———— ФИЗИКА МОРЯ ———

УДК 551.465.53.551.513

БИООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ ПОЛИГОНЕ В СЕВЕРНОЙ ТРОПИЧЕСКОЙ ЗОНЕ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА И ИХ СВЯЗЬ С ДИНАМИКОЙ ВОД

© 2022 г. В. И. Маньковский^{1,} *, Е. В. Маньковская^{1,} **

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия *e-mail: mankovskiy@mhi-ras.ru **e-mail: emankovskaya@mhi-ras.ru Поступила в редакцию 22.10.2020 г. После доработки 21.02.2021 г. Принята к публикации 08.04.2021 г.

Приводятся данные о показателе ослабления света, глубине видимости белого диска и концентрации хлорофилла на крупномасштабном полигоне в северной тропической зоне Атлантического океана летом 1986 г. Рассматривается связь распределения на полигоне оптических и биологических характеристик с динамикой вод. Сравниваются концентрации хлорофилла на разрезе в восточной части полигона летом 1986 г. и осенью 2002 г.

Ключевые слова: показатель ослабления, белый диск, концентрация хлорофилла, динамика вод, Атлантический океан

DOI: 10.31857/S0030157422010099

введение

По программе исследования энергоактивных зон Мирового океана Морским гидрофизическим институтом РАН в 1980-е годы были проведены исследования океанологических характеристик в северной тропической зоне Атлантического океана. Основные исследования выполнялись на крупномасштабном полигоне с координатами: 1° ю.ш.–12° с.ш.; 16°–60° з.д. В настоящей работе приводятся результаты исследования в восточной части полигона летом 1986 года.

Данные об оптических характеристиках вод в этом районе океана приводились ранее в работах [1, 6–10, 16, 17]. В настоящей работе, кроме оптических характеристик, приводятся данные о содержании хлорофилла в водах этого района океана. Целью работы являлось исследование связи оптических характеристик и концентрации хлорофилла с динамикой вод.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены в 47-м рейсе НИС "Михаил Ломоносов" (июль–сентябрь 1986 г.) на полигоне с координатами: 1° ю.ш.–12° с.ш.; 16°–32.5° з.д. Гидрологические станции на меридиональных разрезах полигона располагались с интервалом 0.5° по широте, разрезы выполнялись через 1.5° по долготе. Показатель ослабления света (ε , м⁻¹) измерялся лабораторным прозрачномером [5]. Величина ε определялась в 8-ми участках спектра на длинах волн (λ): 426, 449, 478, 506, 527, 547, 579, 612 нм.

Глубина видимости белого диска (Z_6 , м) определялась по методике [11].

Концентрация хлорофилла (C_{xn} , мг м⁻³) определялась фотометрическим методом [18].

Пробы воды для измерений показателя ослабления и концентрации хлорофилла отбирались с глубины 3 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1—3 показано распределение на полигоне показателя ослабления света, глубины видимости белого диска и концентрации хлорофилла.

Карта распределения показателя ослабления построена для длины волны 426 нм. Такая длина волны выбрана исходя из того, что в крайней синей части спектра на изменчивость показателя ослабления наибольшее влияние оказывает растворенное органическое вещество. С увеличением длины волны его влияние на показатель ослабления быстро убывает по экспоненциальному закону.



Рис. 1. Распределение показателя ослабления $\epsilon(426) \times 10^3$, м⁻¹ на глубине 3 м.



Рис. 2. Распределение глубины видимости белого диска Z_6 , м.



Рис. 3. Распределение концентрации хлорофилла $C_{\rm XJ}$, мг м⁻³ на глубине 3 м.

Оптические и биологические характеристики на полигоне характеризуются большой пространственной изменчивостью. Минимальные и максимальные величины составили:

 $\epsilon(426) = 0.104...0.653$ (м⁻¹) для показателя ослабления света;

 $Z_6 = 14...39$ (м) для глубины видимости белого диска;

 $C_{\rm xn} = 0.02...0.58$ (мг м⁻³) для концентрации хлорофилла.

В распределении всех биооптических характеристик есть общая закономерность, хорошо наблюдаемая на примере распределения показателя ослабления света (рис. 1). В приэкваториальном и восточном районах наблюдались более высокие показатели ослабления. В центральном, северозападном и, частично, в западных районах полигона находились воды с низкими величинами показателя ослабления.

Рассмотрим, как распределение биооптических характеристик на полигоне связано с динамикой вод. На рис. 4 показана карта-схема течений на полигоне, составленная начальником отряда гидрологии в 47-м рейсе НИС "Михаил Ломоносов" П.Д. Ломакиным. Так как динамический метод в экваториальной зоне не работает, карта-схема течений на полигоне была построена штурманским методом – по наблюдениям за сносом судна течениями. Она полностью согласуется с картой течений в части полигона без экваториальной зоны, построенной по расчетам динамическим методом [2]. Представленная на рис. 4 схема крупномасштабных течений является типичной для летнего периода в тропических водах Атлантического океана [14], и в многолетнем плане она устойчива (рис. 5). Например, такая схема течений наблюдалась и летом 1988 г. в работе [1]. На рис. 5 показана среднемноголетняя схема крупномасштабных течений по данным [12].

Согласно рис. 4, северная часть полигона находилась под действием Северного пассатного течения (СПТ). В районе 28°–31° западной долготы в СПТ образовался антициклонический вихрь. В южной части полигона проходило Южное пассатное течение (ЮПТ). На экваторе в ЮПТ наблюдалась дивергенция его потоков, обусловленная изменением направления действия силы Кориолиса, отклоняющим течения вправо в Северном полушарии и влево – в Южном.

В полосе $6^{\circ}-9^{\circ}$ с.ш. через полигон проходило Межпассатное противотечение (МПТ). В районе 25° з.д. в МПТ наблюдалась его конвергенция, восточнее 23° з.д. – его дивергенция: оно разделялось на три ветви, уходящие в северном, северовосточном и юго-восточном направлениях. Около 32° з.д. от МПТ отходила небольшая южная ветвь.

В центральной части полигона между течениями МПТ и ЮПТ в полосе ≈2°-6° с.ш. образовался



Рис. 4. Схема течений на полигоне. СПТ – Северное пассатное течение, ЮПТ – Южное пассатное течение, МПТ – Межпассатное противотечение, ТЛ – течение Ломоносова. ⊕ – подъем вод, ⊖ – опускание вод.



Рис. 5. Скорость (цветовая шкала, м/с) и направление геострофических течений (август месяц). Осредненные расчетные значения по данным спутниковых альтиметрических измерений за 1993–2015 гг. [12]

антициклонический круговорот. В юго-западной части полигона в районе экватора на поверхность выходило подповерхностное течение Ломоносова (ТЛ) [13].

Главным фактором в динамике вод, влияющим на их оптические и биологические характеристики, является их вертикальное движение подъемы и опускания. В районах подъема вод происходит вынос из глубинных слоев в поверхностную эвфотическую зону биогенных веществ, способствующих развитию фитопланктона и увеличению его численности. В районах опускания вод в поверхностных слоях содержание биогенных элементов незначительно и развитие фитопланктона затруднено, численность его мала. Соответственно с численностью фитопланктона в районах подъема и опускания вод изменяются концентрации хлорофилла и показатели прозрачности воды — показатель ослабления света ε и глубина видимости белого диска Z_6 . Подъем вод происходит при циклоническом характере течений и в районах их дивергенции, опускание вод в антициклонических течениях и в районах их конвергенции.

| Вертикальное движение вод; Район | Координаты | ε(426), м ⁻¹ | <i>Z</i> б, м | $C_{\rm XJ}$, мг м ⁻³ | Продуктивность вод | |
|-------------------------------------|--------------|-------------------------|---------------|-----------------------------------|--------------------|--|
| Подъем | 0°00′ с.ш.; | 0.653 | 14 | 0.58 | Мезотрофные2 | |
| Дивергенция ЮПТ. Экватор | 16°00′ з.д. | | | | | |
| Подъем | 9°00′ с.ш.; | 0.331 | 16 | 0.37 | Мезотрофные1 | |
| Дивергенция МПТ | 20°30′ з.д. | | | | | |
| Нейтральное | 3°30′ с.ш; | 0.278 | 26 | 0.13 | Мезотрофные1 | |
| Южное пассатное течение | 16°00′ з.д. | | | | | |
| Нейтральное | 1°00′ ю.ш.; | 0.228 | 28 | 0.20 | Мезотрофные1 | |
| Течение Ломоносова | 32°30′ з.д. | | | | | |
| Нейтральное | 11°00' с.ш.; | 0.195 | 28 | 0.15 | Мезотрофные1 | |
| Северное пассатное течение | 23°30′ з.д. | | | | | |
| Опускание | 3°30′ с.ш.; | 0.163 | 37 | 0.08 | Олиготрофные | |
| Конвергенция южной ветви МПТ с ЮПТ | 31°00′ з.д. | | | | | |
| Опускание | 3°00′ с.ш.; | 0.140 | 32 | 0.09 | Олиготрофные | |
| Антициклонический круговорот | 26°30′ з.д. | | | | | |
| Опускание | 7°30′ с.ш.; | 0.122 | 39 | 0.09 | Олиготрофные | |
| Конвергенция МПТ | 25°00′ з.д. | | | | | |
| Опускание | 10°30′ с.ш.; | 0.104 | 34 | — | Олиготрофные | |
| Антициклон в СПТ | 29°30′ з.д. | | | | | |

Таблица 1. Оптические и биологические характеристики в районах с разной динамикой вод

Характер течений на полигоне (рис. 4) показывает наличие на нем районов подъема и опускания вод. Районы подъема вод: дивергенция Южного пассатного течения на экваторе, дивергенция Межпассатного противотечения в его восточной части. Районы опускания вод: антициклонический круговорот в центральной части полигона, конвергенция вод в Межпассатном противотечении в районе 25° з.д., антициклоническая завихренность в Северном пассатном течении в районе 28° — 31° з.д., конвергенция южной ветви Межпассатного противотечения в районе 28° — 31° з.д., конвергенция южной ветви Межпассатного противотечения в районе 31° з.д.

Сопоставление распределений биоооптических характеристик с картой течений показывает, что в указанных районах подъема и опускания вод наблюдаются их соответствующие изменения: в районах подъема величины ε , C_{xn} возрастают, а Z_6 уменьшается, и наоборот, в районах опускания величины ε , C_{xn} уменьшаются, а Z_6 возрастает.

В табл. 1 приведены наблюдаемые на полигоне биооптические характеристики в районах подъема и опускания, а также в районах с нейтральной вертикальной динамикой вод.

Оценка трофности вод на полигоне была выполнена по распределению концентрации хлорофилла (рис. 3). Использовалась таблица из работы [15], в которой мезотрофные воды были разбиты нами на два типа: мезотрофные 1 и мезотрофные 2 (табл. 2). Трофность вод разного типа на полигоне составила: 84% — мезотрофные воды 1-го типа, 1% — мезотрофные воды 2-го типа (на экваторе), 15% — олиготрофные воды. Эвтрофных вод на полигоне не наблюдалось.

В табл. 3 и на рис. 6 приведены спектральные распределения показателя ослабления света в водах разных динамических структур полигона, указанных в табл. 1. Для сравнения на рисунке представлено спектральное распределение показателя ослабления света для чистой морской воды [4].

В работе [3] приведены данные о концентрации хлорофилла в субтропических и тропических водах Атлантического океана в период октябрьноябрь 2002 г. В районе полигона наблюдения были выполнены на разрезе по 20° з.д. в трех точках: 10°, 5°, 1° с.ш. На рис. 7 показаны концентрации хлорофилла на 20° з.д. по данным [3]. Для сравнения на том же рисунке показано распределение концентрации хлорофилла на разрезе по

Таблица 2. Трофность вод при разной концентрации хлорофилла

| Тип вод | $C_{\rm XJI}$, мг м $^{-3}$ |
|---------------|------------------------------|
| Олиготрофные | <0.1 |
| Мезотрофные 1 | 0.1-0.5 |
| Мезотрофные 2 | 0.5-1.0 |
| Эвтрофные | >1.0 |



Рис. 6. Спектральное распределение показателя ослабления света в районах полигона с разной динамикой вод. Номер спектра соответствует номеру района в табл. 3.

20.5° з.д., который был выполнен в 47-м рейсе НИС "Михаил Ломоносов" в июле 1986 г.

В 2002 г. на 20° з.д. концентрация хлорофилла изменялась в пределах 0.14...0.20 мг м⁻³, что соответствует водам мезотрофного уровня 1-го типа (табл. 3). По данным наблюдений в 1986 г., на разрезе по 20.5° з.д. концентрация хлорофилла изменялась в пределах 0.02...0.37 мг м⁻³. То есть кроме мезотрофных вод имелись и олиготрофные воды.

Следует сказать, что, как видно из рис. 7, пространственные размеры олиготрофных вод, наблюдавшихся в 1986 г., составляют 2°–3° по широте, и при расстояниях на разрезе между станциями в 4° и 5° в 2002 г. такие воды могли быть не зафиксированы. Поэтому приводимые данные о временной изменчивости $C_{\rm xn}$ в данном районе тропического полигона могут быть приняты только как ориентировочные.

С 1997 г. доступны данные дистанционного зондирования оптического сканера SeaWiFS, а с 2003 г. – сканера MODIS-Aqua. Сопоставление со спутниковыми данными MODIS-Aqua за июль– сентябрь 2003 г. (рис. 8) показывает, что на исследуемом полигоне в летне-осенний период в среднем также преобладают воды мезотрофного уровня

Таблица 3. Спектральные показатели ослабления света ε(λ), м⁻¹ в водах полигона: 1 – дивергенция ЮПТ на экваторе; 2 – дивергенция МПТ; 3 – ЮПТ; 4 – ТЛ; 5 – СПТ; 6 – конвергенция южной ветви МПТ с северной ветвью ЮПТ; 7 – антициклональный круговорот; 8 – конвергенция в МПТ; 9 – антициклонический вихрь в СПТ; 10 – оптически чистая морская вода

| λ, нм | Номер района | | | | | | | | | |
|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 426 | 0.653 | 0.331 | 0.278 | 0.228 | 0.195 | 0.185 | 0.131 | 0.122 | 0.104 | 0.009 |
| 449 | 0.626 | 0.301 | 0.255 | 0.216 | 0.185 | 0.165 | 0.120 | 0.113 | 0.095 | 0.007 |
| 478 | 0.575 | 0.287 | 0.239 | 0.193 | 0.180 | 0.150 | 0.104 | 0.094 | 0.076 | 0.006 |
| 509 | 0.552 | 0.283 | 0.246 | 0.184 | 0.173 | 0.156 | 0.106 | 0.101 | 0.083 | 0.012 |
| 527 | 0.534 | 0.285 | 0.251 | 0.184 | 0.182 | 0.166 | 0.127 | 0.115 | 0.094 | 0.021 |
| 547 | 0.552 | 0.315 | 0.258 | 0.200 | 0.209 | 0.182 | 0.143 | 0.138 | 0.117 | 0.035 |
| 579 | 0.552 | 0.338 | 0.283 | 0.235 | 0.230 | 0.214 | 0.186 | 0.175 | 0.144 | 0.073 |
| 612 | 0.644 | 0.467 | 0.393 | 0.354 | 0.350 | 0.334 | 0.311 | 0.305 | 0.276 | 0.224 |

ОКЕАНОЛОГИЯ том 62 № 1 2022



Рис. 7. Распределение биооптических характеристик: на разрезе по 20° з.д. осенью 2002 г. – концентрация хлорофилла $C_{\rm XI} \times 100$, мг м⁻³ (красные квадраты); на разрезе по 20.5° з.д. летом 1986 г. – концентрация хлорофилла $C_{\rm XI} \times 100$, мг м⁻³ (черные круги) и глубина видимости белого диска Z_6 , м (зеленые треугольники).



Time averaged map of Chlorophyll a concentration monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_CHL v2018] mg m⁻³ over 07.01.2003 00:10:01Z–10.01.2003 02:29:58Z, region 32° W, 1° S, 16° W, 12° N

Рис. 8. Концентрация хлорофилла (мг м⁻³), осредненная по данным сканера MODIS-Aqua за июль– сентябрь 2003 г.

1-го типа (табл. 3). Олиготрофные воды наблюдаются на незначительной части полигона. Концентрация хлорофилла изменяется в пределах 0.08...0.50 мг м⁻³. Повышенные значения в распределении концентрации хлорофилла (рис. 8) наблюдаются в тех же районах, что и на рис. 3 для натурных данных, и соответствуют областям подъема вод. Аналогичная биооптическая ситуация на исследуемом полигоне наблюдается по спутниковым данным в летне-осенний период и в другие годы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена связь пространственного распределения биооптических характеристик вод на крупномасштабном полигоне в восточной части северной тропической зоны Атлантического океана летом 1986 г. с динамикой вод. Получены данные о биооптических характеристиках вод в основных динамических структурах на полигоне: районах подъема вод, опускания вод и в районах с нейтральной вертикальной динамикой. По продуктивности 85% вод полигона относились к мезотрофному типу и 15% — к олиготрофному. Приведены сравнительные оценки продуктивности вод в восточной части полигона по наблюдениям летом 1986 г., осенью 2002 г. и летом—осенью 2003 г. по данным дистанционного зондирования.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0555-2021-0003 "Оперативная океанология", № 0555-2021-0005 "Прибрежные исследования".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Агафонов Е.А., Артамонов Ю.В., Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Влияние гидрофизических факторов на распределение прозрачности и взвеси в поверхностном слое вод северо-восточной части тропической Атлантики в летний период // Морской гидрофизический журнал. 2003. № 4. С. 69–79.
- Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. Циркуляция вод восточной части тропической Атлантики в летний сезон // Океанологические исследования в восточной части Атлантической тропической энергоактивной зоны, Деп. ВИНИТИ. № 6826–1987. С. 6–17.
- 3. 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.
- Копелевич О.В. Оптические характеристики чистой воды // Оптика океана. Том 1. Физическая оптика океана. / Под ред. А.С. Монина. М.: Наука, 1983. Табл. 6.2.
- Маньковский В.И. Спектральный лабораторный прозрачномер с переменной базой // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАНУ, 2012. С. 56–60.

- Маньковский В.И. Пространственная изменчивость прозрачности воды в приэкваториальном районе Атлантического океана и ее связь с динамикой вод // Труды IX Международной конференции "Современные проблемы оптики естественных вод". Ин-т океанологии РАН. Санкт-Петербургский филиал: Санкт-Петербург. 2017. С. 91–97.
- Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Мартынов О.В. Пространственная и временная изменчивость оптических характеристик водных масс на полигоне ПИГАП // Морские гидрофизические исследования. 1980. № 2. С. 135–140.
- Маньковский В.И., Ли М.Е., Афонин Е.И., Башарин В.А. Оптические исследования вод тропической Атлантики у западного побережья Африки // Морские гидрофизические исследования. 1978. № 3. С. 188–197.
- 9. Маньковский В.И., Маньковская Е.В. Оптические характеристики вод в тропической энергоактивной зоне Атлантического океана // Труды X Международной конференции "Современные проблемы оптики естественных вод". Ин-т океанологии РАН. Санкт-Петербургский филиал: Санкт-Петербург. 2019. С. 1311–135.
- Николаев В.П., Жильцов А.А., Хулапов М.С. Пространственная изменчивость прозрачности воды // Изменчивость океана и атмосферы в экваториальной Атлантике. М.: Наука, 1982. С. 153–155.
- Определение относительной прозрачности и цвета морской воды // Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. С. 299–303.
- 12. Федоров А.М., Кубряков А.А., Белоненко Т.В. Многолетние изменения крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике на основе спутниковых альтиметрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 225–237. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-7-225-237
- Ханайченко Н.К. Течение Ломоносова // Система экваториальных противотечений в океане Л.: Гидрометеоиздат, 1974. С. 45–84.
- Хлыстов Н.З. Структура и динамика вод тропической Атлантики // Киев: Наукова Думка, 1976. 164 с.
- Чурин Д.А., Гулюгин С.И. Особенности сезонной динамики хлорофилла "а" в связи с абсолютной динамической топографией Антарктической части Атлантики // Труды ВНИРО. 2017. Т. 169. С. 117–123.
- Маньковский В.И. Параметры индикатрис рассеяния света в тропических водах Атлантического океана // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. №8. С.634-639. DOI: 10.15372/АОО20180806
- 17. Маньковский В.И., Гринченко Д.В. Взвешенное вещество и его состав по данным о рассеянии света на макрополигоне в северной части тропической зоны Атлантического океана // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34. № 3 (201). С. 254–266. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-3-254-266
- 18. UNESCO. Determination photosynthetic pigments in seawater. 1966. P. 11–69.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 62 № 1 2022

Biooptical Characteristics on Macropoligon in the Northern Tropical Zone of the Atlantic Ocean and Their Relationship with Water Dynamics

V. I. Mankovsky^{a, #}, E. V. Mankovskaya^{a, ##}

^aMarine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia [#]e-mail: mankovskiy@mhi-ras.ru ^{##}e-mail: emankovskaya@mhi-ras.ru

The data of the beam attenuation coefficient, Secchy disk depth and chlorophill concentration on macropoligon in the northern tropical zone of the Atlantic Ocean in summer 1986 are presented. The relationship of biooptical characteristics with water dynamics are considered. The chlorophyll concentrations in summer 1986 with one in autumn 2002 are compared.

Keywords: beam attenuation coefficient, Secchy disk, chlorophyll concentration, waters dynamics, Atlantic ocean