

В.В. Заворуев

## Нижняя кислородная граница распределения биолюминесценции планктона в морской среде

Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск

Поступила в редакцию 16.09.2005 г.

Проанализированы вертикальные профили интенсивности биолюминесценции планктона и концентрации кислорода в Черном море и в Тихом океане вблизи восточного побережья Америки. Установлено, что глубинный максимум биолюминесценции планктона находится между изоксигенами 0,35 и 0,20 мл/л. При концентрации кислорода в воде ниже 0,10–0,15 мл/л биолюминесценция планктона не обнаруживается.

Исследование светового поля океана имеет большое фундаментальное и прикладное значение. Распределение света в воде зависит от многих физико-химических и биологических факторов. Морские планктонные организмы не только поглощают и рассеивают солнечное излучение, но и сами способны излучать кванты света в видимой области спектра. Явление биолюминесценции повсеместно проявляется в Мировом океане. Интенсивность *in situ* люминесценции морских организмов зависит от температуры, солености, интенсивности проникающей в воду солнечной радиации, концентрации биогенов [1, 2]. Имеются фрагментарные данные о влиянии концентрации кислорода на распределение интенсивности биолюминесценции в морской среде [2].

В данной статье анализируется вертикальная структура интенсивности биолюминесценции планктона в морских и океанических водах, характеризующихся дефицитом кислорода.

Работа проводилась во время 38-го и 44-го рейсов научно-исследовательского судна «Дмитрий Менделеев». Целью комплексных экспедиций было изучение особенностей функционирования и состояния экосистем пелагиали Черного моря и восточной части Тихого океана. Маршруты рейсов были выбраны таким образом, чтобы во всех основных районах получить сравнительные характеристики экосистемы. Для этого проводили комплексные исследования гидрофизических, гидрохимических и биологических параметров.

Центрально-американский разрез имел начало в точке с координатами 08°57' с.ш., 90°00' з.д., станция № 3498, и заканчивался 17°07' с.ш., 102°54' з.д., станция № 3504 (нумерация станций дана по бортовому журналу НИС «Дмитрий Менделеев»). Сделанный вдоль побережья Центральной Америки разрез захватывал воды с глубоким по концентрации кислородным минимумом.

Комплекс методик для измерения гидрологических параметров и комплекс аппаратуры для измерения биолюминесценции даны в работе [3].

В летнее время биолюминесценция в Черном море определяется *N. miliaris* [4]. Вертикальные профили биолюминесценции планктона имеют два максимума (рис. 1).

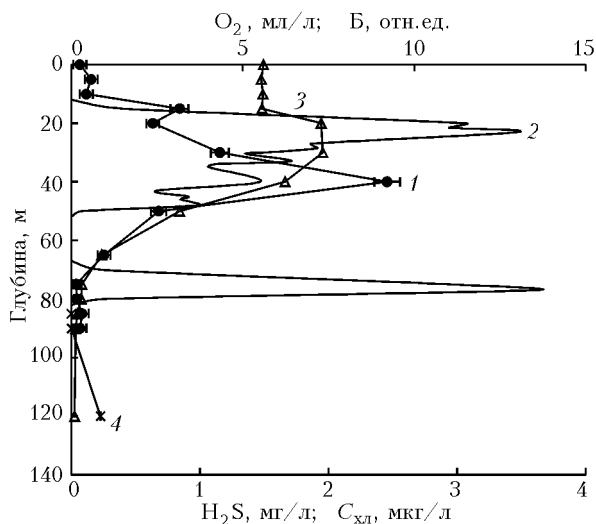


Рис. 1. Вертикальные профили концентрации хлорофилла  $C_{chl}$  (1), биолюминесценции планктона Б (2), концентрации кислорода  $O_2$  (3) и сероводорода  $H_2S$  (4) в августе 1989 г. на станции с координатами 43°28' с.ш., 34°00' в.д.

Верхний максимум свечения планктона всегда обнаруживался под изотермическим слоем. На всей акватории моря его положение совпадает с максимальным градиентом плотности или с так называемым сезонным пикноклином (таблица).

Такая же закономерность была обнаружена ранее, однако ей давалось следующее объяснение: «Летом основным биолюминесцентом оказывается ноктилюка. Для нее характерно изменение содержания жира, в результате чего меняется удельный вес организма. Ноктилюка при этом пассивно перемещается по вертикали, задерживаясь в тех слоях, где ее плавучесть оказывается нейтральной. Чаще всего это происходит в слое температурного скачка.

Толщина (м) изотермического слоя воды ( $H_z$ ), положение кислородной границы на уровне 0,25 мл/л ( $O_2$ ), верхнего ( $B_v$ ) и нижнего ( $B_n$ ) максимума биолюминесценции, глубина залегания сероводородной зоны ( $H_2S$ )

Координаты	Районы моря	Дата	$O_2$	$H_2S$	$H_z$	$B_v$	$B_n$
43°20' с.ш., 32°25' в.д.	центральные	29.07	90	115	10	10–15	70–75
43°28' с.ш., 34°00' в.д.	центральные	05.09	90	100	20	25–30	80–85
43°20' с.ш., 36°11' в.д.	центральные	07.08	95	119	15	15–20	75–90
42°11' с.ш., 28°40' в.д.	юго-западная часть	03.09	95	120	15	15–20	75–80
44°34' с.ш., 30°57' в.д.	северо-западная часть	27.07			12	10–20	
44°27' с.ш., 37°55' в.д.	северо-восточная часть	04.08	165	150	20	20–30	135–140
41°25' с.ш., 38°12' в.д.	юго-восточная часть	29.08	130	90	15	15–20	110–115

Именно там и наблюдается повышенная концентрация этого организма. В слое температурного скачка интенсивность биолюминесцентного поля достигает своего максимума» [5]. Позже представления о приуроченности верхнего максимума биолюминесценции и доминирующих в нем светящихся организмов не изменились. «Следует отметить, что в слое скачка иногда создаются оптимальные условия для обитания организмов. Данные биологических обловов свидетельствуют о том, что *Noctiluca* – основной источник биолюминесцентных вспышек в Черном море – образует скопления на всем протяжении зоны скачка, и над и под слоем термоклина» [6].

В Черном море вблизи хемоклина основным биолюминесцирующим организмом круглогодично является *N. miliaris*. Это следует из многочисленных исследований, посвященных изучению вертикальной структуры черноморского планктона и биолюминесцентных полей [6–9].

Имеются данные о приуроченности скоплений планктона в Черном море к сравнительно узкому и постоянному диапазону величин условной плотности ( $\sigma_t$ ), равному 15,0–16,1 [10]. Действительно, глубинный максимум свечения был приурочен к слою воды, в котором значения  $\sigma_t$  находились в вышеуказанном диапазоне. Однако этот слой достаточно широкий относительно ширины пика биолюминесценции. Поскольку большинство известных реакций биолюминесценции являются кислородзависимыми, то логично было предположить, что положение нижнего максимума свечения планктона определяется концентрацией кислорода. На рис. 2 приведены изооксигены, между которыми обнаруживается нижний максимум биолюминесценции планктона. При концентрациях кислорода в воде ниже 0,10–0,15 мл/л биолюминесценция ночесветки не обнаруживается. Ниже на 10–15 м от глубинного пика свечения численность *N. miliaris* равна нулю.

Расчеты градиентов гидрологических параметров для всех станций, выполненных в июле – августе в пелагиали Черного моря, показали отсутствие их экстремумов на глубинах обнаружения нижнего

пика свечения планктона. Можно предположить, что скопление биолюминесцентных обусловлено нижним пределом потребления кислорода, необходимого для их функционирования.

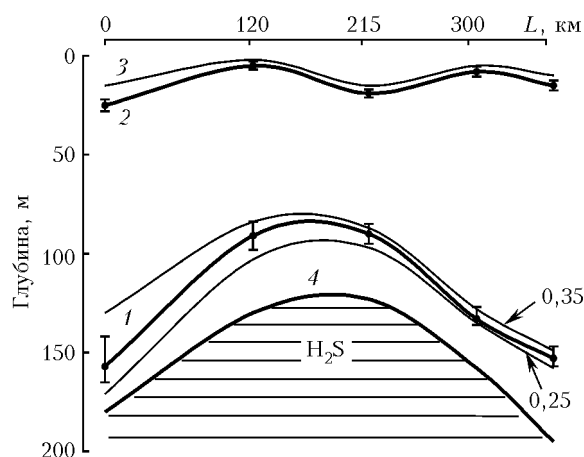


Рис. 2. Глубина обнаружения максимумов биолюминесценции на разрезе Геленджик – Синоп (восточная халистаза) в дневное время в августе 1989 г.: 1 – глубинный максимум биолюминесценции; 2 – максимум биолюминесценции в фотическом слое; 3 – верхняя граница термоклина. Цифры 0,25 и 0,35 обозначают концентрацию кислорода в мл/л соответствующих изооксиген. Граница сероводородной зоны (4) дана для концентрации 0,1 мл/л

Каждый вид гидробионтов имеет свой нижний кислородный предел. Основным фактором, ограничивающим глубину обитания черноморских организмов, является не сероводород, а дефицит кислорода в стратифицированных водах пикноклина. Сочетание этих двух гидрологических факторов служит естественной биологической границей, разделяющей систему на ярусы «аэробноса» и «хемобиоса» [10].

По критерию выделения фронтальной зоны [11] в вертикальном профиле концентрации кислорода не обнаруживается признаков фронтальности на тех глубинах, где располагается нижний максимум биолюминесценции планктона. Однако если

учесть физиологические минимальные потребности организмов в кислороде, который необходим в реакции *in vivo* для излучения квантов света, то признак фронтальной зоны можно записать следующим образом:

$$\frac{\Gamma_{ic}}{\Gamma_{ic} - \Gamma_{кр}} \geq 10, \quad (1)$$

где  $\Gamma_{ic}$  — градиент концентрации кислорода в  $i$ -м слое воды, расположенном от поверхности до глубины минимального содержания  $O_2$ ;  $\Gamma_{кр}$  — градиент на глубине максимальной биолюминесценции.

Как правило, для формирования глубинных скоплений планктона необходимым условием является пикноклинность вод, хотя это условие не обязательно для объяснения максимального обилия зоопланктона на больших глубинах морей и океанов. Известно, что мезопланктон мигрирует по вертикали на большие глубины, образуя скопления в слоях минимума кислорода [12]. Например, вблизи берегов Перу максимальное количество биомассы *Euphausia inermis* обнаруживалось на глубине около 500 м при концентрации кислорода 0,15–0,18 мл/л [13]. Каких-либо значительных по величине градиентов гидрологических параметров на этих глубинах не было обнаружено. В такой ситуации фронтальную зону, обуславливающую скопление зоопланктона, можно выделить, если применить формулу (1) для расчета градиентов в вертикальном профиле распределения кислорода. С учетом этого представляется вполне реальным объяснение положения глубинного максимума биолюминесценции планктона с позиции фронтальности, при котором учитываются физиологические особенности светящихся организмов.

Таким образом, в Черном море концентрация кислорода ниже 0,15 мл/л препятствует проявлению биолюминесценции планктона.

Известно, что соленость черноморской воды почти в два раза меньше, чем в Мировом океане, а дефицит кислорода в море создается за счет его «выведания» сероводородом. В связи с этими особенностями обнаруженная нижняя кислородная граница биолюминесценции могла быть характерна только для Черноморского планктона. Для выяснения существования такой же закономерности в океанических водах были проанализированы экспериментальные данные структуры биолюминесцентного поля в пелагиали Восточной Пацифики. Особенностью этого региона является наличие слоя глубоководного минимума кислорода, охватывающего обширные акватории. В одних частях он лежит на глубине 500–800 м, в других поднимается до 80–100 м [14]. Причем происхождение кислородного минимума вызвано гидродинамикой океанических вод, а не химическим взаимодействием с сульфидом, как это имеет место в меромиктических водоемах [15].

Распределение биолюминесценции планктона на Центрально-американском разрезе показано на рис. 3.

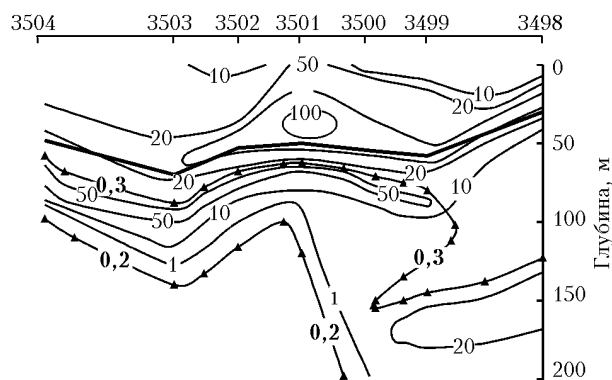


Рис. 3. Распределение интенсивности биолюминесценции на Центрально-американском разрезе. Сплошная жирная линия показывает положение галоклина. Цифры 0,2 и 0,3 обозначают изоксигены соответствующей концентрации кислорода в мл/л. По оси абсцисс проставлены номера станций пропорционально расстоянию между ними

Максимум свечения совпадал с галоклином. Особенностью поля свечения на разрезе было наличие на всех станциях глубинного максимума, который по интенсивности биолюминесценции был сравним с верхним пиком. На станции № 3499 выделялись три пика. Так же, как в Черном море, глубинный максимум свечения планктона располагался вблизи кислородного минимума и был ограничен изоксигенами 0,2 и 0,3 мл/л. Глубина обнаружения максимальной интенсивности биолюминесценции планктона совпадала с положением фронтальной зоны, рассчитанной для кислорода по формуле (1).

Следует отметить, что дефицит кислорода наблюдается в глубинных водах Индийского океана. Исследования вертикальных профилей биолюминесценции в Аравийском море показали, что свечение полностью отсутствует на глубинах 300–400 м, где концентрация кислорода составляет 0,10–0,20 мл/л [2].

Таким образом, установлено влияние концентрации кислорода на распределение интенсивности биолюминесценции по вертикали. Нижней границей свечения планктонных организмов в морских и океанических экосистемах является изоксигена 0,2 мл/л.

1. Herring P.J. Bioluminescence in action. London: Academic Press, 1978. 667 p.
2. Гительзон И.И., Левин Л.А., Утошев Р.Н., Черпанов О.А., Чугунов Ю.В. Биолюминесценция в океане. СПб.: Гидрометеоназдат, 1992. 283 с.
3. Заворуев В.В. Распределение биолюминесценции и флуоресценции планктона в связи с физико-химическими свойствами водной среды в районе Перуанского апвеллинга // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 82–86.
4. Битюков Э.П., Хлыстова Л.М. Биолюминесценция в неритической зоне Черного моря и ее связь с характеристиками планктона // Биология моря. Киев: Наук. думка, 1975. Вып. 34. С. 100–109.
5. Битюков Э.П., Рыбасов В.П., Шейда В.Г. Годовые изменения интенсивности биолюминесцентного поля в неритической зоне Черного моря // Океанология. 1967. Т. 2. № 6. С. 1089–1099.

6. Урденко В.А., Земляная Л.А., Владимирова В.Л. Региональные особенности биолюминесцентных полей в Черном море // Гидробиол. ж. 1979. Т. 14. № 2. С. 17–23.
7. Коваль Л.Г. Зоо- и некрозоопланктон Черного моря. Киев: Наук. думка, 1984. 128 с.
8. Битюков Э.П., Василенко В.И., Серикова И.М., Токарев Ю.Н. Результаты и перспективы биолюминесцентных исследований в Черном море // Экология моря. 1996. Вып. 46. С. 19–24.
9. Виноградов М.Е. Влияние сероводорода на распределение жизни в Черном море // Ж. общей биол. 1997. Т. 58. № 3. С. 43–60.
10. Виноградов М.Е. Вертикальная зональность экосистемы пелагиали Черного моря // Докл. АН СССР. 1989. Т. 306. № 3. С. 717–721.
11. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
12. Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. 2. Распределение, сезонная динамика, питание и значение. Л.: Наука, 1980. 440 с.
13. Флинт М.В., Колосова Е.Г. Мезозоопланктон прибрежных вод Перу // Экосистемы восточных пограничных течений и центральных районов Тихого океана. М.: Наука, 1990. С. 213–230.
14. Стунжас П.А., Гусарова А.Н., Маккавеев П.Н. Гидрохимическая обстановка в центральной части Тихого океана и в районе восточных приграничных течений // Экосистемы восточных пограничных течений и центральных районов Тихого океана. М.: Наука, 1990. С. 47–68.
15. Бордовский О.К., Гусарова А.Н., Налбандов Ю.Р., Стунжас П.А., Протт Л.Н. Гидрохимические условия района исследований // Фронтальные зоны юго-восточной части Тихого океана: Биология, физика, химия. М.: Наука, 1984. С. 64–76.

**V.V. Zavoruev. Low oxygen boundary in plankton bioluminescence distribution in sea water.**

Vertical structures of intensity of plankton bioluminescence and concentration of oxygen in Black sea and in Pacific ocean near the east coast of America have been analysed. The deep maximum of plankton bioluminescence was found to be between isooxygen of 0,35 and 0,20 ml/l. At the oxygen concentration in water lower than 0,10–0,15 ml/l, the plankton bioluminescence was not found.