

УДК 591.148:574.52(262.5)

Бурмистрова Н.В., Жук В.Ф., Мельникова Е.Б.

ТЕРМОХАЛИННАЯ СТРУКТУРА ВОД НА ТРАВЕРСЕ БУХТЫ КРУГЛАЯ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОЛЯ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского,
г. Севастополь, АР Крим,
e-mail: BurmistrovaN@mail.ru

Ключевые слова: термохалинная структура вод, интенсивность поля биолюминесценции, градиент температуры, температурный скачок.

Исследование пространственного распределения интенсивности поля биолюминесценции, формируемого планктоном и тесно коррелирующего с его количественными показателями, широко применяется для выяснения пространственно-временной неоднородности планктонного сообщества [3, 12, 13, 14]. При этом на сезонную динамику его распределения существенное влияние оказывают гидрофизические характеристики (температура, солёность) и их вертикальное распределение в толще воды [1, 8, 15].

Наличие системы циклонических течений вдоль берегов, возникающих кратковременных местных циркуляций, обуславливающих общую динамику вод, наряду с колебаниями градиента температуры и другими факторами определяет характер вертикального перемешивания водных масс, а также и вертикальное распределение светящихся форм планктона. В условиях слабого, умеренного и даже относительно сильного вертикального перемешивания не все виды ведут себя одинаково и распределяются в водной толще в соответствии со своими биологическими и экологическими особенностями [5, 8, 9, 11].

Цель данной работы – исследование сезонных особенностей вертикального распределения интенсивности поля биолюминесценции воды и его связи с термохалинной структурой в верхнем 50-м слое на траверсе бухты Круглая.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа вертикальных профилей пространственной структуры интенсивности поля биолюминесценции были использованы сезонные данные отдела биофизической экологии за 2009 г.

Траверс бухты Круглая (рис. 1), на которой производились съёмки, представляет собой мелководную часть моря ($h = 60$ м), подверженную влиянию ряда внешних факторов – ветрового режима, волнения моря, зимнего выхолаживания и летнего прогрева, а также вертикальной стратификации слоев воды, определяющими изменчивость пространственной структуры полей температуры и солёности.



Рис. 1. Схема района исследования. ▲ – Место отбора проб.

Хорологическую структуру поля биолюминесценции исследовали методом многократного батифотометрического зондирования толщи воды, используя гидробиофизический комплекс «Сальпа-М» [3]. С помощью комплекса «Сальпа-М» измеряли интенсивность поля биолюминесценции, температуру, мутность, солёность. Измерения проводили в следующих единицах: биолюминесценция – $(\cdot 10^{-12})$ Вт·см⁻²·л⁻¹ (пВт·см⁻²·л⁻¹); температура – °С; мутность – по формазину (ЕМФ); солёность – ‰. При рассмотрении гидрологических характеристик основное внимание было уделено вертикальному градиенту температуры, так как на особенности вертикальных профилей распределения интенсивности поля биолюминесценции главным образом влияют особенности распределения именно этой характеристики.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований производилась стандартными методами. Интенсивность поля биолюминесценции исследовали в трех основных гидрологических слоях: 1) над слоем максимального градиента температуры, 2) непосредственно в слое максимального градиента температуры, 3) под слоем максимального градиента температуры.

В каждом из этих слоёв находили и измеряли наибольшее значение интенсивности поля биолюминесценции. Далее сравнивались полученные значения интенсивности между собой и находили максимальную величину. Максимальную величину

интенсивности поля биолюминесценции принимали за единицу. Затем находили относительные значения интенсивности поля биолюминесценции в остальных двух слоях, путем деления наибольшего значения в данном слое на найденное максимальное.

В процессе статистической обработки были рассчитаны также параметры интенсивности поля биолюминесценции в слое 0-50 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Биолюминесцентные Чёрного моря, формирующие поле биолюминесценции, представлены эвритермными видами, которые могут существовать при значительной разнице температуры (4 – 27⁰С). Зимой биолюминесцентные представлены и батипланктонным комплексом (холодолюбивые виды), а летом помимо эвритермных видов – эпипланктонным комплексом (теплолюбивые виды) [8, 9, 11]. Процесс термической конвекции начинается, как правило, в ноябре, с максимальным увеличением к декабрю. С декабря по январь слой гомотермии распространяется почти до дна. Одновременно происходит быстрое охлаждение толщи вод [1, 4].

В 2009 г. наиболее холодными месяцами были: январь, февраль, март, апрель. Температура воды в эти месяцы в верхнем и нижнем слоях менялась незначительно и находилась в пределах от 7,96 до 10,77⁰С. Наличие зимней вертикальной циркуляции и незначительной разницы температур по вертикали приводит к смешиванию организмов всех комплексов. Относительная однородность условий в слое зимней вертикальной циркуляции даёт возможность в темное время суток светящимся видам планктона мигрировать к самой поверхности, и их интенсивность свечения достигает пика в верхнем 10-метровом слое: в январе 4638 пВт·см⁻²·л⁻¹ при средней температуре воды 8,79⁰С, в феврале — 4707 пВт·см⁻²·л⁻¹ при средней температуре воды 8,44⁰С, в марте — 4209 пВт·см⁻²·л⁻¹ (самый холодный месяц 2009 г) при средней температуре воды 7,96⁰С, в апреле — 1887 пВт·см⁻²·л⁻¹ при средней температуре воды 10,77⁰С. Зимние штормы, частые ветра привели к размытию слоя температурного скачка (в среднем разность температур в слое термоклина составляло 0,2⁰С, а градиент температуры не превышал 0,06⁰С/м) (табл. 1).

Зимнее вертикальное распределение светящегося планктона в целом держится на траверзе бухты Круглая с декабря по апрель (рис. 2).

С наступлением весны начинается перестройка вертикальной термической структуры, прекращается конвективное перемешивание, вызванное зимним охлаждением поверхностных вод. В это время начинается образование температурного и плотностного расслоения

[2, 4, 8]. Незначительное повышение температуры (до 14⁰С) не оказывает существенного влияния на вертикальное распределение светящихся организмов планктона, хотя в отличие от зимы это распределение стало менее равномерным. Количество светящихся видов планктона в верхнем 10-м слое повысилось за счет эпипланктонных форм и интенсивность свечения в мае составила – 3659 пВт·см⁻²·л⁻¹ (t = 14⁰С). С увеличением глубины происходит постепенное понижение численности светящегося планктона и на глубине 30-50 м интенсивность свечения уменьшилась в 5 раз, и составила – 737 пВт·см⁻²·л⁻¹ (t = 10,6⁰С). В мае, в результате начинающегося прогрева верхних слоев, на глубине 22 – 27 м намечается температурный скачок, его ширина – 5 м. Изменение температуры в скачке незначительное от 13,57 до 11,61⁰С. Градиент температуры в скачке также незначительный – 0,4⁰С/м и он не препятствует светящимся организмам в темное время суток мигрировать в верхний 10-м слой, где интенсивность его свечения достигает максимума (рис. 3).

Таблица 1. Сезонные изменения гидрофизических характеристик и интенсивности поля биолюминесценции на траверзе бухты Круглая

Месяц	Глубина температурного скачка (м)	Изменение температуры Δt ⁰	Градиент температурного скачка (°С/м)	Уровень пика интенсивности поля биолюминесценции					
				выше температурного скачка		в температурном скачке		ниже температурного скачка	
				пВт·см ⁻² ·л ⁻¹	Отн. знач.	пВт·см ⁻² ·л ⁻¹	Отн. знач.	пВт·см ⁻² ·л ⁻¹	Отн. знач.
Январь	37 – 45	0,3	0,04	4638*	1	1104	0,24	428	0,10
Февраль	34 – 42	0,2	0,03	4707*	1	2245	0,47	637	0,14
Март	38 – 45	0,1	0,015	4209*	1	1753	0,42	773	0,18
Апрель	32 – 39	0,42	0,06	1887*	1	859	0,44	824	0,43
Май	22 – 27	1,96	0,40	3659*	1	1075	0,29	737	0,20
Июнь	28 – 36	10,3	1,30	1420*	1	1310	0,92	516	0,36
Июль	18 – 28	9,3	1,55	663	0,21	1137	0,37	3041*	1
Август	18 – 26	8,63	1,08	444	0,1	1318	0,17	7864*	1
Сентябрь	28 – 37	7,67	0,85	9150	0,7	12642*	1	2046	0,16
Октябрь	50 – 59	7,3	0,81	2182*	1	2161	0,99	нет	нет
Ноябрь	25 – 27	0,85	0,43	1930	1	294	0,15	379	0,20

* - Максимальное значение принятое за единицу.

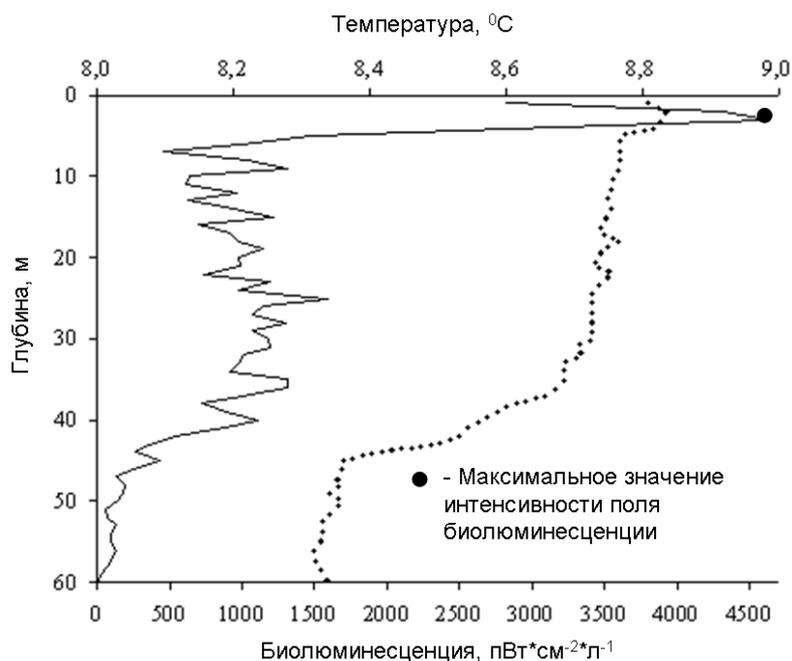


Рис. 2. Вертикальные профили температуры и интенсивности поля биолюминесценции в январе 2009 г.

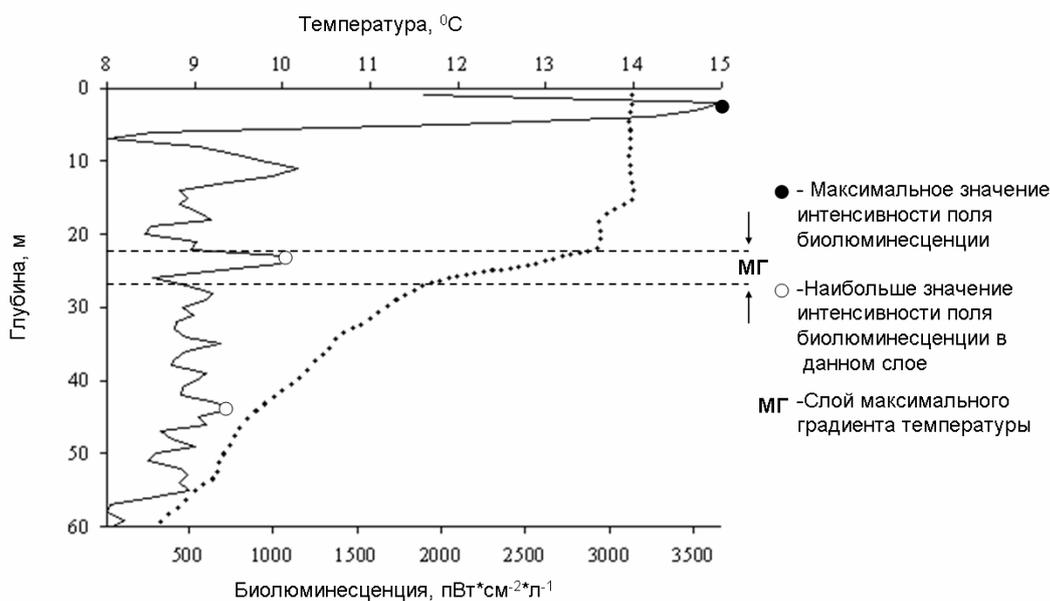


Рис. 3. Вертикальные профили температуры и интенсивности поля биолюминесценции в мае 2009 г.

Летом, благодаря хорошо выраженной стратификации водных масс, разделение эпипланктонного и батипланктонного комплексов наиболее полное [9, 11]. Основная масса всех светящихся теплолюбивых организмов и некоторых эвритермальных видов во все часы суток обитают в верхнем слое (0-10 м) при температуре 20-24⁰С. При очень сильном прогреве поверхностного слоя (для некоторых

видов оптимальная температура близка к 15-20⁰С) светящиеся организмы уходят в ниже лежащие области с оптимальной для них температурой, расположенной в зоне температурного скачка [8, 9, 11]. В июне начинает формироваться верхний квазиоднородный слой (ВКС) и в процессе его развития температурные неоднородности сглаживаются [1,15]. В июне, когда температура в верхнем 10-м слое составила в среднем 23,1⁰С, температурный скачок опустился до глубины 28 м, его ширина колебалась от 7 до 9 метров и градиент температуры достиг величины 1,2⁰С/м. Этот градиент температуры не являлся непроходимой преградой для планктона и интенсивность свечения организмов составила в верхнем 10-м слое и в слое температурного скачка на глубине 29 м была практически одинаковой. В верхнем слое интенсивность поля билюминесценции составила – 1420 пВт·см⁻²·л⁻¹, в слое температурного скачка на глубине 29 м – 1310 пВт·см⁻²·л⁻¹ (t = 15,7⁰С). Под температурным скачком на глубине 38 м – интенсивность поля билюминесценции была в 2,75 раза ниже (516 пВт·см⁻²·л⁻¹ при t = 10,3⁰С), чем в приповерхностном слое (рис. 4).

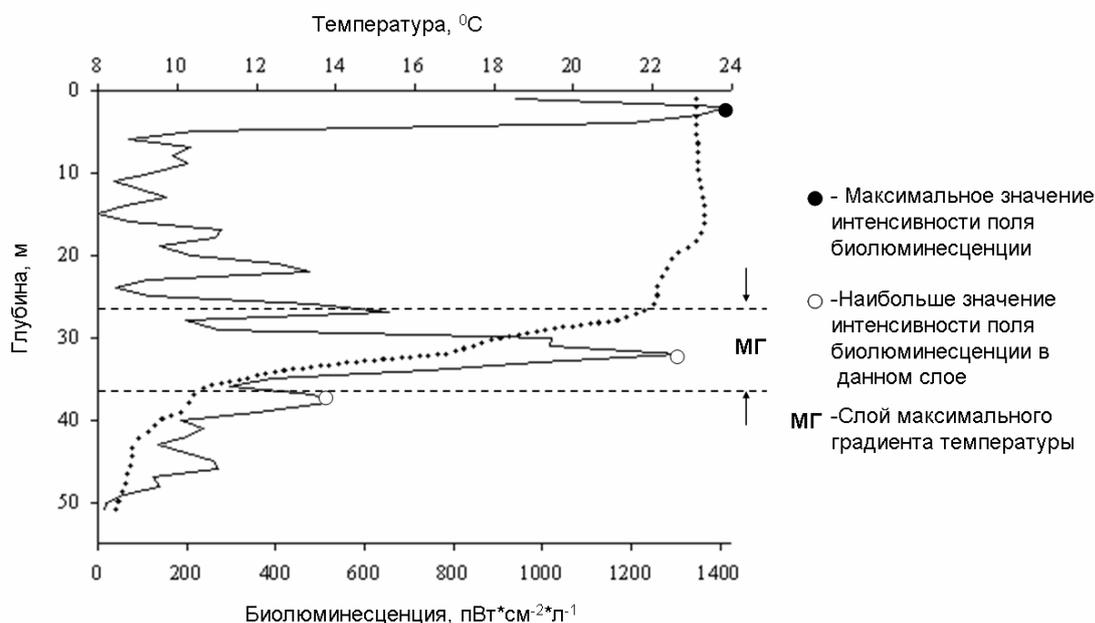


Рис. 4. Вертикальные профили температуры и интенсивности поля билюминесценции в июне 2009 г.

В июле-августе, продолжается прогрев верхних слоев и пик интенсивности свечения смещается под слой термоклина. Здесь интенсивность свечения холодолюбивых видов выше, чем эпипланктонных форм в верхнем хорошо прогретом слое [5, 8, 9]. В июле-августе наблюдается один пик интенсивности поля

биолюминесценции расположенный ниже слоя температурного скачка. В июле его значение составило $3041 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$ на глубине 40 м ($t = 9,7^{\circ}\text{C}$), в августе – $7864 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$ на глубине 31 м ($t = 11,69^{\circ}\text{C}$). В приповерхностном слое и слое температурного скачка интенсивность поля биолюминесценции в 3-10 раз ниже, чем в слоях расположенных под термоклином. В эти месяцы сезонный термоклин располагается ближе к поверхности ($h = 18 \text{ м}$), сильно растянут по вертикали, его ширина составляет от 8 до 10 м. Изменение температуры внутри этого слоя от 6 до 9°C , градиент температуры в термоклине достиг величины ($1,55\text{-}1,57^{\circ}\text{C}/\text{м}$). Высокая разница температур в слое термоклина явилась непроходимой преградой для большинства светящихся организмов обоих комплексов (рис. 5).

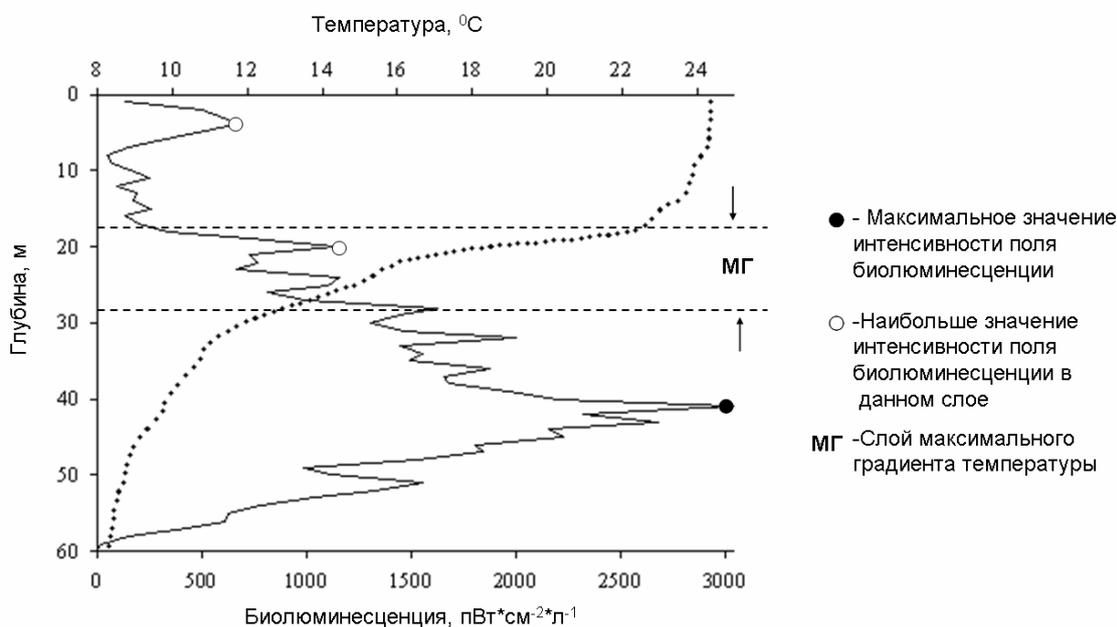


Рис. 5. Вертикальные профили температуры и интенсивности поля биолюминесценции в июле 2009 г.

Исследование сезонной зависимости градиента температуры в термоклине показывает, что в мелководных структурах, таких как бухта Круглая, прогрев в верхних и придонных слоях идет с небольшим сдвигом во времени. Это приводит к тому, что градиент температуры в термоклине постепенно увеличивается от зимних месяцев к летним и достигает наибольшего значения в июле, когда поверхностный слой максимально прогрет. Градиент температуры в слое температурного скачка в июле достигает $1,55^{\circ}\text{C}/\text{м}$. С началом выхолаживания поверхностного слоя воды температурный градиент уменьшается, и в октябре стратификация становится неустойчивой. В

ноябре градиент температуры составляет уже $0,43^{\circ}\text{C}/\text{м}$ и в последующие зимние месяцы еще больше уменьшается (рис. 6).

Интенсивное развитие большинства видов светящегося планктона происходит обычно в конце сентября. В период вегетации в поверхностном слое воды увеличивается содержание кислорода за счет интенсификации фотосинтетических процессов, увеличивается количество биогенов за счет сбрасывание сточных вод, все это приводит к бурному росту светящегося фитопланктона [4, 6, 10]. Сильный прогрев верхнего слоя и период безветрия и отсутствие штормов приводят к повышению вертикальной устойчивости вод – стагнации [4, 7, 8]. Более прохладная, а значит и более плотная вода, в слое термоклина служит благоприятным условием для размножения. Таким образом, образуются скопления светящихся организмов в зоне температурного скачка. Максимальное значение интенсивности поля биолюминесценции наблюдается в сентябре в слое термоклина – $12642 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$ на глубине 32 м, при температуре $17,8^{\circ}\text{C}$. Второй пик (несколько меньший по величине $9150 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$) в приповерхностном слое, при температуре $21,8^{\circ}\text{C}$.

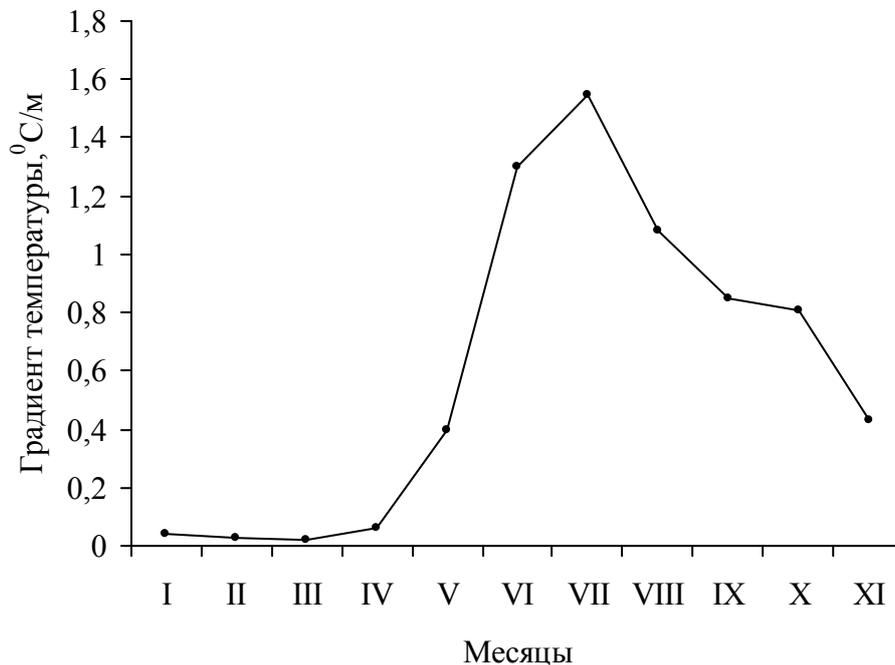


Рис. 6. Сезонный ход вертикальных градиентов температуры ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$) в слое термоклина на траверзе бухты Круглая.

В начале осени на траверсе бухта Круглая еще сохраняется теплая устойчивая погода со слабыми ветрами и небольшим волнением. Постепенное, но незначительное охлаждение поверхностных слоев не меняет общей картины летнего

распределения светящихся видов планктона, однако температурный скачок уже фиксируется на глубине 28 м, он несколько размыт и планктонные комплексы могут легче смешиваться. В сентябре градиент температуры – $0,85^{\circ}\text{C}/\text{м}$ (рис. 7).

В октябре также еще наблюдается температурный скачок, но градиент температуры в нём ниже чем в сентябре – $0,81^{\circ}\text{C}/\text{м}$. В ноябре устанавливается слабая неустойчивая вертикальная температурная стратификация, которая легко разрушается ветро-волновым перемешиванием, а после достижения дна вертикальной зимней конвекции она сменяется гомотермией [8]. В ноябре происходит еще большее размывание слоя скачка (градиент температуры – $0,43^{\circ}\text{C}/\text{м}$), что ведет к полному смешиванию зон обитания светящихся планктонных комплексов.

В ноябре в ночное время суток светящиеся организмы мигрируют в верхние слои и достаточно высокий уровень интенсивности поля биолюминесценции – $1930 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$ расположен на глубинах от 1 до 25 м. На глубинах 30-40 м уровень интенсивности поля биолюминесценции – $379 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$ уменьшается по сравнению с поверхностным слоем в среднем 5 – 6 раз. На глубинах более 40 м интенсивности свечения организмов практически отсутствует.

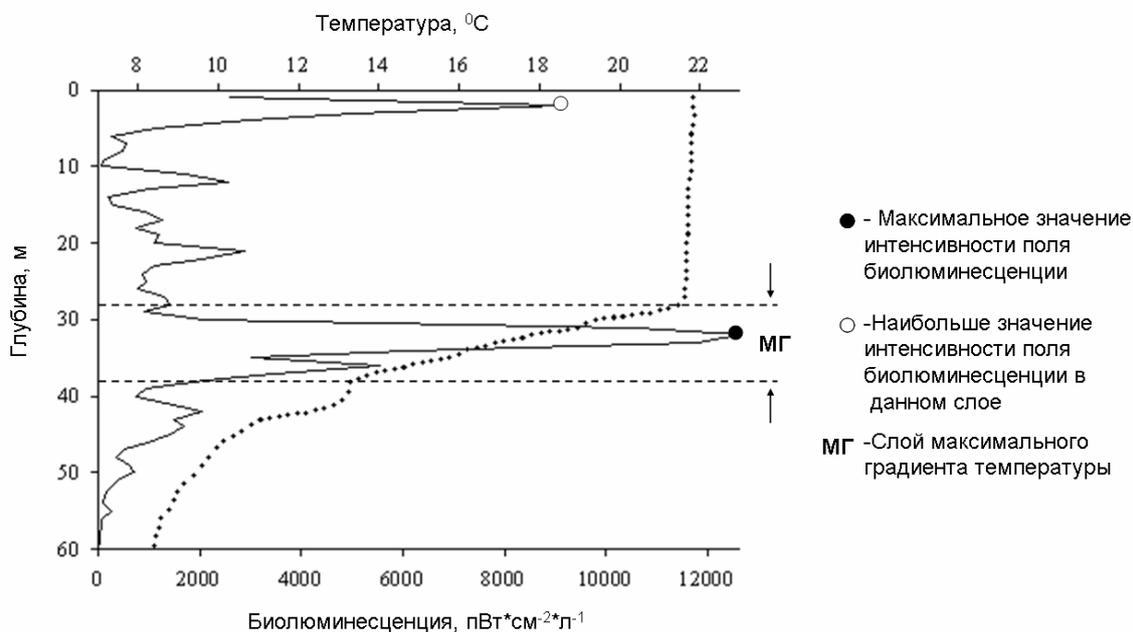


Рис. 7. Вертикальные профили температуры и интенсивности поля биолюминесценции в сентябре 2009 г.

ВЫВОДЫ

1. Интенсивность поля биолюминесценции подвержена сезонным изменениям.

2. В вертикальном профиле интенсивности поля биолюминесценции наблюдается один или два пика. Первый пик располагается (кроме июля и августа) в приповерхностном слое на глубине 3-5 м. Наибольшие значения интенсивности поля биолюминесценции в этом слое (более $4000 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$) наблюдаются в январе-марте.

3. Величина и расположение второго пика биолюминесценции (на глубинах более 10 м) зависит от термохалинной структуры вод и в значительной степени определяется градиентом температуры в слое температурного скачка. Слой скачка, в котором происходит изменение температуры более чем на $6 - 9^{\circ}\text{C}$, является практически непроходимой преградой для большинства светящихся организмов.

4. Чем больше градиент температуры, тем более существенной преградой служит он для светящихся форм планктона. Наибольшее значение интенсивности поля биолюминесценции (более $12000 \text{ пВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$) наблюдалось в сентябре на глубине 30 – 35 м.

5. Зная температуру воды и тенденцию ее изменения можно оценить когда и на каких глубинах будет располагаться пик интенсивности поля биолюминесценции.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность д.б.н. Ю.Н. Токареву за постоянное внимание, помощь и ценные замечания, высказанные в процессе обсуждения работы, а также сотрудникам отдела биофизической экологии за содействие в обеспечении проведенных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блатов А.С., Булгаков Н.Г., Иванов В.А. и др. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 240 с.
2. Бурмистрова Н.В., Машукова О.В. Сезонная динамика поля биолюминесценции в Чёрном море // Тезисы V Международной научно-практической конференции молодых ученых по проблемам водных экосистем “Pontus Euxinus – 2007” (24 – 27 сентября 2007 г.). – Севастополь: ЭКОСИ – Гидрофизика, 2007. – С. 14–15.
3. Бурмистрова Н.В., Токарев Ю.Н., Василенко В.И., Жук В.Ф. Современные проблемы морской инженерной экологии (изыскания, ОВОС, социально-экономические аспекты) // Материалы международной научной конференции (г. Ростов-на-Дону, 9–11 июня 2008 г.) / Отв. ред. Г.Г. Матишов. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2008. – С. 59–62.

4. Васечкина Е.Ф., Ярин В.Д. Объектно-ориентированная модель функционирования планктонного сообщества шельфа // Морск. гидрофиз. журн. – 2004. – № 6. – С. 43–61.
5. Грезе В.Н. Основы биологической продуктивности Черного моря. – К.: Наук. думка, 1979. – 390 с.
6. Добржанская М.А. Содержание и распределение органического вещества в Черном море (по данным окисляемости) // Тр. Севаст. биол. ст. – 1963. – Т. XVI. – С. 472–487.
7. Кондратьев С.И. Особенности вертикального распределения элементов главного биогенного цикла в водах северо-западного шельфа Черного моря // Мор. гидрофиз. журн. – 2009. – № 2. – С. 37–51.
8. Кондратьева Т.М. Суточные изменения фитопланктона в Чёрном море // Тр. Севаст. биол. ст. – 1963. – Т. XVI. – С. 53–71.
9. Петипа Т.С., Сажина, Л.И., Делало Е.П. Вертикальное распределение зоопланктона в Черном море. // Тр. Севаст. биол. ст. – 1963. – Т. XVI. – С. 119–138.
10. Полищук Л.Н., Коцегой Т.П., Трофанчук Г.М. Размер и масса тела *Noctiluca miliaris* Sur. в различных участках Черного моря // Гидробиол. журн. – 1981. – Т. 17, № 5. – С. 26–31.
11. Сажина Л.И., Делало Е.П. Распределение и количественное развитие зоопланктона в Черном море // Биологические исследования Черного моря и его промысловых ресурсов. – М.: Наука, 1968. – С. 55–59.
12. Токарев Ю.Н. Основы биофизической экологии гидробионтов. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 342 с.
13. Токарев Ю.Н., Битюков Э.П., Василенко В.И. и др. Видовое разнообразие планктонных биолюминесцентных в Чёрном море и характеристики формируемого ими поля биолюминесценции в неритической зоне Крыма / В кн: Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (черноморский сектор) / Ред. В.Н. Еремеев, А.В. Гаевская. – Севастополь: ЭКОСИ МГИ НАН Украины. – 2003. – С. 121–151.
14. Токарев Ю.Н., Битюков Э.П., Василенко В.И., Соколов Б.Г. Поле биолюминесценции – характерный показатель структуры планктонного сообщества Черного моря // Экология моря. – 2000. – № 53 – С. 20–25.
15. Троценко О.А., Еремин И.Ю., Субботин А.А. и др. Термохалинная структура вод на взморье Севастополя и ее влияние на основные параметры продукции на мидийной ферме // Экологическая безопасность шельфовой зоны и комплексное использование ресурсов шельфа: сб. науч. тр. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – Вып. 15. – С. 110–119.

Бурмістрова Н.В., Жук В.Ф., Мельнікова О.Б.

ТЕРМОХАЛІННА СТРУКТУРА ВОД НА ТРАВЕРСІ БУХТИ КРУГЛОЇ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ПОЛЯ БІОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ

Ключові слова: термохалинная структура вод, интенсивность поля биолюминесценции, градиент температуры, температурный стрибок

У результаті проведеного аналізу вертикального профілю інтенсивності поля біолюмінесценції і знайдено його зв'язок з термохалінною структурою вод. Залежно від сезону у вертикальному профілі інтенсивності поля біолюмінесценції

спостерігається один або два піки. Перший пік розташовується, крім липня і серпня, в приповерхневому шарі на глибині 1-3 м. Розташування і величина інтенсивності другого піку біоломінесценції значною мірою обумовлюються градієнтом температури в шарі температурного стрибка.

Burmistrova N.V., Zhuk V.F., Melnikova E.B.

THERMOHALINE WATER STRUCTURE OPPOSITE KRUGLAYA BAY AND ITS INFLUENCE ON BIOLUMINESCENCE FIELD INTENSITY

Keywords: *thermohaline water structure, bioluminescence field intensity, temperature gradient, temperature jump.*

The study analyzes the vertical profile of bioluminescence field intensity and establishes its relationship with water thermohaline structure. The authors observe one or two peaks in the vertical profile of bioluminescence field intensity depending on the season. The first peak is registered (except July and August) in the near-surface layer at a depth of 1-3 m. The location and intensity of the second bioluminescence peak are largely determined by a temperature gradient in the layer of the temperature jump.