

## **БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ВОД ПРИБРЕЖНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ У ПОВЕРЕЖЬЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ АФРИКИ В 1994 – 2004 ГОДАХ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ПРОДУКЦИИ ФИТОПЛАНКТОНА И СОДЕРЖАНИЮ ХЛОРОФИЛЛА**

Определение величин первичной продукции планктона и содержания хлорофилла «а» как показателя биомассы фитопланктона позволяет оценить биологическую продуктивность вод в различных пространственно-временных масштабах, исследовать механизмы воздействия на водные экосистемы антропогенных факторов и разрабатывать методы прогноза и регуляции рыбопродуктивности. Поэтому оценка уровня первичной продукции планктона и содержания хлорофилла «а» является одним из направлений программы АтлантНИРО по изучению пелагической экосистемы вод экономических зон Марокко и Мавритании.

Акватории этих государств входят в систему Канарского апвеллинга, относящегося к наиболее высокопродуктивным районам Мирового океана. Исследования первичной продукции в районах с интенсивным апвеллингом, в частности Канарского апвеллинга, начались в 1960 – 1970 гг. [6]. В одном из первых исследований в самом продуктивном районе северо-западного побережья Африки, у м. Кап-Блан, первичная продукция была оценена в  $1,1 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  в весенний период и  $3,4 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  в летний [9]. Близкие величины (около  $2 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ ) были получены в 70-х годах XX века в рамках программы JOINT-I [8, 10]. Согласно другим исследованиям, выполненным в этот же период в районе м. Кап-Блан, первичная продукция составляет около  $1 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  [5, 13]. В частности, по данным Шульца [13], полученным в 70-х годах, содержание хлорофилла «а» в этом районе может составлять  $21 - 531 \text{ мг/м}^2$  в слое  $0 - 50 \text{ м}$ , а первичная продукция –  $0,18 - 3,58 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ , в среднем  $0,95 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ .

Попытка оценить годовую продукцию для всего района была предпринята немецкими исследователями по результатам экспедиционных работ, выполненных в 1971 – 1973 гг. и охвативших акваторию от  $10$  до  $25^\circ \text{с.ш.}$  [13, 14]. Согласно их расчетам средняя для континентального шельфа первичная продукция составляла  $0,44 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ , или  $160 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ , а для наиболее продуктивного района у м. Кап-Блан –  $0,59 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ , или  $215 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ . Как показали другие исследования, результаты которых обобщил Минас [10], вышеуказанные оценки сильно занижены, и первичная продукция у северо-западного побережья Африки между м. Кап-Блан и м. Бохадор ( $20 - 25^\circ \text{с.ш.}$ ) составляет около  $2,0 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ , или  $730 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ .

Таким образом, для района Канарского апвеллинга в оценках первичной продукции имеются большие расхождения. Это можно объяснить как ограниченностью района работ (обычно у м. Кап-Блан), так и эпизодичностью исследований (в отдельные сезоны на протяжении  $1 - 3$  лет).

Исследования АтлантНИРО в районе Канарского апвеллинга в рамках изучения пелагической экосистемы вод экономических зон Марокко и Мавритании были начаты в 1994 г. Изучение биологической продуктивности выполнялось в зоне Марокко в 1994 – 1999 и 2004 гг. и в зоне Мавритании в 1997 – 2000 и 2004 гг. В данной работе представлены данные, полученные в ходе 36-го рейса СТМ «Атлантида» в июле – августе 2004 г., а также результаты обобщения материалов, собранных во всех научно-исследовательских рейсах, выполненных АтлантНИРО в экономических зонах этих государств с 1994 г. В ходе 36-го рейса СТМ «Атлантида» получена достаточно типичная для летнего периода картина пространственного распределения

содержания хлорофилла «а» и первичной продукции планктона, как и в предыдущие годы изучения (1994 – 2000). Поэтому в статье в основном приведены данные и карты пространственного распределения, полученные в ходе этой съемки, поскольку они отражают современный уровень биологической продуктивности вод. Кроме того, большое количество выполненных станций (в 2 – 3 раза больше, чем в предыдущих рейсах) позволило получить более подробные данные о пространственном распределении по сравнению с предыдущим периодом исследований.

Анализ многолетних данных позволяет рассмотреть для этого района закономерности пространственного распределения вод различного трофического статуса с различной биологической продуктивностью, а также исследовать зависимость показателей биологической продуктивности вод (первичная продукция, содержание хлорофилла) от абиотических факторов среды (температура воды, содержание биогенных элементов).

### **Материал и методика**

Исследования первичной продукции и содержания хлорофилла «а» проводились на шельфе побережья Северо-Западной Африки над глубинами 15 – 1000 м по широтно-ориентированной сетке параллельных галсов. В 1994 – 1996 гг. съемки выполнялись в экономической зоне Марокко от 21 до 36° с.ш., а в 1997 – 2004 гг. акватория работ включала еще зону Мавритании до 16° с.ш. Съемки проводились в летний (июнь – август, 8 съемок) и зимний (январь – апрель, 5 съемок) сезоны. В период с 1994 по 2000 г. исследования первичной продукции и содержания хлорофилла «а» были выполнены сотрудником сектора гидробиологии АтлантНИРО И.В. Красовским, а в 2004 г. автором статьи.

На акватории Марокко в ходе 36-го рейса СТМ «Атлантида» в июле – августе 2004 г. первичная продукция была определена на 43 станциях, а содержание хлорофилла на 87. Всего с 1994 г. в этот район было выполнено 13 рейсов, в которых первичная продукция была измерена на 315 станциях, а хлорофилл в столбе воды на 815. На акватории Мавритании первичная продукция в ходе 36-го рейса была определена на 37 станциях, а хлорофилл на 68. Всего с 1997 г. в этот район выполнено 6 рейсов, в которых первичная продукция была измерена на 89 станциях, а хлорофилл на 256.

Содержание хлорофилла «а» на станциях, где измерялась первичная продукция, определяли на горизонтах, соответствующих 100 (поверхность), 69, 46, 25, 10, 3 и 1% подповерхностной освещенности и на горизонте 100 м. На других гидрологических станциях хлорофилл «а» определяли на 7 стандартных горизонтах (0, 10, 20, 30, 50, 75 и 100 м). Пробы воды объемом 0,2 – 0,5 л фильтровали через мембранные фильтры «Sinrog № 6» и «МФАС-МА-6» с диаметром пор 0,3 – 0,4 мкм. Хлорофилл «а» определяли стандартным флуоресцентным методом [4]. Использовали флуориметры «Квант-7» и в 2004 г. «Эко-03», которые предварительно калибровали с помощью спектрофотометра (проводилась серия одновременных измерений на флуориметре и спектрофотометре).

Первичную продукцию определяли радиоуглеродной модификацией скляночного метода. Для расчета интегральной первичной продукции скорость фотосинтеза измеряли на 7 горизонтах, соответствующих 100 (поверхность), 69, 46, 25, 10, 3 и 1% от подповерхностной освещенности. За нижнюю границу фотической зоны принимали глубину, которой достигает 1% проникающей в воду радиации [15]. Глубины отбора проб, соответствующие указанным «световым» горизонтам, рассчитывали с использованием закона ослабления света в столбе воды Бугера-Ламберта-Бера (1). Коэффициент экстинкции (k) находили по соотношению k с прозрачностью воды по диску Секки (S) [11, 12].

$$z = - (\ln I_z/I_0) \cdot (S / 1,7), \quad (1)$$

где  $z$  – глубина отбора проб (м);

$I_0$  и  $I_z$  – интенсивность солнечной радиации у поверхности и на глубине  $z$ .

Пробы воды в 160 – 170 мл склянках (2 светлые и 1 темная на каждый горизонт) помещали в палубный проточный инкубатор, представляющий систему из 7 цилиндров из органического стекла, в котором с помощью нейтральных светофильтров имитировали световые условия на горизонтах отбора проб [11]. Радиоактивность планктона, сконцентрированного после экспозиции на мембранные фильтры с размерами пор 0,3 – 0,4 мкм, измеряли до 2004 г. на пересчетном устройстве ПСО2-08 с помощью торцевых счетчиков СБТ-13, а в 2004 г. на радиометре «УМФ-2000». Скорость фотосинтеза ( $A$ , мг С/м<sup>3</sup>) на каждом горизонте рассчитывали по формуле:

$$A = (r / R) \cdot 1,064 \cdot 25000, \quad (2)$$

где  $r$  – радиоактивность, накопленная фитопланктоном за экспозицию (имп/мин);

$R$  – радиоактивность, внесенная в пробу (имп/мин);

1,064 – поправка, отражающая дискриминацию С<sup>14</sup>;

25000 – содержание углекислоты в морской воде (мг С/м<sup>3</sup>).

До 1999 г. первичную продукцию в течение дня определяли на одной станции, экспозиция проб продолжалась 4 – 5 ч до астрономического полдня. В 2004 г. первичную продукцию обычно определяли на двух станциях, экспозиция продолжалась 4 – 5 ч до и после астрономического полдня, что позволило наиболее полно охватить исследуемую акваторию. По соотношению солнечной освещенности за период экспозиции и весь день (которая измерялась в диапазоне ФАР люксметрами «Ю-16» и «ТКА-ЛЮКС») величины первичной продукции, полученные при краткосрочных экспозициях, пересчитывали на сутки.

Для проверки методики оценки суточных показателей первичной продукции, в 2004 г. ежедневно дополнительно к краткосрочной выполняли суточную экспозицию проб фитопланктона. Величины первичной продукции, измеренные при суточной экспозиции и полученные путем пересчета краткосрочных экспозиций, совпадали (рис. 1). Следовательно, краткосрочное экспонирование проб воды с последующим пересчетом величин продукции на сутки (по соотношению между ФАР за время экспозиции и сутки) можно рекомендовать для определения первичной продукции на больших акваториях. Полученные результаты вполне сопоставимы с результатами исследований, выполненных по классической схеме с суточным экспонированием проб.

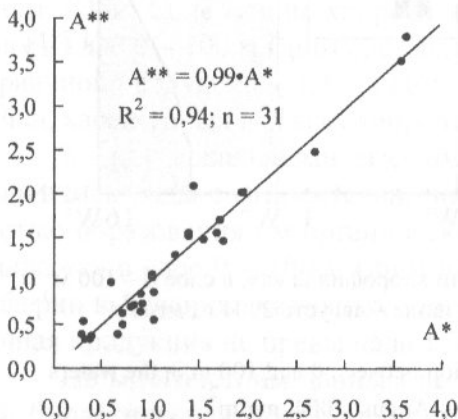


Рис. 1 Соотношение результатов, получаемых при суточной экспозиции ( $A^{**}$ , гС·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>) и путем пересчета краткосрочной (4 – 5 часов) экспозиции ( $A^{*}$ , гС·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>)

Fig. 1. Relationship between the results obtained under diurnal exposition ( $A^{**}$ , g C·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>) and by conversion of short-term (4-5 hours) exposition ( $A^{*}$ , g C·m<sup>-2</sup>·days<sup>-1</sup>)



Анализ связи величин первичной продукции и содержания хлорофилла «а» с гидрологическими и гидрохимическими показателями выполнен по данным, полученным в 1994 – 2004 гг. сотрудниками лаборатории промышленной океанологии АтлантНИРО в ходе тех же съемок в экономических зонах Марокко и Мавритании.

### Результаты

В экономической зоне Марокко наиболее высокие величины первичной продукции планктона и содержания хлорофилла «а» на протяжении всего года были приурочены к южному району ( $20^{\circ}30' - 24^{\circ}00'$  с.ш.) с максимумом у м. Кап-Блан. Данная закономерность особенно хорошо видна при оценке средних показателей для интегрируемого слоя воды. Надо отметить, что эти средние показатели наиболее объективно отражают продуктивность вод и условия для последующих звеньев трофической сети [1]. В июле 2004 г. в этом же районе содержание хлорофилла «а» на мелководных и среднеглубинных станциях в слое 0 – 100 м (дно) составляло  $100 - 360 \text{ мг/м}^2$ , или  $3 - 6 \text{ мг/м}^3$ , а величина первичной продукции –  $1,3 - 4,2 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ , или  $65 - 170 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ , что в 1,5 – 2,0 раза выше, чем на акватории Марокко севернее  $24^{\circ}$  с.ш. (рис. 2, 3). Аналогичная тенденция наблюдалась и в предыдущих рейсах в 1994 – 1999 гг. В частности, за этот период средние для акватории Марокко южнее  $24^{\circ}$  с.ш. величины хлорофилла «а» и первичной продукции были  $2,17 \text{ мг/м}^3$  и  $1,18 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ , тогда как севернее  $24^{\circ}$  с.ш. –  $1,18 \text{ мг/м}^3$  и  $0,88 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$  (т.е. в 1,6 – 1,8 раза меньше).

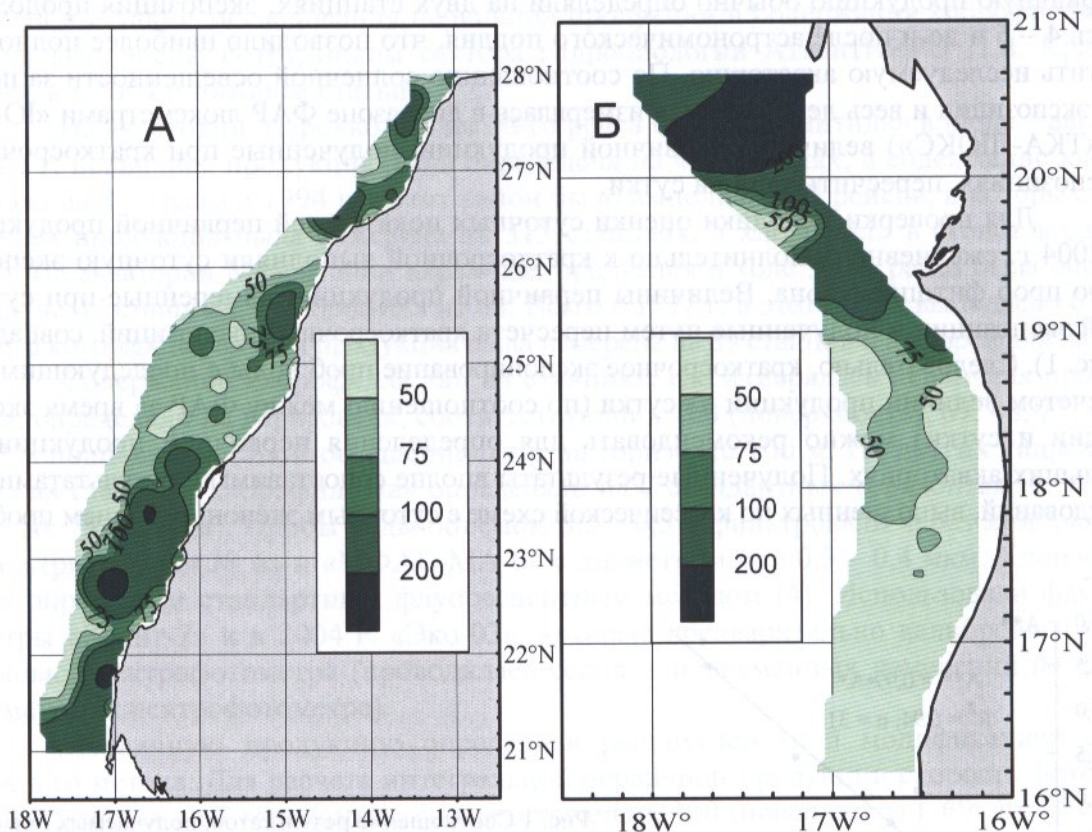


Рис. 2. Пространственное распределение концентрации хлорофилла «а», в слое 0 – 100 м на акваториях Марокко (А) и Мавритании (Б) в июле – августе 2004 г.,  $\text{мг/м}^2$

Fig. 2. Spatial distribution of chlorophyll «а» concentration between 0 and 100 m in the waters of Morocco (A) and Mauritania (B) in July – August 2004,  $\text{mg/m}^2$



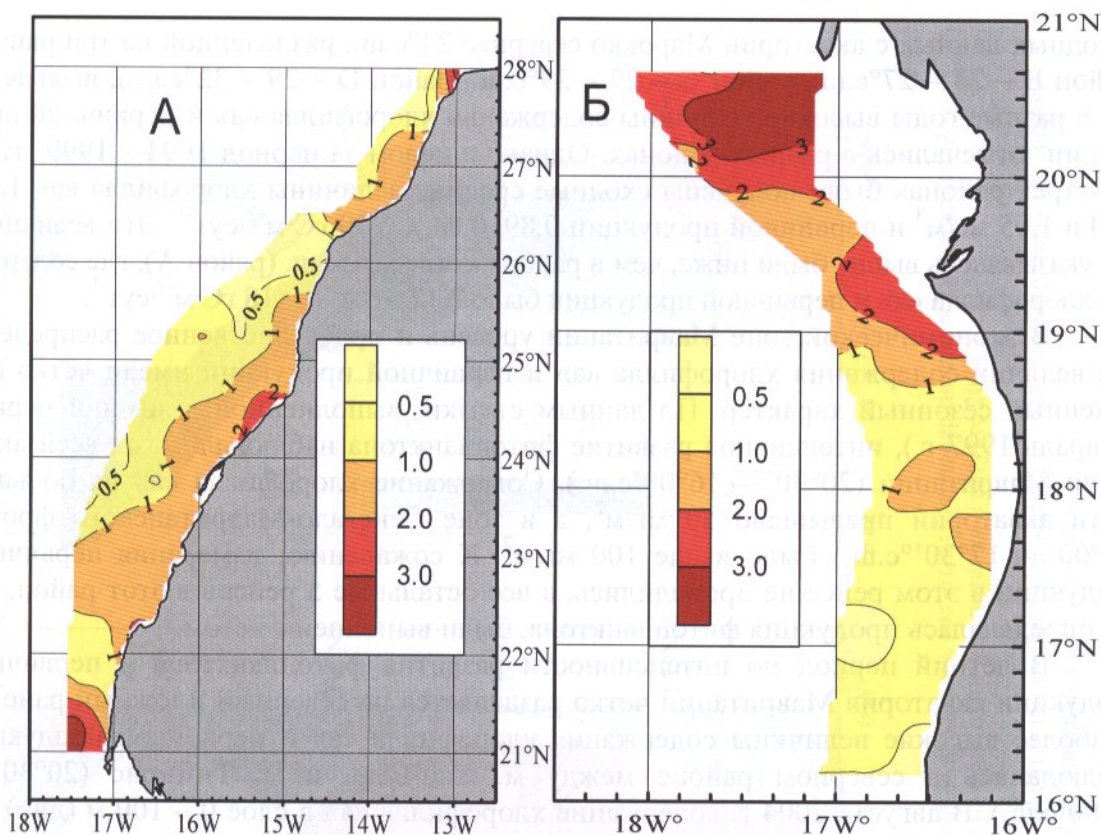


Рис. 3. Пространственное распределение первичной продукции планктона на акваториях Марокко (А) и Мавритании (Б) в июле – августе 2004 г.,  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$

Fig. 3. Spatial distribution of plankton primary production in the waters of Morocco (A) And Mauritania (Б) in July – August 2004,  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$

Севернее  $24^{\circ}$  с.ш. зоны интенсивного развития фитопланктона и повышенной первичной продукции имели локальный характер. Участки повышенной биологической продуктивности севернее  $24^{\circ}$  с.ш. были расположены у берега, и для всего района прослеживалось постепенное снижение интенсивности развития фитопланктона (содержания хлорофилла «а» и первичной продукции) от мелководной зоны к морской части шельфа. Особенно хорошо данная зависимость прослеживается при оценке средних показателей для интегрируемого слоя воды. В июле 2004 г. севернее  $24^{\circ}$  с.ш. повышенное содержание хлорофилла «а» и высокая первичная продукция наблюдались в районе между  $26^{\circ}$  –  $28^{\circ}$  с.ш. (от м. Бохадор до м. Юби) в зоне прибрежного апвеллинга. Особенно высокие величины первичной продукции были отмечены в районе м. Юби. Содержание хлорофилла «а» на мелководных и среднеглубинных станциях в слое 0 – 100 м (дно) составляло  $75 - 220 \text{ мг/м}^2$ , или  $1,0 - 3,2 \text{ мг/м}^3$ , а величина первичной продукции –  $1,3 - 4 \text{ гC}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ , или  $65 - 200 \text{ мгC}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ , т.е. достигала величин, характерных для высокопродуктивной зоны в районе м. Кап-Блан (см. рис. 2, 3).

Между локальными высокопродуктивными участками севернее  $24^{\circ}$  с.ш. располагались воды с относительно низким обилием фитопланктона и небольшой скоростью образования им органического вещества. В июле 2004 г. содержание хлорофилла «а» в слое 0 – 100 м (дно) на таких промежуточных участках, а также на периферии высокопродуктивных зон составляло  $40 - 75 \text{ мг/м}^2$ , или  $0,5 - 1,0 \text{ мг/м}^3$ , первичная продукция не превышала  $1,3 \text{ гC}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ , или  $65 \text{ мгC}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  (см. рис. 2, 3).

По многолетним данным не удалось выделить устойчивые районы повышенной биологической продуктивности для летнего и зимнего периодов. При анализе

исходных данных с акватории Марокко севернее  $24^{\circ}$ с.ш., разделенной на три района (район В –  $24 - 27^{\circ}$ с.ш., район С –  $27 - 29^{\circ}$ с.ш., район D –  $29 - 32^{\circ}$ с.ш.), выявлено, что в разные годы высокие величины содержания хлорофилла «а» и первичной продукции отмечались в разных районах. Однако в целом за период 1994 – 1999 гг. во всех трех районах были получены сходные средние величины хлорофилла «а» 1,21, 1,30 и  $1,05 \text{ мг/м}^3$  и первичной продукции 0,89, 0,84 и  $0,90 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ . Эти величины, как указывалось выше, были ниже, чем в районе южнее  $24^{\circ}$ с.ш. (район А), где содержание хлорофилла «а» и первичной продукции было  $2,17 \text{ мг/м}^3$  и  $1,18 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ .

В экономической зоне Мавритании уровень и пространственное распределение величин содержания хлорофилла «а» и первичной продукции имели четко выраженный сезонный характер. По данным съемки, выполненной в зимний период (февраль 1997 г.), интенсивное развитие фитопланктона наблюдалось на всей акватории Мавритании ( $20^{\circ}30' - 16^{\circ}00'$ с.ш.). Содержание хлорофилла «а» на большей части акватории превышало  $50 \text{ мг/м}^2$ , а в зоне Сенегало-Мавританского фронта ( $16^{\circ}00' - 17^{\circ}30'$ с.ш.) было выше  $100 \text{ мг/м}^2$ . К сожалению, измерения первичной продукции в этом рейсе не проводились, а все остальные 5 рейсов в этот район, когда определялась продукция фитопланктона, были выполнены летом.

В летний период по интенсивности развития фитопланктона и первичной продукции акватория Мавритании четко разделяется на северный и южный районы. Наиболее высокие величины содержания хлорофилла «а» и первичной продукции наблюдались в северном районе между м. Кап-Блан и м. Тимирис ( $20^{\circ}30' - 19^{\circ}00'$ с.ш.). В августе 2004 г. содержание хлорофилла «а» в слое 0 – 100 м (дно) составляло  $100 - 370 \text{ мг/м}^2$ , или  $3,0 - 11,1 \text{ мг/м}^3$ , а величина первичной продукции –  $2,0 - 4,0 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ , или  $130 - 260 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  (см. рис. 2, 3). В связи с обильным развитием фитопланктона прозрачность воды была низкой (4 – 11 м) и соответственно зона фотосинтеза имела небольшую глубину в 30-метровом слое воды. Наибольшие величины хлорофилла «а» и первичной продукции были отмечены в мелководной зоне (на глубинах до 100 м), и постепенно снижались в мористой части шельфа. Данная зависимость наиболее отчетливо видна при использовании средних показателей для интегрируемого слоя.

Район к югу от м. Тимирис (южнее  $19^{\circ}$ с.ш.) в летний период характеризовался невысокой биомассой фитопланктона и низкой первичной продукцией. В августе 2004 г. в этом районе содержание хлорофилла «а» в слое 0 – 100 м (дно) составляло  $5 - 50 \text{ мг/м}^2$ , или  $0,3 - 0,8 \text{ мг/м}^3$ , а суточная первичная продукция  $0,3 - 1,3 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ , или  $10 - 30 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  (см. рис. 2, 3). Более высокие показатели отмечались лишь на прибрежных станциях между  $18^{\circ}30'$  и  $17^{\circ}30'$  с.ш., где наблюдалось незначительное увеличение содержания фосфатов ( $>0,2 \text{ мкг-ат/л}$ ).

Анализ зависимости величин первичной продукции и содержания хлорофилла «а» от гидрологических и гидрохимических показателей показал следующее. На акватории Мавритании в августе 2004 г. отмечена очень хорошая корреляция температуры воды на поверхности с содержанием хлорофилла «а» на поверхности, в столбе воды и в зоне фотосинтеза ( $R^2=0,66 - 0,80$ ). Очень хорошая корреляция наблюдалась также между температурой воды и первичной продукцией фитопланктона ( $R^2=0,67 - 0,84$ ). На акватории Мавритании в августе 2004 г. концентрация фосфатов на поверхности также хорошо коррелировала как с содержанием хлорофилла «а» ( $R^2 = 0,56 - 0,68$ ), так и с первичной продукцией ( $R^2=0,59 - 0,79$ ). Наиболее высокие показатели содержания хлорофилла «а» и первичной продукции в августе 2004 г. наблюдались в районах с меньшим прогревом и более высоким содержанием фосфатов. Области интенсивного развития фитопланктона и фотосинтеза достаточно четко соответствовали прогреву воды до  $26^{\circ}\text{C}$  и содержанию фосфатов выше  $0,2 \text{ мкг-ат/л}$  (рис. 4).



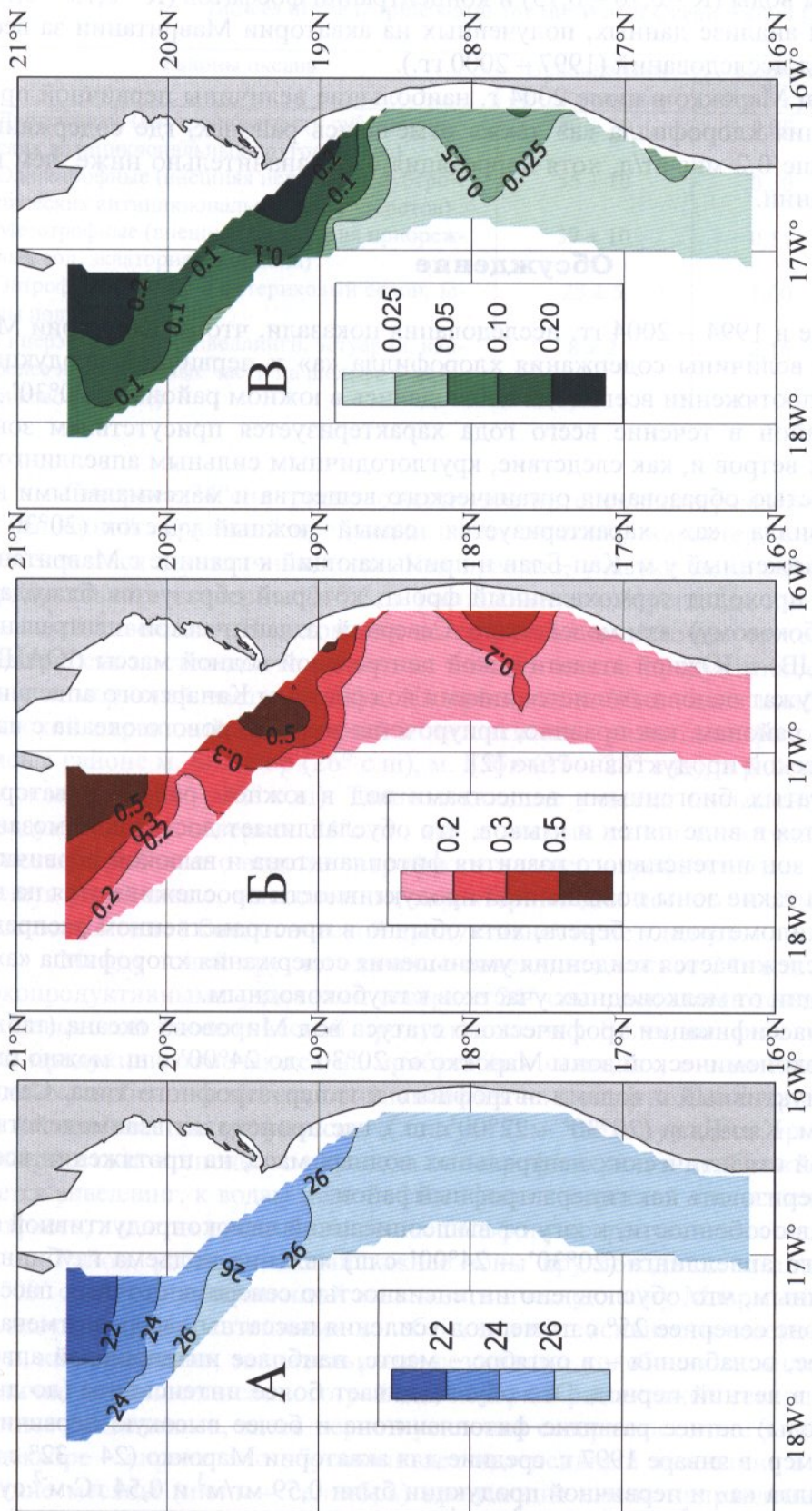


Рис. 4. Пространственное распределение температуры воды,  $^{\circ}\text{C}$  (А) и содержания фосфатов,  $\text{мкг}\cdot\text{а}/\text{л}$  (Б) в поверхностном слое и средней для слоя фотосинтеза первичной продукции,  $\text{гC}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  (Б) на акватории Мавритании в августе 2004 г.

Fig. 4. Spatial distribution of water temperature,  $^{\circ}\text{C}$  (A) and phosphates content,  $\text{mcg}\cdot\text{a}/\text{l}$  (B) in the surface layer and mean value for the primary production photosynthesis layer,  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  (B) in the waters of Mauritania in August 2004

Аналогичная зависимость содержания хлорофилла «а» и первичной продукции от температуры воды ( $R^2=0,70 - 0,73$ ) и концентрации фосфатов ( $R^2=0,73 - 0,77$ ) была выявлена при анализе данных, полученных на акватории Мавритании за весь предыдущий период исследований (1997 – 2000 гг.).

На акватории Марокко в июле 2004 г. наибольшие величины первичной продукции и содержания хлорофилла «а» также отмечались районах, где содержание фосфатов было выше 0,2 мкг-ат/л, хотя корреляция была значительно ниже, чем на акватории Мавритании.

## Обсуждение

Проведенные в 1994 – 2004 гг. исследования показали, что на акватории Марокко наибольшие величины содержания хлорофилла «а» и первичной продукции фитопланктона на протяжении всего года наблюдались в южном районе от 20°30' до 24°00' с.ш. Этот район в течение всего года характеризуется присутствием зоны сильных пассатных ветров и, как следствие, круглогодичным сильным апвеллингом. Наибольшей скоростью образования органического вещества и максимальными величинами хлорофилла «а» характеризуется самый южный участок (20°30' – 22°00' с.ш.), расположенный у м. Кап-Блан и примыкающий к границе с Мавританией. В этом районе проходит термохалинный фронт, который образуется благодаря горизонтальному (боковому) взаимодействию Северной атлантической центральной водной массы (САЦВ) и Южной атлантической центральной водной массы (ЮАЦВ). САЦВ и ЮАЦВ служат основными источниками вод системы Канарского апвеллинга [7]. К подобным районам, как правило, приурочены воды Мирового океана с наибольшей биологической продуктивностью [2].

Подъем богатых биогенными веществами вод в южном районе акватории Марокко проявляется в виде пятен и языков, что обуславливает достаточно мозаичное распределение зон интенсивного развития фитопланктона и высокой первичной продукции. Иногда такие зоны повышенной продуктивности прослеживаются на несколько десятков километров от берега, хотя обычно в пространственном распределении хорошо прослеживается тенденция уменьшения содержания хлорофилла «а» и первичной продукции от мелководных участков к глубоководным.

Согласно классификации трофического статуса вод Мирового океана (таблица) южный район экономической зоны Марокко от 20°30' до 24°00' с.ш. можно оценить как высокопродуктивный с водами эвтрофного и гиперэвтрофного типа. Самый южный участок у м. Кап-Блан (20°30' – 22°00' с.ш.), где происходит взаимодействие Северной и Южной атлантических центральных водных масс, на протяжении всего года можно характеризовать как гиперэвтрофный район.

К северу и, в особенности, к югу от вышеописанной высокопродуктивной зоны круглогодичного апвеллинга (20°30' – 24°00' с.ш.) явление подъема глубинных вод является сезонным, что обусловлено интенсивностью северо-восточных пассатных ветров. В районе севернее 25° с.ш. период усиления пассатных ветров отмечается в мае – сентябре, ослабления – в октябре – марте, наиболее интенсивный апвеллинг наблюдается в летний период. Это обуславливает более интенсивное (до двух раз в некоторые годы) летнее развитие фитопланктона и более высокую первичную продукцию. Например, в январе 1997 г. средние для акватории Марокко (24 – 32° с.ш.) величины хлорофилла «а» и первичной продукции были 0,59 мг/м<sup>3</sup> и 0,54 гС·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>, а в июле 1997 г. – 1,05 мг/м<sup>3</sup> и 1,26 гС·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>. В марте 1998 г. величины хлорофилла «а» и первичной продукции были 0,62 мг/м<sup>3</sup> и 0,66 гС·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>, а в июле 1998 г. – 1,46 мг/м<sup>3</sup> и 1,22 гС·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>.



## Показатели трофического статуса вод Мирового океана [3]

## Indices of the trophic status for the World Ocean waters [3]

Районы океана	Толщина слоя фотосинтеза, м	Первичная продукция	
		гС·м <sup>-2</sup> ·сут <sup>-1</sup>	гС·м <sup>-2</sup> ·год <sup>-1</sup>
Дистрофные (внутренние части субтропических антициклональных круговоротов)	80 ± 20	0,08	30
Олиготрофные (внешняя периферия субтропических антициклональных круговоротов)	55 ± 10	0,30	110
Мезотрофные (внешняя периферия прибрежных вод, экваториальная зона)	37 ± 10	0,55	200
Эвтрофные (шельф и материковый склон, зоны подъема вод)	25 ± 5	1,00	365
Гиперэвтрофные (апвеллинги, эстуарии, наиболее продуктивные части на шельфе и материковом склоне)	8 ± 2	2,16	790

Севернее 24° с.ш. расположение зон интенсивного развития фитопланктона и повышенной первичной продукции имеет очаговый характер, и их локализация может меняться в различные годы. Как правило, участки повышенной биологической продуктивности севернее 24° с.ш. расположены у берега, где наблюдается наиболее сильный апвеллинг. В целом для всего района достаточно четко проявляется закономерность постепенного снижения биологической продуктивности от прибрежной зоны к мористой части шельфа. На протяжении 90-х годов наиболее часто зоны с высокой первичной продукцией и интенсивным развитием фитопланктона отмечались в районе м. Бохадор (26° с.ш), м. Юби (27 – 28° с.ш), в районе Агадирской бухты и м. Гир (30 – 32° с.ш). Такие локальные участки повышенной биологической продуктивности севернее 24° с.ш., как и южный район акватории Марокко, можно отнести к районам с водами эвтрофного и гиперэвтрофного типа (см. таблицу). Выделить устойчивые, многолетние, характерные для летнего и зимнего периода районы повышенной биологической продуктивности не удалось.

Между зоной круглогодичного апвеллинга южнее 24° с.ш и локальными высокопродуктивными участками севернее 24° с.ш. располагаются воды с относительно невысокой биологической продуктивностью. Более высокие показатели первичной продукции отмечаются на прибрежных станциях, а наименьшие – на глубоководных, особенно в местах проникновения на шельф вод со стороны океана. Согласно классификации трофического статуса (см. таблицу) здесь прослеживается закономерность постепенного перехода от эвтрофных вод в прибрежной зоне, где сказывается апвеллинг, к водам мезотрофного типа в мористой части шельфа, и даже олиготрофного, в местах проникновения на шельф низкопродуктивных океанических вод.

Район, расположенный южнее зоны круглогодичного апвеллинга (20°30' – 24°00' с.ш), т.е. включающий всю экономическую зону Мавритании, характеризуется значительными сезонными колебаниями интенсивности северо-восточного пассата и, как следствие, значительными сезонными колебаниями индекса апвеллинга. В отличие от вышеописанного района, который расположен севернее зоны круглогодичного апвеллинга, здесь период усиления северо-восточного пассата наблюдается в декабре – апреле, что обуславливает интенсивный апвеллинг в зимний период. В летние месяцы (июль – сентябрь) происходит смена направления преобладающих ветров на юго-западное и резкое уменьшение интенсивности апвеллинга. В поверхностном слое между 10 и 21° с.ш. проходит Сенегало-Мавританский термический фронт. Он разделяет теплую южную поверхностную водную массу, формируемую

потоком северной ветви Межпассатного противотечения, и холодные воды северной поверхностной водной массы, которая формируется Канарским течением. В течение года этот фронт совершает значительные пространственные перемещения с севера на юг и обратно, занимая свое крайнее северное положение в летний период. Гидрологические условия, обуславливающие интенсивность поступления в поверхностный слой богатых биогенными элементами вод, определяют четко выраженный сезонный характер развития фитопланктона и первичной продукции на акватории Мавритании. В зимний период интенсивное развитие фитопланктона наблюдается на всей акватории Мавритании от 20°30' до 16°00' с.ш.

В летний период по уровню биологической продуктивности вод зона Мавритании четко разделяется на два района – северный и южный. Наиболее высокие показатели наблюдались в северном районе между м. Кап-Блан и м. Тимирис (20°30' – 19°00' с.ш.), где в этот период наблюдался интенсивный прибрежный апвеллинг, проходил Сенегало-Мавританский фронт и происходил подъем богатых биогенными элементами вод. По трофическому статусу (см. таблицу) воды северной части экономической зоны Мавритании от 19°00' до 20°30' с.ш. можно оценить как эвтрофные и гиперэвтрофные.

В летний период соприкосновение этих вод с зоной круглогодичного апвеллинга (20°30' – 24°00' с.ш) приводит к образованию в Центрально-Восточной Атлантике непрерывной высокопродуктивной зоны с водами эвтрофно-гиперэвтрофного типа от 24 до 19° с.ш. В зимний период эта зона расширяется на юг до границы прохождения Сенегало-Мавританского фронта.

К югу от м. Тимирис (южнее 19° с.ш.) в летний период прибрежный апвеллинг практически отсутствует, и акватория занята теплыми тропическими водами южной поверхностной водной массы, которые характеризуются невысокой биомассой фитопланктона и низкой первичной продукцией. Лишь локально у берега, где может быть повышенное содержание биогенных элементов, может наблюдаться более высокая продуктивность вод. По трофическому статусу (см. таблицу) район южнее м. Тимирис (19° с.ш.) в летний период в основном занят водами мезотрофного типа, с участками эвтрофного типа (в зоне повышенного содержания биогенных элементов у берега) и олиготрофного (на самом юге).

Анализ зависимости показателей биологической продуктивности вод (первичная продукция фитопланктона, содержание хлорофилла) от абиотических факторов среды (температура воды, содержание биогенных элементов и др.) позволил выделить два основных. В районе, расположенном южнее зоны круглогодичного апвеллинга (20°30' – 24° с.ш), т.е. включающем всю экономическую зону Мавритании, пространственное распределение содержания хлорофилла «а» и величин первичной продукции соответствует распределению температуры воды и концентрации фосфатов на поверхности. Наиболее высокая биологическая продуктивность вод наблюдается в районах с меньшим прогревом и более высоким содержанием фосфатов, что обусловлено подъемом вод с промежуточных горизонтов. В частности, в августе 2004 г. области интенсивного развития фитопланктона и высокой первичной продукции четко соответствовали прогреву воды ниже 26°C и содержанию фосфатов выше 0,2 мкг-ат/л. Температура воды в данном случае выступает как индикатор границы, разделяющей богатые биогенными элементами эвтрофные и гиперэвтрофные воды, формируемые в зоне интенсивного апвеллинга и Сенегало-Мавританского фронта, и мезотрофные и олиготрофные теплые (>25°C) тропические воды южной поверхностной водной массы.

На акватории Марокко наибольшая продуктивность вод также наблюдалась в зонах прибрежного апвеллинга, где отмечено повышенное содержание биогенных элементов, но корреляция значительно ниже, чем на акватории Мавритании.



## Выводы

1. Анализ данных по первичной продукции и содержанию хлорофилла, полученных в 13 научно-исследовательских рейсах в 1994 – 2004 гг., позволил описать закономерности пространственного распределения в прибрежной экосистеме Северо-Западной Африки ( $16 - 36^\circ$  с.ш.;  $6 - 18^\circ$  з.д.) вод разного трофического статуса, имеющих разную биологическую продуктивность.

2. Наибольшая биологическая продуктивность характерна для зоны круглогодичного апвеллинга ( $20^\circ 30' - 24,00^\circ$  с.ш.) и зоны интенсивного апвеллинга и прохождения Сенегало-Мавританского фронта (южнее  $20^\circ 30'$  с.ш.). Пространственное перекрывание этих зон в летний период приводит к образованию в Центрально-Восточной Атлантике непрерывной высокопродуктивной полосы с водами эвтрофного и гиперэвтрофного типа, расположенной от  $19$  до  $24^\circ$  с.ш. В зимний период эта зона расширяется на юг до границы прохождения Сенегало-Мавританского фронта.

3. Район, расположенный южнее Сенегало-Мавританского фронта, в основном занят водами олиготрофного и мезотрофного типа.

4. К северу от района круглогодичного апвеллинга (севернее  $24^\circ$  с.ш.) расположение высокопродуктивных участков имеет пятнистый характер, и их локализация может изменяться в разные годы. Здесь прослеживается закономерность перехода от эвтрофных и гиперэвтрофных вод в прибрежной зоне, где сказывается апвеллинг, к водам мезотрофного типа в мористой части шельфа, и даже олиготрофного типа, в местах проникновения на шельф низкопродуктивных океанических вод.

5. Анализ зависимости первичной продукции и содержания хлорофилла «а» от гидрологических и гидрохимических показателей выявил хорошую корреляцию ( $R^2=0,66 - 0,84$ ) с температурой воды у поверхности на всей исследованной акватории ( $16 - 36^\circ$  с.ш.), а также с поверхностной концентрацией фосфатов ( $R^2=0,56 - 0,79$ ) на акватории южнее  $21^\circ$  с.ш.

## Благодарности

Выражаю глубокую благодарность И.В. Красовскому, к большому сожалению ушедшему из жизни. Полученные им данные по первичной продукции и хлорофиллу в экономических зонах Марокко и Мавритании в 1994-2000 гг. были использованы в статье. Автор также благодарен сотрудникам лаборатории промысловой океанологии АтлантНИРО В.Н. Шнару, А.М. Сироте, Е.Н. Тимохину и многим другим за данные по гидрологическим и гидрохимическим показателям, полученные в 1994 – 2004 гг. в ходе рейсов АтлантНИРО.

## Список использованной литературы

1. Аржанова, Н.В. Эффективность использования фитопланктоном биогенных элементов в Центральной и Северной Атлантике / Н.В. Аржанова // Биологические ресурсы Атлантического океана. – М., 1986. – С. 133-145.
2. Гершанович, Д.Е. Биопродуктивность океана / Д.Е. Гершанович, А.А. Елизаров, В.В. Сапожников. – М.: Агропромиздат, 1990. – 237 с.
3. Моисеев, П.А. Мировой океан и его биологические ресурсы / П.А. Моисеев. – М.: Знание, 1983. – 40 с.
4. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных районов Мирового океана / под ред. В.В. Сапожникова. – М.: ВНИРО, 2003. – 202 с.

5. Estrada, M. Photosynthetic pigments and productivity in the upwelling region of NW Africa /M. Estrada // Tethys. – 1974. – V. 6. – P. 247-260.
6. Dugdale, R.C. Primary production in the Cap Blanc region /R.C. Dugdale, F.P. Wilkerson // Int. Symp. Upw. W Afr., Inst. Inv. Pesq., Barcelona. – Barcelona, 1985. – Vol. I. – P. 25-36.
7. Fraga F., Barton E.D., Llinas O. The concentration of nutrient salts in «pure» North and South Atlantic Central Waters /F. Fraga, E.D. Barton, O. Llinas // Int. Symp. Upw. W Afr., Inst. Inv. Pesq., Barcelona. – Barcelona, 1985. – Vol. I. – P. 25-36.
8. Huntsman, S.A. Primary production off Northwest Africa: the relationship to wind and nutrient conditions /S.A. Huntsman, R.T. Barber // Deep-Sea Res. – 1977. – V. 24. – P. 25-33.
9. Lloyd, I.J. Primary production off the coast Northwest Africa /I.J. Lloyd // J. Cons. int. Explor. Mer. – 1971. – V. 33. – P. 312-323.
10. Minas, H.J. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa /H.J. Minas, L.A. Codispoti, R.C. Dugdale// The canary current: studies of an upwelling system. – Rapp. P.-v. Cons. int. Explor. Mer. – 1982. – V. 180. – P. 148-183.
11. O'Reilly, J. A manual for the measurement of total daily primary productivity on marine and ocean pulse cruises using  $^{14}\text{C}$  simulated in situ sunlight incubation. Ocean pulse technical manual / J. O'Reilly, J. Thomas. – Report No. SHL 79-06 (February 1979). – 104 p.
12. Poole, H.H. Photo-electric measurements of submarine illumination throughout the year /H.H. Poole, W.R. Atkins // J. Marine Biol. Assoc. U. K. – 1929. – № 16. – P. 297-324.
13. Schulz, S. A comparison of primary production in upwelling regions off Northwest and Southwest Africa /S. Schulz // The canary current: studies of an upwelling system. – Rapp. P.-v. Cons. int. Explor. Mer. – 1982. – V. 180. – P. 202-204.
14. Schulz, S. Some remarks to the conditions for the primary production off NW Africa and the estimation of the annual production /S. Schulz, W. Kaiser // Comm. No 43 third int. Symp. Upwelling Ecosystems. – Kiel, 1975. – P. 100-105.
15. Vollenweider, R.A. A manual on methods for measuring primary production in aquatic environments /R.A. Vollenweider – IBP, Handbook. – 1969. – № 12. – 213 p.

УДК [551.465+591.524.12] (261.77)

А. М. Сирота, Н.Н. Жигалова

## **ВОДНЫЕ МАССЫ И ВИДОВОЙ СОСТАВ ЗООПЛАНКТОНА У ПОБЕРЕЖЬЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ АФРИКИ**

Система Канарского апвеллинга на шельфе Северо-Западной Африки является высокопродуктивным районом Атлантики. Оценка средней годовой первичной продукции здесь составляет порядка  $7000 \text{ т/км}^2$ , а ежегодного вылова промысловым флотом – около  $3 - 10 \text{ т/км}^2$  [9, 11, 14]. Являясь районом интенсивного международного рыболовства, этот район в течение последних десятилетий находится в сфере активных промыслово-океанологических исследований. Но, несмотря на это, экосистема Канарского апвеллинга все еще остается малоизученной по сравнению с другими крупными апвеллинговыми экосистемами Мирового океана (Бенгельской, Перуанской, Калифорнийской).

Бас в 1993 г. [9] попытался обобщить данные по долгопериодной изменчивости океанологических условий и состоянию пелагической экосистемы Канарского апвеллинга. По его мнению, основным фактором, сказывающимся на динамике экосистемы, является Канарское течение. Кроме того, велико влияние интенсивности прибрежного апвеллинга, вихреобразования в районе к югу от Канарских островов, перемещений фронтальной зоны вдоль побережья Мавритании, а также от некото-