

УДК 574.5; 579.68 ...

ПРОДУКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИТО- И БАКТЕРИОПЛАНКТОНА НА ТРАНСАТЛАНТИЧЕСКОМ РАЗРЕЗЕ (ДЕКАБРЬ 2019 – ЯНВАРЬ 2020 гг.)

© 2024 г. С. П. Захарков*, Е. А. Штрайхерт, Ю. В. Шамбарова

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия**e-mail: zakharkov@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 01.12.2022 г.

После доработки 23.02.2023 г.

Принята к публикации 18.04.2024 г.

Получены продукционные характеристики фито- и бактериопланктона на Трансатлантическом разрезе (79 рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”, декабрь 2019 – январь 2020 гг.). Анализ проводился с учетом биогеографического районирования региона. Первичная продукция (ПП) составляла 0.8–34.2 мгС/м³·сут при среднем значении 8.9 мгС/м³·сут в эвфотической зоне. Суточное ассимиляционное число на разрезе изменялось в поверхностных пробах от 7.2 до 260.1 мгС/мгХл в сут. Концентрация хлорофилла-а варьировала от 0.01 мг/м³ в районе SASTG до 0.59 мг/м³ в районе NASTG. Интегральная первичная продукция варьировала от 258 до 765 мгС/м². Бактериальная продукция (БП) в поверхностных горизонтах варьировала от 0.04 до 16.1 мгС/м³·сут со средним значением 3.7 мгС/м³·сут, максимальные значения наблюдались в течении Ломоносова с максимумом на глубине 160 м. Бактериальная продукция в столбе воды изменялась от 23.2 мгС/м² до 6182.7 мгС/м². Мы предполагаем, что наибольшая бактериопродукция, отмеченная на глубоководных горизонтах, связана с высокими концентрациями РОВ.

Ключевые слова: Атлантический океан, первичная продукция, бактериальная продукция, ассимиляционное число.

DOI: 10.31857/S0030157424060092, **EDN:** FHYANG

ВВЕДЕНИЕ

Изучение продукционных характеристик фито- и бактериопланктона важно для лучшего понимания их роли в глобальном круговороте углерода, биологического насоса, участия в механизмах формирования изменения климата, а также оценки продуктивности региона [41, 46]. О продуктивности региона часто судят по показателям концентрации хлорофилла (Ххл) и величине первичной продукции (ПП), к тому же результаты продукции органического вещества фитопланктоном оцениваются как особенность естественного круговорота веществ в экосистеме. Гетеротрофный бактериопланктон осуществляет процессы реминерализации, в результате которых биогенные элементы становятся доступны для первичных продуцентов [14].

Большая роль в естественном круговороте веществ в экосистеме принадлежит микроорганизмам, которые получают энергию исключительно за счет окисления органического вещества. Поскольку более 95% органического вещества в морских экосистемах состоит из полимерных

соединений с высокой молекулярной массой, только небольшая часть от общего растворенного органического вещества легко используется большинством морских организмов на более высоких трофических уровнях. Это означает, что растворенный органический углерод недоступен для большинства морских организмов напрямую. Органическое вещество океана в растворенной или взвешенной корпускулярной форме трансформируется микроорганизмами и активно вовлекается ими в биогенный круговорот элементов [15]. Бактериями потребляется от 40 до 60% углерода, создаваемого первичными продуцентами [7, 29, 31]. Уровень бактериальной продукции (БП) может быть спрогнозирован исходя из запасов органического вещества (углерода), поступающего в экосистему [2]. В работах [36, 39, 44] отмечается, что изменения продукционных характеристик бактериопланктона, в основном, связаны с температурой, выеданием зоопланктоном и наличием субстрата (органического вещества). При низкой температуре вод, например, при весеннем цветении водорослей

продукционные показатели бактериопланктона падают [29].

Считается, что функциональная активность бактерий и, следовательно, величина создаваемой ими продукции напрямую зависит от состояния и активности фитопланктона [18, 20, 29]. В работе J. Cole с соавторами [29] для отдельных районов Атлантики была выявлена значимая корреляционная связь, где БП составляет в среднем 20% ПП, а для оценки по целому столбу воды — около 30% [29]. Исследования в Антарктике также показывают значительную пространственную и временную изменчивость микробной биомассы и продуктивности, совпадающую с весенним цветением фитопланктона [36]. Таким образом, микробный цикл вместе с ПП контролирует продуктивность морских систем в океане.

ПП и БП (в меньшей степени) в Атлантическом океане исследовались различными научными группами в районах Канарского апвеллинга, субтропических антициклонических круговоротов, приэкваториальной зоны, Северо-Атлантического течения, полярного фронта. В России можно отметить цикл работ В.И. Ведерникова и А.Б. Демидова по Трансатлантическим разрезам, выполненным в конце XX — начале XXI веков [4, 5, 9, 10], а за рубежом — программу Atlantic Meridional Transect (под руководством J. Aiken), по которой с 1995 г. проводятся практически ежегодные экспедиции в основном по маршруту от Великобритании до Фолклендских островов и обратно [42].

При этом для изучения изменений продукционных характеристик фитопланктона используется разделение океана на биогеографические районы [27, 37, 45].

Трансатлантический разрез пересекает ряд экосистем от субполярных до тропических и от эвтрофных шельфовых морей и систем апвеллинга до олиготрофных срединно-океанических круговоротов. Поэтому в условиях изменения климата мониторинг и изучение изменений, например, физических, биологических, химических свойств и процессов через разнообразные экосистемы

от Северной до Южной Атлантики не перестает представлять особую актуальность и интерес.

В связи с этим, целью нашей работы было выявление закономерностей изменчивости продукционных характеристик фито- и бактериопланктона по маршруту, проходившему через разнообразные экосистемы Атлантического океана, с обсуждением возможных ее причин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились по маршруту 79 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в Атлантическом океане в декабре 2019 — январе 2020 гг. [17]. Исследования, представленные в работе, выполнены после выхода судна из пролива Ла-Манш и до 35° ю.ш. На рис. 1 показан район исследования и гидробиологические станции, которые были выполнены в декабре 2019 — январе 2020 гг. как на ходу судна, так и на гидрологических станциях.

Для анализа изменчивости продукционных характеристик фито- и бактериопланктона вдоль маршрута судна, эта область была разделена на биогеографические районы (табл. 1) аналогично тому, как это было сделано нами для изучения анализа распределения содержания хлорофилла-а в работе [24]. На рис. 1 представлено расположение гидробиологических станций в биогеографических районах: пролив Ла-Манш; NASTG — Северо-Атлантический субтропический антициклонический круговорот; CNRY — система Канарского апвеллинга; NATRE — восточная часть Северо-Атлантического тропического циклонического круговорота; CNZ — зона между CNRY и NATRE; TRA — тропическая область Атлантики; EC — экваториальное течение; SASTG — Южно-Атлантический субтропический антициклонический круговорот. Разделение на биогеографические районы Атлантического меридионального разреза (табл. 1) позволяет учитывать, уровень биогенных элементов, органического вещества и взвеси, выносимых при апвеллинге в деятельную часть океана [25].

Таблица 1. Названия и границы биогеографических районов по широте и номера станций, относящиеся к районам

Биогеографические районы	Пролив Ла-Манш	CNRY и восточная периферия NASTG	CNZ	NATRE	TRA	EC	SASTG
Границы района по широте и номера станций	49°50' с.ш.; Ст. 1	43°–18° с.ш.; Ст. 2–15	18°–16° с.ш.; Ст. 20	16°–10° с.ш.; Ст. 23	9°–1.5° с.ш., 1.5°–5° ю.ш. Ст. 26, 30, 32, 39	1.5° с.ш. – 1.5° ю.ш.; Ст. 33–38	7°–34° ю.ш.; Ст. 41–55

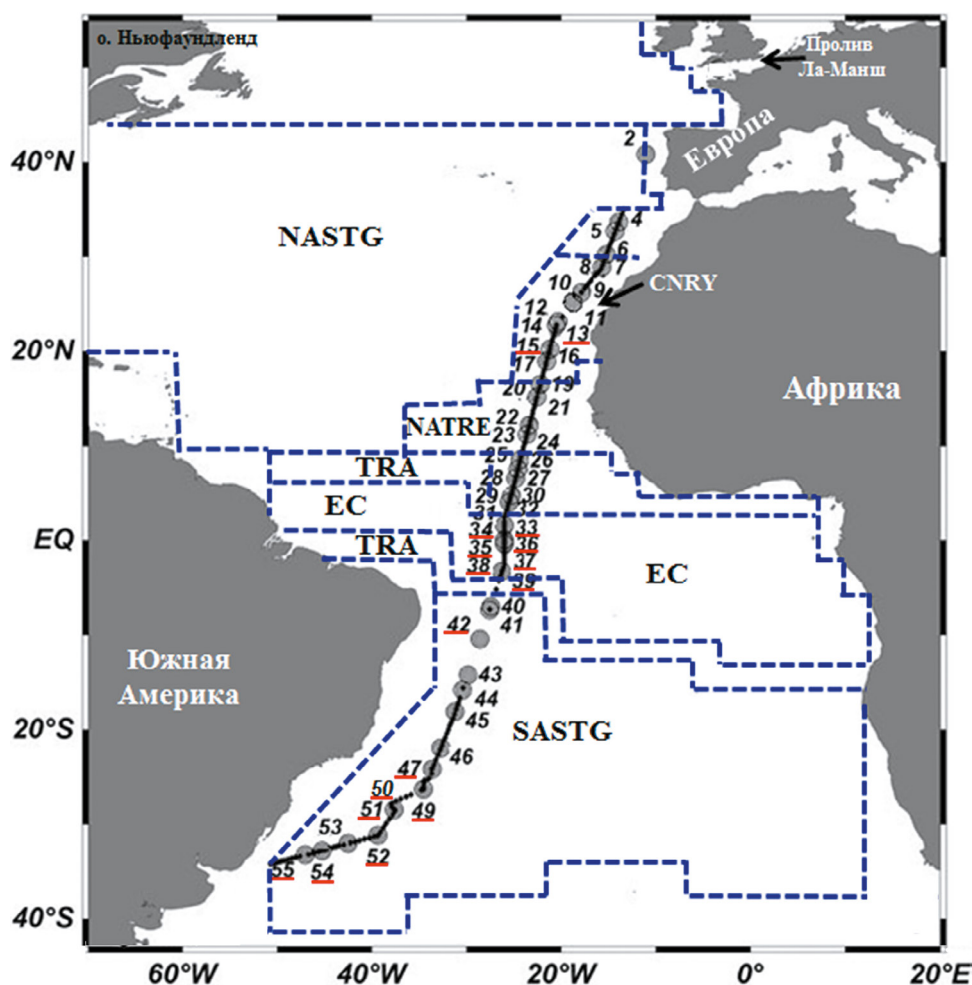


Рис. 1. Маршрут НИС “Академик Мстислав Келдыш” по Трансатлантическому разрезу. Расположение гидробиологических станций по маршруту в биогеографических районах: пролив Ла-Манш; NASTG – Северо-Атлантический субтропический антициклонический круговорот; CNRY – система Канарского апвеллинга; NATRE – восточная часть Северо-Атлантического тропического циклонического круговорота; CNZ – зона между CNRY и NATRE; TRA – тропическая область Атлантики; EC – экваториальное течение; SASTG – Южно-Атлантический субтропический антициклонический круговорот.

Большая часть проб данного рейса отбиралась с поверхностных горизонтов 0–2 м по ходу судна с использованием ныряющего батометра из нержавеющей стали (в табл. 2 это станции с одним горизонтом отбора 0 м, и с номерами 1–4, 7, 8, 10, 20, 23, 30, 32, 41, 42, 45, 46). Батометр перед забором воды стерилизовался 70% раствором этилового спирта. После отбора пробы разливались по стерильным склянкам для дальнейшего определения БП, ПП и Кхл. Другая часть проб для определения вышеуказанных параметров отбиралась из батометров Нискина объемом 5 л и системой “Rosette”-1015 с горизонтов, выбранных после предварительного STD-зондирования в эвфотической зоне (в табл. 2 станции с номерами 13, 15, 33–35, 37, 38, 39, 42, 47, 49, 51, 52, 54, 55, при этом на станциях выделенных полужирным шрифтом пробы дополнительно

отбирались еще и с поверхности ныряющим батометром). Отбор проб с использованием разных батометров принципиальной разницы для наших исследований не имел. 24 пробы воды из приповерхностного горизонта были взяты из проточной системы. Ввиду того, что при прохождении воды через проточную систему клетки фитопланктона повреждаются [11], значения Кхл, полученные стандартным экстракционным спектрофотометрическим методом по пробам воды из проточной системы, были откалиброваны на значения Кхл, полученные этим же методом, но по пробам воды, отобраным одновременно из батометра. Уравнение связи между Кхл в пробах, полученных из батометра (y) и Кхл с этими же пробами, прошедшими через проточную систему (x) ($y = 1.3x$; $R^2 = 0.9$; $N = 15$), показывает, что хлорофилл содержащие органеллы

поврежденных клеток проходят через фильтры “Владисарт” с диаметром пор 0.65 мкм.

Концентрация хлорофилла-а. Определения Кхл в 79 рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” на части маршрута в Атлантическом океане в декабре 2019 г. — январе 2020 г. изложены в работе [24]. Кхл определялась стандартным спектрофотометрическим методом [8, 34]. Для этого метода проба воды объемом 1.5 литра пропусклась через мембранные фильтры “Владисарт” с диаметром пор 0.65 мкм. Фильтры замораживались и хранились при температуре -18°C для дальнейшей обработки в лабораторных условиях на берегу.

Вертикальные профили и определение глубины эвфотической зоны. Вертикальные профили Кхл на гидрологических станциях измерялись с помощью погружаемых гидрологических зондов с флуоресцентными датчиками. Все измерения, выполненные флуоресцентными датчиками, были откалиброваны на значения Кхл, определенные стандартным экстракционным методом [24].

Глубины эвфотической зоны (ЭЗ) рассчитывались по коэффициентам ослабления света морской водой, полученным из показаний прозрачности [1, 43].

Прибор ПУМ позволял измерять коэффициенты ослабления света морской водой (ϵ_0) на длине волны 530 нм из которых с помощью модельного соотношения. По данной формуле оценивалась глубина ЭЗ (Zф):

$$Z_f = 102.7 \times \exp(-2.407 \times \epsilon_0(530)) + 29.1. \quad (1)$$

Первичная продукция. Определение уровня ПП проводилось с использованием радиоуглеродной модификации скляночного метода [6]. Подробная методика работы с пробами описана нами ранее [12]. Пробы для определения ПП фитопланктона разливали по стеклянным склянкам объемом от 0.25 до 0.5 л (по 2 светлых и 1 темной на каждой станции), вносили реактив $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ активностью 0.5–1 μCi (ОАО “СПб “Изотоп”, Россия). ПП определялась в стеклянных склянках емкостью 0.25 л, которые располагались в проточном аквариуме с заборной водой. При этом освещенность поддерживалась равной 0.5 от поверхностной, т. е. пробы со всех горизонтов экспонировались при насыщающей фотосинтез освещенности. Экспонирование проводилось в течение половины светового дня: если пробы отбирались после полудня и до восхода — от восхода до астрономического полудня, и с полудня до заката — если пробы отбирались в дополуденное время. После окончания экспонирования, пробы фиксировали Люголем до слабо-желтой

окраски и фильтровали через фильтры диаметром 25 мм и размером пор 0.45 мкм. Дальнейший расчет ПП в столбе воды (интегральная ПП) проводили по формуле (2), предложенной Бехренфельдом и Фальковски [26] и модифицированной нами [13]:

$$PP = 0.825 \times AЧ \times C_{хл} \times Zф \times Tэф. \quad (2)$$

Здесь PP — интегральная ПП, $\text{мгС/м}^2 \cdot \text{сут}$; $AЧ$ и $C_{хл}$ — средние значения ассимиляционного числа (мгС/мгХл в час) и Кхл в слое фотосинтеза (мг/м^3) соответственно, $Zф$ — толщина эвфотического слоя (м), $Tэф$ — эффективный фотопериод (час), рассчитывается по формуле:

$$Tэф = 0.8 \times Td. \quad (3)$$

где Td — продолжительность светового дня, который зависит от географического положения.

Удельная скорость фотосинтеза, или $AЧ$, от которого зависит величина первичной продукции, определяется как отношение ПП к концентрации хлорофилла. Если $AЧ$ определялось только на одном горизонте (на ст. 51), то оно использовалось для расчетов в качестве среднего значения $AЧ$ эвфотической зоны.

Формула (4) соответствует предложенному ранее эмпирическому уравнению для расчета ПП в столбе воды [13].

В связи с тем, что пробы экспонировались в течение половины светового дня, были введены некоторые модификации:

$$PP = 0.66 \times САЧ_{ср} \times C_{хл} \times Zф. \quad (4)$$

Здесь PP — первичная продукция, $\text{мгС/м}^2 \cdot \text{сут}$; $САЧ_{ср}$ — среднее значение суточного ассимиляционного числа в день ($AЧ \cdot Tэф$) (мгС/мгХл в сут), $САЧ$ — суточное ассимиляционное число, определялось как значение ПП, деленное на Кхл на горизонте; $C_{хл}$ — среднее значение Кхл (мг/м^3); $Zф$ — глубина эвфотической зоны. По этой формуле нами проводились дальнейшие расчеты для интегральной первичной продукции.

Определение уровня продукции бактериопланктона. Определение БП проводили с использованием радиоуглеродного скляночного метода, предложенного В.И. Романенко [19] с модификациями других авторов [12; 22; 46]. Метод основан на измерении с помощью ^{14}C темновой ассимиляции углекислоты (ТАУ). Этот метод вызывал определенные споры у авторов [35], но в других работах [46] показана возможность применения этого метода с ограничениями для количественного определения БП, в работе Максимова с соавторами [16] показано что результаты, полученные двумя методами (лейци-

новым и темновой ассимиляции углекислоты), сопоставимы и выражены сравнимыми величинами. Метод основан на измерении с помощью ^{14}C темновой ассимиляции углекислоты (ТАУ). Для определения БП образцы воды отбирались на каждой станции и/или каждой глубине в три параллельные склянки. Прежде чем внести в них раствор изотопа, набор образцов помещали в черные мешки приблизительно на 1 час при температуре, близкой к температуре места взятия проб. После внесения реактива $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ активностью 1–5 μCi они немедленно закрывались стеклянными пробками, покрытыми кусочками полимерной пленки, закрепленной на горлышках круглыми резинками. При этом контроль фиксировали Люголем до слабо-желтой окраски [46]. Горловины черных мешков плотно затягивали круглыми резинками. Наполненные таким образом пробы помещались для экспозиции в темный инкубатор. Для имитации температуры вертикальных профилей на борту судна — использовали два холодильника с выставленной температурой, совпадающей с температурой отбора проб с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. При высоких температурах заборной воды пробы экспонировали в темных ящиках внутри лабораторных помещений, при этом температура в них поддерживалась равной температуре заборной воды с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Для регулировки температуры в ящиках нами использовались емкости с холодной или теплой водой с контролем температуры каждые 2–3 часа. После инкубации образцы снова переносили в затемненное место. Один за другим мешки открывали и пробы фиксировали раствором Люголя до слабого желтоватого цвета пробы. Затем содержимое каждой склянки проходило предфильтрацию через фильтры с диаметром пор 3 μm в воронке с диаметром рабочей зоны ~ 40 мм. Фильтрат собирали, а затем повторно фильтровали через мембранный фильтр, задерживающий бактерии, с диаметром пор 0.2 μm . Фильтры замораживались и хранились при температуре -18°C для дальнейшей обработки в лабораторных условиях на берегу. Та же самая операция проводилась с «мертвым контролем» (в монографии Сорокина [46] перевод похожего термина, означающего — «клетки убитые слабым раствором Люголя перед внесением изотопа», нами интерпретирован в термин «мертвый контроль»). Затем, среднее значение активности, измеренное для каждого образца, корректировалось вычитанием среднего значения показателей контроля [46]. Радиоактивность фито- и бактериопланктона, сконцентрированных после экс-

позиции на мембранные фильтры, измеряли по стандартной методике на жидкостно-сцинтилляционном счетчике “Tri-Carb 2800 TR” фирмы “PerkinElmer/Packard” США. Использовался сцинтилляционный коктейль “ULTIMA GOLD AB” также фирмы “PerkinElmer/Packard США”. Измерения проводили после 2-часовой экспозиции флаконов с образцами в темноте.

Интегральные значения БП рассчитывались по методу трапеции. Для расчета и значений БП в столбе воды по методу трапеций нами были использованы величины БП, рассчитанные для разных по толщине слоев. Как правило, эти слои совпадали с эвфотической зоной, за исключением экваториального района, где было обнаружено повышение флуоресценции растворенной органики на глубинах 150–160 м гидрооптической группой 79 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”.

Статистическая обработка применялась для расчета коэффициента корреляции между БП и ПП на тех горизонтах, где эти параметры определялись одновременно. Статистическая обработка, полученных данных выполнена на персональном компьютере с использованием “Microsoft Excel”.

Буй АРГО. Для дополнительной информации о вертикальной структуре температуры и солености морской воды использовали данные буюв АРГО (<http://dataselection.euro-argo.eu>). Информация о зондированиях буюв АРГО, в изучаемом регионе представлена в работе Штрайхерт с соавторами [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные районы исследований — биогеографические провинции Трансатлантического разреза (пролив Ла-Манш, CNRY и восточная периферия NASTG, CNZ, NATRE, TRA, EC, SASTG) (табл. 2).

Глубина эвфотического слоя в районе CNRY и восточной периферии NASTG варьировала от 73 до 85 м, в районе EC от 81 до 91 м, в TRA (в южном полушарии) — 92 м, в SASTG от 91 до 99 м.

Суточное ассимиляционное число (САЧ) в поверхностном слое имело наибольшие значения на ст. 23 (101.4 mgC/mgXл в сут) в районе NATRE, и на большинстве станций района SASTG от 111.33 до 260.15 mgC/mgXл в сут. Наблюдаемый выброс на ст. 42—752.33 mgC/mgXл в сут., связан с высокими ошибками определения Кхл, при низком значении последнего 0.01 mg/m^3 .

Таблица 2. Бактериальная продукция (БП) и первичная продукция (ПП), САЧ (суточное ассимиляционное число), концентрация хлорофилла-а (Кхл) и соотношение бактериальной продукции к первичной продукции (БП/ПП) на Трансатлантическом разрезе

Районы	Ст.	Горизонт, м	ПП, мг С/м ³ ·сут	БП, мг С/м ³ ·сут	Кхл, мг/м ³	САЧ, мг С/мг хл·сут	БП/ПП
пролив Ла-Манш	1	0	13.54	0.51	0.34	39.91	0.04
CNRV, восточная периферия NASTG	2	0	34.23	1.01	0.59	58.12	0.03
	3	0	2.67				
	4	0	2.27	1.16	0.18	12.8	0.51
	7	0	13.54	11.87	0.16	84.02	0.88
	8	0	30.81	1.49	0.38	80.83	0.05
	10	0		2.57	0,1		
	13	10	17.5	0.81	0.42	44.82	0.05
		35	10.29	0.04	0.42	29.4	0.00
		80		0.52	0.24		
	15	0	15.6	6.38	0.32	48.53	0.41
		70	11.39	0	0.31	36.38	
		120		0	0.08		
CNZ	20	0	26.08	6.39	0.57	45.64	0.25
NATRE	23	0	14.15	7.74	0.08	181.61	0.55
TRA (в северном полушарии)	26	0	6.69	4.28	0.14	47.88	0.64
	30	0	9.92	11.89	0.14	70.61	1.2
	32	0	4.02	7.68	0.06	61.96	1.91
EC	33	5	1.71	1.67	0.12	14.2	0.98
		50	7.08	1.41	0.7	10.1	0.2
		90	0.99	3.44	0.14	7.19	3.47
		150		1.01	0.08		
	34	5	2.64		0.13	20	
		50	15.99		0.6	26.7	
		88	28.98		0.22	113.8	
		150			0.03		
	35	5			0.19		
		20	7.07	3.7	0.12	57.66	0.52
		60	16.8	16.15	0.5	33.6	0.96
		90	1.23	1.77	0.16	7.5	1.44
		160		181.2	0.09		
	36	5	5.99	0.6	0.08	70.93	0.10
		50		6.54	0.27		
		75	8.18	8.39	0.4	20.5	1.03
	37	5	2.29	4.52	0.14	16.4	1.97
		20	1.03	1.69	0.17	5.92	1.64
		75	8.56	2.22	0.51	16.9	0.26
		160		3.02			
	38	0	5.09	0.09			
		70		0.66			

Таблица 2. Окончание

Районы	Ст.	Горизонт, м	ПП, мг С/м ³ ·сут	БП, мг С/м ³ ·сут	Кхл, мг/м ³	САЧ, мг С/мг хл·сут	БП/ПП
TRA (в южном полушарии)	39	0	1.08		0.05	20.56	
		70	6.41		0.49	13.1	
SASTG	41	0	4.79	3.07	0.02	258.31	0.67
	42	0	6.35	4.28	0.01	752.33	
		280		0.78			
		800		0			
	43	0		2.86	0.01		
	45	0	6.62	4.95	0.03	260.15	0.75
	46	0	4.46	1.95	0.02	248.36	0.44
	47	0	2.19	2.98	0.04	54.65	1.36
		901		0			
	49	0	6.97	1.9	0.04	190.77	0.27
		106	4.82	2.87	0.17	28.37	0.60
	51	40	5.78	2.22	0.1	57.8	0.38
		120		0	0,3		
	52	40	19.19	2.27	0.12	165.45	0.12
		95	17.11		0.49	34.9	
	54	0	8.71		0.08	111.53	
		40	2.11		0.15	13.96	
		105	3.68		0.36	10.2	
	55	20	0.82		0.1	8.2	
		60	1.6		0.12	13.72	
		86	1.17		0.49	2.4	

Примечание: Полужирным шрифтом отмечен выброс значений САЧ на ст. 42.

*Продукционные характеристики
фитопланктона (Кхл, САЧ, ПП),
бактериопланктона (БП) и соотношения
БП/ПП в приповерхностном слое*

Из табл. 2 по продукционным характеристикам фитопланктона (Кхл, САЧ, ПП), бактериопланктона (БП) отмечено, что в приповерхностном слое наибольшие значения Кхл (0.59 мг/м³ и 0.57 мг/м³) и ПП (34.2 мгС/м³·сут и 26.1 мгС/м³·сут) находились в зонах CNRY с NASTG и CNZ, САЧ (с показателями выше 100 мгС/мгХл в сут) — в районах SASTG и NATRE, БП (11.87 мгС/м³·сут и 11.89 мгС/м³·сут) — в районах CNRY и TRA, БП/ПП (1.91 и 1.97) — в районах TRA и ЕС. Наименьшие значения Кхл (до 0.19 мг/м³) в приповерхностном слое (0–5 м) были зарегистрированы в районах SASTG (0.01 мг/м³–0.08 мг/м³),

TRA (0.05 мг/м³–0.14 мг/м³), NATRE (0.14 мг/м³), ЕС (0.08 мг/м³–0.19 мг/м³). Значения ПП в приповерхностном слое этих районов варьировали соответственно от 2.19 мгС/м³·сут до 8.71 мгС/м³·сут; от 1.08 мгС/м³·сут до 4 мгС/м³·сут; 6 мгС/м³·сут. Наименьшие значения ПП были зарегистрированы в районах TRA (1.08 мгС/м³·сут); ЕС (1.7 мгС/м³·сут); SASTG (2.19 мгС/м³·сут) при значениях Кхл от 0.04 мг/м³ до 0.12 мг/м³. Наименьшие значения САЧ (12.8 мгС/мгХл в сут и 14.2 мгС/мгХл в сут) и БП (0.51 мгС/м³·сут и 0.6 мгС/м³·сут) были отмечены в районах CNRY и ЕС. При этом значения ПП и Кхл были невысокими. В районе CNRY ПП и Кхл составляли соответственно 2.3 мгС/м³·сут и 0.18 мг/м³, а в районе ЕС — 1.7 мгС/м³·сут и 0.12 мг/м³. Наименьшие значения соотношения БП/ПП (0.03–0.05) были зафиксированы в районе CNRY.

*Продукционные характеристики
фитопланктона (Кхл, САЧ, ПП),
бактериопланктона (БП) и соотношение
БП/ПП в толще воды*

Район CNRY. В толще воды Кхл на представленных профилях мало меняется по вертикали до глубины 70 м в пределах эвфотической зоны со средним значением 0.4 мг/м^3 на ст. 13 и 0.3 мг/м^3 на ст. 15. Ниже они плавно уменьшаются до нулевых значений на глубинах около 90 м вследствие лимитации в освещенности (рис. 2). ПП на ст. 13 с глубиной уменьшалась с $17.5 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ на 10 м до $10.3 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ на 35 м и на ст. 15 с $15.6 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ на поверхности до $11.4 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ на 70 м. САЧ также как и ПП с глубиной уменьшалась соответственно с 44.8 мгС/мгХл в сут до 29.4 мгС/мгХл в сут и с 48.5 мгС/мгХл в сут до 36.4 мгС/мгХл в сут (табл. 2). БП по глубине была распределена неоднородно. На приповерхностных горизонтах (0–10 м) по сравнению с ее показателями на глубине БП имела повышенное значение $0.81 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ и $6.38 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ соответственно на ст. 13 и ст. 15. БП падала почти до нулевых значений на тех глубинах, где Кхл была однородна. В слое скачка плотности вод БП увеличивалась до 0.52 мг/м^3 (ст. 13). Соответственно с уменьшением уровня БП с глубиной уменьшалось соотношение БП/ПП.

Район ЕС. В вертикальном распределении Кхл (ст. 33–37) наблюдался максимум на глубинах 45–75 м, достигающий значений $0.5–0.7 \text{ мг/м}^3$. Он находился в окрестности верхней границы подповерхностного холодного противотечения Ломоносова, движущегося на восток, примерно на глубине 50–200 м. Глубинные максимумы Кхл и ПП (диапазон значений ПП в ГМХ – $7.1 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ – $16.8 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$) на ст. 33, 35, 36, 37 совпадали за исключением ст. 34. На ст. 34 максимум ПП ($29 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$) был зарегистрирован глубже максимума Кхл, на глубине 88 м (табл. 1). Соответственно максимум САЧ (131.8 мгС/мгХл в сут) на этой станции также наблюдался на 88 м. На ст. 33, 35, 36 САЧ уменьшалось с глубиной за исключением ст. 37, где на глубине 75 м оно увеличивалось до значения 16.9 мгС/мгХл в сут, что было выше значения 16.4 мгС/мгХл в сут на приповерхностном горизонте. Распределение БП по глубине было неоднородным. Максимумы значений БП в приповерхностном слое были отмечены на ст. 37, 38 ($4.52 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$; $5.09 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$), в слое максимума Кхл – на ст. 35, 36, 37 ($16.15 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$; $8.39 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$; $2.22 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$), ниже слоя скачка плотности вод – на ст. 33, 35 ($7.2 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$

на 90 м; $181.2 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ на 160 м). Соотношение БП/ПП, как правило, на больших глубинах 75, 90 м имело повышенные значения ($1.03–3.47$) по сравнению со значениями ($0.1–0.98$) в вышележащей части столба воды, но на ст. 37 повышенные значения (1.96 в приповерхностном слое до 0.26 на 75 м) этого соотношения располагались в приповерхностном слое.

Район SASTG. Вертикальные распределения Кхл в районе SASTG отличались от распределений в районе экватора заглублением максимума Кхл до глубин 85–120 м (рис. 2). На станциях на западной периферии круговорота глубинный максимум Кхл (ГМХ) располагался выше (85–105 м, ст. 52, 53, 54, 55), чем на станциях, смещенных в северо-восточном направлении (105–120 м, ст. 42, 49, 51). Значения Кхл в максимуме периферийных станций также были выше (около $0.35–0.49 \text{ мг/м}^3$) по сравнению со станциями (ст. 42, 49, 51), где максимум Кхл не превышал 0.3 мг/м^3 . Значения ПП и САЧ с глубиной, как правило, уменьшались, за исключением ст. 55, где максимум этих характеристик находился на глубине 60 м и составлял соответственно значения $1.6 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ и 13.72 мгС/мгХл в сут. При этом максимум Кхл располагался ниже, на глубине 86 м со значением 0.49 мг/м^3 . Максимум БП совпадал с максимумом Кхл на ст. 49 (106 м). Измерения БП, выполненные на глубинах 800–900 м (ст. 42, 47) имели нулевые значения, тогда как на глубине 280 м (ст. 42) значение этой характеристики еще не снизилось до 0 и составляло $0.78 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$. Соотношение БП/ПП по имеющимся данным ст. 49 было выше (0.6) на глубине (106 м) по сравнению с приповерхностным горизонтом, где оно составляло 0.27 .

ОБСУЖДЕНИЕ

Во время проведения работ в Северном полушарии был сезон поздней осени – начала зимы, а в Южном полушарии поздней весны – начала лета. Такие особенности биопродукционных характеристик (Кхл, ПП, БП) фито- и бактериопланктона в разных полушариях объясняют изменчивость, как самих величин продукционных характеристик, так и отношения между ними.

В районе CNRY в период исследований в декабре 2019 г. маршрут судна проходил вне зоны прибрежного Канарского апвеллинга, но периодически пересекал зоны локальных апвеллингов [31] в общей системе района CNRY. Поэтому наибольшие значения Кхл (0.59 мг/м^3 и 0.57 мг/м^3) и ПП ($34.2 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ и $26.1 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$)

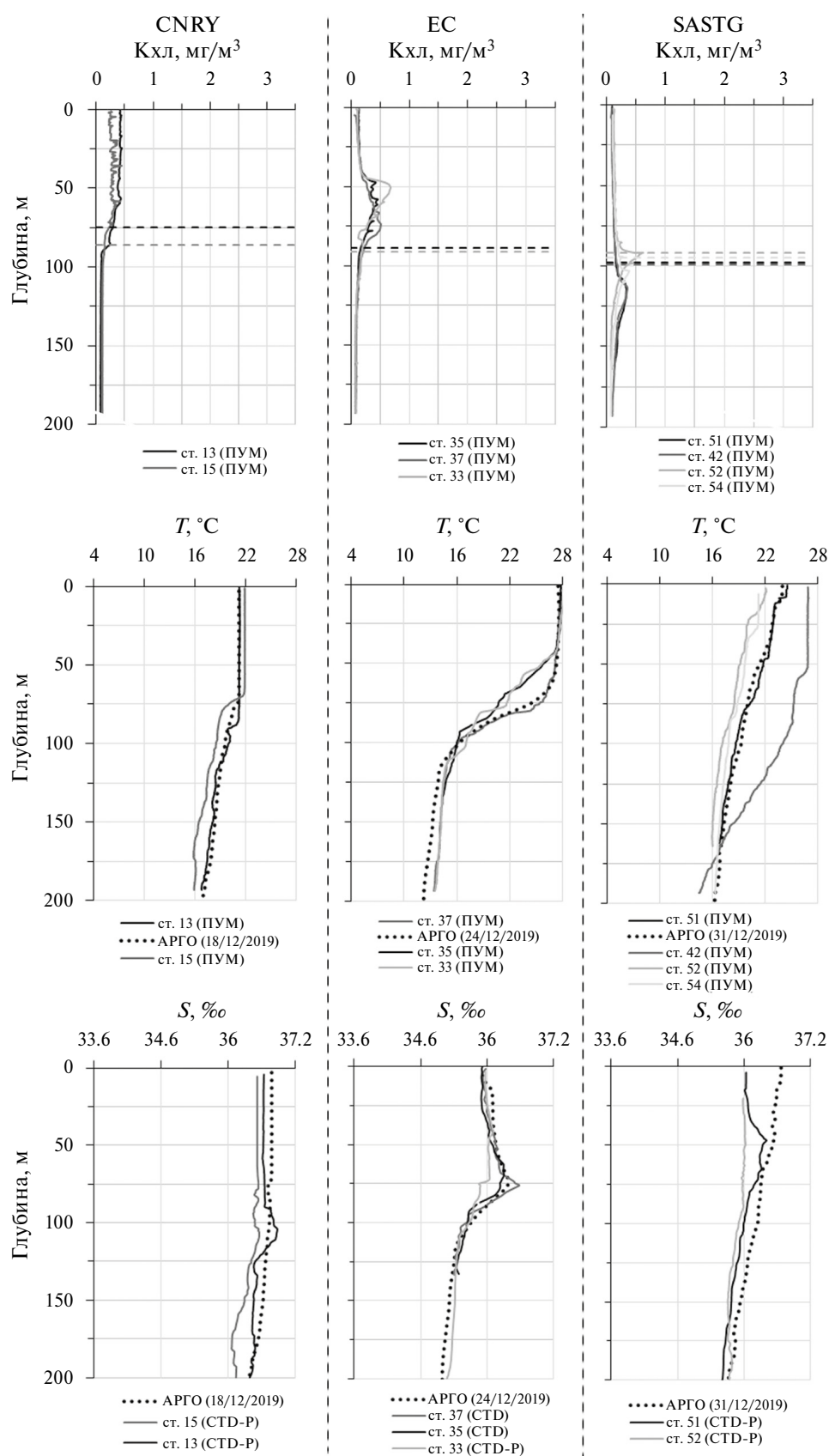


Рис. 2. Вертикальное распределение Кхл (концентрации хлорофилла-а), температуры, солёности вод в биогеографических районах Атлантического океана (CNRY, EC, SASTG), через которые проходил маршрут 79-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”.

приповерхностного слоя в зонах CNRY с NASTG и CNZ обусловлены соответственно влиянием насыщенных биогенными элементами вод в результате локальных апвеллингов вблизи прибрежного Канарского апвеллинга и взаимодействием Северно-Атлантического экваториального и Мавританского течений [25, 40]. В отличие от Кхл, мало меняющейся в CNRY по вертикали до глубины 70 м в пределах эвфотической зоны, ПП с глубиной уменьшалась, что связано с уменьшением САЧ.

Наименьшие значения Кхл (до 0.19 мг/м^3) в приповерхностном слое (0–5 м) были зарегистрированы в районах SASTG, TRA, NATRE, ЕС. Экваториальная и тропическая области характеризовались высокими значениями температуры и солености вод [24]. Теплая менее плотная вода на поверхности препятствовала обменным процессам верхних слоев с глубинными водами, обогащенными биогенными веществами. Поэтому Кхл у поверхности в этих районах имеют низкие значения. Район SASTG также характеризовался относительно высокой соленостью вод. Но температура вод при удалении от экватора постепенно снижалась [24]. Низкие значения Кхл в SASTG вызваны опусканием биогенных веществ и клеток фитопланктона в глубинные слои водных масс в результате даунвеллинга [10, 28].

Так как САЧ зависит от Кхл и ПП [3], то высокие показатели САЧ в приповерхностном слое в SASTG были обусловлены наименьшими значениями Кхл в этом районе, а в NATRE оптимальным соотношением между ПП и Кхл, в котором ПП была выше, чем в SASTG. Наименьшие значения САЧ ($12.8 \text{ мгС/мгХл в сут}$ и $14.2 \text{ мгС/мгХл в сут}$) и БП ($0.51 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ и $0.6 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$) были отмечены в районах CNRY и ЕС. При этом значения ПП и Кхл были невысокими. В районе CNRY ПП и Кхл составляли соответственно $2.3 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ и 0.18 мг/м^3 , а в районе ЕС – $1.7 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ и 0.12 мг/м^3 .

Наибольшим значениям БП ($11.87 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ и $11.89 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ в районах CNRY и TRA) соответствовали средние уровни ПП соответственно равные $13.5 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ и $9.9 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$. Высоким уровням ПП $34.2 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ (ст. 2) и $30.8 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ (ст. 8) (район CNRY с восточной периферией NASTG) соответствовали низкие значения БП – $1.01 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$ и $1.49 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$. Эти факты свидетельствуют о том, что бактериопланктон развивается вслед за развитием фитопланктона и связан с изменениями содержания хлорофилла-а и температуры, что отмечается в работах [2, 30, 32].

Между ПП и БП было отмечено наличие значимой связи при $\gamma = 0.05$ ($R^2 = 0.27$; $N = 17$) для приповерхностных горизонтов. При этом значения ПП и БП, для которых отношение БП/ПП оказалось меньше 0.05 были исключены. Такими стали данные 4-х станций, расположенных в северном полушарии. Отношение БП/ПП меньше 0.05 характерно для вод умеренного типа [11, 23]. Очевидно, что фазы развития ПП и БП на отмеченных выше станциях отличалась от станций, данные которых были включены в уравнение взаимосвязи между этими характеристиками.

Для выборки, включающей данные ПП и БП приповерхностного и горизонтов, отобранных в толще воды и содержащей 34 пары значений, при исключении 6 пар из них, где отношение БП/ПП было меньше 0.05 было отмечено наличие значимой взаимосвязи при $\gamma = 0.05$ ($R^2 = 0.26$; $N = 28$).

При отсутствии указанного выше разбиения выборки, взаимосвязь между ПП и БП была не значимой. Сильный разброс в значениях соотношения БП/ПП от 0.03 в районе CNRY, до 1.91 и 1.97 соответственно в районах TRA и ЕС был вызван сменой режимов с автотрофного на гетеротрофный, что подтверждается другими авторами для участков вдоль Трансатлантического разреза [33].

В районе CNRY ПП варьировала от 2.3 до $34.2 \text{ мгС/м}^3 \cdot \text{сут}$. Наименьшие значения соотношения БП/ПП (0.03–0.05) были зафиксированы в районе CNRY на отдельных станциях (2, 8, 13). Район CNRY характеризовался температурами вод $20\text{--}22^\circ\text{C}$ (рис. 2), что могло влиять на развитие фито- и бактериопланктона. В частности температурная зависимость величины ПП отражена в общепринятой модели VGPM для определения ПП в Мировом океане [26].

Наименьшие значения ПП отмечены в подповерхностном слое в олиготрофных районах SASTG и ЕС. Минимальное значение ПП в столбе воды наблюдалось на станциях, выполненных в районе экватора. При этом ограничивающим фактором для роста фитопланктона может быть поступление питательных веществ в олиготрофных регионах Атлантического океана [38]. Между ПП и Кхл по данным всего рейса для приповерхностных горизонтов наблюдалась значимая связь ($R^2 = 0.76$; $N = 24$). Для всей выборки, включающей как приповерхностные, так и подповерхностные горизонты взаимосвязь также была значима, но значение коэффициента детерминации (R^2) в ней значительно уменьшалось ($R^2 = 0.3$; $N = 46$). С увеличением глубины резко падает

уровень ПП, кроме низкоширотных станций, где на распределение ПП, в большей степени влияет не освещенность, а распределение биогенных элементов в столбе воды [5].

Исследований БП на Трансатлантическом разрезе относительно немного [33, 42, 48] и они различаются методами для оценки БП. В статье [33] рассматриваются данные рейса, совпадающие по сезону (ноябрь – январь) с данными нашего рейса и, несмотря на разные методы оценки БП, общий ход этого параметра сравним с нашими результатами. Превышение БП над ПП наблюдается в приэкваториальной зоне от 22° с.ш. до 32° ю.ш. Для такого превышения требуется, как указано в данной работе, дополнительное снабжение источниками органического углерода нетогетеротрофных областей. Такие запасы происходят за счет: (1) экваториального апвеллинга, обеспечивающего подток растворенного органического углерода, (2) сильных течений (Северные и Южные экваториальные течения, противотечения), переносящих материалы из отдаленных зон апвеллинга в этот район (Канарские острова, Бенгела), больших рек (Амазонка, Конго, Нигер) и, возможно, (3) временного переноса органического вещества как медленно разлагающейся фракции первичной продукции.

Рейсы, рассматриваемые в статье [42] были выполнены в другие сезоны (апрель – май) и (сентябрь – октябрь). Для этих сезонов характерны, отличные от наших, более низкие значения БП – 0.1–0.2 мгС/м³·сут для северного и южного круговоротов, и в 2–4 раза выше в теплых экваториальных водах. При этом в работе [42] отмечается высокая вариабельность БП в приэкваториальных регионах. В работе [48] по определению БП данные были получены в сентябре – октябре и мае – июне, что отличается от сезона исследования в нашем рейсе. БП в работе [48] измерялась в направлении от прибрежных районов в открытый океан, поэтому сравнение с нашими данными затруднено.

БП по глубине была распределена неоднородно. На приповерхностных горизонтах (0–10 м) по сравнению с ее показателями на глубине БП имела повышенное значение 0.81 и 6.38 соответственно на ст. 13 и ст. 15. На глубине, где Кхл была однородна БП падала почти до нулевых значений, а в слое скачка плотности вод увеличивалась до 0.52 (ст. 13). Соответственно с уменьшением уровня БП с глубиной уменьшалось соотношение БП/ПП.

Соотношение между интегрированными БП и ПП (табл. 3) было 0.03 в зоне умеренного климата, от 1.16 до 12.58 в тропических областях.

Таблица 3. Интегрированные первичная продукция (ПП) и бактериальная продукция (БП), соотношение бактериальной продукции к первичной продукции (БП/ПП)

№ станции	ПП, мгС/м ²	БП, мгС/м ²	БП/ПП
13	683.2	23.2	0.03
33	258.1	299.8	1.16
35	491.4	6182.7	12.58
36	420.8	347.3	0.82
37	237.8	376.8	1.58
42	414.9	911.2	2.19

Впервые такую закономерность для тропических регионов Мирового океана отметил Сорокин Ю.И. [21, 47]. Изменчивость соотношения интегральных БП/ПП указывает на снабжение дополнительными источниками растворенного органического вещества районов ЕС и SASTG во время проведения разреза. Также установлено, что отношение БП/ПП коррелирует с температурой, как на севере, так и в южной части Атлантики [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изученные нами акватории Атлантики различались как по биомассе фитопланктона, выраженной в значениях концентрации хлорофилла, так и по условиям формирования первичной и бактериальной продукции. Анализ данных показал, что продукционные характеристики зависели от района и сезона исследования. Первичная и бактериальная продукция были распределены по глубине неравномерно. С увеличением глубины резко падает уровень ПП, кроме низкоширотных станций, где на распределение ПП, в большей степени влияет распределение биогенных элементов в столбе воды. БП по сравнению с ПП более равномерно убывает с глубиной. Отмеченная достоверная связь между БП и ПП при отношении БП/ПП > 0,05 была как для приповерхностных горизонтов, так и выборки, включающей приповерхностные и горизонты в толще воды. Условию БП/ПП > 0.05 не соответствовало 6 пар значений с 4 станций, расположенных в северном полушарии.

В целом же по всему разрезу для 34 пар коэффициент корреляции равен 0.11, что указывает на отсутствие связи между параметрами для $\gamma = 0.05$. Мы предполагаем, что наибольшая бактериопродукция, отмеченная на глубоководных горизонтах, связана с высокими концентрациями РОВ.

Финансирование. Исследования субантарктических и антарктических районов Атлантического океана выполнены в рамках госбюджетных тем 0211-2019-0005 (ТОИ ДВО РАН), исследование распределения первичной и бактериальной продукции в океане по теме № 121021700342-9.

Соблюдение этических стандартов. В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарности начальнику рейса Морозову Е.Г., ученому секретарю Демидовой Т.А., заместителю начальника рейса Спиридонову В.А., зам.директора ТОИ ДВО РАН Шакирову Р.Б. за организацию научных работ в рейсе, членам экипажа НИС “Академик М. Келдыш” за поддержку в работе, магистрантке Мозес А.И. за техническую помощь в оформлении статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемов В.А., Таскаев В.Р., Григорьев А.В.* Автономный прозрачный ПУМ-200 // Материалы 17-й международной научно-технической конференции “Современные методы и средства океанологических исследований”. М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2021. С. 95–99.
2. *Бульон В.В.* Внеклеточная продукция фитопланктона и ее значение для гетеротрофной активности бактерий // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2021. № 3. С. 299–308.
3. *Ведерников В.И.* Зависимость ассимиляционного числа и хлорофилла “а” от продуктивности вод в различных температурных областях мирового океана // Океанология. 1975. Т. 15. № 4. С. 703–707.
4. *Ведерников В.И., Демидов А.Б.* Первичная продукция и хлорофилл в Северной Атлантике (сентябрь–октябрь 1991 г.) // Океанология. 1999. Т. 39. № 6. С. 876–886.
5. *Ведерников В.И., Гагарин В.И., Демидов А.Б. и др.* Распределение первичной продукции и хлорофилла в субтропических и тропических водах Атлантического океана осенью 2002 г. // Океанология. 2007. Т. 47. № 3. С. 418–431.
6. *Винберг Г.Г.* Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН СССР, 1960. 329 с.
7. *Виноградов М.Е., Шушкина Э.А.* Функционирование планктонных сообществ эпипелагиали океана. М.: Наука, 1987. 240 с.
8. *ГОСТ 17.1.04.02–91.* Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла-а. Государственный стандарт союза ССР. М.: Изд-во стандартов, 1991. 14 с.
9. *Демидов А.Б., Ведерников В.И., Гагарин В.И. и др.* Продукционные характеристики фитопланктона в восточных районах Атлантики и Атлантическом секторе Южного океана в октябре – ноябре 2004 г. // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 396–410.
10. *Демидов А.Б., Мошаров С.А., Гагарин В.И.* Продукционные характеристики фитопланктона в Южной Атлантике и Атлантическом секторе Южного океана летом 2009–2010 гг. // Океанология. 2012. Т. 52. № 2. С. 226–226.
11. *Диденко Ю.Т., Аникеев В.В., Ильичев В.И. и др.* Исследование влияния ультразвуковой кавитации на монокультуры водорослей методом измерения замедленной флуоресценции // Биофизика. 1985. Т. 30. № 1. С. 103–106.
12. *Захарков С.П., Владимиров А.С., Штрайхерт Е.А. и др.* Продукционные характеристики бактерий и фитопланктона в весенне-летний период в Охотском и Беринговом морях // Микробиология. 2017. Т. 86. № 3. С. 364–372.
13. *Захарков С.П., Лепская Е.В., Тепнин О.Б. и др.* Первичная продукция Авачинской бухты летом 2017 г. // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2020. № 1 (209). С. 83–89.
14. *Ильинский В.В.* Гетеротрофный бактериопланктон: экология и роль в процессах естественного очищения среды от нефтяных загрязнений // Дисс. ... д. б. н. М.: МГУ, 2000.
15. *Копылов А.И., Косолапов Д.Б.* Микробная “петля” в планктонных сообществах морских и пресноводных экосистем. – Ижевск: КнигоГрад, 2001. 332 с.
16. *Максимов В.В., Щетинина Е.В., Глебова И.В. и др.* Определение бактериальной продукции в водах озера Байкал различными методами // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2009. Т. 2. № 3. С. 255–262.
17. *Морозов Е.Г., Спиридонов В.А., Молодцова Т.Н. и др.* Исследования экосистемы Атлантического сектора Антарктики (79-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”) // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 823–825.
18. *Мошаров С.А., Мошарова И.В., Фрей Д.И. и др.* Первичная и бактериальная продукция в проливе Брансфилда (Антарктика) в летний период // Океанология. 2023. Т. 63. № 4. С. 604–617.
19. *Романенко В.И.* Гетеротрофная ассимиляция CO₂ бактериальной флорой воды // Микробиология. 1964. Т. 33. № 4. С. 679–683.
20. *Сажин А.Ф., Романова Н.Д., Мошаров С.А.* Бактериальная и первичная продукция в водах Карского моря // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 801–808.
21. *Сорокин Ю.И.* Численность и продукция бактерий в толще воды центральной части Тихого океана // Океанология. 1971. Т. 11. № 1. С. 105–116.

22. Сорокин Ю.И. Применение изотопного метода в водной микробиологии // Успехи микробиологии. 1975. Т. 10. С. 214.
23. Флинт М.В., Копылов А.И., Суханова И.Н. Сравнительная роль бактерий и фитопланктона в цикле органического углерода в пелагической экосистеме восточной части Берингова моря (район островов Прибылова) // Океанология. 2003. Т. 43. № 1. С. 54–68.
24. Штрайхерт Е.А., Захарков С.П., Салюк П.А. и др. Распределение содержания хлорофилла-а в Атлантическом океане в декабре 2019 г – январе 2020 г. по данным судовых измерений при различных гидрометеорологических условиях // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15. № 3. С. 97–113.
25. Aristegui J., Barton E.D., Álvarez-Salgado X.A. et al. Subregional ecosystem variability in the Canary Current upwelling // Progress in Oceanography. 2009. V. 83. P. 33–48.
26. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. A consumer's guide to phytoplankton primary production models // Limnology and oceanography. 1997. V. 42. P. 1479–1491.
27. Bunse C., Pinhassi J. Marine bacterioplankton seasonal succession dynamics // Trends in microbiology. 2017. V. 25. N6. P. 494–505.
28. Cabrerizo M.J., Carrillo P., Villafañe V.E. et al. Current and predicted global change impacts of UVR, temperature and nutrient inputs on photosynthesis and respiration of key marine phytoplankton groups // Journal of experimental marine biology and ecology. 2014. V. 461. P. 371–380.
29. Cole J.J., Findlay S., Pace M.L. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: a cross-system overview // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1988. V. 43. P. 1–10.
30. Cullen J.J. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll “a” // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 1982. V. 39. P. 791–803.
31. Ducklow H.W., Carlson C.A. Oceanic bacterial production // Adv. Microb. Ecol. 1992. V. 12. P. 113–181.
32. Glukhovets D.I., Salyuk P.A., Artemiev V.A., Shtraikhert E.A., Zakharkov S.P. Variability of Bio-Optical Characteristics of Surface Water Layer during Transatlantic Transect in 2019–2020 // Oceanology. 2021. V. 61. P. 872–880.
33. Hoppe H.G., Gocke K., Koppe R. et al. Bacterial growth and primary production along a north–south transect of the Atlantic Ocean // Nature. 2002. V. 416. P. 168–171.
34. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochemie und Physiologie der Pflanzen. 1975. V. 167. N2. P. 191–194.
35. Jordan M.J., Likens G.E. Measurement of planktonic bacterial production in an oligotrophic Lake 1 // Limnology and Oceanography. 1980. T. 25. N4. P. 719–732.
36. Karl D.M., Holm-Hansen O., Taylor G.T. et al. Microbial biomass and productivity in the western Bransfield Strait, Antarctica during the 1986–87 austral summer // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. 1991. V. 38. P. 1029–1055.
37. Longhurst A. Ecological geography of the sea (2nd Edition) // San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo: Academic Press, 2006. 543 p.
38. Marañón E., Holligan P.M., Varela M. et al. Basin-scale variability of phytoplankton biomass, production and growth in the Atlantic Ocean // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2000. T. 47. N5. P. 825–857.
39. Pace M.L. Bacterial mortality and the fate of bacterial production // Hydrobiologia. 1988. V. 159. P. 41–49.
40. Pérez V., Fernández E., Marañón E. et al. Seasonal and interannual variability of chlorophyll a and primary production in the Equatorial Atlantic: in situ and remote sensing observations // Journal of Plankton Research. 2005. V. 27. N2. P. 189–197.
41. Puigcorbé V., Roca-Martí M., Masqué P. et al. Latitudinal distributions of particulate carbon export across the North Western Atlantic Ocean // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2017. V. 129. P. 116–130.
42. Robinson C., Poulton A.J., Holligan P.M. et al. The Atlantic Meridional Transect (AMT) programme: a contextual view 1995–2005 // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2006. V. 53. N14–16. P. 1485–1515.
43. Salyuk P.A., Artemiev V.A., Glukhovets D.I. et al. Bio-optical models for estimating euphotic zone depth in the western Atlantic sector of the Southern Ocean in the Antarctic summer. Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean // Oceanography and Ecology. 2021. P. 241–250.
44. Sherr B.F., Sherr E.B., Hopkinson C.S. Trophic interactions within pelagic microbial communities: Indications of feedback regulation of carbon flow // Hydrobiologia. 1988. V. 159. P. 19–26.
45. Smyth T., Quartly G., Jackson T. et al. Determining Atlantic Ocean province contrasts and variations // Prog. Oceanogr. 2017. V. 158. P. 19–40.
46. Sorokin Yu.I. Radioisotopic Methods in Hydrobiology. Heidelberg: Springer Verlag., 1999. 321 p.
47. Sorokin Y. I. Bacterial populations as components of oceanic ecosystems // Marine Biology. 1971. V. 11. P. 101–105.
48. Vaqué D., Alonso-Sáez L., Aristegui J. et al. Bacterial production and losses to predators along an open ocean productivity gradient in the Subtropical North East Atlantic Ocean // Journal of Plankton Research. 2014. V. 36. P. 198–213.

PRODUCTION CHARACTERISTICS OF PHYTO AND BACTERIOPLANKTON IN THE TRANSATLANTIC SECTION (DECEMBER 2019 – JANUARY 2020)

S. P. Zakharkov, E. A. Shtraikhert, Yu. V. Shambarova

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences

** e-mail: zakharkov@poi.dvo.ru*

The production characteristics of phyto- and bacterioplankton were obtained on the Transatlantic transect along the route of the 79th cruises of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” in the Atlantic Ocean in December 2019 – January 2020. The analysis of these data was carried out taking into account the biogeographical zoning of the research region, determined by various hydrometeorological conditions. Primary production (PP) was 0.8–34.2 mgC/m²·day with an average value of 8.9 mgC/m²·day in the euphotic zone. The daily assimilation number on the section varied in surface samples from 7.2 to 260.1 mgC/mgChl per day. Chlorophyll-a concentrations ranged from 0.01 mg/m³ in the SASTG region to 0.59 mg/m³ in the NASTG region. Integral primary production varied from 258 to 765 mgC/m². Bacterial production (BP) in the surface horizons varied from 0.04 to 16.1 mgC/m³·day with an average value of 3.7 mgC/m³·day, the maximum values were observed during the Lomonosov Current with a maximum at a depth of 160 m. Bacterial production in the water column varied from 23.2 mgC/m² to 6182.7 mgC/m². Between PP and BP with a BP/PP ratio > 0.05, a significant relationship was noted at a 95% confidence level both for near-surface horizons and for a sample that included near-surface and horizons in the water column. The condition BP/PP > 0.05 did not correspond to 6 pairs of values from 4 stations located in the northern hemisphere. In general, across the entire section for 34 pairs the correlation coefficient is 0.11, which indicates the absence of a relationship between the parameters for $\gamma = 0.05$. We assume that the highest bacterial production observed in deep-sea horizons is associated with high concentrations of DOM.

Keywords: Atlantic Ocean, chlorophyll concentration, primary production, bacterial production, assimilation number