поля как показатель агрегированного распределения планктона // Гидробиол. журн. — 1984. — 20, № 5. — С. 24—31.
4. Битюков Э. П., Василенко В. И., Токарев Ю. Н., Шайда В. Г. Батифотометр с дистанционной переключаемой чувствительностью для оценки интенсивности биолюминесцентного поля // Там же. — 1969. — 5, № 1. — С. 82—86.
5. Владимиров В. И., Урденко В. А., Неуймин Г. Г. и др. Исследование биолюминесцентного светового поля // Мор. гидрофиз. исслед. — 1972. — № 2. — С. 187—196.
6. Кушинир В. М., Токарев Ю. Н., Евстигнеев П. В. Волновые спектры неоднородностей биолюминесценции в зоне тропического энергетического полигона / АН УССР. Мор. гидрофиз. ин-т. — Севастополь, 1986. — 13 с. — Деп. в ВИНТИ 13.05.86, № 3440-B.
7. Родина А. Г. Методы водной микробиологии. — Л.: Наука, 1965. — 363 с.
8. Суханова И. Н., Раткова Т. Н. Сравнение численности фитопланктона в пробах, собранных методом двойной фильтрации и стандартным методом осаждения // Океанология. — 1977. — 17, вып. 4. — С. 691—693.
9. Тарасов Н. И. Свечение моря. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956. — 204 с.
10. Gibbs C. E. Chlorophyll „b“ interferes in the fluorimetric determination of chlorophyll „a“ and phaeopigments // Aust. J. Mar. Freshwater Res. — 1979. — 30, N 5. — P. 597—606.

Ин-т биологии юж. морей
им. А. О. Ковалевского АН УССР, Севастополь

Получено 09.11.87

STUDY OF THE SURFACE LAYER BIOLUMINESCENCE IN TROPIC ATLANTICS

Summary

The paper deals with characteristics of integral fluorescence of the surface plankton in the North-Western region of the tropic Atlantics. The level of the bioluminescent field development is shown to be related to biological (amount of phytoplankton, concentration of its pigments, biomass and amount of zoo- and bacterioplankton) and hydrophysical (salinity and temperature) characteristics. Species of bioluminescent organisms which are basic for the given region are established.

УДК 591.524.12:591:546:221 (262.5)

Т. В. ПАВЛОВСКАЯ, Т. М. КОВАЛЕВА,
Н. И. МИНКИНА

ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗООПЛАНКТОНА ИЗ РЕДОКС-ЗОНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

Дана оценка продолжительности выживания, интенсивности питания и скорости потребления кислорода черноморского зоопланктона (личинки полихет, инфузорий и копепод) в присутствии сероводорода и низких концентраций кислорода. Отмечена различная степень устойчивости зоопланктона к газовому режиму редокс-зоны. Наиболее устойчивыми к наличию сероводорода и кислорода в концентрациях 0,06—0,19 и 0,52—1,16 мл·м⁻¹ соответственно были личинки полихет. Увеличение содержания H₂S в воде до 1,6 мл·л⁻¹ вызывало гибель организмов через 0,1—5 ч. Интенсивность питания и скорость потребления кислорода составляли 10—75% величин рапионов и дыхания при той же температуре в окислительной зоне. Полученные результаты свидетельствуют о невозможности длительного существования зоопланктона в редокс-зоне.

Наличие живого зоопланктона в граничащей с сероводородной редокс-зоне, характеризующейся пониженным содержанием кислорода и наличием сероводорода, было установлено многими исследователями [6, 7, 9, 15]. Но данные о влиянии сероводорода и низких концентраций кислорода на жизнедеятельность животных немногочисленны [6, 11, 15]. Показана большая устойчивость ряда представителей черноморского планктона к содержанию сероводорода и низким концентрациям кислорода.

В переходной зоне Черного моря в исследуемых районах содержание сероводорода и кислорода колебалось в диапазоне 0,06—0,53 и 0,06—0,34 мл·л⁻¹ соответственно¹. Для отмеченного газового режима данные о жизнедеятельности животных полностью отсутствуют. Задача данной работы состоит в выяснении зависимости продолжительности выживания зоопланктона от соотношения концентраций сероводорода и кислорода, а также в оценке величины дыхания и рационов массовых форм зоопланктона в переходной зоне.

Материал и методика. Не останавливаясь подробно на методиках проведения экспериментов, отметим следующее. Было установлено, что в воде, отобранной батометром из редокс-зоны, из-за контакта с воздухом нарушается газовый режим. В течение 2—5 ч содержание сероводорода падает практически до нуля и быстро возрастает концентрация кислорода. Поэтому в опытах по дыханию гидробионтов создавали условия, близкие к газовому режиму редокс-зоны, путем разбавления фильтрованной, освобожденной от газов воды из этой зоны глубинной водой с высоким содержанием сероводорода и необходимым обогащением кислородом. Подробно методика описана в работе [5].

¹ Данные о содержании сероводорода и кислорода предоставлены А. С. Романовым, за что авторы приносят ему благодарность.