

УДК 57.087:591.148(269.4)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В АНТАРКТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

© 2023 г. Л. А. Мельник, А. В. Мельник, О. В. Машукова, В. В. Мельников

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

Севастополь, Российская Федерация

E-mail: [melniklidi@gmail.com](mailto:melniklidi@gmail.com)

Поступила в редакцию 16.02.2021; после доработки 17.06.2021;  
принята к публикации 04.08.2023; опубликована онлайн 01.12.2023.

Биолюминесценция — существенный элемент функционирования пелагического сообщества, что связано с важнейшей экологической ролью света в жизни гидробионтов, в том числе в формировании их пространственной неоднородности. Свечение морских гидробионтов — это проявление их жизнедеятельности в форме электромагнитного излучения в видимой области спектра, кинетические закономерности которого тесно связаны с механизмом порождающих их химических реакций и процессов метаболизма. Глобальное потепление, охватившее и Атлантический сектор Антарктики, вызвало серьёзные структурно-функциональные изменения пелагического сообщества, которые отражаются на морской биолюминесценции — экспрессивном показателе состояния среды. Целью работы было изучить возможность применения метода многократного вертикального зондирования гидробиофизическим комплексом «Сальпа-М» с одновременной фиксацией биофизических и гидрологических параметров на одной станции для исследования структуры и протяжённости полей свечения антарктических вод. В статье представлены метод изучения структурных характеристик биолюминесценции и материалы, полученные во время 79-й антарктической экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш». Суть метода зондирования состоит в подъёме (или опускании) батифотометра «Сальпа-М» с постоянной скоростью в заданном слое [обычно это верхний продуктивный (0–200 м) или фотический (0–100 м) слой] в дрейфе судна. Планктонные биолюминесцентные организмы, вносящие основной вклад в формирование биолюминесцентного потенциала пелагиали, высвечиваются, как правило, только при раздражении. Именно поэтому движущийся с постоянной скоростью батифотометр создаёт стандартный уровень их механического раздражения, что позволяет корректно сравнивать результаты измерений вертикальной структуры поля биолюминесценции, выполняемых в разных регионах и при различных погодных условиях (качка, ветровой снос и т. д.). В работе представлен набор данных об интегральном биолюминесцентном сигнале на разных горизонтах. На 18 гидрографических станциях в исследуемой акватории Атлантического сектора Антарктики были получены первичные данные интенсивности биолюминесценции, значений температуры, электропроводности и фотосинтетически активной радиации. В статье рассмотрен важный вопрос, который связан с изменением биолюминесценции морской воды в Атлантическом секторе Антарктики, изученной методом вертикального зондирования на разных уровнях с помощью биолюминесцентного зонда. При исследовании биолюминесценции выполняли определения вертикальной изменчивости свечения в верхнем продуктивном слое в связи с особенностями распределения планктона. В результате было установлено, что свечение антарктических вод в фотическом слое этого района происходит в пределах от  $8,4 \times 10^{-12}$  до  $104,42 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>. Пики биолюминесценции (до  $104 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>) фиксировали под термоклином на глубине 45 м в зонах концентрации сальпы *Salpa thompsoni* Foxton, 1961

вблизи гидрологического фронта, на расстоянии около 6–7 миль по обе стороны от него. Показано, что метод вертикального зондирования в антарктических водах даёт возможность экспресс-регистрации полей и структуры скопления светящихся организмов.

**Ключевые слова:** интенсивность биолюминесценции, Атлантический сектор Антарктики, фотический слой, вертикальное зондирование, планктон

Важнейшим объектом промысла в Антарктике является криль *Euphausia superba* Dana, 1852, который составляет основу пищевого рациона многочисленных консументов. Его запасы в акватории Южного океана исчисляются сотнями миллионов тонн [Самышев, 1991]. Этот вид наиболее распространён в циркумполярном поясе между Антарктидой и полярным фронтом [Nicol, Foster, 2016; Nicol et al., 2000]. Оценка состояния сообществ криля — одно из приоритетных направлений исследований в Атлантическом секторе Антарктики [Спиридонов, Урюпова, 2009; Sprong, Schalk, 1992].

Скопления криля светятся за счёт биолюминесцентных фотофор, которые расположены на теле каждого рачка: одна пара — на стебельках глаз, другая — на бёдрах второго и седьмого торакопод, отдельные органы — на четырёх сегментах плеона. Эти органы периодически излучают свет в течение двух-трёх секунд. Такое хорошо видимое в темноте свечение живых организмов называется биолюминесценцией. Это электромагнитное излучение в видимой области спектра, кинетические закономерности которого тесно связаны с механизмом порождающих их химических реакций и процессов метаболизма [Harvey, 1957]. Известно множество светящихся гидробионтов: динофитовые водоросли, радиолярии, а также подвижные многоклеточные животные разных типов — от полипов, медуз и гребневиков до кальмаров, ракообразных и рыб [Лабас, Гордеева, 2003]. Исследованиями специалистов ФИЦ ИнБЮМ способность к свечению обнаружена у 364 видов фито- и зоопланктона, среди которых 164 оказались биолюминесцентами, причём у 137 видов светоизлучение было показано впервые [Токарев, 2006]. Светятся и бактерии, которые найдены в морских водах на разных широтах — от тропических до полярных. В открытом океане на 1 л морской воды в среднем приходится до 1000 клеток светящихся бактерий [Гительзон, 1976].

Биолюминесценция зоопланктона в энергетическом плане заведомо выше таковой у растительного планктона или бактерий. Наибольшей интенсивностью и продолжительностью свечения (до 22 с) характеризуются различные виды криля [Токарев, Соколов, 2001].

Метод вертикального зондирования для определения уровня биолюминесценции может быть использован для экспресс-оценки видового разнообразия и пространственного распределения биолюминесцентных гидробионтов анализируемой акватории.

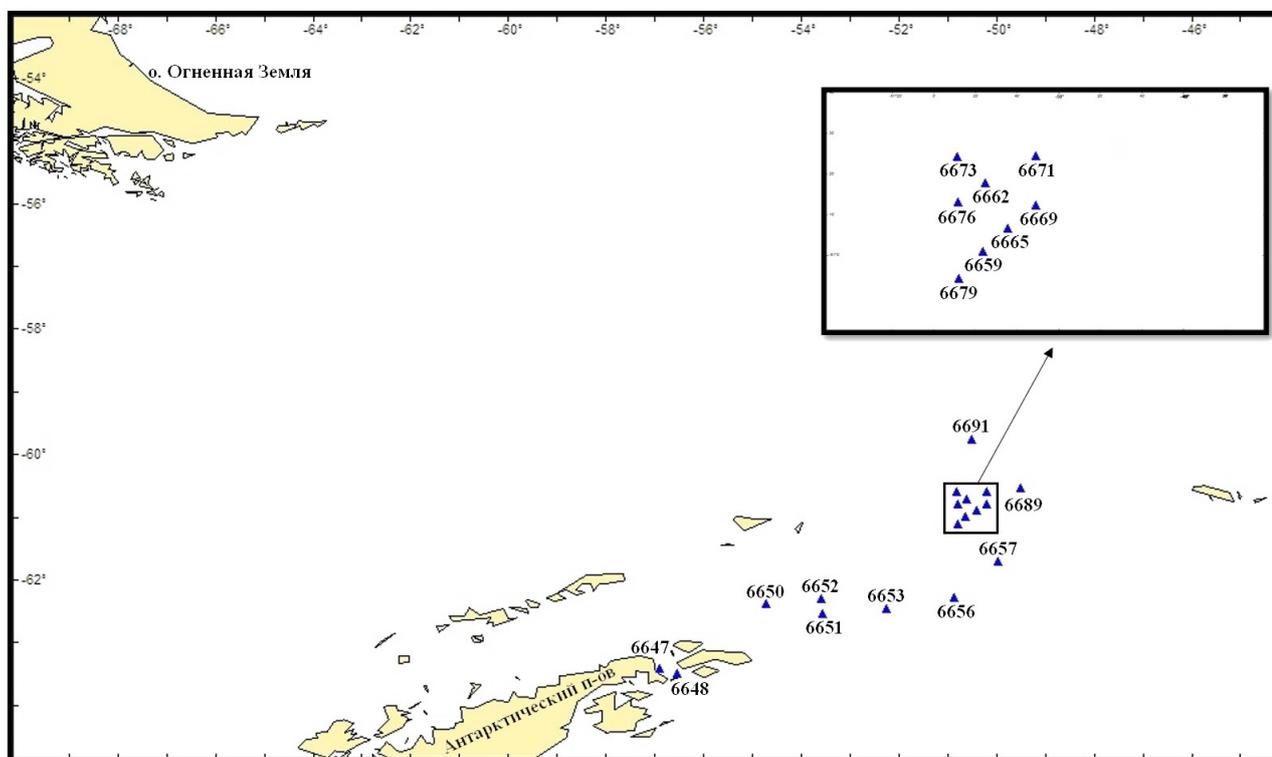
Основной целью данной работы было изучить возможность применения метода многократного вертикального зондирования гидробиофизическим комплексом «Сальпа-М» с одновременной фиксацией биофизических и гидрологических параметров на одной станции для исследования структуры и протяжённости полей свечения антарктических вод.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Данные получены в феврале 2020 г. (122 зондирования на 18 станциях в 79-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш») (рис. 1). Измерение поля биолюминесценции производили в дневное и ночное время мультипараметрическим гидробиофизическим комплексом «Сальпа-М» [Токарев и др., 2016], НПП «Аквастандарт», ТУ 431237-005-00241904-2015, код ТН ВЭД ЕАЭС 9027 50 000 0, сертификат ЕАЭС NRU Д-РУ.ЭМ03.А.00160, шесть измерительных и служебных каналов:

- 1) биолюминесценции (диапазон измерений — от  $10^{-12}$  до  $10^{-8}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>);
- 2) температуры (диапазон измерений — от  $-2$  до  $+35$  °С);

- 3) давления (диапазон измерений — от 0 до 2 МПа);
- 4) фотосинтетически активной радиации;
- 5) передачи информации и дистанционного управления работой;
- 6) контроля и сигнализации.



**Рис. 1.** Карта станций

**Fig. 1.** Map of stations

**Измерительный канал интенсивности биолюминесцентного излучения.** Этот канал состоит из измерительной камеры, светового коллектора, фотоприёмного устройства, устройства управления и интерфейсного устройства, применяемого для измерения температуры и давления. Перевод биолюминесцентных организмов в активное состояние, при котором они испускают световую энергию, осуществляют механическим методом. Для этого используют измерительную камеру, которая состоит из восьми лопастных импеллеров, располагаемых в ней двумя разнесёнными по оси группами по четыре импеллера в каждой.

Для уменьшения влияния солнечного света четыре ряда зачёрнённых импеллеров, состоящие из двух групп рядов взаимно перпендикулярных углов атаки, образуют подвижную светоловушку, обеспечивая при минимальном сопротивлении набегающему потоку водной среды ослабление световой энергии в  $2 \times 10^7$  раз. При осевом движении измерителя биолюминесценции набегающий поток исследуемой водной среды поступает в измерительную кювету. Проходя четыре ряда лопастных импеллеров, водная среда активно перемешивается, и биолюминесцентные организмы, находящиеся в ней, возбуждаются. Латентное время (время до высвечивания биолюминесцентных организмов после их раздражения) определяется видовым составом микроорганизмов. Для измерения биолюминесцентного потенциала время нахождения возбуждённого биолюминесцентного организма в объёме проточной камеры должно превышать латентный период и длительность его свечения. При этом время нахождения микроорганизмов в рабочей измерительной камере после механического воздействия

определяется скоростью протока водной среды через эту камеру. При решении задачи регистрации биолюминесценции предварительный анализ гидродинамического протока водной среды через измерительную камеру показал необходимость формирования турбулентного потока в средней части камеры. Дискретность измерений характеристик этим комплексом при зондировании «вниз» со скоростью  $1,2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  составляла  $0,25 \text{ м}$ . Программным обеспечением её интегрировали до  $1 \text{ м}$ . Отметим, что особая конструкция светопровода, формирующего конусную диаграмму направленности, обеспечивает передачу энергии биолюминесценции микроорганизмов со всего объёма рабочей камеры на фотоприёмное устройство.

**Фотоприёмное устройство.** Биолюминесценция представляет собой малые по интенсивности импульсы световой энергии. Для измерения световой энергии используют ФЭУ-71, имеющий высокую анодную чувствительность ( $1000 \text{ А}\cdot\text{лм}^{-1}$ ) при напряжении питания не более  $1000 \text{ В}$ . Измерительный сигнал ФЭУ через повторитель и последующее усиление подаётся на интерфейс — аналого-цифровой преобразователь. Предусмотрена фильтрация информационного сигнала с постоянным временем  $1\text{--}5 \text{ с}$ , управление которой осуществляется от программной оболочки Salpa-T, P. Измерительные каналы интенсивности биолюминесцентного излучения, температуры, электропроводности и гидростатического давления являются базовыми для комплекса.

Район обитания антарктического криля отделён от других регионов океанов антарктическим полярным фронтом, который является эффективным барьером для распространения морских организмов и делает Южный океан в значительной степени изолированной экосистемой. Создаваемый крилем суммарный световой эффект называется полем биолюминесценции. Большой вклад в его формирование вносят и другие светящиеся гидробионты. Как физическое поле, оно характеризуется интенсивностью энергии и частотным спектром. Поскольку это поле формируется биологическими объектами, оно характеризуется и биологическими признаками — числом составляющих его вспышек отдельных организмов и гетерогенной структурой (неоднородностью) их распределения во времени и пространстве.

В исследовании биолюминесценции антарктических вод использован метод многократного ( $5\text{--}10$ ) зондирования фотического слоя пелагиали ( $1\text{--}80 \text{ м}$ ). Его преимуществами перед другими способами анализа морской биолюминесценции являются:

- возможность изучать мозаичность пространственного распределения поля биолюминесценции одновременно с фоновыми характеристиками среды;
- постоянный уровень влияния на среду и раздражения светящихся организмов;
- возможность детального исследования вертикальной структуры популяций биолюминесцентных;
- отсутствие влияния поверхностных волн на регистрируемый сигнал;
- достаточно простое решение вопроса о выделении суточной составляющей регистрируемого свечения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Гидрологическая характеристика региона.** На мезомасштабном участке исследования в море Уэдделла был обнаружен гидрологический фронт [Морозов и др., 2020], который образовался между более тёплыми водами с холодным подповерхностным слоем и более холодными адвективными водами, поступающими на этот участок из западной мелководной части бассейна Пауэлла (северо-западная часть моря Уэдделла). Изучение показало, что северная часть бассейна Пауэлла содержит относительно тёплые воды. Фронтальная зона простиралась с юго-запада на северо-восток в широтном диапазоне от  $58^\circ$  до  $61^\circ$ . Гидрологический фронт был особенно выражен в фотической зоне, где перепад температур в верхнем слое достигал  $2^\circ\text{C}$  [Морозов и др., 2020].

**Биолюминесценция.** Исследования проводили на унифицированной сетке станций, утверждённой общей программой научных исследований 79-й антарктической экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш». Биолюминесценцию измеряли в дневное и ночное время. Для исключения явления фотоингибирования были вычислены коэффициенты суточной изменчивости интенсивности поля биолюминесценции, с помощью которых все данные были приведены к таковым для ночного времени.

В 2020 г. для анализируемой акватории была характерна сезонная вспышка численности сальп *Salpa thompsoni* Foxton, 1961. Этот вид желетельх абсолютно доминировал в составе зоопланктона в зоне южной ветви Антарктического циркумполярного течения, течения пролива Брансфилд, прибрежных вод Антарктического полуострова и поднятий, ограничивающих бассейн Пауэлла с северо-запада [Морозов и др., 2020]. Фоновая биомасса эвфаузиид, включая антарктический криль, оценённая по уловам сети Бонго в слое 200–0 м, была на два порядка ниже; фоновая биомасса других групп — на несколько порядков ниже. Эти данные могут быть интерпретированы как проявление отрицательного воздействия вспышки численности сальп на количество других групп мезо- и макрозоопланктона.

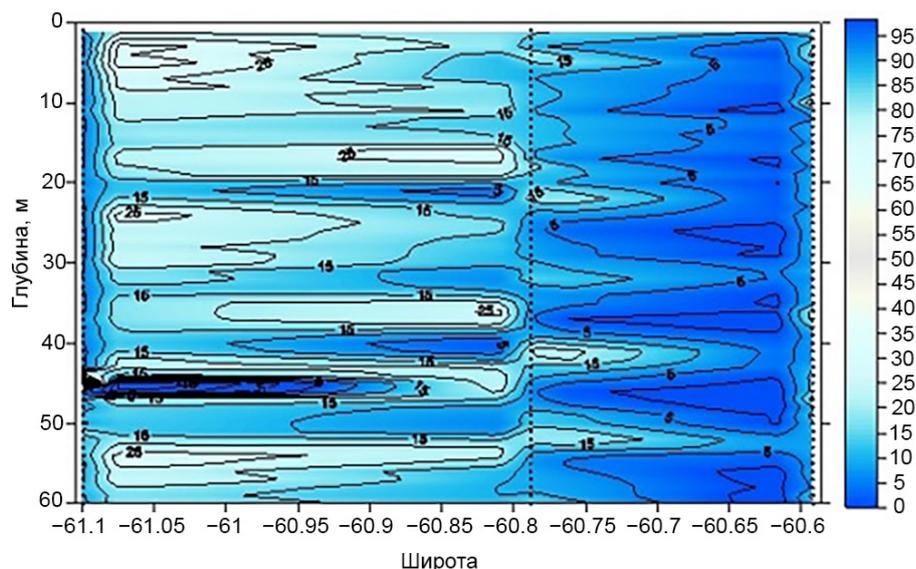
В табл. 1 приведены данные о средних амплитудных показателях полей биолюминесценции на 18 станциях исследуемого региона в 2020 г. Самый высокий уровень зарегистрирован на ст. 6679 (в южной части бассейна Пауэлла) в области скопления сальп: значение достигло  $104,42 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>.

**Таблица 1.** Объём собранного материала по измерению биолюминесценции (2020 г.)

**Table 1.** Volume of sampled material for bioluminescence measurement (2020)

№ ст.	Глубина зондирования, м	Дата	Время начала станции	Средняя биолюминесценция, $10^{-12}$ Вт·см <sup>-2</sup> ·л <sup>-1</sup>	Максимальная биолюминесценция, $10^{-12}$ Вт·см <sup>-2</sup> ·л <sup>-1</sup>	Горизонт максимальной биолюминесценции, м	Средняя температура, °С	Средняя солёность, ‰
6647	35	13.02	14:58	25,93	38,98	11	+0,69	34,29
6648	46	13.02	18:22	5,75	17,52	46	+1,65	35,5
6650	65	14.02	15:54	12,56	25,65	8	+0,22	33,94
6651	65	14.02	22:53	5,14	17,52	35	+0,62	33,72
6652	75	15.02	17:40	4,51	15,99	58	+0,49	33,9
6653	85	16.02	16:05	6,76	25,78	3	+0,39	33,56
6656	65	17.02	14:43	4,61	10,25	65	+0,77	33,25
6657	64	18.02	08:53	4,79	10,25	63	+0,58	33,14
6659	71	19.02	00:09	4,75	10,25	4	+0,69	33,81
6662	70	19.02	06:44	4,61	8,4	67	+1,25	33,7
6665	78	19.02	13:38	6,97	21,03	24	+0,4	33,85
6669	75	19.02	22:11	11,41	103,4	45	+1,15	33,61
6671	75	20.02	03:33	4,41	12,04	61	+1,9	33,79
6673	79	20.02	10:53	8,05	19,49	10	+1,36	34
6676	65	20.02	15:52	11,44	25,66	18	+0,22	33,95
6679	74	20.02	23:15	11,13	104,42	45	+1,15	33,62
6689	75	23.02	16:45	2,71	13,77	26	+1,97	33,24
6691	75	24.02	07:40	1,85	8,4	12	+2,13	33,32

Слой повышенного уровня биолюминесцентного потенциала регистрировали на глубине 40–50 м при вертикальной структуре биолюминесценции с одним максимумом. Интенсивные вспышки в данном районе (при низкой численности криля) могут быть связаны с обилием сальпы *S. thompsoni*, поскольку они способны генерировать вспышки такого потенциала. По мере продвижения на север интенсивность биолюминесценции заметно снижалась. Так, на ст. 6676 уровень биолюминесценции составлял уже  $25,66 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>. Слой повышенного уровня биолюминесцентного потенциала формировался на глубине 15–20 м. На более северной станции, ст. 6673, значение составляло  $19,49 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup> (рис. 2).

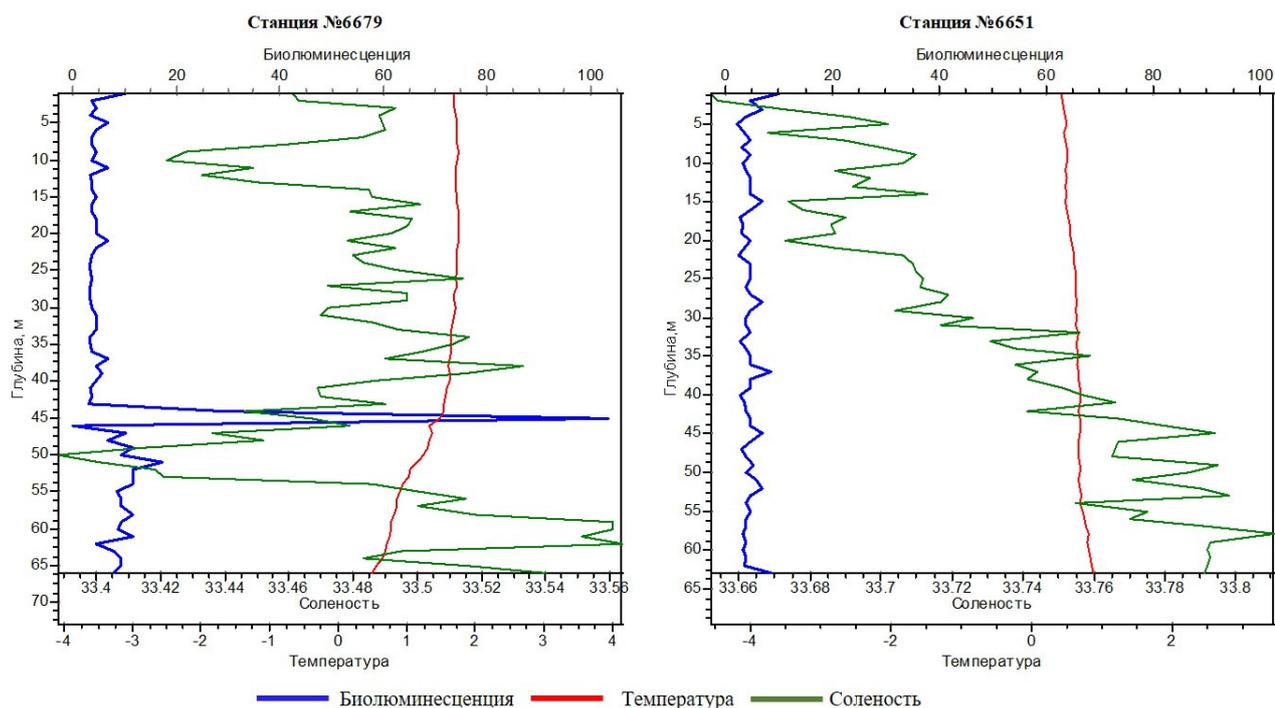


**Рис. 2.** Биолюминесценция: разрез по станциям 6679, 6676, 6673

**Fig. 2.** Bioluminescence: spatial section at stations 6679, 6676, 6673

Слой повышенного уровня биолюминесцентного потенциала регистрировали также на глубине 10 м. Вертикальная структура биолюминесценции на ст. 6676 и 6673 была схожа. Ст. 6647 и 6648 выполнены в проливе Антарктик Саунд, отделяющем острова Жуэнвиль от северо-восточной оконечности Антарктического полуострова. Вертикальная структура биолюминесценции исследуемой акватории характеризовалась наличием пиков светимости. На ст. 6647 пик интенсивности ( $25,93 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>) располагался на глубине 11 м. На ст. 6648 пик интенсивности ( $5,75 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>) был заглублён и находился на 46 м. Средний уровень биолюминесценции на ст. 6647 составлял  $38,98 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup> и был значительно выше такового на ст. 6648 ( $17,52 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>). Зондирование на ст. 6651 было выполнено в то же время, что и на ст. 6679 (22:00–23:00), и средний уровень биолюминесценции на ст. 6651 не превышал  $5,14 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>. На рис. 3 представлены средние профили значения биолюминесценции, температуры и солёности на ст. 6679 и 6651.

В северо-западной части моря Уэдделла в разное время суток было выполнено шесть станций. Максимальный уровень биолюминесценции ( $25,65 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>) зарегистрирован на ст. 6650 на глубине 8 м; минимальный уровень ( $15,99 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>) зафиксирован на ст. 6652 на глубине 58 м. Максимальный средний уровень биолюминесценции в исследуемой акватории отмечен на ст. 6653 ( $25,78 \times 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·л<sup>-1</sup>). Вертикальная структура биолюминесценции на ст. 6650 и 6653 была многопиковой, значения равномерно распределялись по всей глубине зондирования. На ст. 6652 зарегистрирована вертикальная структура биолюминесценции с одним максимумом.



**Рис. 3.** Вертикальные профили температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ), солёности ( $\text{‰}$ ), биолюминесценции ( $\times 10^{-12} \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{л}^{-1}$ )

**Fig. 3.** Vertical profiles of temperature (red) ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinity (green) ( $\text{‰}$ ), bioluminescence (blue) ( $\times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{L}^{-1}$ )

### ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты настоящего исследования показали, что метод многократного зондирования гидробиофизическим комплексом «Сальпа-М» с одновременной фиксацией биофизических и гидрологических параметров на одной станции намного эффективнее других способов [Kim et al., 2006] изучения структуры и протяжённости полей свечения вод. Среди существующих методов измерения сигналов биолюминесценции в толще воды (буксировка фотометров, вывешивание их на заданном горизонте, зондирование определённых слоёв, установка с помощью специальных ферм на дне и т. д.) наиболее перспективными и точными признаны методы буксировки и зондирования [Биолюминесценция в океане, 1992], преимущество которых состоит в регистрации биолюминесценции движущимся с постоянной скоростью батифотометром. При этом метод буксировки может быть использован только при движении судна (со скоростью не более 4 узлов) и на ограниченном числе горизонтов, как правило в диапазоне верхних 10 м. Суть метода зондирования состоит в подъёме (или опускании) батифотометра в дрейфе судна с постоянной скоростью в заданном диапазоне глубин (обычно это эпипелагиаль или фотический слой).

Таким образом, благодаря использованию этого метода в антарктических водах, появилась новая возможность регистрации полей и структуры скопления криля, сальпы и других светящихся организмов.

Установлено, что одной из основных черт вертикальной структуры антарктических полей биолюминесценции является их стратификация, определяемая как параметрами пелагического сообщества (видовой состав, хронологическая структура и т. д.), так и характеристиками водных масс. Глубина залегания слоя или слоёв максимальной интенсивности свечения и их количество

также являются важными характеристиками полей биолюминесценции. Пока неизвестны протяжённость слоёв максимальной интенсивности свечения сальпы в горизонтальном направлении, мозаичность их распределения на мелкомасштабном уровне, а также суточная, межсуточная, сезонная и межгодовая изменчивость интенсивности свечения. Изучение этого нового фактора в экологии светящихся гидробионтов предполагает выполнение горизонтальных буксировок с одновременным отбором биологических проб и акустическим зондированием.

**Заключение.** Установлено, что метод многократного вертикального зондирования гидро-биофизическим комплексом «Сальпа-М» достаточно эффективен при изучении структуры и протяжённости полей свечения антарктических вод. В 2020 г. в исследуемом районе Антарктики вместо полей криля наблюдали поля сальпы, что может быть связано как с изменениями климата, так и с активным промыслом антарктического криля. Криль создаёт поля биолюминесценции в виде непрерывных вспышек отдельных рачков. Сальпы формируют совершенно иное поле биолюминесценции: его вертикальная структура характеризуется наличием одного максимума.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по темам «Комплексные исследования современного состояния экосистемы Атлантического сектора Антарктики» (№ гос. регистрации 121090800137-6) и «Структурно-функциональная организация, продуктивность и устойчивость морских пелагических экосистем» (№ гос. регистрации 121040600178-6).*

**Благодарность.** Авторы выражают искреннюю признательность экипажу и капитану НИС «Академик Мстислав Келдыш» за эффективную помощь при выполнении данного исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Биолюминесценция в океане. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1992. 283 с. [*Biolu-mines-tsentsiya v okeane*. Saint Petersburg : Hidrometeoizdat, 1992, 283 p. (in Russ.)]
2. Гительсон И. И. *Живой свет океана*. Москва : Наука, 1976. 120 с. [Gitelson I. I. *Zhivoi svet okeana*. Moscow : Nauka, 1976, 120 p. (in Russ.)]
3. Лабас Ю. А., Гордеева А. В. Неразгаданная Дарвином биолюминесценция // *Природа*. 2003. № 2. С. 25–31. [Labas Yu. A., Gordeeva A. V. Nerazgadannaya Darwinom biolumines-tsentsiya. *Priroda*, 2003, no. 2, pp. 25–31. (in Russ.)]
4. Морозов Е. Г., Фрей Д. И., Полухин А. А., Кречик В. А., Артемьев В. А., Гавриков А. В., Касьян В. В., Сапожников Ф. В., Гордеева Н. В., Кобылянский С. Г. Мезомасштабная изменчивость океана в северной части моря Уэдделла // *Океанология*. 2020. Т. 6, № 5. С. 663–679. [Morozov E. G., Frey D. I., Polukhin A. A., Krechik V. A., Artemiev V. A., Gavrikov A. V., Kasian V. V., Sapozhnikov F. V., Gordeeva N. V., Kobylyansky S. G. Mesoscale variability of the ocean in the northern part of the Weddell Sea. *Okeanologiya*, 2020, vol. 6, no. 5, pp. 663–679. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0030157420050184>
5. Самышев Э. З. *Антарктический криль и структура планктонного сообщества в его ареале*. Москва : Наука, 1991. 168 с. [Samyshev E. Z. *Antarctic Krill and the Structure of the Plankton Community in Its Areal*. Moscow : Nauka, 1991, 168 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1462>
6. Спиридонов В. А., Урюпова Е. Ф. Антарктика и Южный океан сегодня: к пятидесятой годовщине Договора об Антарктике // *Россия в окружающем мире*. 2009. № 12. С. 125–150. [Spiridonov V. A., Uryupova E. F. Antarktika i Yuzhnyi okean segodnya: k pyatidesyatoi godovshchine Dogovora ob Antarktike. *Rossiya v okruzhayushchem mire*, 2009, no. 12, pp. 125–150. (in Russ.)]
7. Токарев Ю. Н., Соколов Б. Г. Влияние физических и биологических факторов на формирование мелкомасштабной структуры биолюминесцентного и акустического полей в Чёрном и Средиземном морях // *Гидробиологический журнал*. 2001. Т. 37, № 2. С. 3–13. [Tokarev Yu. N., Sokolov B. G. Effect of physical and biological factors on forming of small-scale structure of bioluminescent and acoustic fields in the Black and Mediterranean seas. *Gidrobiologicheskii zhurnal*, 2001, vol. 37, no. 2, pp. 3–13. (in Russ.)]

8. Токарев Ю. Н. *Основы биофизической экологии гидробионтов*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 342 с. [Tokarev Yu. N. *Osnovy biofizicheskoi ekologii gidrobiontov*. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2006, 342 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/9076>
9. Токарев Ю. Н., Евстигнеев П. В., Машукова О. В. *Планктонные биолюминесцентные Мирового океана: видовое разнообразие, характеристики светоизлучения в норме и при антропогенном воздействии*. Симферополь : Н.Орианда, 2016. 347 с. [Tokarev Yu. N., Evstigneev P. V., Mashukova O. V. *Planktonnye bioluminescentny Mirovogo okeana: vidovoe raznoobrazie, kharakteristiki svetoizlucheniya v norme i pri antropogennom vozdeistvii*. Simferopol : N.Orianda, 2016, 347 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/7926>
10. Harvey E. N. *A History of Luminescence from the Earliest Times Until 1900*. Philadelphia : American Philosophical Society, 1957, 692 p. (Series: Memoirs of the American Philosophical Society ; vol. 44). <https://doi.org/10.5962/bhl.title.14249>
11. Kim G., Lee Y.-W., Joung D.-J., Kim K.-R., Kim K. Real-time monitoring of nutrient concentrations and red-tide outbreaks in the southern sea of Korea. *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, iss. 13, art. no. L13607 (4 p.). <https://doi.org/10.1029/2005GL025431>
12. Nicol S., Constable A. J., Pauly T. Estimates of circumpolar abundance of Antarctic krill based on recent acoustic density measurements. *CCAMLR Science*, 2000, vol. 7, pp. 87–99. <https://www.ccamlr.org/ru/node/72892>
13. Nicol S., Foster J. The fishery for Antarctic krill: Its current status and management regime. In: *Biology and Ecology of Antarctic Krill*. Cham, Switzerland : Springer, 2016, pp. 387–421. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-29279-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29279-3_11)
14. Sprong I., Schalk P. H. Acoustic observations on krill spring–summer migration and patchiness in the northern Weddell Sea. *Polar Biology*, 1992, vol. 12, iss. 2, pp. 261–268. <https://doi.org/10.1007/BF00238268>

## USING THE VERTICAL SOUNDING METHOD FOR RECORDING BIOLUMINESCENCE IN THE ANTARCTIC SECTOR OF THE ATLANTIC OCEAN

**L. A. Melnik, A. V. Melnik, O. V. Mashukova, and V. V. Melnikov**

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation  
E-mail: [melniklidi@gmail.com](mailto:melniklidi@gmail.com)

Bioluminescence is an essential element in the functioning of the pelagic community, which is associated with the key ecological role of light in the life of hydrobionts, *inter alia* in the formation of their spatial heterogeneity. The luminescence of marine hydrobionts is a manifestation of their vital activity in the form of electromagnetic radiation in the spectrum visible area, and its kinetic patterns are closely related to mechanism generating their chemical reactions and metabolic processes. Global warming, which undoubtedly has affected the Atlantic sector of Antarctica, caused serious structural and functional alterations in the pelagic community with repercussion on marine bioluminescence, an expressive indicator of environmental conditions. We aimed at studying the possibility of using the method of multiple vertical sounding by the hydrobiophysical complex “Salpa-M,” with simultaneous capture of biophysical and hydrological parameters at one station, to investigate the structure and length of fields of luminescence in Antarctic waters. The paper provides the technique for analyzing structural characteristics of bioluminescence, as well as material obtained during the 79<sup>th</sup> Antarctic expedition on-board the RV “Akademik Mstislav Keldysh.” The core of the sounding method is raising (or lowering) the bathyphotometer “Salpa-M” at a constant speed in a given layer [usually, it is the upper productive (0–200 m) or the photic (0–100 m) layer] in the RV’s drift. Planktonic bioluminescent organisms, which are the main contributors to the formation of the bioluminescent potential of the pelagic, mostly illuminate when stimulated. Therefore, a bathyphotometer moving at a constant speed creates a standard level of the mechanical stimulation of bioluminescent organisms, and this allows to compare correctly the results of measurements for the vertical structure of the field of bioluminescence carried out in different areas and under various weather conditions (rolling, wind drift, *etc.*). The paper presents a fairly large data set of the integral bioluminescent signal at different horizons.

Primary data on bioluminescence intensity, temperature values, electrical conductivity, and photosynthetically active radiation were obtained at 18 hydrographic stations in the studied water area of the Atlantic sector of Antarctica. The article considers an important issue related to the change in seawater bioluminescence in the Atlantic sector of Antarctica studied by the vertical sounding at different levels with a bioluminescent probe. When investigating bioluminescence, its vertical variability in the upper productive layer was determined in relation to features of plankton distribution. As a result, it was found out that the luminescence of Antarctic waters in the photic layer of this area occurs within the range from  $8.4 \times 10^{-12}$  to  $104.42 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{L}^{-1}$ . Bioluminescence peaks (up to  $104 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{L}^{-1}$ ) were recorded under the thermocline at a 45-m depth in the areas of concentration of the salp *Salpa thompsoni* Foxton, 1961 near the hydrological front, at a distance of about 6–7 miles on either its side. It is shown that the method of vertical sounding in Antarctic waters allows expressing the fields and the structure of aggregations of luminescent organisms.

**Keywords:** bioluminescence intensity, Atlantic sector of Antarctica, euphotic zone, vertical sounding, plankton