

Сравнительная характеристика вертикального распределения интенсивности биолюминесценции в северо-западной и северо-восточной частях Черного моря

А.Б. Полонский[✉], Е.Б. Мельникова, А.Н. Серебренников*

*Институт природно-технических систем
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28*

Поступила в редакцию 28.03.2024;
после доработки 01.05.2024;
принята к печати 07.05.2024

Представлены результаты анализа пространственно-временного распределения интенсивности свечения гидробионтов в Черном море на основе данных экспедиционных исследований, проведенных в июне 2013 г. и сентябре 2014 г. в рейсах НИС «Профессор Водяницкий». Сравнивается вертикальное распределение интенсивности биолюминесценции в северо-западной и северо-восточной частях Черного моря. Для объяснения причин пространственно-временных вариаций интенсивности свечения гидробионтов привлекаются спутниковые данные о приводном ветре и геострофических течениях. Показано, что в вертикальном распределении интенсивности биолюминесценции на большинстве станций наблюдался один максимум, который находился в верхней части сезонного термоклина. На глубоководных станциях в северо-западной части моря, приуроченных к зоне слабых вертикальных движений, наблюдались два максимума. Верхний максимум обусловлен развитием теплолюбивых, а нижний — холодолюбивых комплексов гидробионтов. Максимальные величины интегральной интенсивности свечения гидробионтов наблюдались в зоне дивергенции течений в глубоководной части северо-восточной акватории моря, что объясняется более активным обогащением вод биогенными веществами за счет более интенсивных восходящих движений. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения оценки биопродуктивности деятельного слоя вод Черного моря на основе спутниковых данных.

Ключевые слова: Черное море, спутниковые данные, геострофические течения, приводный ветер, интенсивность биолюминесценции, вертикальное распределение температуры и солёности, гидробионты; Black Sea, satellite data, geostrophic currents, near-surface wind, intensity of bioluminescence, vertical distribution of temperature and salinity, hydrobionts.

Введение

Одним из наиболее важных факторов, определяющих особенности крупномасштабной циркуляции вод Черного моря, является воздействие пространственно-неоднородного поля ветра [1–5]. Преобладающий циклонический характер приводного поля ветра над полузамкнутым Черным морем приводит к подъему вод в центральной его части и их опусканию на периферии. В результате действия этого механизма (называемого иногда «экмановской накачкой») формируется геострофическое (градиентное) течение, определяющее генеральное направление основного черноморского течения (ОЧТ) [3, 4, 6–9]. Характер вертикального водообмена, связанный с циркуляционными процессами, существенно

влияет на обогащение вод биогенными веществами и, как следствие, биологическую продуктивность морских акваторий [10, 11].

На структуру меандрирующего ОЧТ и формирующуюся в результате отрыва от основного потока систему вихревых образований принципиальное влияние оказывает характер континентального склона, который в северо-западных и северо-восточных районах Черного моря различен. Вследствие этого следует ожидать, что параметры вертикального водообмена, экологическое состояние и биологическая продуктивность вод в северо-западной и северо-восточной частях Черного моря также будут различны [6, 12–15].

Светящиеся виды фитопланктона, которые являются типичными представителями первичного звена в трофической цепи, формируют биолюминесцентное излучение, интенсивность которого коррелирует с концентрацией гидробионтов, что позволяет проводить сравнительный анализ биологической продуктивности вод различных регионов [16–21].

* Александр Борисович Полонский (apolonsky5@mail.ru); Елена Борисовна Мельникова (helenamelnikova@mail.ru); Александр Николаевич Серебренников (swsilv@gmail.com).

Интенсивность биолюминесценции в Черном море изучали многие исследователи [17, 18, 20–23]. В результате выявлены основные планктонные биолюминесцентные Черного моря [17, 18, 20], определены основные особенности суточной и сезонной динамики интенсивности биолюминесценции в открытых и прибрежных районах [17, 23], оценено интегральное влияние гидрофизических параметров на интенсивность биолюминесцентного излучения [18, 22, 23]. Однако вопросы сравнительного анализа вертикальной структуры интенсивности свечения гидробионтных сообществ в различных частях Черного моря с учетом пространственно-временных особенностей динамических процессов рассмотрены недостаточно полно.

Цели настоящей работы – анализ изменчивости вертикальной структуры интенсивности свечения гидробионтов, характеризующих продуктивность вод, с учетом особенности динамических процессов и гидрологической структуры вод в северо-западной и северо-восточной частях Черного моря в середине теплого полугодия и ее сравнение с вертикальной структурой интенсивности свечения гидробионтов в весенний и осенний периоды, описанной ранее в работе [23].

Материалы и методы

Исследование вертикального распределения интенсивности свечения гидробионтных сообществ проводилось летом и в начале осени 2013 и 2014 гг. в 73, 74 и 77-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий» (Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН). Основной массив данных получен на 23 станциях, расположенных в северо-западной и северо-восточной частях Черного моря (рис. 1).

Вертикальное распределение интенсивности свечения планктонного сообщества исследовалось мето-

дом многократного батифотометрического зондирования толщи воды с использованием гидробиофизического комплекса «Сальпа-М». С его помощью измерялась также температура и электропроводность морской воды, которую пересчитывали в соленость.

Съемки проводили в ночное время через 2 ч после наступления темноты. На каждой станции выполняли по 10 зондирований с интервалом 2 мин. Дискретность измерений в режиме зондирования составляла 1 м. Далее по выполненным 10 зондированиям для каждой станции находили средние профили интенсивности свечения гидробионтов, температуры и солености и рассчитывалась дисперсия, характеризующая относительно высокочастотные флуктуации. По рассчитанным средним профилям были получены осредненные профили анализируемых характеристик по нескольким группам станций, каждая из которых находилась в регионе, отличающемся специфическим динамическим режимом в период проведения съемки.

Для сглаживания тонкоструктурных особенностей на вертикальных распределениях интенсивности свечения гидробионтов, температуры и солености на каждой станции была произведена дополнительная фильтрация с помощью скользящего осреднения профилей. Сглаживание проводили по трем точкам двумя способами: либо обычным скользящим осреднением с помощью прямоугольного фильтра, либо с использованием треугольного фильтра с весами 1–2–1. Результаты, естественно, несколько отличались друг от друга, поскольку характеристики этих фильтров различны [24]. Приведенные в статье профили сглаживались треугольным фильтром.

В каждой группе станции выделяли слой, в котором интенсивность свечения планктонного сообщества превышала уровень 0,5 от максимального. Считалось, что это слой с высоким уровнем интенсивности свечения планктонного сообщества.

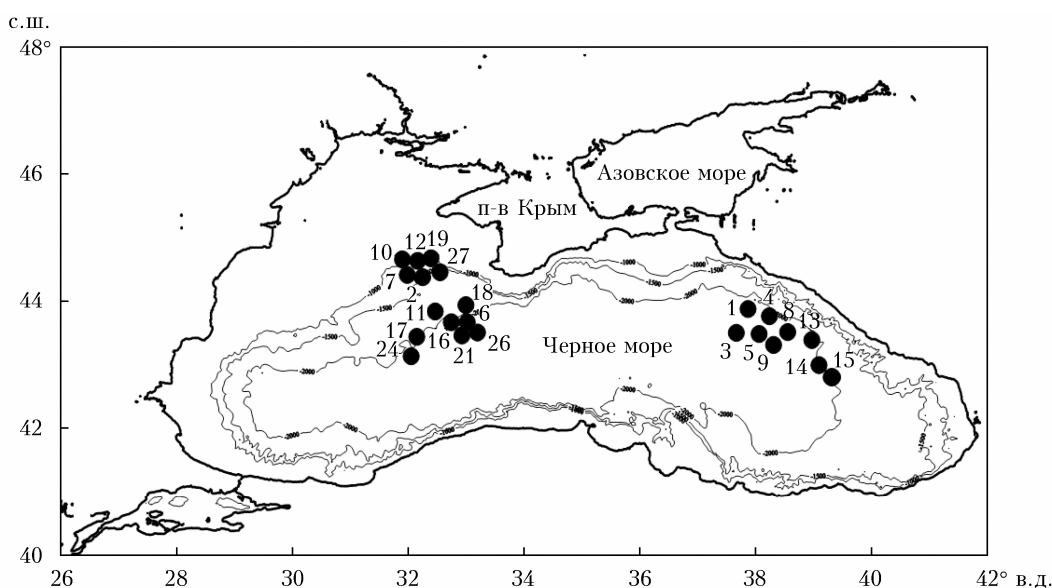


Рис. 1. Расположение и номера станций; тонкими линиями нанесены изобаты 1000, 1500 и 2000 м

В дальнейшем анализировалась связь характеристик этого слоя с термохалинной структурой вод и вертикальной циркуляцией для каждого из рассматриваемых районов. Таким образом, при обработке результатов зондирований использовалось понятие интегральной интенсивности свечения гидробионтов (ИИСГ) [23].

На графиках вертикальных профилей интенсивности свечения гидробионтов в точках максимума и уровней 0,5 от максимального приведены значения, соответствующие $2S_x$, где S_x — параметр, который позволяет оценить границы доверительного интервала для заданного уровня (например, 90 или 95%). Он рассчитывается по следующему алгоритму:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}{n(n-1)}} = \sigma / n^{1/2},$$

где n — количество зондирований на всех станциях в группе; x_i — измеренное значение для i -го зондирования; x_{cp} — усредненное значение по рассматриваемой группе станций; σ — среднеквадратическое отклонение параметра, рассчитанное по всем профилям на каждой группе станций в отдельности.

Для построения карт приповерхностного ветра и расчета вертикальной скорости подъема воды, обусловленного экмановской накачкой, использовались векторные данные о поле ветра CCMP OCW (Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind) в Черноморском регионе с шестичасовым временным разрешением и пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$, которые затем усреднялись за сутки. Данные о ветре были получены с сайта NASA PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) (<https://www.remss.com>). Абсолютные динамическая топография уровня Черного моря и скорости геострофических течений с пространственным разрешением $0,125 \times 0,125^\circ$ рассчитывались по данным, взятым с сайта CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, European Seas Gridded L4 Sea Surface Heights And Derived Variables, product ID = SEALEVEL_EUR_PHY_L4_MY_008_068) (<https://www.copernicus.eu>).

Толщина верхнего перемешанного слоя (mixed layer depth, MLD) определялась на каждой станции по измеренным комплексом «Сальпа-М» профилям температуры и солености. Нижняя граница MLD выделялась по градиентному критерию.

Зональная и меридиональная компоненты вектора скорости U_g и V_g геострофического течения на поверхности моря рассчитывали по следующим формулам:

$$U_g = -(g/f)(\partial H / \partial y), \quad V_g = (g/f)(\partial H / \partial x), \quad (1)$$

где g — ускорение силы тяжести; $f = 2\omega \sin \theta$ — параметр Кориолиса; ω — угловая скорость вращения Земли; θ — широта места; H — высота уровня поверхности моря.

Вертикальную скорость подъема/опускания вод, напрямую не связанную с экмановской составляющей, рассчитывали по формуле

$$W_{GEO} = \overline{MLD} \left(\frac{\partial \tilde{U}_g}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{V}_g}{\partial y} - \frac{\tilde{V}_g}{R_a \cdot \tan \theta} \right), \quad (2)$$

где R_a — экваториальный радиус Земли (6378245 м); θ — географическая широта места.

Расчет вертикальной скорости подъема воды, обусловленного экмановской накачкой, вычисляли из компонентов касательного напряжения ветра по следующей формуле [25]:

$$W_{ep} = \frac{\text{rot}_z \tau}{\rho_w \cdot f} + \frac{\beta \cdot \tau_x}{\rho_w \cdot f^2} = \frac{1}{\rho_w \cdot f} \left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right) + \frac{\beta \cdot \tau_x}{\rho_w \cdot f^2}, \quad (3)$$

где τ и τ_x — касательное напряжение приповерхностного ветра и его зональная компонента соответственно; ρ_w — плотность морской воды; $\beta = \partial f / \partial y$ — меридиональный градиент параметра Кориолиса, известный как « β -эффект».

Карты геострофических течений позволяют выделить области крупномасштабных круговоротов и интенсивные циклонические и антициклонические вихри. Полученные сведения были использованы для локализации районов подъема и опускания вод в районе станций, на которых проводились зондирования. При этом производилось пространственно-временное усреднение вертикальных скоростей по каждой группе станций и за периоды, которые определялись временем выполнения соответствующей части съемки и продолжительностью существования устойчивых динамических условий в окрестности конкретной группы. Изменение динамического режима определялось по смене знака скорости вертикальных подповерхностных течений в окрестности каждой группы станций.

При анализе результатов экспедиционных съемок учитывалось следующее обстоятельство. Циклонический вихрь создает в своем ядре подъем термоклина, а вместе с ним подъем подповерхностных и верхнего слоя промежуточных вод, которые содержат биогенные элементы, необходимые для синтеза органического вещества, что способствует повышению биопродуктивности. В ядре антициклонического вихря имеет место опускание термоклина, что негативно сказывается на биопродуктивности. Однако при этом на периферии такого вихря происходит компенсационный подъем насыщенных биогенными элементами вод, что способствует увеличению первичной продукции здесь.

Математическая обработка результатов измерений проводилась на персональном компьютере программами *Microsoft Excel 7.0*, *Statistica 6.0*, *SigmaPlot 12.5*, *Surfer 13.0* и собственным программным обеспечением.

Результаты и обсуждение

На основе анализа полученных вертикальных распределений интенсивности свечения гидробионтов, а также с учетом расположения станций относительно зон конвергенции и дивергенции, формируемых за счет пространственной неоднородности полей градиентных течений и приповерхностного

ветра, станции были разбиты на четыре группы. Две группы находились в северо-западной и две — в северо-восточной части Черного моря (см. рис. 1).

Особенности вертикального распределения интенсивности биолюминесценции на станциях первой и второй групп, расположенных в северо-западной части Черного моря. Первая группа станций в этой части моря выполнялась к югу от широкого континентального склона и основной струи ОЧТ, в области халистатики западного циклонического круговорота. В эту группу вошли станции 6, 11, 16, 17, 18, 21, 24 и 26, расположенные в глубоководной ($h \geq 1500$ –2000 м) части моря, где в период проведения исследований находилась зона слабой конвергенции, обусловленная завихренностью поля ветра. Векторы геострофических течений, приведенные на рис. 2, построены на основе расчетов зональной и меридиональной составляющих вектора геострофических течений (см. соотношение (1)).

Расчеты показали, что вертикальные скорости, связанные с пространственной неоднородностью градиентных течений, могли привести лишь к очень незначительному подъему подповерхностных вод, скорость которых была около $0,23 \cdot 10^{-2}$ м/сут. Скорость опускания воды, связанная с экмановской накачкой, составила около $-0,05$ м/сут.

Средние вертикальные профили температуры и солености на станциях первой группы (рис. 3, а) показывают, что в июне в районе их расположения летняя термохалинная структура вод была уже хорошо сформирована. Верхний перемешанный слой (ВПС) был прогрет до $24,8^\circ\text{C}$, а его средняя толщина составляла около 7 м. Глубже залегал сезонный термоклин с вертикальным градиентом температуры $\sim 1,0^\circ\text{C}/\text{м}$.

На рис. 3, а хорошо видно, что на станциях 6, 11, 16, 17, 18, 21, 24 и 26 наблюдались два слоя с повышенным уровнем интенсивности свечения гидробионтов. Первый находился в верхней части сезонного термоклина на глубинах от 8 до 14 м при средней температуре в этом слое $20,7^\circ\text{C}$ и солености $18,29\text{‰}$. Интегральная интенсивность свечения гидробионтов (ИИСГ) в верхнем слое была достаточно низкой и составляла в среднем $4500 \text{ пВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$. Второй слой с более высоким

уровнем ИИСГ находился в холодном промежуточном слое на глубинах от 39 до 44 м при средней температуре $8,8^\circ\text{C}$ и солености $18,75\text{‰}$. Средняя ИИСГ в нижнем слое составляла $7715 \text{ пВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$, что более чем в 1,7 раза превышало значение, наблюдавшееся в верхнем слое. Такая вертикальная структура интенсивности свечения гидробионтов типична и для весны [23]. Отметим, что в мае — июне происходит увеличение видового состава гидробионтов за счет массового развития теплолюбивых мелкоклеточных представителей светящихся динофлагеллят: виды рода *Goniaulax*, а также *Scripsiella trochoidea* (Stein, 1883), Balech ex Loeblich III, 1965 и *Lingulodinium poliedrum* (Stein, 1883) Dodge, 1989. Количество и разнообразие этих видов приводит к увеличению суммарной биомассы светящихся динофлагеллят и интенсивности биолюминесценции в ВПС [17, 18, 20, 21].

Тенденция уменьшения или увеличения суммарного свечения планктона в подповерхностном слое вызвана пространственно-временной неоднородностью распределения гидробионтов и в первую очередь представителями рода *Noctiluca*, максимальная численность которых наблюдается ранним летом [17, 18, 20]. Ночесветка является самым ярко светящимся организмом в Черном море, ее биолюминесцентный потенциал не зависит от солнечного света, отсутствие суточного ритма позволяет ночесветке неравномерно распределяться в толще воды.

Во многих работах [26–28] было отмечено, что в глубоководных районах в структуре планктонного сообщества наблюдаются два максимума с высокой концентрацией клеток *Noctiluca*. Второй максимум интенсивности свечения обеспечивается организмами холодноводного комплекса — представителями рода *Neoceratium* и *Protoperidinium*, относящихся к более глубоководным биотопам. На этих глубинах в летне-осенний период наблюдаются повышенные концентрации растворенного и взвешенного органического вещества, чем и объясняется увеличение здесь доли крупноклеточных форм, в частности крупноклеточных динофлагеллят [1, 27–29].

Во вторую группу станций входят станции 2, 7, 10, 12, 19 и 27, расположенные в северо-западной части моря в окрестности материкового склона с глубинами от 1000 до 1500 м. Станции этой группы

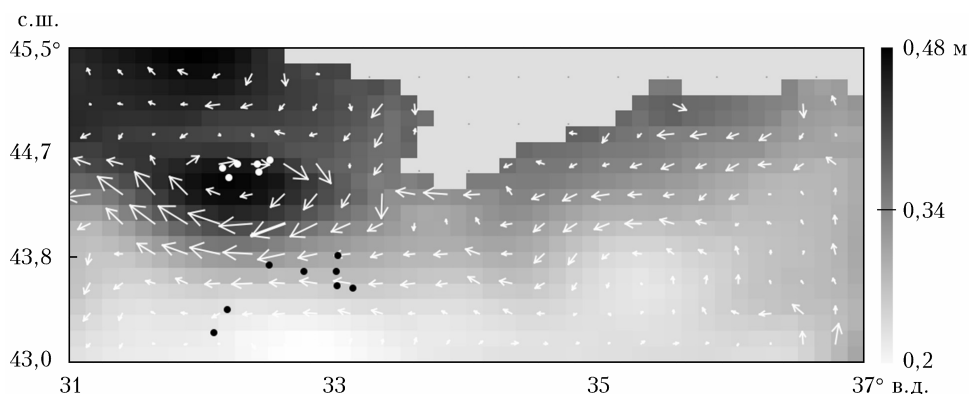


Рис. 2. Усредненная абсолютная динамическая топография уровня Черного моря и геострофические течения (стрелки) в северо-западной его части (31.05–29.06.2013 г.)

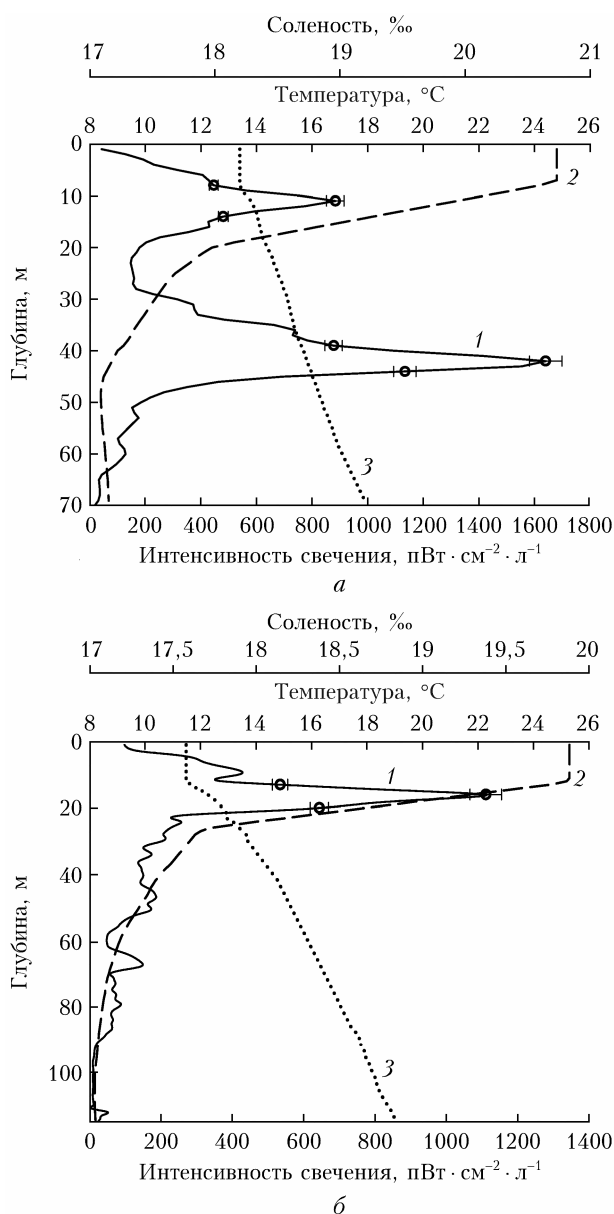


Рис. 3. Средние вертикальные распределения интенсивности свечения гидробионтов (1), температуры (2) и солености (3) на станциях первой (а) и второй (б) групп, расположенных в северо-западной части моря. Горизонтальные отрезки указывают на удвоенную величину $\sigma/n^{1/2}$ (подробности в тексте)

находились в зоне конвергенции, относящейся к мезомасштабному антициклоническому вихрю. Такой антициклон, характеризующейся опусканием поверхностных малопродуктивных вод, часто фиксируется в анализируемом районе Черного моря и иногда называется в литературе «Севастопольский антициклон» [6]. Расчеты показывают, что скорость опускания вод, обусловленная завихренностью геострофического течения, для станций этой группы в среднем оказалась равной около $-0,66 \cdot 10^{-2}$ м/сут, а вызванная экмановской накачкой — около $-0,13$ м/сут.

Графики вертикального распределения термохалинных характеристик и интенсивности свечения гидробионтов на станциях второй группы летом (рис. 3, б) показывают, что в зоне конвергенции толщина ВПС несколько увеличилась по сравнению с зоной слабых вертикальных движений, рассмотренной выше, и в среднем составляла 11 м при температуре более 25 °С. Слой с высоким уровнем биolumинесценции располагался ниже ВПС в сезонном термоклине на глубинах от 14 до 20 м. Средняя температура в этом слое составляла 20,8 °С, соленость 17,63‰.

Вторая группа станций была расположена у свала глубин, что повлияло на интенсивность свечения гидробионтов. Несмотря на то что эта группа находилась в зоне конвергенции (т.е. зоне малопродуктивных поверхностных вод), среднее значение ИИСГ составляло $6048 \text{ пВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$, что было в 1,34 раза выше, чем в верхнем слое на глубоководных станциях первой группы с глубинами $h \geq 1500\text{--}2000$ м, где имела место значительно более слабая конвергенция.

Особенности вертикального распределения интенсивности биolumинесценции на станциях третьей и четвертой групп, расположенных в северо-восточной части Черного моря. Третья и четвертая группы станций расположены в области дивергенции или на ее периферии, относящейся к восточному циклоническому круговороту и соответствующей халистатической области.

В целом восточный циклонический круговорот в Черном море характеризуется более интенсивными вертикальными скоростями экмановского происхождения по сравнению с западным круговоротом [5]. Этот круговорот удален от основных источников распределения вод Черного моря, связанных с речным стоком. Оба эти фактора способствуют увеличению солености в поверхностном и подповерхностном слоях. Интенсивный вертикальный подъем вод в восточной части моря способствует более активному, по сравнению с северо-западным районом, обогащению вод биогенными веществами и повышению биологической продуктивности вод.

Режим ОЧТ в северо-восточной части Черного моря тесно связан с интенсивностью ветровой накачки. Если циклоническая завихренность поля ветра усиливается, то ОЧТ, как правило, наблюдается в виде когерентной струи, прижатой к континентальному склону. Если же она ослабевает, то наблюдается вихревой режим циркуляции, характеризующийся неразвитостью струи ОЧТ, которая отходит от континентального склона в глубоководную часть моря до 100 км от берега, и доминируют вихревые мезомасштабные структуры [7, 9, 29].

Девять станций (1, 3, 4, 5, 8, 9, 13, 14, 15), на которых проводились исследования в северо-восточной акватории Черного моря, располагались в районе больших глубин ($h \geq 1800\text{--}2000$ м), частично захватывая материковый склон. Наибольшая глубина отмечалась на станции 3 (2164 м). В период проведения съемки в районе выполнения станций

находилась область дивергенции и ее периферия (рис. 4). Поэтому эти станции были разбиты на две группы (третью и четвертую).

Третья группа (станции 8, 9, 13, 14, 15) располагалась в глубоководной ($h \approx 2000$ м) части моря в районе крупномасштабной зоны дивергенции восточного циклонического круговорота (рис. 4). Вертикальная скорость в приповерхностном слое за счет неоднородности геострофического течения оказалась незначительной и составила $\sim 0,23 \cdot 10^{-2}$ м/сут. Средняя вертикальная скорость подъема воды за счет экмановской дивергенции $\approx 0,2$ м/сут.

Средние профили температуры и солености на станциях третьей группы, представленные на рис. 5, а, показывают, что ВПС был хорошо прогрет (до $26,4^\circ\text{C}$), а его толщина составляла 7 м. Глубже залегал сезонный термоклин с вертикальным градиентом температуры $\sim 1,0^\circ\text{C}/\text{м}$. Вертикальное распределение интенсивности свечения гидробионтов (рис. 5, а) показывает, что на станциях 8, 9, 13, 14 и 15 наблюдался один слой с высоким уровнем

свечения. В среднем ИИСГ в этом слое составляла $9194 \text{ пВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$. Слой с максимальной интенсивностью свечения располагался в верхней части сезонного термоклина на глубинах от 11 до 15 м. Средняя температура в этом слое $20,5^\circ\text{C}$, соленость $18,45\text{‰}$. ИИСГ на станциях третьей группы была самой высокой в районе проведения исследований, в два раза выше, чем в зоне слабой конвергенции северо-западной части моря.

Четвертая группа – станции 1, 3, 4, 5, расположенные в северо-восточной акватории Черного моря с глубинами, превышающими 2000 м. В период проведения исследований эти станции находились на периферии восточного циклонического круговорота, в области, где должно наблюдаться опускание вод, связанное со слабой конвергенцией ОЧТ (см. рис. 5, б). Расчеты показывают, что вертикальная скорость опускания вод за счет конвергенции в среднем по всем станциям этой группы могла бы привести к незначительному опусканию воды со скоростью около $-0,3 \cdot 10^{-2}$ м/сут. Однако средняя

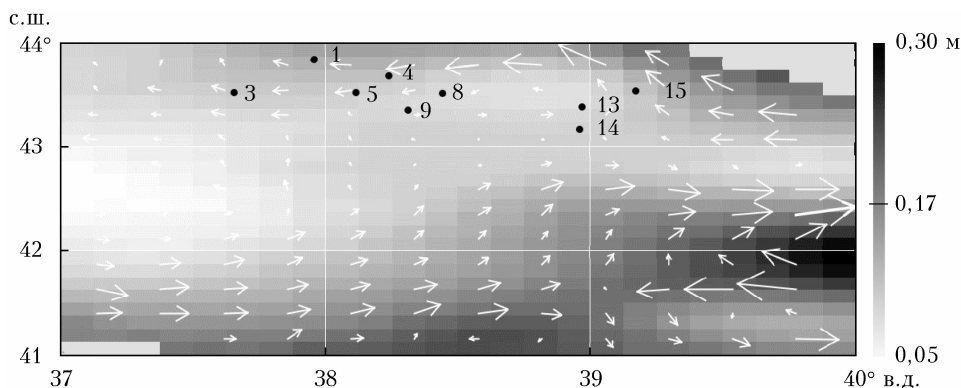


Рис. 4. Усредненная абсолютная динамическая топография уровня Черного моря и геострофические течения (стрелки) в северо-восточной его части (09.08–07.10.2014 г.)

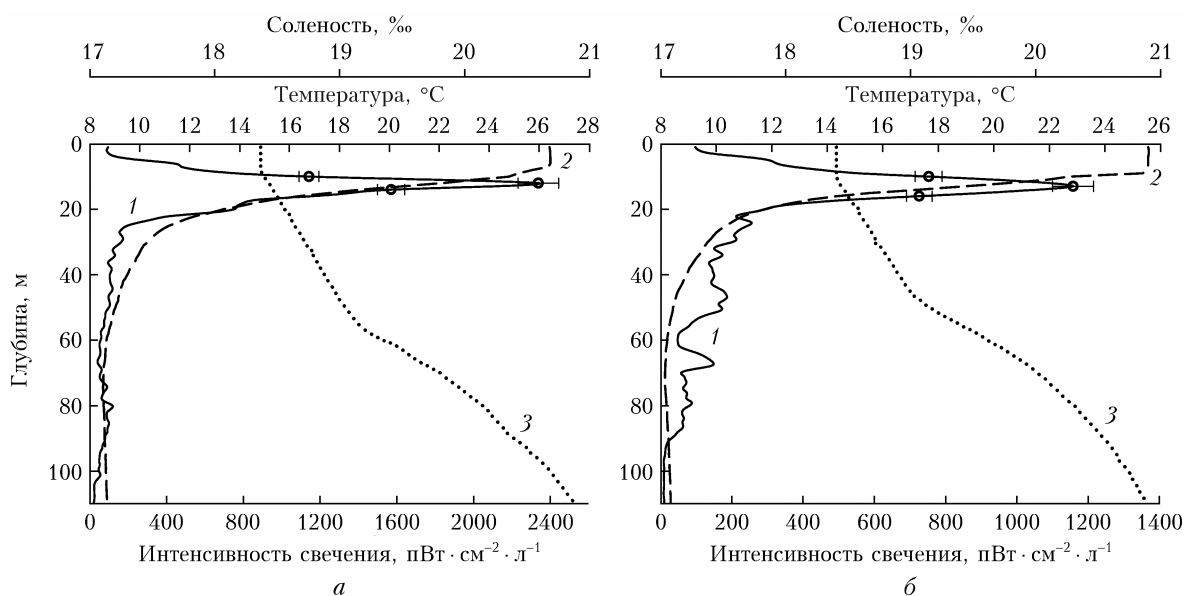


Рис. 5. Средние вертикальные распределения интенсивности свечения гидробионтов (1), температуры (2), солености (3) на станциях третьей (а) и четвертой (б) групп, расположенных в северо-восточной части Черного моря

вертикальная скорость подъема воды за счет неоднородности приповерхностного ветра составила $\sim 0,09$ м/сут, что привело к подъему подповерхностных вод. Вертикальные профили температуры и солености на станциях четвертой группы показывают, что средняя толщина ВПС равнялась 9 м, его температура $25,5^\circ\text{C}$ (рис. 5, б).

На графике вертикального распределения интенсивности свечения гидробионтов (рис. 5, б) хорошо видно, что в начале осени слой максимального свечения гидробионтов располагался в верхней части сезонного термоклина на глубинах от 10 до 16 м при средней температуре в этом слое $17,4^\circ\text{C}$ и солености 18,47‰. Температурный градиент в сезонном термокline составлял $1,2^\circ\text{C}/\text{м}$, т.е. был наибольшим из всех описанных ранее градиентов в районах проведения экспедиционных исследований. Среднее значение ИИСГ на станциях 1, 3, 4, 5 равнялось $6645 \text{ пВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$, что в 1,38 раза ниже, чем на станциях третьей группы, расположенных в зоне более интенсивной дивергенции с более быстрым подъемом обогащенных биогенными веществами вод.

Сравнение результатов экспедиционных исследований, выполненных в северо-западном и северо-восточном глубоководных районах Черного моря в теплое время года, выявил следующие основные различия:

— на всех станциях в исследуемый период ВПС был хорошо прогрет (в среднем от $24,8$ до $26,4^\circ\text{C}$), но на станциях в зоне конвергенции толщина ВПС была больше, чем на станциях в зоне слабых вертикальных движений или зоне дивергенции;

— в северо-восточной части моря ИИСГ была выше, чем в северо-западной, в первую очередь за счет подъема воды, обусловленного завихренностью приповерхностного ветра.

Заключение

В исследуемый период в вертикальном распределении интенсивности свечения гидробионтов на большинстве станций наблюдался один максимум интенсивности биолюминесценции, характеризующий повышение концентрации гидробионтов и увеличение биологической продуктивности вод. Он располагался в верхней части сезонного термоклина при средней температуре $\sim 20,5^\circ\text{C}$. На глубоководных станциях в северо-западной части моря, в зоне слабых вертикальных движений наблюдались два максимума. Верхний максимум обусловлен развитием теплолюбивых, а нижний (расположенный в холодном промежуточном слое) — холодолюбивых комплексов гидробионтов.

Средняя ИИСГ на станциях в зоне дивергенции северо-восточной части Черного моря составляла $\sim 9200 \text{ пВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$, что было самым высоким значением ИИСГ в исследуемых глубоководных районах. Эта величина в 1,5 раза превышала среднюю ИИСГ для станций, расположенных в зоне слабых вертикальных движений и области конвергенции в северо-западной части моря, что объясня-

ется более активным обогащением вод биогенными веществами за счет более интенсивных восходящих движений.

Интегральная интенсивность свечения гидробионтов в северо-восточной части глубоководной акватории Черного моря выше, чем в северо-западной. Это свидетельствует о более высокой биологической продуктивности вод первого субрегиона моря по сравнению со вторым.

Благодарности. Считаю своим долгом выразить признательность анонимному рецензенту за очень обстоятельную рецензию и критические замечания, высказанные по поводу первого варианта работ.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания 124020100120-9 «Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость морской среды и прилегающих территорий в широком диапазоне масштабов».

Список литературы

1. Филиппов Д.М. Циркуляция и структура вод Черного моря. М.: Наука, 1968. 260 с.
2. Полонский А.Б., Ловенкова Е.А. Долговременные тенденции в изменчивости характеристик пикноклина Черного моря // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2006. Т. 42, № 3. С. 419–430.
3. Stanev E.V. On the mechanisms of the Black Sea circulation // Earth Sci. Rev. 1990. V. 28. P. 285–319.
4. Oguz T., Malanotte-Rizzoli P. Seasonal variability of wind and thermohaline driven circulation in the Black Sea: Modeling studies // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 16551–16569.
5. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Изменение сезонного хода геострофической циркуляции в Черном море // Морской гидрофиз. журн. 2010. № 1. С. 16–31.
6. Korotaev G.K., Oguz T., Nikiforov A., Koblinsky C. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N C4. P. 3122. DOI: 10.1029/2002JC001508.
7. Кривошея В.Г., Москаленко Л.В., Мельников В.А., Скирта А.Ю. Влияние изменчивости ветрового режима и термических условий на структуру и динамику вод северо-восточной части Черного моря // Океанология. 2012. Т. 52, № 4. С. 484–497.
8. Polonsky A.B. Upwelling in the Northern Black Sea: Description, Mechanisms and Impact on Chlorophyll-A concentration In book: Upwelling: Mechanisms, Ecological Effects and Threats to Biodiversity / W.E. Fischer, A.B. Green (eds.). New York: Nova Science, 2013. P. 59–76.
9. Зацепин А.Г., Елкин Д.Н., Корж А.О., Куклев С.Б., Подымов О.И., Островский А.Г., Соловьев Д.М. О влиянии изменчивости течения в глубоководной зоне Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа // Морской гидрофиз. журн. 2016. № 3. С. 16–25.
10. Сапожников В.В., Аржанова Н.В., Мордасова Н.В., Полякова А.В. Влияние вихревых образований на распределение биогенных элементов и хлорофилла в северо-восточной части Черного моря // Океанология. 2002. Т. 42, № 4. С. 511–517.
11. Зацепин А.Г., Голенко Н.Н., Корж А.О., Кременецкий В.В., Пака В.Т., Поярков С.Г., Стунжас П.А. Влияние динамики течений на гидрофизическую

- структуру вод и вертикальный обмен в деятельном слое Черного моря // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 3. С. 327–339.
12. Полонский А.Б., Джиганиш Г.Ф. Структура и мезомасштабная изменчивость основного черноморского течения у побережья Крыма // Докл. Национальной академии наук Украины. 2010. № 6. С. 107–112.
 13. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
 14. Tuzhilkin V.S. General Circulation. The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry / A. Kostianoy, A. Kosarev (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5, Part Q. P. 159–194.
 15. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г., Кривошея В.Г., Скирта А.Ю., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Якубенко В.Г. Отделение прибрежных антициклонических вихрей от Кавказского берега и их трансформация в вихри открытого моря // *Компл. иссл. сев.-вост. части Черного моря*. М.: Наука, 2002. С. 82–91.
 16. Сеничева М.И. Видовое разнообразие, сезонная и межгодовая изменчивость микроводорослей в планктоне у берегов Крыма // *Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 5–17.
 17. Заворуев В.В., Заворуева Е.Н., Крум С.П. Распределение планктона в районах фронтальных зон водных экосистем. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 292 с.
 18. Токарев Ю.Н., Евстигнеев П.В., Машукова О.В. Планктонные биолуминесцентные Мирового океана: видовое разнообразие, характеристики светоизлучения в норме и при антропогенном воздействии. Симферополь: Нижняя Орианда, 2016. 340 с.
 19. Perin L.S., Moraes G.V., Galeazzo G.A., Oliveira A.G. Bioluminescent dinoflagellates as a bioassay for toxicity assessment // *Int. J. Mol. Sci.* 2022. V. 23. P. 13012. DOI: 10.3390/ijms232113012.
 20. Битюков Э.П., Хлыстова Л.М. Биолуминесценция в неритической зоне Черного моря и ее связь с характеристиками планктона // *Биология моря*. 1975. Вып. 34. С. 100–109.
 21. Черепанов О.А., Левин Л.А., Утюшев Р.Н. Связь биолуминесценции с биомассой и численностью светящегося и всего планктона. 2. Черное море // *Морской экологический журн.* 2007. Т. 6, № 3. С. 84–89.
 22. Mashukova O., Silakov M., Temnykh A. Ecological role of bioluminescence of Black sea ctenophores // *Biophys. Rev.* 2023. V. 15, N 5. P. 947–954. DOI: 10.1007/s12551-023-01155-5.
 23. Полонский А.Б., Мельникова Е.Б., Серебренников А.Н. Особенности изменчивости интенсивности свечения планктонного сообщества в прибрежной зоне Черного моря в весенний и осенний периоды // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 8. С. 633–640. DOI: 10.15372/AOO20190805; Polonsky A.B., Mel'nikova E.B., Serebrennikov A.N. Features of the variability of the bioluminescence intensity of the plankton community in the nearshore zone of the Black Sea in the spring and autumn periods // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 2. P. 146–153.
 24. Хэмминг Р.У. Цифровые фильтры. М.: Советское радио, 1980. 257 с.
 25. Stommel H.M. The Gulf Stream. A Physical and Dynamical Description. Berkeley: Univ. Calif. Press, 1958. 202 p.
 26. Микаэлян А.С., Завьялова Т.А. Вертикальное распределение гетеротрофного фитопланктона Черного моря в летний период // *Океанология*. 1999. Т. 39, № 6. С. 895–902.
 27. Заика В.Е. Экология ноктилюки *Noctiluca Scintillans* (Macartney) в Черном море // *Морской экологический журн.* 2005. Т. IV, № 4. С. 42–48.
 28. Селифонова Ж.П., Ясакова О.Н. Вертикальная структура фито- и зоопланктона северо-восточной части Черного моря (район Геленджика) // *Бюлл. Московского Общества испытателей природы*. 2012. Т. 117, № 5. С. 31–37.
 29. Тамайчук А.Н. Специфика региональной дифференциации глубоководной части Черного моря // *Уч. записки Таврического национального ун-та им. В.И. Вернадского. Сер.: Географ.* 2010. Т. 23, № 1. С. 84–90.

A.B. Polonsky, E.B. Mel'nikova, A.N. Serebrennikov. Comparative study of the vertical distribution of bioluminescence intensity in the north-western and north-eastern parts of the Black Sea.

The spatiotemporal distribution of the intensity of bioluminescence formed by hydrobionts in the Black Sea based on the data of expeditionary research conducted in June 2013 and September 2014 during the voyages of NIS "Professor Vodyanitskiy" (IBSS) was investigated. Comparison of this characteristic in the N–W and N–E parts of the Black Sea has been done. Satellite data on near-surface wind and geostrophic currents are used to explain the causes of spatiotemporal variations in the intensity of hydrobiont bioluminescence. It has been shown that in the vertical distribution of bioluminescence intensity, most stations had one maximum at the top part of the seasonal thermocline. At deep-sea stations in the north-western part of the sea located in the zone of weak vertical movements, two maxima were observed due to the development of heat-loving hydrobiont species in the upper maximum and cold-loving species in the lower one. The maximum values of the integral intensity of hydrobiont glow were observed in the divergence zone in the deep-water north-eastern part of the sea, which is explained by more active enrichment of waters with biogenic substances due to more intense upward movements. Obtained results can be utilized for more accurate assessment of the upper layer water bioproduktivty in the Black Sea from satellite data.