



УДК 577.472(262.5):591.148:574.52

Ю. Н. Токарев¹, докт. биол. наук, зав. отделом, **Э. П. Битюков¹**, канд. биол. наук, ст. н. с.,
В. И. Василенко¹, вед. инженер, **Р. Вильямс²**, д-р. фил., **Д. Я. Слипецкий¹**, вед. инженер,
Б. Г. Соколов^{1†}, вед. инженер

¹ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского Национальной Академии наук Украины,
Севастополь, Украина

² Plymouth Marine Laboratory, Prospect Place, The Hoe, Plymouth PL1 3DH, Devon, United Kingdom.

ДИНАМИКА ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ПЛАНКТОНА В ВОСТОЧНОЙ АТЛАНТИКЕ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Исследовано влияние гидрологических параметров водных масс, видового состава и обилия планктона на пространственную изменчивость амплитудных характеристик поля биолюминесценции вдоль 20⁰ з.д. в Атлантическом океане. Показано, что вертикальное распределение интенсивности поля биолюминесценции коррелирует с количественным развитием фито- и зоопланктона, распределение которых обусловлено концентрацией биогенных элементов и вертикальной структурированностью основных гидрофизических характеристик. Предложено использовать результаты анализа пространственной структуры и амплитудно-временной изменчивости биолюминесценции в различных климатических зонах восточной части Атлантического океана для визуализации вертикальной структуры планктонного сообщества и проведения экспресс-типизации водных масс.

Ключевые слова: Атлантический океан, биолюминесценция, планктон, пространственная изменчивость, циркуляция водных масс

За длительную историю развития морской планктонологии накоплен большой объём информации о составе и распределении планктона в Атлантическом океане. Об этом свидетельствуют разнообразные схемы и карты, первые из которых составлены Е. Геншелем [16] и Х. Фридрихом [17], продолжены затем И. П. Канаевой [10] и В. Г. Богоровым с соавторами [5]. Тенденции обобщения сохранились и к настоящему времени [12, 18, 20]. В результате стала очевидной зональная неоднородность планктона, соответствующая климатическим зонам и схеме преобладающих течений.

На этом фоне детали мелкомасштабного (метры – сотни метров) распределения планктона - фундаментальной основы функционирования пелагической экосистемы - изучены недостаточно, что обусловлено, прежде всего, методическими трудностями сбора и обработки статистически достоверного для таких масштабов материала. В связи с этим выполняемые в реальном масштабе времени определения формируемых планктоном экспрессных биофизических (в первую очередь поля биолюминесценции) характеристик, существенно дополняют особенности пространственно-временной изменчивости пелагичес-

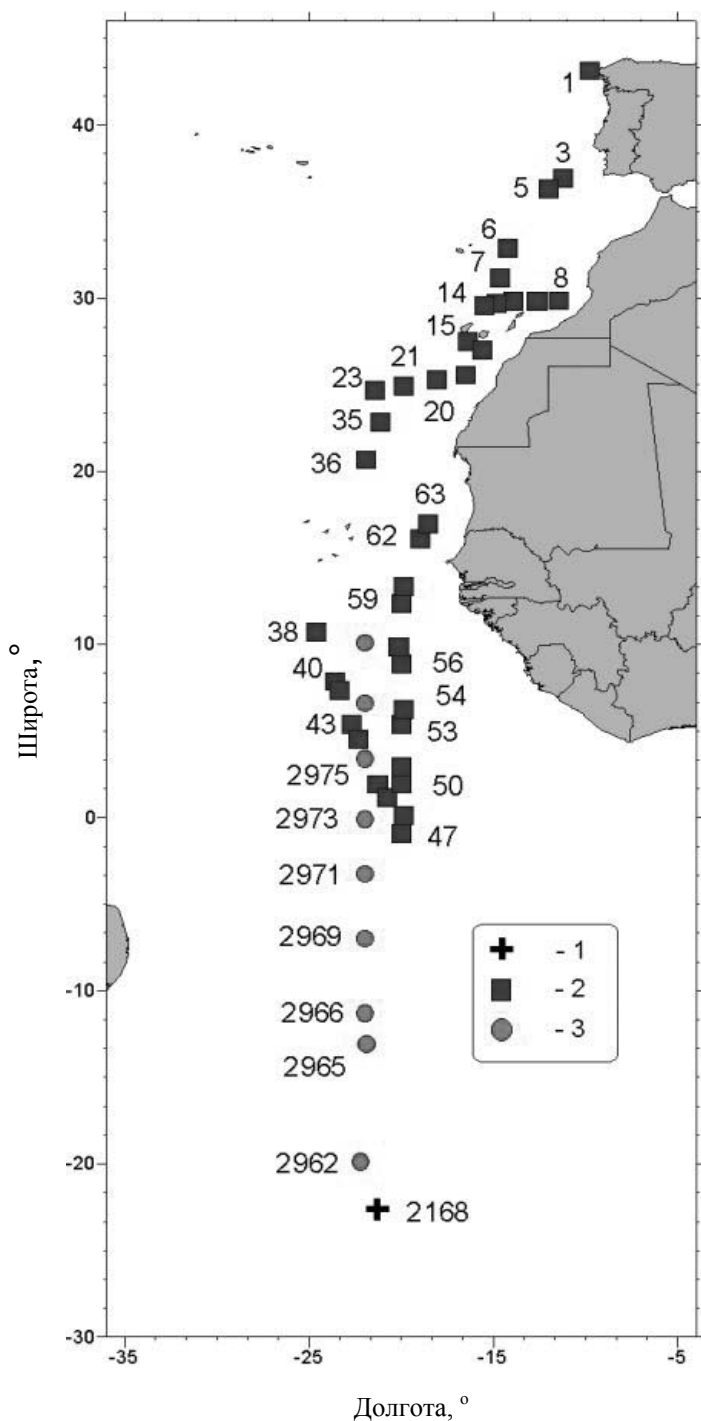
кого сообщества.

Методика визуализации пространственной структуры планктона с помощью метода батифотометрического зондирования, основанная на тесных корреляционных связях между количественными характеристиками планктонного и биолюминесцентного полей, позволяет оценить ее специфику на пространственных шкалах различного масштаба [1, 21, 23]. Динамичность структурно-функциональных характеристик планктона определяет временную неустойчивость и пространственную неоднородность поля биолюминесценции (ПБ), связанную с особенностями биологии светящихся организмов. Типичная картина светового поля представлена постоянным уровнем астрономического фона с возвышающимися над ним импульсами от биолюминесценции. Частотно-амплитудный спектр этих импульсов обуславливает суммарный световой эффект - от отдельных разрозненных вспышек, когда по времени преобладает темнота, до сливного свечения, когда море сияет.

Результатом исследований пространственно-временных особенностей ПБ, выяснения спектра его амплитудно-частотных характеристик и степени их связи с биологическими и океанологическими параметрами было создание в ИнБЮМ НАН Украины базы данных по бассейну Атлантического океана. В базу данных вошли определения интенсивности поля биолюминесценции (ИПБ) по 1-метровой последовательным слоям по вертикали, сопутствующие характеристики гидрологического поля, а также данные о составе и количественном развитии фито- и зоопланктона [22]. База данных сформирована 9697 зондированиями ПБ преимущественно до глубины 200 м, таким же количеством сопутствующих зондирований температуры и электропроводности морской воды, 474 пробами фито- и 1076 про-

бами зоопланктона, собранными по традиционной методике на 1244 станциях в 36 экспедициях.

Представление данных в стандартизированной форме с результатами статистической обработки дало возможность проводить сравнение собранного материала на обширных акваториях. Так, реализация возможностей, появившихся после создания подобной базы данных, позволила проанализировать материалы, полученные в зимний сезон на разрезе протяженностью около 4000 миль, расположенном преимущественно по 20° з.д. Разрез пересекал акваторию у западных берегов Пиренейского полуострова, северо-западной и центральной частей африканского материка, а также северную и центральную части Южно-Атлантического антициклонального круговорота течений. Основная цель анализа заключалась в определении влияния топографии водных масс различного генезиса на особенности вертикальной и горизонтальной неоднородности ПБ в слое 0 - 100 м в качестве показателя структуры материка. Из базы данных выбраны результаты двух рейсов НИС “Профессор Водяницкий” и одного - НИС “Михаил Ломоносов”, когда исследования выполнялись в декабре - январе по сходной методике. На восточной периферии Северо-Атлантического антициклонального круговорота, в основном по меридиану 20° з.д., в 1-ом рейсе НИС “Профессор Водяницкий” в 1976 - 1977 гг. выполнена 41 станция. В декабре 1985 г. в 20-м рейсе того же судна исследования провели на 12 станциях в тропической зоне по 22° з. д., и, наконец, результаты измерений в центральной части Южно-Атлантического антициклонального круговорота на 21°30' з. д. получены по материалам 27-го рейса НИС “Михаил Ломоносов” в феврале 1973 г. (рис. 1).



Акваторию от 43° с. ш. до 24° с.ш. исследовали в 1-ом рейсе при движении к югу на протяжении 10-ти суток с 24 декабря 1976 г. Измерения на остальной части разреза по меридиану 20° з. д. от 1° ю. ш. выпол-

Рис. 1 Распределение станций с измерениями поля биолюминесценции в 27 рейсе НИС «Михаил Ломоносов» (1), а также в 1 и 20 рейсах НИС «Профессор Водяницкий» (2 и 3, соответственно)

Fig.1 Distribution of the stations with the bioluminescence field measurements in the 27-th cruise of the R/V "Mikhail Lomonosov" (1), and also in the 1-st and 20-th cruises of the R/V "Professor Vodyanitsky" (2 and 3, correspondingly)

нены 20 - 27 января 1977 г. в обратном направлении. В 20-м рейсе исследования провели от 20° ю. ш. до 9°30' с. ш. по меридиану 22° з.д. 8 - 20 декабря 1985 г. Ниже приведем обоснование корректности объединения этих выборок, сделанных в сходный сезон, хотя и в различные годы.

Пространственную неоднородность и временную неустойчивость ПБ, а также соответствующие параметры полей температуры и солёности определяли методом батифотометрического зондирования. Методика измерений была стандартной для биофизических исследований ИнБЮМ НАН Украины, а её различные модификации достаточно подробно описаны ранее [2, 4, 8, 12, 21]. Величины ИПБ переводили в абсолютные величины суммарной мощности излучения, отнесенные к объему воды 1 л, используя соответствующие переводные коэффициенты, полученные при применении радиоломинесцентных эталонных источников света. Корректность определения нами ИПБ позднее подтверждена синхронными интеркалибровочными работами с применяемым исследователями США батифотометром HIDEX [25].

В 20 рейсе НИС “Профессор Водяницкий” методика измерений характеристик ИПБ характеризовалась тем, что вместо одноразового зондирования использовали метод многократного батифотометрического зондирования. В этом рейсе на каждой станции выполняли не менее 20 зондирований с интервалом в 4 мин. С учетом дрейфа судна относительно поверхности воды под воздействием ветра дискретность каждого последовательного зондирования составляла обычно около 20 м.

В результате многократного зондирования получали двумерные матрицы полей биолюминесценции, температуры и солёности, соответствующие трансекте дрейфа судна. Матрицы подвергали статистической обработке. В частности, оценивали средние величины измеренных параметров и их ошибку для слоя 1 - 100 м, а также определяли частоты вариантов 11 классовых интервалов полученного вариационного ряда. Детали структуры ИПБ на каждой станции иллюстрировали вертикальным профилем, который своей ИПБ соответствовал средним величинам по всей серии измерений. Именно такая методика предоставила обоснование возможности объединения, на наш взгляд достаточно корректно, измерений, выполненных на локальной акватории в один сезон, хотя и в различные годы.

Измерения биолюминесценции проводили через 1 ч после окончания навигационных сумерек, поэтому их можно считать стационарными по времени наблюдения. Таким образом, обнаруживаемые изменения ИПБ обусловлены пространственной неоднородностью распределения планктона, а не особенностями его миграции или суточной ритмикой свечения биолюминесцентных организмов.

Сбор проб зоопланктона осуществляли тотальными ловами с глубины 200 м сетью Джели с диаметром входного отверстия 36 см, оснащенной мелкоячеистым газом с размером ячеек сита 116 мкм. Обработка собранного ма-

териала заключалась в определении объема сестона в волюмометре Яшнова с последующим просмотром под биноклем для выявления массовых форм.

Пробы фитопланктона собирали 5-литровым батометром, крепившимся на 1 м выше батифотометра. Из батометра брали 1 л воды, фитопланктон из которой после отстаивания и концентрации в камеральных условиях исследовался традиционным счетно-весовым методом. Пробы фототрофного пикопланктона [9] и микрозоопланктона, также собирали батометром.

Результаты. В табл. 1 приведены статистические показатели ИПБ по станциям со сходными координатами для подтверждения правомочности объединения выборок, полученных в этих рейсах. Из материалов таблицы видно, что выполненные на станции 2973 с суточным интервалом измерения показали стационарность характеристик биолюминесценции в слое 1 - 100 м. В 1977 г. на ст. 48 и 46, расположенных на сходной широте, ИПБ также практически идентична, близкая к $140.0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$. Такая ИПБ выше, чем на ст. 2973, однако соответствовала высшему классовому интервалу вариант ИПБ, которых оказалось 6. Вероятность совпадения ИПБ на экваторе, определенная в разные годы, составила 28 %.

Близкое совпадение измерений ИПБ было на парных станциях 45 или 51 с таковыми на ст. 2975, а также на ст. 57 и ст. 2979. Однако в Межпассатном течении показания ИПБ на ст. 2977 и ст. 2978 значительно меньше, чем на ст. 56 и ст. 57, соответственно. Известно, что динамическая активность струй Межпассатного течения характеризуется межгодовой изменчивостью [6, 7].

Таблица 1. Средняя интенсивность (\bar{x}) биолюминесценции ($\bullet 10^{-12} \text{Вт} \bullet \text{см}^{-2} \bullet \text{л}^{-1}$), её лимиты (мин, макс) и распределение по классовым интервалам на станциях экваториальной зоны в 1 и 20 рейсах НИС “Профессор Водяницкий”

Table 1. Average intensity (\bar{x}) of the bioluminescence ($\bullet 10^{-12} \text{W} \bullet \text{cm}^{-2} \bullet \text{l}^{-1}$), its limits (min, max) and distribution on the class intervals at the stations of the equatorial zone in the 1-st and 20-th cruises of the R/V “Professor Vodyanitsky”

1 рейс		20 рейс								
Станция	\bar{x}	Станция	\bar{x}	<19	20 - 59	60 - 99	100 - 129	130 - 160	мин	макс
48	141.6	2973а	113.1	-	-	6	9	6	72	152
46	140.6									
48	141.6	2973 б	109.1	-	-	10	24	6	85	142
46	140.6									
44	90.6	2975	73.4	-	5	24	1	-	53	116
45	80.7									
51	97.8	2977	23.4	4	16	-	-	-	14	47
56	144									
57	77.4	2978	39.0	-	20	-	-	-	24	53
		2979	80	-	1	19	-	-	59	97

Очевидно, именно это привело к таким отличиям интегральной характеристик ИПБ. Тем не менее, поскольку из 6 сравниваемых парных станций на 4-х выявлен близкий уровень ИПБ и сходный характер ее вертикальной структуры, объединение результатов, полученных в этих рейсах, оказалось правомочным.

В связи со спецификой гидрологического режима и количественного развития планктонного населения в расположенных по разрезу водных массах характеристики ПБ различались в разных районах. Общей чертой ПБ явилось наличие в верхней 100-метровой толще чередующихся слоев с повышенной или пониженной биолюминесценцией. На этом основании можно считать, что на большей части исследованной акватории существуют слои, иногда весьма тонкие, повышенной концентрации организмов.

Другой общей чертой структуры ПБ оказалась сопряженность вертикального распределения ИПБ с вертикальным распределением плотности воды, рассчитанной по показателям электропроводности и температуры.

На рис. 2 представлены типичные вертикальные структуры ПБ, температуры и солености, характеризующие различные водные массы, а на рис. 3 – топография ПБ. В табл. 2 представлено распределение частот ИПБ по 1-метровым слоям, отличия по которым также являются достаточно показательными для различных акваторий.

Интегральные характеристики ИПБ по слоям 1 - 100 и 1 - 50, положение верхней границы слоя температурного скачка и изменения температуры поверхностного слоя и на глубине 100 м иллюстрирует рис. 4. Расположение показателей температуры у поверхности и на глубине 100 м характеризует протяженность изотермического слоя. Там, где абсолютные показатели температуры на этих глубинах близки, изотермический слой оказывается протяженным, занимая почти всю 100-метровую толщу. При различной температуре на этих глубинах наблюдается ее резкая стратификация. В таком случае указание положения верхней границы слоя температурного скачка оказывается важным информационным признаком.

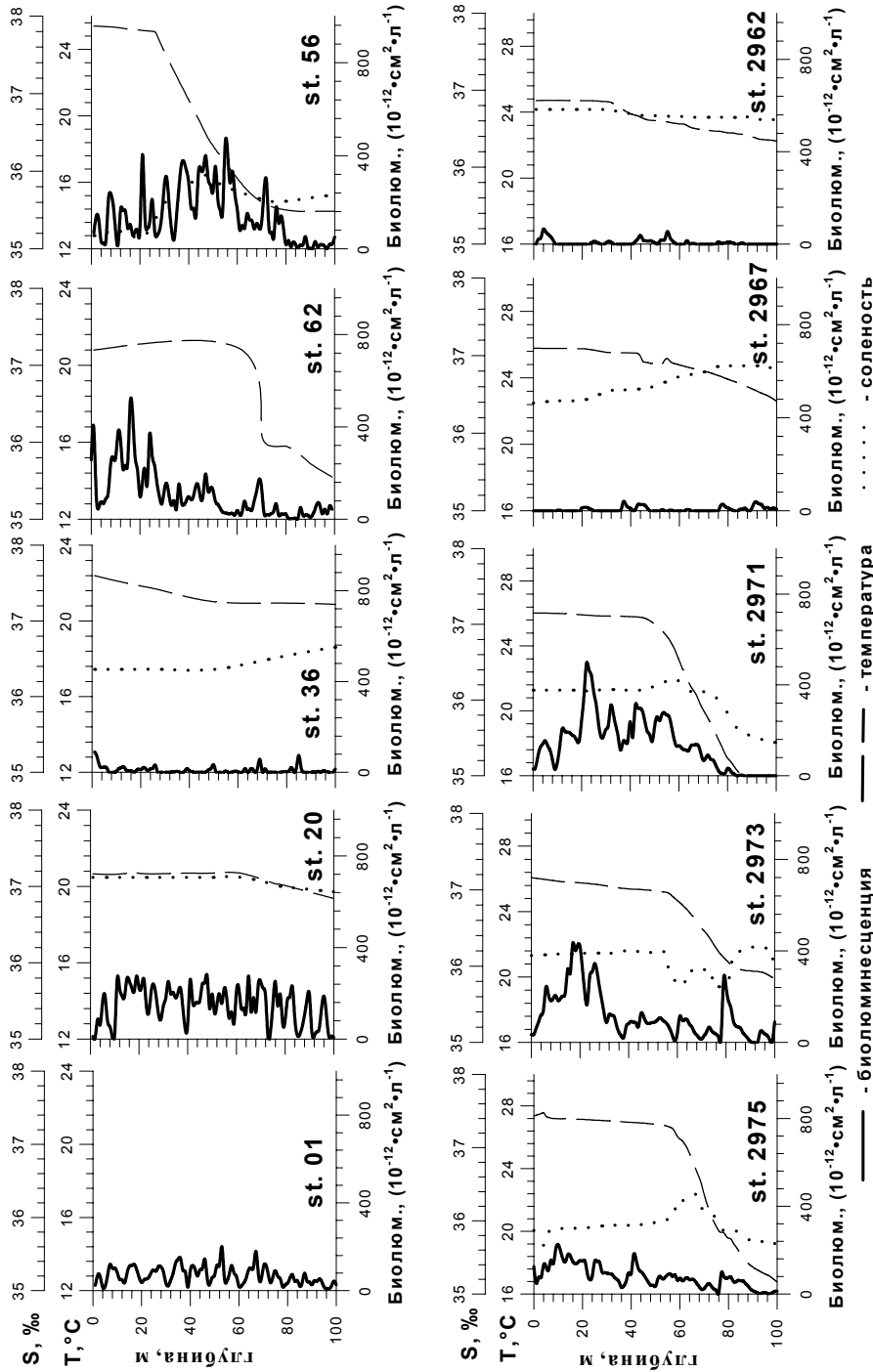


Рис. 2 Типичные профили вертикальной структуры ИПБ (1), температуры (2) и солёности (3) в субарктической (st. 01), северо-тропической (st. 20), субтропической вне Канарского течения (st. 36), в Канарском течении (st. 62), в Северо-Пассатном течении (st. 56), в Межпассатном противотечении (st. 2975), в районе Экваториального противотечения Ломоносова (st. 2973), в Южно-Пассатном течении (st. 2971), в южно-тропической (st. 2967) и центральной водных массах Южно-Атлантического антициклонного круговорота (st.2962)
 Fig.2 Typical profiles of the BFI vertical structure (1), temperature (2) and salinity (3) in the subarctic (st. 01), the north-tropical (st. 20), the subtropical out of Canary current (st. 36), in the Canary current (st. 62), in the north-trade wind current (st. 56), in the intratrade wind countercurrent (st. 2975), in the region of the Lomonosov equatorial countercurrent (st. 2973), in the south-trade wind current (st. 2971), in the south-tropical (st.2967) and central water masses of the south Atlantic anticyclone circulation (st. 2962)

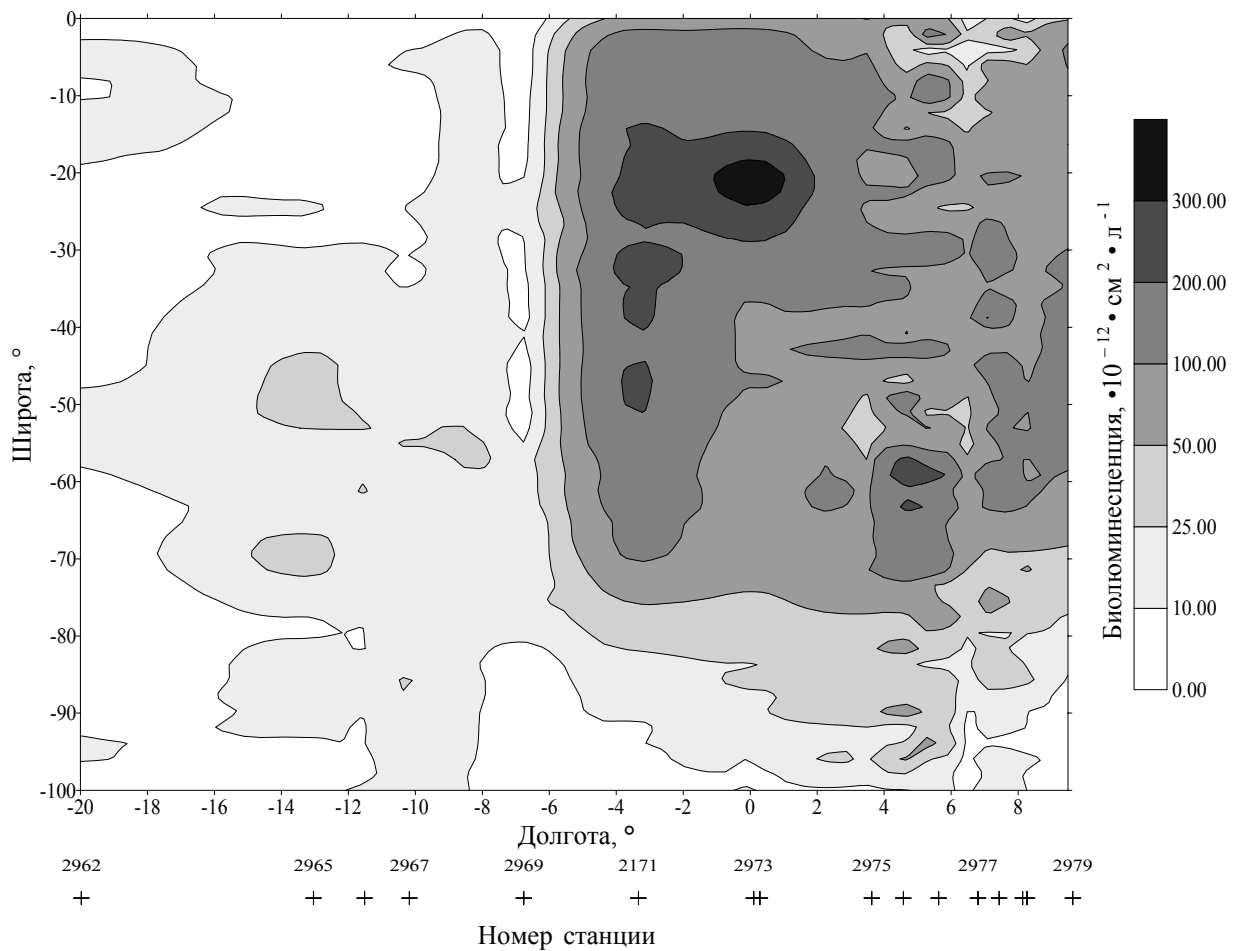


Рис. 3 Топография поля билюминесценции по 20-му градусу западной долготы
 Fig.3 Bioluminescence field topography along the 20⁰ of the western longitude

Северный участок разреза занимает субарктическая водная масса, формируемая струями Северо-Атлантического течения с температурой верхнего гомотермного слоя 12,5⁰С и слабо выраженным слоем температурного скачка на глубине около 110 м. Этот участок характеризуется умеренной билюминесценцией во всем гомотермном слое. Только ниже термоклина она снижается примерно в два раза. Вертикальной структуре ПБ свойственно наличие чередующихся слоев повышенной и пониженной билюминесценции, толщина которых не превышает 2 - 5 м.

По мере дрейфа водной массы примерно на 600 миль в южном направлении температура поверхностного слоя повышается. Ход

изобиолюмин свидетельствует о значительном трансформировании вертикального распределения планктона. Повышение температуры на 3 - 3,5⁰ С приводит к замене североатлантических видов организмами более теплолюбивыми, среди которых видовой состав билюминесцентоов существенно выше, однако их количество еще невелико. Соответственно уровень ПБ также оказывается низким. Его вертикальной структуре характерно чередование тонких слоев с повышенными и пониженными показателями.

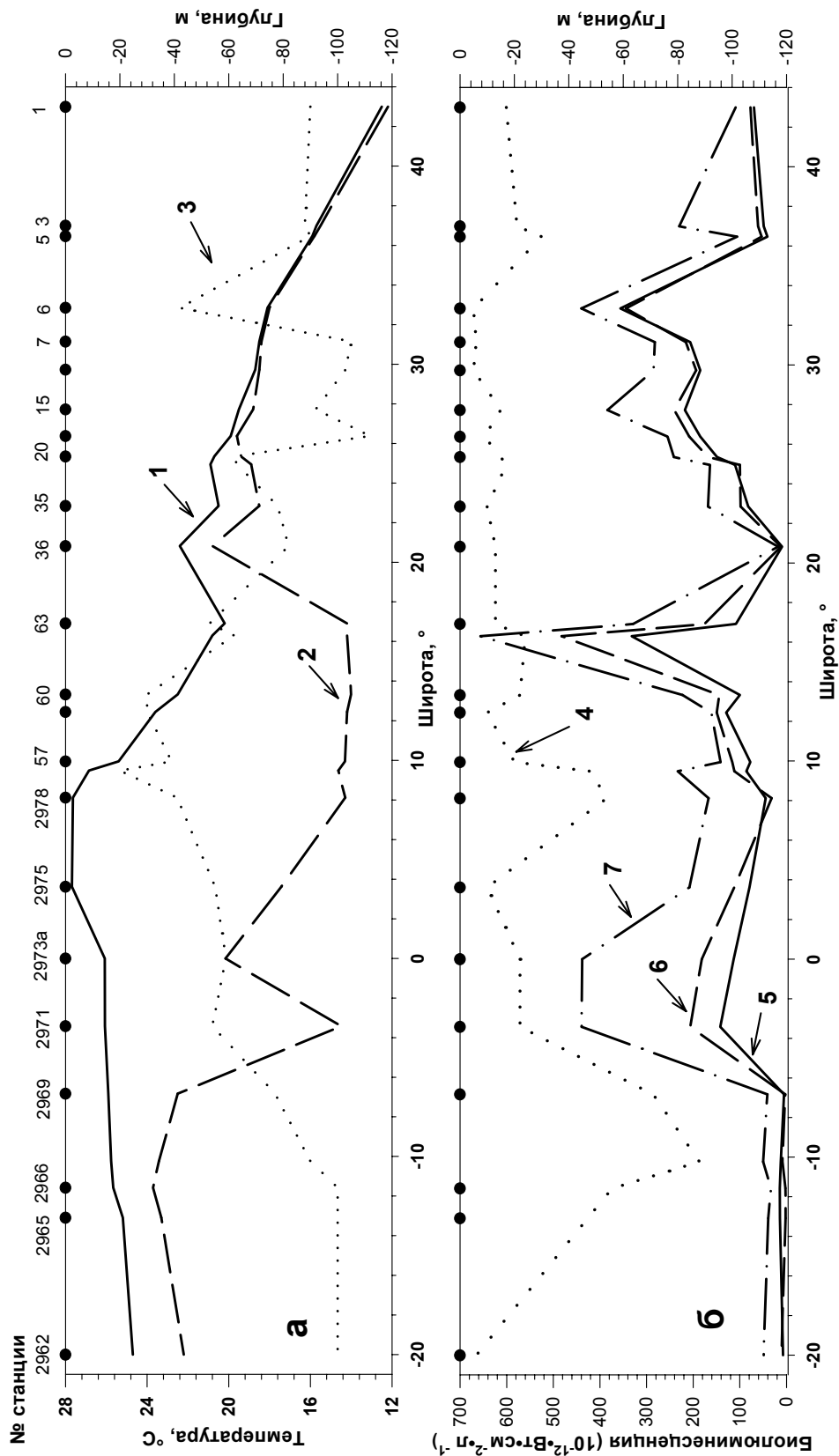


Рис 4. Распределение температуры и биолюминесценции в Атлантическом океане вдоль 20⁰ з.д.: «а» - температура воды у поверхности (1) и на 100м (2), а также глубина верхней границы термоклина (3); «б» - глубина залегания горизонта максимальной светимости (4), а также интенсивность биолюминесценции в слоях 1-100м (5), 1-50м (6) и на горизонте максимальной светимости (7)
 Fig. 4. Temperature and bioluminescence distribution along the 20⁰ meridian: “a” - surface temperature (1), temperature on horizon of the 100 m depth (2) and depth of the upper boundary of thermocline (3); “b” - depth of the maximum bioluminescence horizon (4), bioluminescence intensities in the 1-100 m layer (5) and in 1-50 m layer (6) as well as at the maximum bioluminescence horizon (7)

Таблица 2. Частотный спектр классовых интервалов интенсивности биолюминесценции ($\bullet 10^{-12}$ Вт \bullet см $^{-2}$ ·л $^{-1}$) по однометровым слоям в верхней 100-метровой толще воды в различных водных массах
 Table 2. Frequency spectrum of the bioluminescence intensity class intervals ($\bullet 10^{-12}$ W \bullet cm $^{-2}$ ·l $^{-1}$) of the 1-meter layers in the upper 100-m water column in different water masses

Водная масса	Стан-ция	БП слоя 0 - 100	Классовые интервалы								
			0	1 - 49	50 - 99	100 - 199	200 - 299	300 - 399	400 - 499	500 - 599	> 600
Субарктическая	1	69.4	-	34	43	22	1	-	-	-	-
Северо-тропическая	20	148.8	-	16	12	42	30	-	-	-	-
Субтропическая вне Канарского течения	36	9.5	28	68	4	-	-	-	-	-	-
Канарское течение	62	332.1	1	16	14	14	10	7	8	11	29
Северо-Пассатное течение	56	143.6	-	25	21	28	12	10	4	-	-
Межпассатное противотечение	2975	79.3	-	30	44	24	2	-	-	-	-
Противотечение Ломоносова	2973	107.6	11	36	15	20	6	7	3	2	-
Южно-пассатное течение	2971	141.9	15	13	8	35	20	6	3	-	-
Тропическая область южного круговорота	2967	12.2	35	64	3	-	-	-	-	-	-
Центральная часть южного круговорота	2962	7.2	52	48	-	-	-	-	-	-	-

Акватории между 33⁰ и 25⁰ с.ш., занятой северной субтропической водной массой, свойственна интенсивная биолюминесценция, образующая сливные импульсы (рис. 2). Такой уровень ИПБ наблюдался до 100 - 110 м, т.е. в “канарской поверхностной водной массе” [11]. Резкие градиенты биолюминесценции приходились на область соприкосновения с “центральной североатлантической водной массой”, характеризующейся более низкой температурой и повышенными показателями солености [15]. Например, на ст. 6 на глубине 110 м интенсивность биолюминесценции на протяжении 5 м по вертикали уменьшилась в слое температурного скачка в 120 раз. Глубже биолюминесценция представлена отдельными вспышками от единичных биолюминесцентных. В верхней гомотермной зоне образовались 3 - 4 тонких слоя повышенной светимости, разделенных 15 - 20 м водной толщи с пониженной

в 2 - 3 раза биолюминесценцией. Средняя величина биолюминесцентного потенциала верхнего гомотермного слоя и слоя 1 - 50 м оказались высокими, соответствуя 300.0 $\bullet 10^{-12}$ Вт \bullet см $^{-2}$ ·л $^{-1}$ (рис. 4). В отдельных слоях интенсивность биолюминесценции превышала 900.0 $\bullet 10^{-12}$ Вт \bullet см $^{-2}$ ·л $^{-1}$ (табл. 2).

Субтропическая водная масса, расположенная вне Канарского течения, характеризовалась умеренным уровнем биолюминесценции (около 80.0 $\bullet 10^{-12}$ Вт \bullet см $^{-2}$ ·л $^{-1}$) и близким по всей глубине биолюминесцентным потенциалом. Слои повышенной светимости не локализованы по определенным глубинам и имели незначительное повышение биолюминесценции. Например, на ст. 36, которую можно считать типичной для восточной периферии Северо-Атлантического антицикло-

нального круговорота с распространяющимся до глубин 120 м обширным гомотермным слоем, интенсивность биолюминесценции в слое 1 - 100 м на порядок ниже, не превышая $9.5 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$ (рис. 2 и 3). Только 4 однометровых слоя, которые случайным образом располагались в верхней 100-метровой толще, относились к классовому интервалу от 55.0 до $99.0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$ (табл. 2). Содержание сестона на этой станции незначительно - $0.067 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$.

Акватория южнее 20° с.ш. со сложной системой течений занята Северо-Тропической водной массой. Участок, прилегающий к материку, представлен водами Канарского течения, пополняющегося глубинными водами прибрежных апвеллингов. Для этого участка характерны высокое развитие биомассы планктона, достигающее местами $0.29 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ в слое 1 - 200 м, и интенсивная биолюминесценция во всей гомотермной зоне. Резкое возрастание биомассы планктона происходит здесь, главным образом, за счет многочисленных видов копепод, доля которых составляла около 40 % объема сестона. В гомотермной зоне, на фоне средней ИПБ, соответствующей $400.0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$, в слоях повышенной светимости биолюминесценция была в 2 раза интенсивнее.

К югу от о-вов Зеленого Мыса эвфотический слой формируется Северно-Пассатным течением, в котором можно выделить несколько струй с повышенной скоростью переноса, и Межпассатным противотечением. Взаимодействие этих потоков обуславливает эффект поперечной циркуляции [13, 14], вызывающей поднятие обогащенных биогенными веществами глубинных вод, способствующих развитию планктона и, как функции его жизнедеятельности, повышенной биолюминесценции (рис. 2 и 3). Особенно высокая интенсивность свечения отмечена на ст. 62, на которой на глубине 30 - 45 м в слое, находившимся над

термоклин, она превышала $800.0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$. Эта станция имела типичную для вод Северо-Пассатного течения термохалинную структуру. Прогретая всего до 21°C толща воды с относительно низкой соленостью занимала верхний 60-метровый слой. Глубже располагался термоклин, в котором на 5-метровом интервале глубин температура понижалась почти на 6°C . Степень развитости ПБ в этих водах оказалась высокой. Его вертикальное распределение характеризовалось наличием двух слоев повышенной светимости. Над слоем температурного скачка располагалась примерно 20-метровая толща с наиболее высокой биолюминесценцией. Второй слой повышенной светимости, толщиной 8 - 10 м, имел горизонт с максимальной интенсивностью на глубине около 20 м.

В Межпассатном противотечении находилась ст. 2975. В гомотермном слое, прогретом до 28°C и имевшем толщину около 60 м, наблюдалось плавное увеличение солености, темп нарастания которой возрос в термоклине. Однако распределение планктона, показателем которого явилась биолюминесценция, не оказалось адекватным гидрофизической ситуации. В толще воды формировались несколько слоев повышенной светимости, незначительно превышавших по интенсивности рядом расположенные слои. Из-за слабой развитости биолюминесценции в слоях повышенной светимости и ее относительно низкого уровня на остальных глубинах, величина интегральной биолюминесценции в слое 1 - 100 м не превышала $70.0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$, оказываясь почти в 2 раза слабее, чем в Северо-Пассатном течении. Сетного сестона в этом районе в слое 1 - 200 м было в среднем около $0.1 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$. В основном мезозoopланктон в нем

представлен копеподами, сагиттами и полихетами.

Экваториальная водная масса, располагающаяся на 6^0 от экватора к северу и к югу, соответствует струям Южно-Пассатного течения с температурой верхнего квазиоднородного слоя выше 27^0C . Толщина этого слоя относительно невелика. Верхняя граница термоклина наблюдалась на глубинах 35 - 45 м. Только на станции 47, очевидно из-за глубинного противотечения Ломоносова, этот слой имел толщину около 70 м. Необходимо отметить, что именно на этой станции наблюдался самый высокий уровень развития планктона, биомасса которого в слое 1 - 200 м составляла $0.52 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$. Во время 20 рейса НИС "Профессор Водяницкий" в этом районе также выявлена максимальная численность суммарного фитопланктона, средняя величина которого в слое 1 - 100 м составляла около 200 млн.кл $\cdot\text{м}^{-3}$, и пикофитопланктона, чья численность на глубине максимума концентрации была около 2,5 тыс.кл $\cdot\text{мл}^{-1}$ [9].

Поле биолюминесценции Южно-Пассатного течения резко стратифицировано и имело высокую интенсивность (рис. 2 и 3). Для всех станций этого района типичным оказывалось формирование в верхней толще воды, на фоне высокой сливной биолюминесценции, слоев повышенной светимости, разделенных 15 – 25-метровыми слоями с пониженной примерно в 2 раза интенсивностью. В верхнем слое формировалась зона сливного свечения. Максимальная величина биолюминесцентного потенциала, достигающая $305.0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$, была в слое температурного скачка. В 1-метровых слоях глубже термоклина, которым соответствовала преимущественная ИПБ, равная $40.0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$, наблюдались небольшие сливные или отдельные вспышки.

Несколько специфично вертикальное распределение ПБ на экваторе, где наблюдалась одномаксимумная структура его интенсивности. Слой повышенной светимости находился в верхнем 20 - 25-метровом слое. В этом районе высокий уровень изменчивости структур термохалинного и биолюминесцентного полей. Экваториальная ст. 2973А имела относительно однородный слой, толщиной около 30 м. Располагающиеся глубже термоклин и галоклин имели сложную структуру. Интенсивная биолюминесценция на этой станции наблюдалась в слое до 30 м. Слой повышенной светимости с ИПБ около $500.0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$ и протяженностью по вертикали около 10 м, был в приповерхностном слое. На ст. 2973Б, расположенной на 25 миль к северо-западу, структуры полей температуры и солености существенно изменились. Вертикальная протяженность слоя с близкими величинами температуры и солености оказались на 20 м обширнее, чем на экваторе. Соответственно, область с высокой интенсивностью биолюминесценции также увеличилась. Например, изолюмена $100.0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$, ограничивающая слой повышенной светимости снизу, на этой станции располагалась на 20 - 25 м глубже, чем на экваторе. Такое сложное вертикальное распределение гидрофизических полей и поля биолюминесценции связано, очевидно, с влиянием подповерхностного течения Ломоносова, эффект которого проявился также, в частности, в изменении угла наклона троса в процессе опускания приборного комплекса.

Наконец, южнее 6^0 ю.ш., в пределах тропической зоны, располагались бедные в продукционном отношении воды северной периферии и центральной части Южно-Атлантического антициклонального круговорота течений с обширным квазиоднородным по термохалинным характеристикам и крайне

обедненным планктоном олиготрофным слоем. Основной термоклин располагался глубже 150 м. В верхней 100-метровой толще на глубинах 40 - 60 м наблюдался слабо выраженный термоклин, максимальные градиенты температуры в котором около $0.1 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$. Обычно в области термоклина был максимум солености, превышающий показатели солености около поверхности на 0.2 - 0.4 ‰.

Вертикальная структура ПБ характеризовалась наличием одного слоя повышенной светимости, толщиной 10 - 15 м, приуроченного к этому термоклину. В остальной толще случайным образом формировались мелко-масштабные зоны облачного характера со слабо выраженной биолюминесценцией. Протяженность таких зон по вертикали соответствовала 4 - 8 м, а в горизонтальном направлении - на протяжении 2 - 4 зондирований, т.е. соответствовала трансекте 50 - 150 м. В интервалах между этими слоями биолюминесценция не зарегистрирована. Средний уровень ее развитости на акватории от 7 до 20° ю.ш. оказался сходным - около $15.0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{д}^{-1}$.

Обсуждение. Исследования, выполненные на протяженном меридиональном разрезе, позволили детально проследить широтные изменения интегральных характеристик биолюминесценции и топографии глубин залегания ее максимумов. Для каузального анализа пространственной неоднородности поля биолюминесценции, являющегося экспресс-тестом распределения планктона, определяющим оказалось привлечение сопутствующих профилей гидрологических факторов, характеризующих циркуляцию поверхностных вод. Полученные распределения интенсивности биолюминесценции на этом крупномасштабном разрезе полностью соответствуют дифференциации тропической и субтропической Атлантики на области с различным уровнем потенциальной биологической продуктивно-

сти [3, 7, 13, 14], детализируя специфику вертикальной структуры планктонного ценоза.

Абрис планктонного сообщества и, соответственно, ПБ на исследованном меридиональном направлении определяют достаточно отличающиеся друг от друга водные массы, формируемые сложной и взаимодействующей системой течений. Выполненный разрез пересекал весь набор водных масс, свойственных северной, бореальной и тропической областям Атлантического океана: субарктическую, субтропическую, северо-тропическую, экваториальную и южно-тропическую. Поэтому топографии планктона и ИПБ характеризуются своей неоднородностью.

Известно, что под воздействием квазистационарной атмосферной циркуляции, в первую очередь Азорского максимума давления, в поверхностных слоях у западных берегов европейского и африканского материков образуется устойчивая циркуляция вод [11]. Восточная периферия Северо-Атлантического антициклонального круговорота от мыса Финистерре представлена Португальским течением, идущим на юг. Затем это течение переходит в Канарское и, последовательно, в Северо-Пассатное течение. Южный отрезок разреза расположен в центральной части Южно-Атлантического антициклонального круговорота, а в северном направлении пересекает Южно-Пассатное течение и подповерхностное течение Ломоносова.

Итогом анализа структуры и степени развитости ПБ в исследованных областях Атлантического океана явился, во-первых, вывод о значительных изменениях ИПБ в различных водных массах. Диапазон ее лимита в слое 1 - 100 м составил более 70 раз. Максимальные амплитудные характеристики биолюминесценции в таком слое наблюдались в Канарском течении на 31° с.ш. и в Северном пассатном течении, в котором на широте около

16^0 с. ш. они достигали $356.0 \cdot 10^{-12} \text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$. В центральной части Южно-Атлантического антициклонального круговорота течений и на его северо-западной периферии биолюминесценция минимальна, отсутствуя в случайно расположенных слоях толщиной 8 - 15 м.

Во-вторых, характерной чертой вертикального распределения ПБ явилась его стратификация. В толще воды выделялись слои повышенной светимости толщиной от 3 - 5 до 30 м, расположенные не только в термоклине или около него, но также в верхнем квазиоднородном по гидрологическим характеристикам слое. На этом основании необходимо считать, что в толще воды существуют тонкие слои повышенной концентрации планктона. Обычно нижний слой повышенной светимости оказывался более интенсивным, чем остальные. Стационарность вертикальных профилей биолюминесценции достаточно велика, поэтому формируется слоистая или облачная структура ПБ, которая перемещается по вертикали под влиянием внутренних волн.

Вертикальное распределение биолюминесценции коррелирует с количественным развитием фито- и зоопланктона, распределение которых обусловлено структурой биогенных элементов и основных гидрофизических характеристик, связанных с системой циркуляции водных масс. Обобщенные характеристики абсолютных величин и структуры ПБ до глубины 100 м позволяют выделить три основных типа пространственной структуры этого биофизического параметра, характерных для водных масс со слабым вертикальным перемешиванием, для районов конвергенций, а также для районов с поднятием глубинных вод, в частности для участков с их дивергенцией (рис. 5). Между ними, естественно, существуют переходные ситуации [12].

Первый тип, наблюдаемый в областях с заглубленным положением слоя температурного скачка, характеризуясь слабой биолюми-

несценцией в верхнем 100-метровом слое, имел близкую по всей глубине величину биолюминесцентного потенциала. Небольшое его повышение (до 20 %) происходит в области температурного скачка, залегающего ниже 100 м (рис. 5). Глубже биолюминесценция еще более снижается, оказываясь представленной редкими вспышками от биолюминесцентоов. Этот тип свойственен олиготрофным водам и соответствует Северо- и Южно-Атлантическим антициклональным круговоротам и областям конвергенции водных масс.

В водных массах со слабым вертикальным перемешиванием слой термоклина залегает на меньшей глубине. Его нижняя граница является областью резких градиентов биолюминесцентного потенциала, где он уменьшается в 7 - 9 раз. ИПБ верхнего гомотермного слоя характеризуется наличием 1 - 3 слоев с повышенной светимостью. Наибольшая светимость имеет место над слоем температурного скачка, приходящегося на глубину 50 - 80 м. Второй по величине максимум, в 1,5 - 2 раза слабее, находится в вышележащем слое 25 - 40 м. ИПБ между слоями повышенной светимости в 2 - 3 раза слабее (рис. 5). Такая структура ПБ характерна для стационарных периферических течений северной, западной и южной областей круговоротов и Межпассатному противотечению [19].

Наконец, в районах с дивергенцией водных масс и в районах, прилегающих к апвеллингам и находящихся под их влиянием, т.е. там, где планктон усиленно развивается в обогащенном биогенами поверхностном слое, интенсивная биолюминесценция наблюдается в слое термоклина и почти во всей, лежащей над ним, гомотермной толще. Только в приповерхностном 10-метровом слое она снижается в 4 - 6 раз.

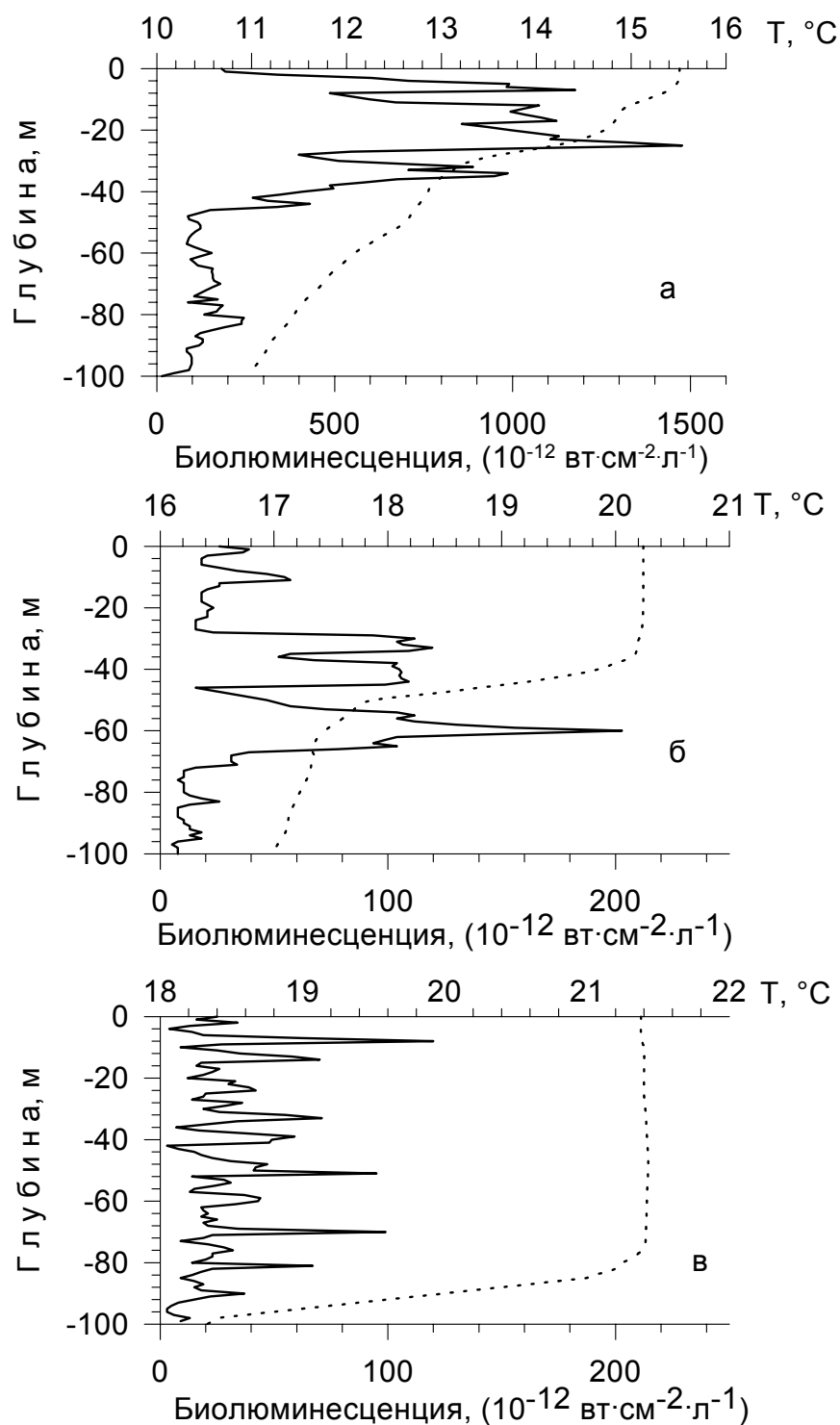


Рис. 5. Типы вертикального распределения интенсивности биолуминесценции (сплошные линии) и температуры (прерывистые линии): а – зона дивергенции; б- зона слабого вертикального перемешивания; в – зона конвергенции

Fig.5. Types of the bioluminescence intensity (firm lines) and temperature (dash lines) vertical distribution: а – divergence zone; б – zone of the light vertical mixing; с – convergence zone

Резкое, примерно на два порядка, снижение ИПБ происходит у нижней границы слоя температурного скачка (рис. 5).

Таким образом, анализ степени развитости и вертикальной структуры ИПБ в различных климатических зонах восточной части Атлантического океана позволяет не только визуализировать вертикальную структуру планктонного сообщества, но открывает возможности проводить экспресс-типизацию водных масс по интегральной оценке уровня количественного развития планктона.

Выводы. 1. На меридиональном разрезе, протяженностью более 4000 миль, зафиксирован диапазон интенсивности поля биолюминесценции в верхнем 100-метровом слое, крайние величины которого отличались почти в 70 раз. При этом акватории с интенсивной биолюминесценцией, превышавшей $300.0 \cdot 10^{-12} \cdot \text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$, соответствовали продуктивным районам, биомасса планктона в которых близка к $0.5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$. **2.** Батифотометрические зондирования выявили существование в водной толще слоев повышенной светимости (повышенной концентрации светящегося планктона), протяженностью по глубине 5 - 12 м. При двухмаксимумной вертикальной

структуре биолюминесценции нижний слой повышенной светимости оказывался более интенсивным, чем верхний в 1.5 - 2.0 раза. Его вертикальная протяженность также была больше на 20 - 50%. В случае одномаксимумной вертикальной структуры поля биолюминесценции топография слоя повышенной светимости соответствовала максимальным градиентам полей температуры и (или) солёности – зонам концентрации планктонных организмов. **3.** Выделено три основных типа пространственной структуры поля биолюминесценции, характерных для водных масс со слабым вертикальным перемешиванием, для районов конвергенций, а также для районов с поднятием глубинных вод, в частности для участков с их дивергенцией.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ONR № 00014-99-1-1025 “The database on the bioluminescence field of the Worlds Ocean”. Участники проекта выражают благодарность сотрудникам Морского гидрофизического института НАН Украины и Института биофизики Сибирского отделения РАН, которые активно участвовали в создании базы данных по биолюминесценции Мирового океана и в обсуждении полученных результатов.

1. Битюков Э. П. Пространственное распределение биолюминесценции в водах Южно-Атлантического антициклонального круговорота // Биопродукционная система крупномасштабного океанического круговорота / Ред. В. Н. Грезе. – Наук. думка : Киев, 1984. - С. 72 - 82.
2. Битюков Э. П. Горизонтальная неоднородность биолюминесцентного поля как показатель агрегированного распределения планктона // Гидробиол. журн. - 1984. - **20**, вып. 5. - С. 24 - 31.
3. Битюков Э. П., Балдина Э. П., Василенко В. И. Планктон и его биолюминесценция в центральной и северной частях тропической области Атлантического океана / Результаты ис-

- следований северной части тропической зоны Атлантического океана по программе “Декалант” - Севастополь: МГИ АН Украины, 1975. - С.171 - 186.
4. Битюков Э. П., Василенко В. И., Токарев Ю. Н., Шайда В. Г. Батифотометр с дистанционно переключаемой чувствительностью для оценки интенсивности биолюминесцентного поля // Гидробиол. журн. - 1969. - **5**, вып.1. - С. 82 - 86.
5. Богоров В. Г., Виноградов М. Е., Воронина Н. М., Канаева И. П., Суетова И. А. Распределение биомассы зоопланктона в поверхностном слое Мирового океана // ДАН СССР. – 1968. - **182**, № 5. – С. 1205 - 1207.

6. Бубнов В. А., Навроцкая С. Е. Северное экваториальное подповерхностное противотечение в Атлантике // Океанология. – 1991. – **31**, вып. 2. – С. 207 - 216.
7. Булгаков Н. П., Ярошеня Р. А., Скрипалева Е. А., Воскресенская Л. А. Физико-гидрологические характеристики климатических фронтальных зон Тропической Атлантики // Мор. гидрофиз. журн. – 1998. – №4. – С. 39 - 56.
8. Гительзон И. И., Левин Л. А., Утюшев Р. Н., Черепанов О. А., Чугунов Ю. В. Билюминесценция в океане. – С.-П.: Гидрометеоздат, 1992. – 283 с.
9. Заика В. Е., Шевченко В. А., Булатов К. В. Экология морского фототрофного пикопланктона - Научный центр биологических исследований АН СССР в Пущине. - 1989. - 169 с.
10. Канаева И. П. О количественном распределении планктона Атлантического океана // Тр. Всесоюз. н.-и. ин-та морского рыбного хозяйства и океанографии. - 1965. – **57**. - С. 333 - 343.
11. Суховой К. А., Голинько А. И. Тепловое состояние вод в зонах восточных пограничных течений Северного полушария // Метеорология и Гидрология. – 1987. - №3. – С. 72 - 81.
12. Токарев Ю. М. Біофізичні аспекти екології пелагіалі: автореф. дис. ... докт. біол. наук. - Київ, 2000. – 36 с.
13. Ханайченко Н. К. Система экваториальных противотечений в океане. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. - 158 с.
14. Хлыстов Н. З., Новоселов А. А., Ханайченко Л. П. Роль динамических процессов в формировании зон повышенной биологической продуктивности в Тропической Атлантике / Результаты исследований северной части тропической зоны Атлантического океана по программе "Декалант". – Севастополь: Издание МГИ АН Украины, 1975. – С. 139 - 149.
15. Bulgakov N. P., Polonsky A. B., Popov Yu. I., Artamonov Yu. V., Nikiforova V. P. Variability of the temperature field off the North-Western Coast of Africa / Int. Symp. W. Afr., Barselona, 1985. – **1**. – P. 79 - 92.
16. Hentschel E. Allgemeine Biologie des Südatlantischen Ozeans // Wissensch. Ergebnisse. d. Deutsch. Atlant. Exp. auf. d. Forschungs- u. Vermessungsschiff "Meteor" 1925 - 1927. - 1933 - **11**, L. 1. – 168 p.
17. Friedrich H. Versuch einer Darstellung der relativen Besiedlungsdichte in den Oberflächenschichten des Atlantischen Ozeans. - 1950. - **7**, Hef 2.
18. Finenko Z. Z., Piontkovski S. A., Williams R., Mishonov A. V. Variability of phytoplankton and mesozooplankton biomass in the subtropical and tropical Atlantic Ocean // Mar. Ecol. Prog. Ser. – 2003. – 250. – P. 125 - 144.
19. Kushnir V. M., Tokarev Yu. N., Williams R., Piontkovski S. A., Evstigneev P. V. Spatial heterogeneity of the bioluminescence fields of the tropical Atlantic Ocean and its relationship with internal waves // Mar. Ecol. Prog. Ser. - 1997. - **160**. - P. 1 - 11.
20. Longhurst A., Sathyendranath S., Platt T., Caverhill C. An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data // J. Plankton Res. - 1995. - **17**. - P. 1245 - 1271.
21. Piontkovski S. A., Tokarev Yu. N., Bitukov E. P., Williams R., Kiefer D. A. The bioluminescent field of the Atlantic Ocean // Mar. ecol. Prog. Ser. - 1997. - **156**. - P. 33 - 41.
22. Piontkovski S., Williams R., Levin L., Lubartsev V. Data base of the plankton bioluminescence in the World's Ocean / Abstr. paper of the 37-th EMBS. - Reykjavik, 2002. - P. 129.
23. Tokarev Yu. N., Williams R., Piontkovski S. A. The identification of the small-scale structure of pelagic plankton communities of the Black and Ionian Seas by bioluminescent characteristics // Hydrobiologia. – 1999. - **393**. - P. 163 - 167.
24. Vinogradov M. E., Gitelson I. I., Sorokin Yu. N. The vertical structure of a pelagic community in the tropic ocean // Mar. Biol. – 1970. – **16**. – P. 187 - 194.

25. Williams R., Mishonov A., Piontkovski S., Tokarev Yu., Bityukov E. et al. Intercalibration of the bathyphotometers Salpa (Ukraine) and HIDEX (USA) in the Marmara sea / Oceanography of the eastern

Mediterranean and Black Sea: Abstr. papers of the Inter. Confer.- Greece, 1999. - P. 178.

Поступила 25 июля 2003 г.

Bioluminescent field and plankton characteristics dynamics at the Eastern Atlantic in winter. U. N. Tokarev, E. P. Bityukov, V. I. Vasilenko, R. Williams, D. Ya. Slipetsky, B. G. Sokolov[†]. Water mass hydrological parameters, plankton species composition and abundance influence on the bioluminescence field amplitude characteristics spatial changeability along 20° west in the Atlantic ocean has been investigated. It was shown that vertical distribution of bioluminescence field intensity correlated with abundance of phyto- and zooplankton, distribution of which was caused by biogenic elements concentration and vertical structure of the main hydrophysical characteristics. It was suggested to use the results of spatial structure and amplitude-temporal bioluminescence changeability analysis in different climatic zones of the east part of the Atlantic Ocean for plankton community vertical structure visualization and carrying out water masses express-typization.

Key words: Atlantic Ocean, bioluminescence, plankton, spatial changeability, water masses circulation

Динаміка характеристик поля біолюмінесценції і планктону в Східній Атлантиці в зимовий період. Ю. М. Токарев, Е. П. Бітюков, В. І. Василенко, Р. Вільямс, Д. Я. Сліпецький, Б. Г. Соколов[†]. Досліджено вплив гідрологічних параметрів водних мас, видового складу і великої кількості планктону на просторову мінливість амплітудних характеристик поля біолюмінесценції уздовж 20° з. д. в Атлантичному океані. Показано, що вертикальний розподіл інтенсивності поля біолюмінесценції корелює з кількісним розвитком фіто- і зоопланктону, розподіл яких обумовлено концентрацією біогенних елементів і вертикальною структурованістю основних гідрофізичних характеристик. Запропоновано використовувати результати аналізу просторової структури й амплітудно-часової мінливості біолюмінесценції в різних кліматичних зонах східної частини Атлантичного океану для візуалізації вертикальної структури планктонного угруповання і проведення експрес-типізації водних мас.

Ключові слова: Атлантичний океан, біолюмінесценція, планктон, просторова мінливість, циркуляція водних мас