

В.В. Заворуев

Флуоресцентные и биолюминесцентные поля в поверхностных водах Тихого океана

Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск

Поступила в редакцию 16.08.2002 г.

Исследования полей биолюминесценции и флуоресценции были выполнены в поверхностных водах Тихого океана. Одновременно регистрировалась температура воды. В 85% случаев биолюминесценция, при скачке температуры вверх, тоже возрастала, а флуоресценция – уменьшалась. Если же температура падала, то флуоресценция, наоборот, возрастала, а биолюминесценция падала. Характерно, что изменение люминесценции либо предшествовало температурному фронту, либо следовало за ним. Масштабы неоднородностей флуоресценции фитопланктона составляли 30 – 60 км, а превышение усредненной величины пиков флуоресценции над фоном было около 35%. Неоднородности поля биолюминесценции достигали 100 км и превышали фон в 10 и более раз.

Введение

Морская взвесь состоит из частиц живой и неживой природы. Живую компоненту представляют мелкие планктонные организмы. Среди них фитопланктон является наиболее массовым представителем в поверхностных водах пелагиали морей и океанов. Фотосинтезирующие организмы содержат хлорофилл, который под действием естественного или искусственного излучения флуоресцирует в красной и дальней красной части видимого спектра [1]. Между концентрацией хлорофилла и интенсивностью флуоресценции имеется пропорциональная зависимость [2]. В поверхностных водах пелагиали Тихого океана количество хлорофилла изменяется в пределах от 0,2 до > 2 мкг/л [3]. Более 90% этого пигмента приходится на диатомовые водоросли, которые не способны к самостоятельному передвижению и поэтому могут считаться взвесью. Таким образом, по измерению поля флуоресценции хлорофилла можно получить оценку масштабов неоднородностей распределения живой взвеси в Тихом океане.

Считается, что в состав морского планктона практически всегда входят организмы, способные излучать свет в зеленой части спектра [4]. Основными источниками излучения в верхних слоях морских экосистем являются динофлагелляты и радиолярии [5]. Они формируют биолюминесцентное поле в Мировом океане. Динофлагелляты и радиолярии также можно считать взвесью, поскольку они не имеют двигательного аппарата. Распределение светящейся взвеси можно оценить по интенсивности биолюминесценции [4].

При вертикальном зондировании в Черном море было показано, что одновременная регистрация биолюминесценции и флуоресценции дает более адекватное представление о распределении взвеси, чем их раздельное использование [6]. Однако для трассовых

исследований такой подход не использовался. В связи с этим целью данной работы было определение масштабов неоднородностей распределения живой взвеси в поверхностных водах Тихого океана при одновременном измерении интенсивностей полей флуоресценции и биолюминесценции на многокилометровых разрезах.

Методы исследования

В состав разработанного и используемого в 38-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев» комплекса аппаратуры входил датчик биолюминесценции, помещенный в проточную светонепроницаемую камеру. Эта камера через специальную шахту в корпусе корабля крепилась под днищем. Там же находились датчик температуры и насос, поднимающий воду в лабораторное помещение [4]. В лабораторном помещении располагались регистрирующая аппаратура и проточный флуориметр [7]. Время задержки измерения флуоресценции от момента регистрации биолюминесцентного сигнала равнялось 10 с. При 12-узловом ходе судно за это время проходило приблизительно 60 м. При измерении неоднородностей люминесцентных полей более 1 км такой погрешностью можно пренебречь.

На суточных океанических станциях, для получения дополнительной информации о люминесцентных полях, исследовали вертикальные профили флуоресценции и биолюминесценции. Интенсивность свечения планктона регистрировали зондом «Ромашка-3». Он позволяет измерять биолюминесценцию в любое время суток, так как снабжен специальными затемнителями для отсека астрономического света [4]. Кроме того, с помощью батифотометра «Ромашка-3» отбирали пробы воды с горизонтов от 0 до 200 м для измерения флуоресценции фитопланктона.

Температурные фронты выделяли по методике, описанной в работе [8].

Результаты исследования и обсуждение

Известно, что на распределение планктона влияют температурные фронты [9, 10]. Поэтому люминесцентные характеристики воды рассматривались в связи с изменением температурных градиентов. Непрерывная запись температуры, флуоресценции и биолюминесценции поверхностных вод экваториальной части Тихого океана на протяжении 6 сут движения судна показана на рис. 1. Общая тенденция изменения температуры характеризовалась уменьшением от 27,6 до 25,7 °С на 500-километровом участке, а затем постепенным повышением до 26,8 °С на последующем расстоянии более 1000 км. На фоне плавного изменения температуры отмечались довольно резкие ее перепады в среднем 0,2 – 0,3 °С на небольшом пространственном интервале. Эти изменения и есть температурные фронты поверхностных вод океана.

Интерпретация экстремумов люминесценции в районе фронтов оказалось непростой задачей. Основная трудность заключалась в суточном ритме биолюминесценции и флуоресценции, который, как известно, задается продолжительностью и интенсивностью солнечного освещения [2, 11, 12]. В темное время суток люминесценция планктона была выше, чем при солнечном освещении. В течение первых трех дней наблюдения разница между средней дневной и средней ночной биолюминесценциями составляла почти два порядка. В последующие дни эта разница сократилась до 3 – 5 раз. Интенсивность биолюминесценции на разрезе составляла $10^{-10} - 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/см². Суточные изменения интенсивности флуоресценции в светлое и темное время составляли 2 – 3 раза, что находилось в полном соответствии с данными других ав-

торов [11, 13]. Общим в люминесцентных сигналах было время начала возрастания и уменьшения интенсивности свечения, происходящих на стыке свет – темнота.

Понятно, что если температурный фронт приходился на период восхода или захода солнца, то практически невозможно было дать трактовку причине изменения люминесцентного сигнала: то ли это связано с суточной ритмикой свечения, то ли это изменение концентрации планктона. Выход из этой ситуации состоял в рассмотрении изменений флуоресценции и биолюминесценции в районе температурных фронтов, которые обнаруживали или в светлое, или в темное время суток. Изменение люминесценции в районе фронтов было неоднозначным. В 85% случаев биолюминесценция, при скачке температуры вверх, тоже возрастала, а флуоресценция уменьшалась. Если же температура падала, то флуоресценция, наоборот, возрастала, а биолюминесценция падала. Характерно, что изменение люминесценции либо предшествовало температурному фронту, либо следовало за ним.

Прямой связи между температурой и флуоресценцией не обнаружено. Ранее было показано, что в морских экосистемах флуоресценция разгорается в местах уменьшения толщины верхнего перемешанного слоя, где существует небольшой путь от источника биогенов (глубинных вод) до фотической зоны [14]. Существование экстремумов вне температурного фронта подтверждает вывод о том, что факторы, способствующие и поддерживающие гидрологические градиенты, не оказывают существенного влияния на распределение фитопланктона [11]. Популяция морского фитопланктона реагирует с задержкой на изменение окружающей среды, что было подтверждено исследованиями на Байкале [15].

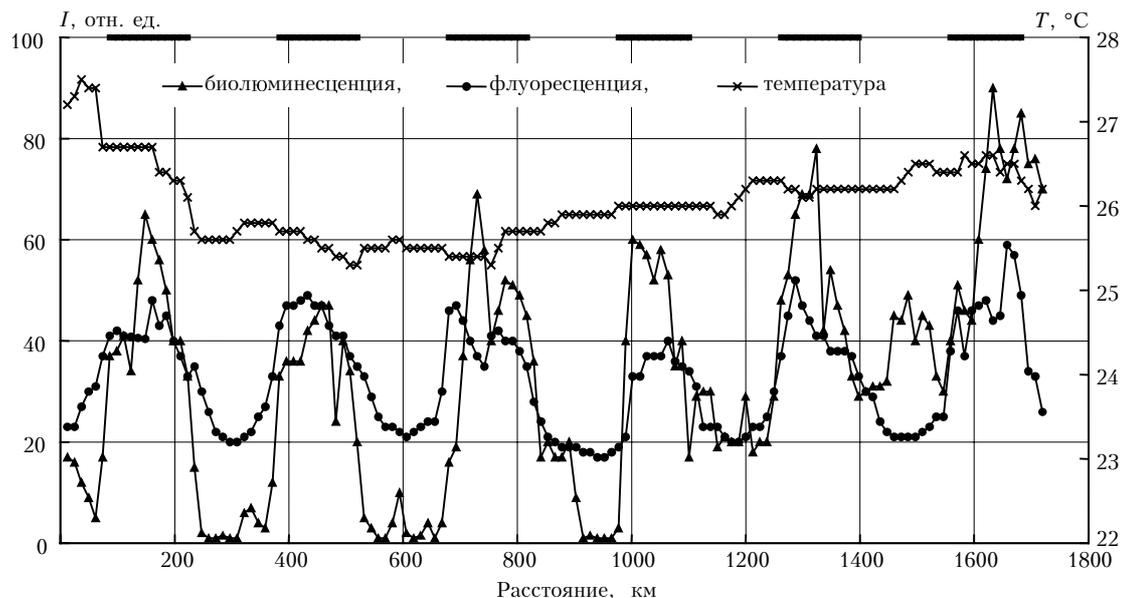


Рис. 1. Изменение биолюминесценции, флуоресценции и температуры в экваториальной части Тихого океана на разрезе между координатами 02° 10' с.ш., 111° 04' з.д. и 08° 41' ю.ш., 84° 05' з.д. Жирные отрезки сверху графика показывают темное время суток

Мезомасштабные неоднородности повышенного свечения хлорофилла фитопланктона составляли 30 – 60 км, а превышение усредненной величины пика флуоресценции над фоном – около 35%. Неоднородности поля биолюминесценции достигали 100 км и превышали фон в 10 и более раз.

Другое определение масштабов неоднородностей люминесцентных полей было выполнено на 1000-км участке по 30°-й с.ш. в центральной части Тихого океана при переходе 180-го меридиана (рис. 2).

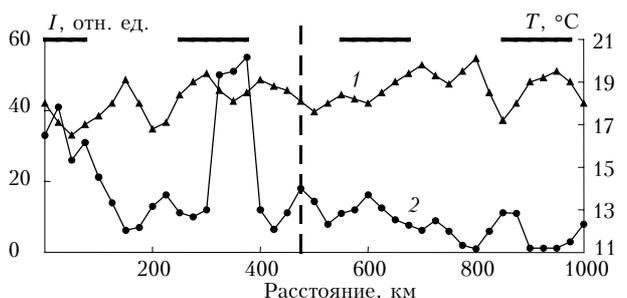


Рис. 2. Изменение температуры (1) и флуоресценции (2) в Тихом океане при переходе 180-го меридиана (на графике он обозначен вертикальным пунктиром) по 30°-й с.ш. Жирные линии сверху графика показывают темное время суток

Температурные фронты на этом разрезе были более резко выражены, чем на экваторе. Биолюминесцентный сигнал в поверхностных водах не регистрировался даже в ночное время. Причина заключалась в отсутствии светящихся организмов в верхнем слое воды. Это было подтверждено измерениями вертикальных профилей биолюминесценции в светлое и темное время суток на нескольких станциях, расположенных на 30°-й с.ш. Например, на станции с координатами 30° 04' 01" с.ш., 153° 43' 01" з.д. даже в ночное время свечение планктона начиналось с глубины 40 м (рис. 3). Максимум биолюминесценции располагался на глубине 100 м. На этом же горизонте наблюдались максимальная численность зоопланктона и концентрация хлорофилла фитопланктона. Судя по характеру вертикальных профилей биолюминесценции с их многочисленными экстремумами и учитывая численность рачков, глубинное свечение в центральной части Тихого океана было обусловлено зоопланктоном. Его скопления наблюдались в зоне термоклина. Если бы фитопланктон вносил какой-то вклад в биолюминесценцию, то в ночное время на глубинах от поверхности до 35 м регистрировалось бы свечение, так как содержание хлорофилла в этом слое воды равнялось 0,05 мкг/л, что всего в пять раз меньше его максимального содержания на 100 м. Такое заключение следует из гидробиологической ситуации, которая наблюдалась в районе Перуанского апвеллинга. Там в темное время суток в верхнем слое воды появлялась люминесценция, интенсивность которой коррелировала с концентрацией хлорофилла (рис. 4). В дневное время биолюминесценция в поверхностных водах отсутствовала вследствие фотоингибирования биохимических реакций, приводящих к излучению квантов света в зеленой части спектра [4].

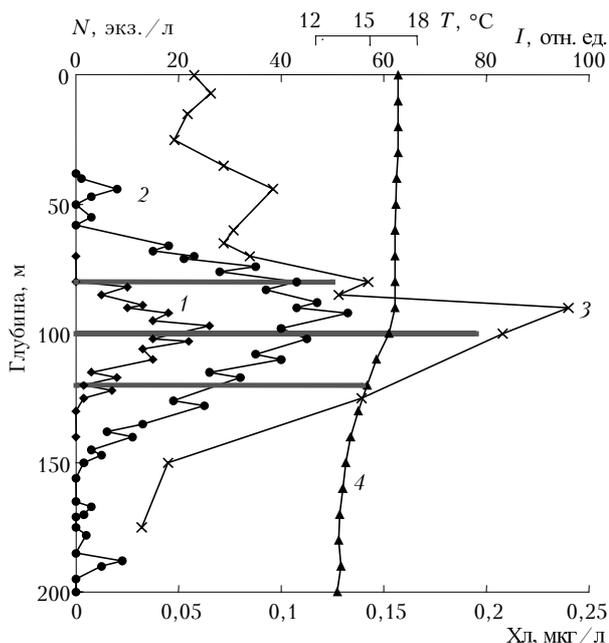


Рис. 3. Вертикальное распределение гидробиологических параметров в Тихом океане на станции № 3536 (30°04'01" с.ш., 153°43'01" з.д.) 08 апреля 1987 г.: 1 и 2 – интенсивность биолюминесценции в дневное (08 ч) и ночное (20 ч) время суток; 3 – концентрация хлорофилла; 4 – температура. Горизонтальные линии показывают численность мелкого зоопланктона

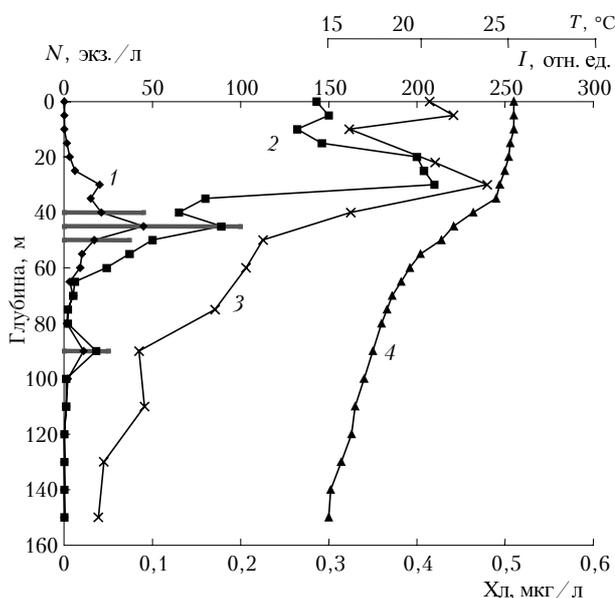


Рис. 4. Вертикальное распределение гидробиологических параметров в Тихом океане на станции № 3485 (07°58'09" ю.ш., 80°45'07" з.д.) 10 февраля 1987 г.: 1 и 2 – интенсивность биолюминесценции в дневное (08 ч) и ночное (20 ч) время суток; 3 – концентрация хлорофилла; 4 – температура. Горизонтальные линии показывают численность мелкого зоопланктона

Возвращаясь к данным, представленным на рис. 2, следует отметить, что в отличие от суточного хода флуоресценции в районе экватора интенсивность флуоресценции на 30°-й широте северной части Тихо-

го океана не подчиняется суточному ритму солнца. Более явная связь наблюдается с изменением температуры. Флуоресценция с запаздыванием от фронта возрастала при уменьшении температуры. Неоднородности были четко выражены в западном полушарии и их размеры составляли около 100 км.

Выводы

1. Изменения интенсивности биолюминесценции и флуоресценции поверхностных вод экваториальной части Тихого океана подчиняются суточному ритму. В светлое время суток средняя интенсивность биолюминесценции меньше, чем ночью, в 3–100 раз, а флуоресценции в 2–3 раза. В районе 30°-й широты северной Пацифики в апреле не наблюдалось суточного ритма флуоресценции.

2. Неоднородности полей флуоресценции достигали 60 км в экваториальной части Тихого океана и 100 км в районе 30°-й ш.ш. В экваториальной зоне интенсивность свечения планктона достигала $5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/см², а неоднородности полей биолюминесценции – 100 км. В апреле интенсивность биолюминесценции в поверхностных водах северной части центральной Пацифики была ниже порога чувствительности датчика свечения – 10^{-11} Вт/см².

1. *Lichtenthaler H.K., Rinderle U.* The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress condition in plant // CRC Critical Reviews in Annal. Chem. 1988. V. 19. P. 29–85.
2. *Lorenzen C.J.* A method for the continuous measurements of «in vivo» chlorophyll concentration // Deep-Sea Res. 1966. V. 13. Pt. I. P. 223–227.
3. *Obayashi Y., Tanoue E., Suzuki K., Handa N., Nojiri Y., Wong C.S.* Spatial and temporal variabilities of phytoplankton community structure in the northern North Pacific as determined by phytoplankton pigments // Deep-Sea Res. 2001. V. 48. Pt. I. P. 439–469.

4. *Гутельзон И.И., Левин Л.А., Утюшев Р.Н., Черепанов О.А., Чугунов Ю.В.* Биолюминесценция в океане. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 283 с.
5. *The Luminescence of Biological Systems / Johnson F.H.* Washington DC: American Association for the Advancement of Science. 1955. 452 p.
6. *Заворуев В.В.* Биолюминесценция и флуоресценция в Черном море в летний период // Материалы Третьего съезда фотобиологов России. Воронеж: ЗАО ТЭФА, 2001. С. 69–70.
7. *Анонасенко А.Д., Сидько Ф.Я., Балакчина Л.А.* Флуоресцентный метод и аппаратура для изучения пространственного распределения фитопланктона // Биол. внутр. вод. 1995. № 98. С. 53–57.
8. *Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 296 с.
9. *Laubsher R.K., Perissinoto R., McQuaid C.D.* Phytoplankton production and biomass at frontal zones in the Atlantic sector of the Southern Ocean // Polar Biology. 1993. V. 13. P. 471–481.
10. *Lohrenz S.E., Wiesenburg D.A., De Palma I.P., Johnson K.S., Gustafson D.E.* Interrelationships among primary production, chlorophyll and environmental conditions in frontal regions of the western Mediterranean Sea // Deep-Sea Res. 1988. V. 35. Pt. I. P. 793–810.
11. *Карбаашев Г.С.* Флуоресценция в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 200 с.
12. *Hastings J.W., Sweeney B.M.* A persistent diurnal rhythm of luminescence in *Gonyaulax polyedra* // Biol. Bull. 1958. V. 115. P. 440–458.
13. *Setser P.J., Guinasso N.L., Schink D.R.* Daily patterns of fluorescence in vivo in the central equatorial Pacific // J. Mar. Res. 1982. V. 40. P. 453–471.
14. *Kahru M., Aitsam A., Elken J.* Coarse-scale spatial structure of phytoplankton standing crop in relation to hydrography in the open Baltic Sea // Mar. Ecol. Progr. Ser. 1981. V. 5. P. 311–318.
15. *Левин Л.А., Заворуев В.В., Гранин Н.Г., Шимараев М.Н.* Характеристики пространственно-временной изменчивости полей температуры и флуоресценции хлорофилла деятельного слоя оз. Байкал (по материалам полигонных наблюдений в южной части Северного Байкала) // Сиб. экол. ж. 1996. № 5. С. 373–386.

V.V. Zavoruev. Fluorescent and bioluminescent fields in surface waters of the Pacific Ocean.

Bioluminescence and fluorescence fields were investigated in surface waters of the Pacific Ocean. Temperature of water was simultaneously registered. At the temperature rise, bioluminescence increased and fluorescence decreased in 85% cases. Fluorescence increased at the temperature decrease. It is significant that the change of luminescence preceded the temperature front or followed it. The scales of heterogeneities of the phytoplankton fluorescence were 30–60 km, and the average value of fluorescence peaks approximately 35% exceeded the background. The heterogeneities of the bioluminescence field achieved 100 km and ten and more times exceeded the background.