



УДК 591.524.12 (26)

**О. А. Черепанов**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., **Л. А. Левин**<sup>2</sup>, докт. биол. наук, вед. н.с.,  
**Р. Н. Утюшев**<sup>2</sup>, канд. биол. наук, н.с.

<sup>1</sup> Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

<sup>2</sup> Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

## СВЯЗЬ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ С БИОМАССОЙ И ЧИСЛЕННОСТЬЮ СВЕТЯЩЕГОСЯ И ВСЕГО ПЛАНКТОНА. 1. БАРЕНЦЕВО И НОРВЕЖСКОЕ МОРЯ

Для выявления связи между биолюминесценцией и планктоном исследована корреляция между вертикальными профилями биолюминесценции и данными 154 проб фито- и 206 проб зоопланктона. Исследованный район (Баренцево и Норвежское моря, 1984 – 1987 гг.) сильно гетерогенен по водным массам и, соответственно, по видовому составу планктонного сообщества. Видовой состав планктонного сообщества достаточно беден, что влияет на стабильность корреляционных связей. Кроме того, наблюдается ярко выраженная сезонная сукцессия планктонного сообщества. Но даже в этих неблагоприятных условиях биолюминесцентный анализ с приемлемой точностью может использоваться для оценки численности и биомассы зоопланктона в достаточно большой промежуток времени (апрель – август) и на обширной гетерогенной акватории (коэффициент корреляции биолюминесценции с биомассой зоопланктона достигает 0.61). Использование биолюминесценции для оценки характеристик фитопланктонного сообщества ограничено вследствие сезонной сукцессии, в ходе которой процент численности светящихся клеток меняется на три порядка.

**Ключевые слова:** биолюминесценция, планктон, корреляции, Баренцево море, Норвежское море

Попытки использовать биолюминесценцию для оценки биомассы и численности планктона имеют давнюю историю [1 – 3, 9 – 11]. В этих и последующих работах интенсивность биолюминесцентного поля сопоставлялась с распределением планктона, отмечалось подобие в ходе этих распределений и приводились списки видов планктона, возможно ответственных за формирование поля биолюминесценции. При этом подходе всегда возникает сомнение в полученных результатах. Параметры биолюминесцентного поля измеряются либо на фиксированных горизонтах, либо при движении прибора, что даёт непрерывное распределение биолюминесценции за коротких промежутков времени. Сетные же ловы планктона производятся послойно и характеризуют усреднённый состав планктона для слоёв дос-

точно большой протяжённости, причём ловы занимают довольно длительное время. Более того, как правило, измерения биолюминесценции и сетные ловы проводятся в разное время и поэтому даже сравнение биолюминесцентного потенциала слоя лова планктона (суммарной интенсивности свечения в слое) с численностью и биомассой планктона в этом слое не спасает положения. Дополнительную погрешность вносят и различная уловистость батифотометров и орудий лова планктона, и неточность в определении глубины или границ слоя отбора пробы. В последнее время для уменьшения этих методических погрешностей используют такие способы, как установка на сети электронных замыкателей с датчиком глубины и проведение непрерывных зондирований поля биолюминесценции в процессе лова

планктона [4]. Последнее сопряжено с риском сцепления приборов и возможно только на достаточно больших судах или при благоприятных метеорологических и гидроусловиях. Далее рассчитываются биолюминесцентные потенциалы, соответствующие слоям и моментам лова планктона, и проводится корреляционный анализ. При этой методике значительно повышается достоверность полученных результатов, уровень корреляции между биолюминесценцией и планктоном может достигать значимых значений [4]. Однако она не уменьшает погрешности из-за различной уловистости батифотометров и орудий лова. Оценка показывает, что эта погрешность для зондирующих батифотометров увеличивается с увеличением размера особей зоопланктона, так как большие размерные классы активных планктонов ими практически не улавливаются.

Накопленная к настоящему времени информация о светящемся планктоне позволяет подойти к проблеме «биолюминесценция – планктон» с другой точки зрения, позволяющей смягчить описанные выше методические трудности [8]. Проблема легко решается, если полностью известен каталог светящихся видов и все характеристики их биолюминесцентных вспышек. Тогда, используя богатство накопленного биологического материала, можно практически для любой точки Мирового океана рассчитать биолюминесцентное поле, найти связь между динамикой параметров сообщества биолюминесцентных и всего планктона. В связи с растущим объемом биологической информации о морском планктоне, преимущество этого подхода с каждым годом будет возрастать. Кроме того, развивается техника регистрации биолюминесцентного поля и возникает вопрос: «Что может нам дать знание полной информации о светящемся планктоне?» Ответ на него будет получен, если мы будем знать, в какой степени численность, биомасса, продукция, размерная и трофическая структура биолюминесцентных отражают те или иные характеристики всего планктона. Эти вопросы можно разре-

шить с помощью каталога светящихся видов. К сожалению, только для некоторых районов достоверно известен список светящихся видов, однако и это уже позволяет решить ряд задач и выяснить потенциальные возможности биолюминесцентного метода. В частности, одной из таких задач является оценка связи биолюминесценции и биомассы и численности светящегося планктона с таковыми всего планктона. Рассмотрим её и возникающие при этом методические трудности на примере материала из Баренцева и Норвежского морей.

**Материал и методы.** Районы и сезоны работ см. на рис. 1. Биолюминесценцию измеряли батифотометрическим комплексом «Ромашка-3», позволяющим производить «прицельный» отбор проб фитопланктона шестью батометрами по сигналу оператора с борта судна [4]. Иногда пробы фитопланктона отбирали из батометров Нансена стандартной гидрологической серии. Лов зоопланктона осуществляли сетью Джеди. Всего отобрано и проанализировано 154 пробы фито- и 206 проб зоопланктона. Планктонные пробы анализировали на видовой и количественный состав, биомассу рассчитывали по таблице стандартных для данного района индивидуальных весов. Обработка проб выполнена сотрудниками ПИНРО, за что авторы выражают им свою благодарность.

Для количественной оценки связи «биолюминесценция – фитопланктон» использовали батометрические пробы фитопланктона из слоя 0 – 100 м, отобранные в рейсе судна «Аякс» (76 проб). Ввиду спорадического присутствия достоверно светящихся клеток в пробах, отобранных в районе работ судна «Мензелинск», 78 проб фитопланктона этого рейса исключили из анализа. Здесь проявилось существенное различие планктонных сообществ, принадлежащих различным водным массам. Первое (район работ судна «Аякс») сформировалось в атлантических водах Гольфстрима, второе – в основных водах Баренцева моря.

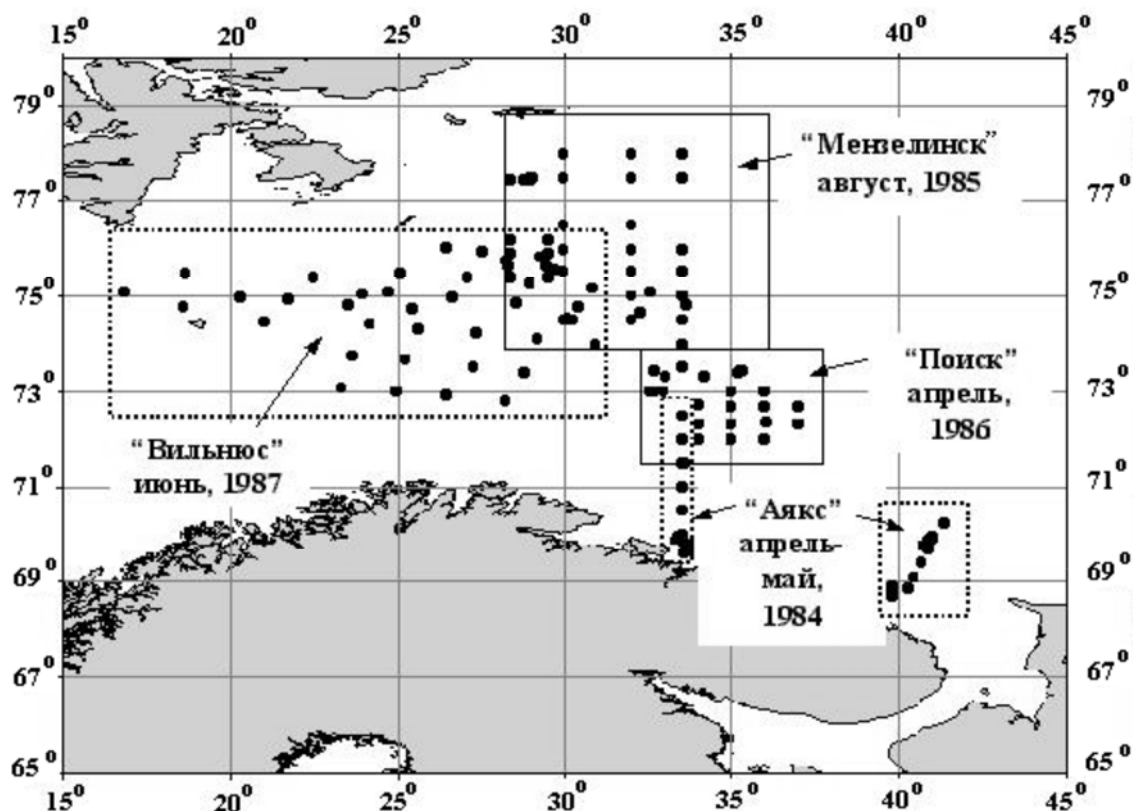


Рис. 1 Районы и сезоны экспедиций в Баренцево и Норвежское моря  
 Fig. 1 Regions and seasons of expeditions in Barents and Norwegian Seas

Связь «биолюминесценция – зоопланктон» исследована на данных сетных ловов в районах работ судов: «Аякс» – 67 проб, «Мензелинск» – 20, «Поиск» – 46 и «Вильнюс» – 73 пробы.

Для целей биолюминесцентного анализа весь планктон дифференцировался на три группы: 1 – достоверно светящиеся, 2 – сомнительно светящиеся и 3 – несветящиеся виды. Составление каталога светящихся видов проведено по литературным данным и измерениям, выполненным с помощью установки «Спираль», разработанной и изготовленной в Институте биофизики СО РАН. Установка позволяет проводить измерения интенсивности биолюминесценции и автоматизированный отлов высветившихся организмов. Работы с данной установкой проводились в 1986 г. в акватории Баренцева моря и в 1987 г. в Дальне-Зеленецкой губе. Пробы отбирались как с по-

верхности, так и с разных горизонтов планктонной сетью и батометрами.

Полученные результаты сведены в табл. 1 и 2, где виды, помеченные звездочкой, зарегистрированы на установке «Спираль», а остальные приведены по [7 – 19].

Связь между биолюминесценцией и численностью/биомассой всего планктона определяется, с одной стороны, корреляцией между биомассами/численностями светящегося и всего планктона, с другой – насколько точно биолюминесценция характеризует биомассу/численность светящегося планктона. Очевидно, что уровень корреляции между светящимся и всем планктоном характеризует потенциальную возможность биолюминесцентного анализа, так как из-за аппаратных искажений связь между биолюминесценцией и всем планктоном может быть только слабее.

Табл. 1 Список светящихся видов фитопланктона  
Table 1 List of luminous species of phytoplankton

| Достоверно светящиеся         | Сомнительно светящиеся          |
|-------------------------------|---------------------------------|
| <i>Ceratium furca</i>         | <i>Actinoigelus ehrenbergii</i> |
| <i>C. fusus</i>               | <i>Bacterosira fragilis</i>     |
| <i>C. longipes</i> *          | <i>Biddulphia aurita</i>        |
| <i>C. macroceros</i> *        | <i>Chilomonas marina</i>        |
| <i>Gonyaulax polygramma</i> * | <i>Dinophysis norvegica</i>     |
| <i>Peridinium brevipes</i> *  | <i>Distephanus speculum</i>     |
| <i>P. conicum</i>             | <i>Fragidinium oceanica</i>     |
| <i>P. grassipes</i>           | <i>F. oceanica v. circul</i>    |
| <i>P. curvipes</i>            | <i>Gymnodinium wulffii</i>      |
| <i>P. depressum</i> *         | <i>Gyrodinium wulffii</i>       |
| <i>P. granii</i> *            |                                 |
| <i>P. pallidum</i> *          |                                 |
| <i>P. pellicidum</i> *        |                                 |

Табл. 2 Список светящихся видов зоопланктона  
Table 2 List of luminous species of zooplankton

| Достоверно светящиеся            | Сомнительно светящиеся         |
|----------------------------------|--------------------------------|
| Nauplii <i>Metridia</i> *        | <i>Pseudocalanus elongatus</i> |
| <i>Metridia lucens</i> *         | <i>Microcalanus</i> spp.       |
| <i>Metridia longa</i> *          | <i>Acartia</i> spp.            |
| <i>Oithona similis</i> *         | <i>Evadne nordmanii</i>        |
| <i>O. atlantica</i> *            | <i>Fritillaria borealis</i>    |
| <i>Oncaea borealis</i> *         | <i>Sagitta elegans</i>         |
| <i>Temora longicornis</i>        | Hyperiididae juv.              |
| Nauplii Euphausiacea             | <i>Parauchaeta</i> spp.        |
| Euphausiacea spp.                | Larvae Polychaeta              |
| <i>Oikopleura labradoriensis</i> |                                |
| <i>Limacina helicina</i>         |                                |
| <i>Limacina retroversa</i>       |                                |
| <i>Conchoecia obtusata</i>       |                                |
| <i>C. elegans</i>                |                                |
| <i>Thysanoessa inermis</i>       |                                |

В общем случае количественные параметры связи светящегося планктона со всем планктонным сообществом зависят от типа водной массы, глубины, сезона работ и, при наличии мигрирующих видов, от времени суток [8]. Поэтому при анализе проводилась дифференциация экспериментального материала по этим параметрам, если его объём позволял получать статистически достоверные выводы для выделенных групп. В частности,

ввиду сильной зависимости уровня биолюминесцентного сигнала от времени суток, отдельно анализировались дневные (с 4.00 до 20.00) и ночные данные.

Регистрируемый биолюминесцентный сигнал является суперпозицией вспышек от особей различного видового состава, высветившихся в темновой камере батифотометра. Как следствие, зависимость биолюминесценции от численности светящегося планктона описывается функцией

$$I = \sum_i k_i \cdot \xi_i \cdot e_{0i} \cdot w^m \cdot N_i \quad (1)$$

где  $I$  – интенсивность биолюминесценции,  $k_i$  – коэффициент уловистости  $i$ -го вида,  $\xi_i$  – доля регистрируемой вспышки,  $e_{0i}$  – энергия свечения, приходящаяся на единицу веса особи;  $w$  – вес особи,  $m$  – показатель степени, характеризующий зависимость энергии вспышки от веса особи;  $N_i$  – численность  $i$ -го вида особей в среде. При анализе корреляционных связей биолюминесценции с численностью/биомассой светящегося планктона из параметров уравнения (1) в настоящее время реально можно учесть только влияние коэффициента уловистости и то лишь частично, задавая верхний предел веса особей, ещё улавливаемых батифотометром. Этот предельный вес можно найти из экспериментальных данных, максимизируя коэффициент корреляции между биолюминесцентным сигналом и светящимся планктоном, последовательно удаляя из выборки особей с наибольшим весом.

В [8] на данных рассматриваемого региона проанализирована потенциальная возможность биолюминесцентного метода. Используя каталог светящихся видов, рассчитывались следующие характеристики:  $K_n$ ,  $K_m$  – средние проценты светящихся особей по численности и биомассе, соответственно;  $R_n$ ,  $R_m$  – коэффициенты корреляции между численностью и биомассой светящихся организмов и общей численностью и биомассой всех особей;  $D_n$ ,  $D_m$  – средние погрешности восстановления

численности и биомассы всех особей по численности и биомассе их светящихся организмов, по следующим формулам

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n abs((Y_i - Y_i^*) / Y_i^*) * 100 \quad (2)$$

$$Y_i = Y_{bi} / K$$

где  $Y_i$  – рассчитанная численность или биомасса всех особей;  $Y_i^*$  – истинная численность или биомасса всех особей;  $Y_{bi}$  – численность или биомасса особей способных к свечению;  $K$  – процент численности или биомассы светящихся организмов;  $n$  – количество проб;  $i$  – номер пробы.

При анализе возможности оценки численности и биомассы всего планктона по биолюминесценции была дополнительно проведена ревизия результатов работы [8]. Выяснилось, что полученные оценки степени корреляционных связей и коэффициентов уравнений регрессии очень чувствительны к удалению или введению в выборку данных с высокими значениями численности/биомассы, несмотря на их относительно низкое процентное содержание во всей массе измерений. Вследствие этого прогностическая ценность уравнений при низких концентрациях планктона неудовлетворительна. Поэтому в данной работе, для увеличения вклада в регрессионные уравнения низких концентраций планктона, все данные были прологарифмированы.

За основу описания связи между логарифмами анализируемых параметров принято линейное приближение

$$\ln(y) = a + m \cdot \ln(x) \quad (3)$$

При использовании непроброзованных данных, уравнение

$$y = k \cdot x^m \quad (4)$$

является аналогом уравнения (3), где  $k = e^a$ .

Связь между уравнениями (3) и (4) является полезной при интерпретации результа-

тов корреляционного анализа логарифмированных данных. Кроме того, было принято считать корреляционную связь отсутствующей, если коэффициент корреляции  $R < 0.3$ , слабой – при  $0.3 < R < 0.5$ , средней – при  $0.5 < R < 0.7$  и сильной – при  $R > 0.7$ .

**Результаты и обсуждение.** Была обнаружена сильная корреляция биолюминесценции с общей биомассой фитопланктона и слабая – с его численностью, причём только в дневных измерениях. Очевидно, в ночных измерениях, характеризующихся увеличением интенсивности свечения клеток, переходные процессы снятия фотоингибирования перекрывают влияние изменений численности/биомассы фитопланктона. Поэтому далее анализировалась только корреляционная связь с биомассой в дневных измерениях. Результаты анализа приведены на рис. 2 – 4. Коэффициент корреляции между биомассами светящегося и всего фитопланктона значим и равен 0.82 (рис. 2), т.е. потенциальные возможности биолюминесцентного метода для оценки биомассы фитопланктона достаточно велики. Однако, ввиду средней связи между биолюминесценцией и биомассой светящегося фитопланктона ( $R=0.53$ , рис. 3), коэффициент корреляции между биолюминесценцией и биомассой всего планктона равен всего 0.45 (рис. 4).

Причина средней связи биолюминесценции с биомассой светящегося планктона выяснилась при анализе её зависимости от глубины. Оказалось, что в верхнем 15-метровом слое корреляция вообще отсутствует. Ниже, в слоях 20 – 31 м и 40 – 50 м корреляция между логарифмами биолюминесценции и общей биомассой фитопланктона равна 0.62 и 0.57, соответственно. Несмотря на близость коэффициентов корреляции, уравнения линейной регрессии различны

$$\ln(y) = 5.16 + 0.200 \ln(x) \quad \text{в слое 20 – 31 м} \quad (5)$$

$$\ln(y) = 3.65 + 0.546 \ln(x) \quad \text{в слое 40 – 50 м.}$$

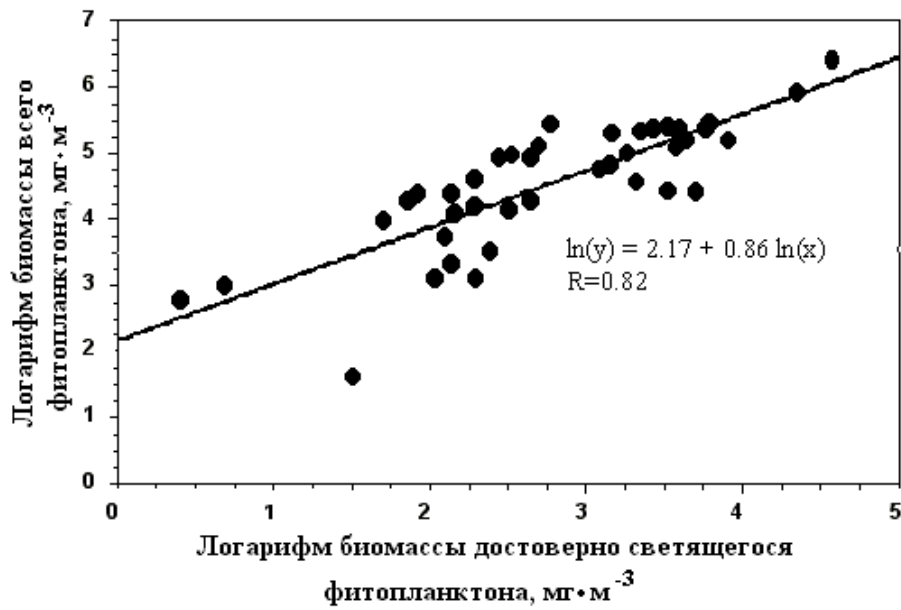


Рис. 2 Зависимость между логарифмами биомасс достоверно светящегося и всего фитопланктона («Аякс», апрель – май 1984 г., дневные измерения)  
 Fig. 2 Correlation between logarithms of biomasses of luminescent and total phytoplankton (R/V “Ayaks”, April – May 1984, day time)

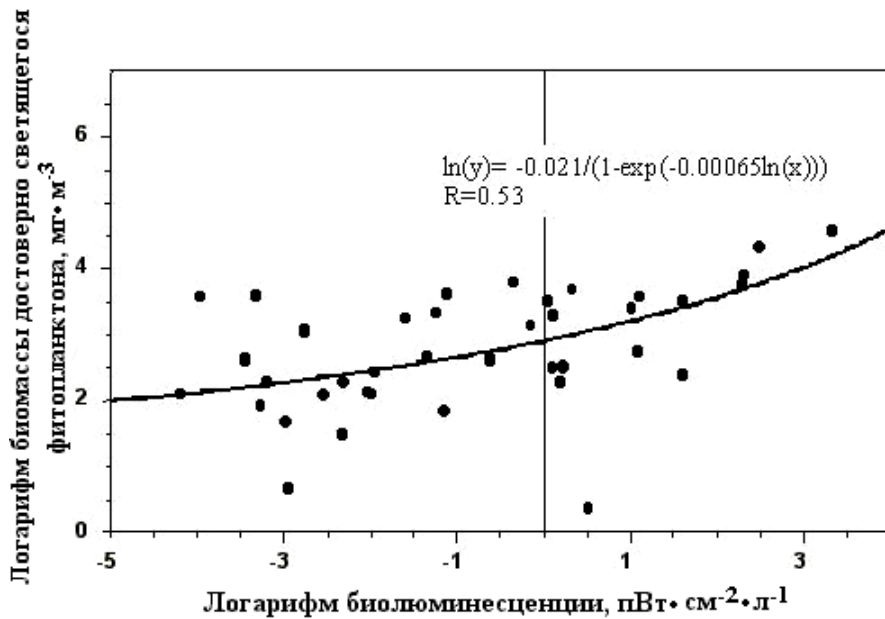


Рис. 3 Зависимость между логарифмами биолюминесценции и биомассой достоверно светящегося фитопланктона («Аякс», апрель - май 1984 г., дневные измерения)  
 Fig. 3 Correlation between logarithms of bioluminescence and biomass of truly luminescent phytoplankton (R/V “Ayaks”, April – May 1984, day time)

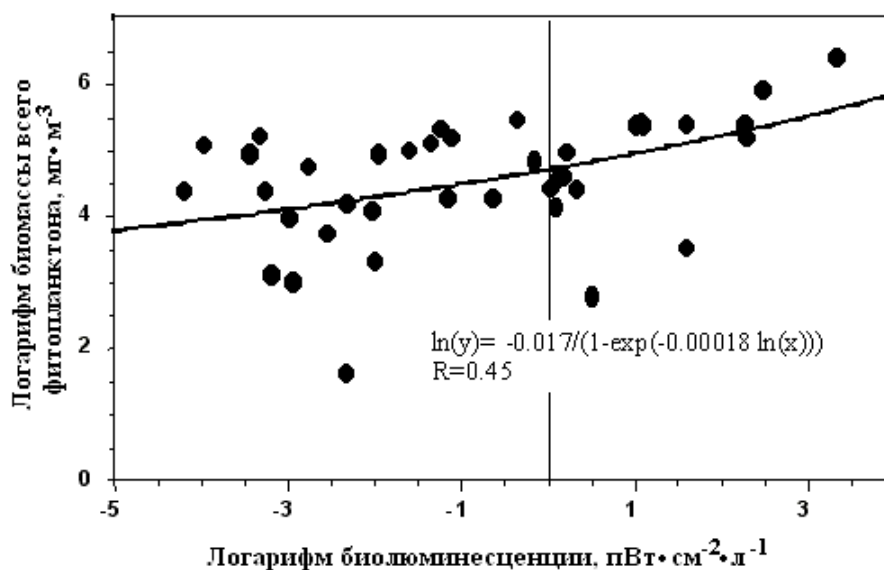


Рис. 4 Зависимость между логарифмами биолюминесценции и биомассой всего фитопланктона («Аякс», апрель - май 1984 г., дневные измерения)

Fig. 4 Correlation between logarithms of bioluminescence and biomass of total phytoplankton (R/V “Ayaks”, April – May 1984, day time)

Как следствие, коэффициент корреляции для общего слоя 20 – 50 м значительно ниже и равен 0.32, а уравнение линейной регрессии имеет вид

$$\ln(y) = 4.45 + 0.221 \ln(x) \quad (6)$$

Поскольку проанализированные слои различаются в основном уровнем подводной облучённости, то, очевидно, для повышения связи биолюминесценции с биомассой светящегося планктона необходимы регистрация подводной облучённости и коррекция биолюминесцентного сигнала в зависимости от её уровня.

По аналогичной методике проведён совместный анализ биолюминесцентных зондирований и результатов обработки проб зоопланктона.

По совокупности всех данных рейса судна «Аякс», корреляция биолюминесценции с численностью/биомассой зоопланктона отсутствует. Данные были разбиты на две группы – дневные и ночные. В этом случае обнаружена слабая корреляция с численностью всего зоопланктона в ночных измерениях. Вероятно, причина этого, как и для фитопланктона, в до-

минирующем влиянии переходных процессов суточной ритмики биолюминесценции. В дневных данных биолюминесценция коррелирует практически со всеми группами зоопланктона: светящимися, сомнительно светящимися, несветящимися и всем зоопланктоном. Сильная корреляционная связь с численностью/биомассой сомнительно светящегося и всего зоопланктона, средняя – с численностью достоверно светящегося зоопланктона и численностью/биомассой несветящегося зоопланктона. Связь биолюминесценции с биомассой достоверно светящегося зоопланктона слабая. Этот факт говорит о том, что в данном случае биолюминесцентный сигнал формируется зоопланктоном, отнесённым к достоверно и сомнительно светящимся видам, которые с коэффициентом корреляции 0.99 связаны с общей биомассой зоопланктона. Тогда, вся погрешность оценки биомассы зоопланктона определяется регистрирующей аппаратурой или алгоритмами обработки регистрируемого сигнала.

Были рассчитаны уравнения связи биолюминесценции с общей биомассой зоопланктона, как для всех дневных данных, так и для

дневных измерений дифференцированных по глубине (рис. 5). Видно, что в верхних слоях коэффициент корреляции очень высок. Значение коэффициента корреляции по всем дан-

ным, равное 0.52, является следствием различия в регрессионных уравнениях на разных горизонтах.

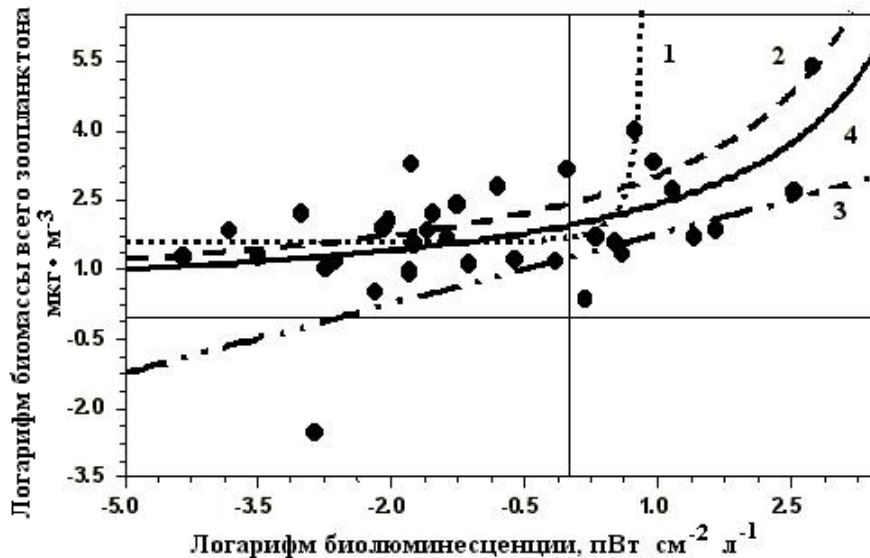


Рис. 5 Зависимость между логарифмами биоломинесценции и биомассой всего зоопланктона («Аякс», апрель – май 1984 г., дневные измерения). Логистическая модель:  $y=a/(1+b*\exp(-cx))$ . 1 – слой 0 – 20 м: логистическая модель:  $a=1.6, b=-0.049, c=-3.35, R=0.78$ ; 2 – слой 20 – 40 м, логистическая модель:  $a=-0.02, b=-1.01, c=0.00164, R=0.86$ ; 3 – слой 40 – 60 м,  $y=a+bx$ :  $a=1.25, b=0.5, R=0.63$ ; 4 – все данные, логистическая модель:  $a=-0.0157, b=-1.01, c=-0.00154, R=0.52$ .

Fig. 5 Correlation between logarithm of bioluminescence and logarithm of biomass total zooplankton (R/V “Ayaks”, April – May 1984, day time). Logistic Model:  $y=a/(1+b*\exp(-cx))$ . 1 – layer 0 – 20 m, Logistic model:  $a=1.6, b=-0.049, c=-3.35, R=0.78$ ; 2 – layer 20 – 40 m, Logistic model:  $a=-0.02, b=-1.01, c=0.00164, R=0.86$ ; 3 – layer 40 – 60 m:  $y=a+bx, a=1.25, b=0.5, R=0.63$ ; 4 – all data, Logistic model:  $a=-0.0157, b=-1.01, c=-0.00154, R=0.52$ .

По данным рейса судна «Мензелинск», точки в пространстве «биомасса зоопланктона – биоломинесценция» явно группируются в двух областях. По какому признаку – неизвестно, так как измерений зоопланктона в данном рейсе мало и статистически достоверные результаты получить невозможно. Имеется всего 10 точек совместных данных биоломинесценции и зоопланктона, а группировка может идти, как по глубине, так и по району, который занимает обширную акваторию.

При анализе данных рейса судна «Вильнюс», выполненного в гетерогенном по водным массам районе, наблюдается совершенно противоположная картина. Наиболее

тесная связь биоломинесценции с биомассой зоопланктона обнаружена в ночных измерениях, но её коэффициент корреляции равен 0,48. Кроме того, выявлена тенденция уменьшения биомассы всего зоопланктона с увеличением его численности, что говорит о смене или видового, или возрастного состава. В этом случае следует ожидать и изменения связи между всем зоопланктоном и его светящейся частью, и поэтому низкий суммарный коэффициент корреляции предсказуем.

Для выхода из этой ситуации были рассмотрена возможность коррекции биоломинесцентного сигнала, усиливающей его корреляцию с общей биомассой зоопланктона. При



этом за основу приняты следующие предположения. Во-первых, учитывая тенденцию роста амплитуды биолюминесцентных вспышек при увеличении размера (веса) организмов, из анализа биолюминесцентного сигнала можно определить размеры (вес) высветившихся особей. Во-вторых, дифференциация зоопланктонного сообщества на группы по среднему весу организмов приведёт к повышению точности оценки общей биомассы зоопланктона по биомассе светящихся организмов. Тогда, зная регрес-

сионные уравнения связи биомассы светящегося планктона с биомассой всего планктона для сообществ с различным средним весом организмов и используя их для преобразования биолюминесцентного сигнала, можно увеличить его прогностическую ценность.

Эта гипотеза была проверена на данных ночных измерений. Были получены необходимые уравнения связи биомассы светящегося и всего зоопланктона при различных средних весах особей (рис. 6).

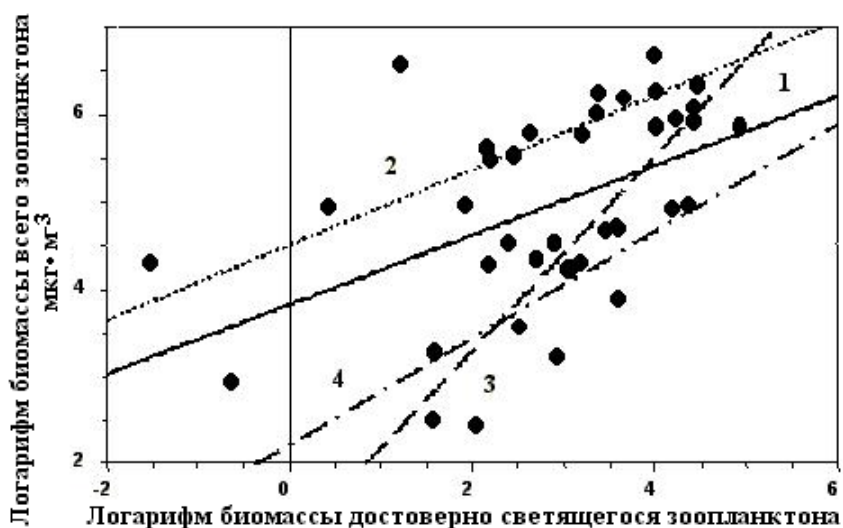


Рис. 6 Зависимость между логарифмами биомасс достоверно светящегося и всего зоопланктона в разных интервалах индивидуальных весов особей ( $w$ , мкг). Ночные измерения,  $y$  – биомасса всего,  $x$  – достоверно светящегося зоопланктона.

1 –  $0 < w < 1$ ,  $\ln(y) = 3.8 + 0.40 \ln(x)$ ,  $R = 0.48$ ; 2 –  $0 < w < 0.032$ ,  $\ln(y) = 4.5 + 0.43 \ln(x)$ ,  $R = 0.69$ ;  
 3 –  $0.032 < w < 0.41$ ,  $\ln(y) = 1.1 + 1.10 \ln(x)$ ,  $R = 0.88$ ; 4 –  $0.41 < w < 1$ ,  $\ln(y) = 2.2 + 0.60 \ln(x)$ ,  $R = 0.68$

Fig.6 Correlation between logarithms of biomasses of total and truly luminescent zooplankton in others intervals of weight of individuals ( $w$  in mkg). Night soundings,  $y$  - biomass of total zooplankton,  $x$  - biomass of truly luminescent zooplankton.

1 –  $0 < w < 1$ ,  $\ln(y) = 3.8 + 0.4 \cdot \ln(x)$ ,  $R = 0.48$ ; 2 –  $0 < w < 0.032$ ,  $\ln(y) = 4.5 + 0.43 \ln(x)$ ,  $R = 0.69$ ;  
 3 –  $0.032 < w < 0.41$ ,  $\ln(y) = 1.1 + 1.1 \ln(x)$ ,  $R = 0.88$ ; 4 –  $0.41 < w < 1$ ,  $\ln(y) = 2.2 + 0.6 \ln(x)$ ,  $R = 0.68$ .

При помощи этих уравнений были модифицированы данные ночных измерений биолюминесценции. Результат этой модификации повышает коэффициент корреляции биолюминесценции с биомассой зоопланктона с 0.48 до 0.61, что уже позволяет уверенно применять биолюминесцентный анализ для оценки биомассы всего зоопланктона.

Следует иметь в виду, что проанализированные материалы получены в районе, очень неблагоприятном с точки зрения использования биолюминесценции для экспрессной оценки параметров планктонного сообщества. Во-первых, район сильно гетерогенен по водным массам (исследования проводились в тёплых атлантических водах Гольфстрима, в холодных водах Центрального течения, в холодных водах

Медвежинского течения и основных водах Баренцева и Норвежского морей) и, соответственно, по видовому составу планктонного сообщества. Во-вторых, видовой состав планктонного сообщества достаточно беден, что влияет на стабильность корреляционных связей. В-третьих, наблюдается ярко выраженная сезонная сукцессия планктонного сообщества. Но даже в этих неблагоприятных условиях биолюминесцентный анализ с приемлемой точностью может использоваться для оценки численности и биомассы зоопланктона в достаточно большой промежуток времени (апрель – август) и на обширной гетерогенной акватории. Следует ожидать, что в субтропических и тропических районах Мирового океана потенциальные возможности биолюминесценции

будут значительно выше. Использование биолюминесценции для оценки характеристик фитопланктонного сообщества ограничено вследствие сезонной сукцессии, в ходе которой процент численности светящихся клеток меняется на три порядка. Дополнительное ограничение накладывает эффект фотоингибирования свечения фитопланктона светом. Поэтому представляется перспективным совместное использование в одном зонде двух методов – флуоресцентного, для исследования фитопланктона, и биолюминесцентного – для зоопланктона. При этом, вероятно, при совместном анализе данных двух методов появятся возможности, не присутствующие ни в одном из этих методов.

1. Битюков Э. П., Хлыстов Л. М. Биолюминесценция в неритической зоне Черного моря и ее связь с характеристиками планктона // Биол. моря. – 1975. – Вып. 34. – С. 100 - 109.
2. Гительзон И. И., Левин Л. А., Шевырнов А. П., Утюшев Р. Н., Артемкин А. С. Батифотометрическое зондирование пелагиали и возможности его применения для исследования пространственной структуры биоценоза / Виноградов М.Е. Функционирование пелагических сообществ тропических районов океана. - М.: Наука, 1971. - С. 50 - 63.
3. Гительзон И. И., Левин Л. А., Филимонов В. С. и др. Выявление пространственной структуры океанического биоценоза батифотометрическим зондированием // IV Междунар. биофиз. конгресс. - Москва, 1972. – 4. - С. 424 - 425.
4. Гительзон И. И., Левин Л. А., Утюшев Р. Н., Черепанов О. А., Чугунов Ю. В. Биолюминесценция в океане. – С.-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. - 283 с.
5. Зернова В. В. О биолюминесценции планктона в Индийском океане по материалам 35-го рейса экспедиционного судна "Витязь" // Биоэнергетика и биологическая спектрофотометрия. - М.: 1967. - С. 46 - 52.
6. Рудяков Ю. А., Воронина Н. М. Планктон и биолюминесценция в Красном море и Аденском заливе // Океанология, 1967. - 7, вып.6. - С. 1076 - 1088.
7. Филимонов В. С., Артемкин А. С. Измерение биолюминесценции в Карибском море, северной и центральной Атлантике // Биоэнергетика и биологическая спектрофотометрия. М.: 1967. - С. 40 - 46.
8. Черепанов О. А., Левин Л. А., Утюшев Р. Н., Нестерова В. Н., Павлов В. А. Оценки численности и биомассы фито- и зоопланктона по биолюминесценции в Баренцевом море // Океанология. - 1989. - 29, вып. 2. - С. 286 – 292.
9. Backus R. H., Yentsch C. S., Wing A. S. Bioluminescence in the surface waters of the sea // Nature. - 1961. – 192, No. 4802. - P. 518 - 521.
10. Breslau L. R., Edgerton H. E. Plankton bioluminescence // Oceanogr. and Mar. Biol., Annual Rev. - 1958. – 2. - P. 341 - 371.
11. Clarke G. L., Breslau G. J. Studies of luminescent flashing in Phosphorescent Bay, Puerto Rico, and in the Gulf of Naples, using portable bathyphotometer // Bull. Inst. Oceanogr. Monaco. - 1960. – No. 1171. - P. 1 - 32.
12. Clarke G. L., Conover R. J., David C. W., Nicol J. A. C. Comparative studies of luminescence of copepods and other pelagic marine animals // J. mar. biol. Ass. U.K. - 1962. – 42, No. 3. - P.541 - 564.
13. Egan W. G., Cassin J. M. Correlation of in situ fluorescence and bioluminescence with biota in New York Bight // Biol.Bull. - 1973. - 144, No. 2. - P. 262 - 275.
14. Galt C. P., Sykes P. F. Sites of bioluminescence in the appendicularians *Oikopleura dioica* and *O.*

- labradoriensis* (Urochordata: Larvacea) // Mar. Biol. - 1983. - 77, No. 2. - P. 155 - 159.
15. Herring P. J. Appendix: A classification of luminous organisms / Herring P.J. Bioluminescence in action. New York: Academic Press, 1978. - P. 461 - 476.
16. Kelly M. G., Katona S. An endogenous diurnal rhythm of bioluminescence in natural population of dinoflagellates // Biol. Bull., 1966. - 131, No. 1. - P. 115 - 126.
17. Kelly M. G. The occurrence of dinoflagellate luminescence at Wood Hole // Biol. Bull. - 1968. - 135, No. 2. - P. 279 -295.
18. Sweeney B. M. Bioluminescent dinoflagellates // Biol. Bull. - 1963. - 125, No. 1. - P. 177 - 181.
19. Tett P. B. The relation between dinoflagellates and the bioluminescence of sea water // J. mar. biol. Ass. U.K. - 1971. - 51, No. 1. - P. 183 - 206.

Поступила 22 октября 2004 г.

После доработки 28 октября 2006 г.

**Зв'язок біоломінесценції з біомасою і чисельністю світлого і всього планктону. 1. Баренцове і Норвезьке моря. О. О. Черепанов, Л. О. Левин, Р. М. Утюшев.** Для виявлення зв'язку між біоломінесценцією і планктоном проведено кореляційний аналіз між вертикальними профілями біоломінесценції і даними 154 проб фіто- та 206 проб зоопланктону. Досліджений район (Баренцове і Норвезьке моря, 1984 – 1987 році) сильно гетерогенний за водними масами і, відповідно, за видовим складом планктонного угруповання. Видовий склад планктонного угруповання досить бідний, що впливає на стабільність кореляційних зв'язків. Крім того, спостерігається яскраво виражена сезонна сукцесія планктонного угруповання. Але навіть у цих несприятливих умовах біоломінесцентний аналіз із прийнятною точністю може використовуватися для оцінки чисельності і біомаси зоопланктону в досить великий інтервал часу (квітень – серпень) і на великій гетерогенній акваторії (коефіцієнт кореляції біоломінесценції з біомасою зоопланктону досягає 0.61). Використання біоломінесценції для оцінки характеристик фітопланктонного угруповання обмежено внаслідок сезонної сукцесії, у ході якої відсоток чисельності світних клітин змінюється на три порядки.

**Ключові слова:** біоломінесценція, планктон, кореляції, Баренцове море, Норвезьке море

**Correlation of bioluminescence with biomass and number of luminous and total plankton. 1. Barents and Norwegian Seas. O. A. Cherepanov, L. A. Levin, R. N. Utyushev.** The correlation between vertical profiles of bioluminescence and data of 154 samples of phyto- and 206 samples of zooplankton has been studied. The explored region (Barents and Norwegian seas, 1984 – 1987) is strongly heterogeneous on water masses and, accordingly, on a specific composition of plankton community. The specific composition of plankton community is poor enough, which decrease stability of correlations. Besides, brightly expressed seasonal variability of plankton community was observed. However, even in these unfavorable conditions the bioluminescent analysis with acceptable precision can be used for estimation of number and biomass of zooplankton in an enough large time interval (April – August) and on an extensive heterogeneous water area (the coefficient of correlation of bioluminescence with a zooplankton biomass reaches 0.61). Use of bioluminescence for an estimation of the performances of phytoplankton community is restricted owing to the seasonal variability, during which percent of bioluminescent cells abundance varies on three orders.

**Key words:** bioluminescence, plankton, correlation, Barents Sea, Norwegian Sea