

ПРОВ 98

АКАДЕМИЯ НАУК УССР

ПРОВ 2010

ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ АН УССР им. А. О. КОВАЛЕВСКОГО

N 840 - В. 91 26.02.91

УДК 581.526.325:551.464.797.9(261)

Афонин Е. И., Мишонов А. В., Юнев О. А.

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА, БИОМАССЫ И ЧИСЛЕННОСТИ
ФИТОПЛАНКТОНА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ОКЕАНА ПО ДИСТАНЦИ-
ОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ЦВЕТОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ ТОЛЩИ.

Институт биологии
южных морей АН УССР

БИБЛИОТЕКА

№ 296 деп

Севастополь, 1991

Одной из важных задач дистанционного зондирования океанских вод в видимом диапазоне спектра является разработка надежных, экспрессных методов оценки показателей биопродуктивности планктонных полей океана и прогнозирование на этой основе состояния морских экосистем. Известно, что наибольшее влияние на оптические свойства океанских вод оказывают скопления в водной толще различных популяций фитопланктона. Рассеяние солнечного излучения, проникающего в воду, клетками фитопланктона и другими частицами, а также селективное поглощение света пигментами фитопланктона и растворенным органическим веществом, определяют спектральный состав выходящего из водной толщи излучения. Последнее обстоятельство является основой всех методик дистанционного определения биопродукции фитопланктона, суммированных в [2], где в качестве первого шага используются корреляционные связи суммарной концентрации хлорофилла "а" и феофитина "а" с параметрами, характеризующими изменение формы спектров восходящего излучения. Вместе с тем, следует отметить, что пигменты являются лишь индикатором биомассы фитопланктона, которая используется как один из входных параметров в моделях морских экосистем, поскольку описывает первичное звено пищевой цепи взаимодействия с высшими трофическими уровнями.

Одним из методов определения биомассы фитопланктона является расчет ее по концентрации хлорофилла "а", при этом связь между этими величинами неустойчива, главным образом, из-за трудоемкости и неточности определения биомассы в морских условиях. Погрешность определения биомассы фитопланктона с использованием концентрации зеленого пигмента достигает 300% [14]. Появившийся в последнее время метод определения биомассы по данным проточной цитофлуориметрии дает гораздо более точные, на наш взгляд, результаты, но требует сложного и дорогостоящего оборудования [12].

В настоящей работе предложен новый экспрессный метод оценки численности и биомассы клеток фитопланктона по цветовым характеристикам водной толщи, разработанный на основе синхронных измерений спектров яркости восходящего излучения в видимом диапазоне, концентрации пигментов, численности и размерного состава морского фитопланктона, определявшегося с помощью

макета проточного цитофлуориметра. Натурные измерения указанных величин проводились в различных районах Атлантики во время 40 рейса НИС "Академик Вернадский" осенью 1989 г.

Аппаратура и методика измерений. Массовые измерения спектров падающего на поверхность океана и восходящего из толщи воды излучения, обратно-отраженного взвешенными частицами и молекулами воды, выполнялись телефотометром видимого диапазона СПРУТ 2-М в интервале длин волн от 380 до 780 нм [1]. Оптический блок телефотометра с поворотной платформой был установлен на носу судна, где исключалось затемнение его корабельными надстройками. Для регистрации, накопления и обработки данных использовалась автоматизированная информационно-измерительная система, включающая персональный компьютер IBM PC/AT с двухканальным интерфейсом и пакет прикладных программ [3, 6]. Цикл измерений, длящийся около 5 минут, состоял в регистрации нескольких спектров яркости поверхности океана при визировании под углом 30^0 и азимуте Солнца 90^0 , яркости участка неба в зеркально-сопряженной точке и яркости горизонтальной диффузно-пропускающей молочной пластинки из стекла МС-23, калиброванной относительно белого ортотропно-рассеивающего эталонного экрана фторопласта-4. После проведения фильтрации сигналов и обработки бликов вычислялся спектральный коэффициент яркости поверхности океана $R_s(\lambda)$, неба $R_a(\lambda)$ и водной толщи $R_w(\lambda)$:

$$R_s(\lambda) = \frac{I_s(\lambda)}{I_0(\lambda)} \cdot T(\lambda) \quad (1)$$

$$R_a(\lambda) = \frac{I_a(\lambda)}{I_0(\lambda)} \cdot T(\lambda) \quad (2)$$

$$R_w(\lambda) = R_s(\lambda) - RF \cdot R_a(\lambda), \quad (3)$$

где $I_s(\lambda)$, $I_a(\lambda)$, $I_0(\lambda)$ - соответственно, яркости океанской поверхности, неба и молочной пластинки с учетом спектральной чувствительности телефотометра;

- $T(\lambda)$ - спектральный коэффициент пропускания пластинки;
- R_F - коэффициент отражения от поверхности воды диффузного излучения небосвода, учитывающий распределение наклонов элементарных отражающих площадок на взволнованной поверхности океана по Коксу и Манку [13]. Значение этого коэффициента изменялось от 0,02 до 0,06 в зависимости от состояния морской поверхности и наличия облачности. Далее из спектров коэффициента яркости морской поверхности $R_s(\lambda)$ и водной толщи $R_w(\lambda)$ рассчитывались следующие параметры этих объектов:
- координаты цветности в системе XYZ Международной комиссии по освещению 1931 г. для источника освещения типа D -65:

$$\begin{aligned} X &= x' / \sigma \\ Y &= y' / \sigma \\ Z &= z' / \sigma \end{aligned} \quad (4)$$

где $\sigma = x' + y' + z'$ (5)

есть цветовой локус, x', y', z' - координаты цвета исследуемого излучения, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} x' &= \int_{380}^{780} R_i(\lambda) x(\lambda) d\lambda \\ y' &= \int_{380}^{780} R_i(\lambda) y(\lambda) d\lambda \\ z' &= \int_{380}^{780} R_i(\lambda) z(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (6)$$

где x, y, z - удельные координаты монохроматических излучений стимулов одинаковой мощности [11];

- доминирующая длина волны l_{dw} , характеризующая цветовой тон излучения объекта определяется как функция положения на цветовом графике точки с координатами цветности X, Y относительно точки с координатами X_0, Y_0 и линии спектрально-чистых цветов

/локуса цветности/ [8] ;

- чистота цвета:

$$P = (Y - Y_0) / (Y_1 - Y_0) \quad (7)$$

где Y_1 - координата цветности монохроматического излучения, а Y_0 - координата цветности Y стандартного источника излучения D -65.

Суммарная концентрация хлорофилла "а" и феофитина "а" измерялась экстрактым флуоресцентным методом [10]. Макет проточного цитофлуориметра был использован тот же, что и в работе [12], но объем анализируемой пробы увеличен до 0,2 мл. Подходы к установлению размерной структуры океанического фитопланктона с применением этого прибора и расчет биомассы изложены в работе [11]. Основным узлом прибора является проточная система с гидродинамической фокусировкой струи, позволяющая создавать настолько узкий поток исследуемой жидкости, что клетки образца выстраиваются друг за другом и анализируются каждая в отдельности в измерительной зоне оптической системы. Импульсы флуоресценции хлорофилла "а" с фотоприемника подаются на анализатор импульсов АИ-1024, на экране которого фиксируется распределение импульсов флуоресценции по их амплитуде.

Распределение численности клеток изображалось в виде гистограммы. По оси ординат откладывали количество импульсов флуоресценции хлорофилла "а", соответствующее количеству клеток фитопланктона в 1 мл морской воды; по оси абсцисс - средние размеры клеток для восьми размерных диапазонов, соответствующих серии средних объемов клеток V , $2V$, $4V$ и т.д. При этом интенсивность импульсов флуоресценции хлорофилла "а" соответствовала размерному интервалу от 1-до 5-8 мкм, согласно зависимости, установленной на культурах одноклеточных водорослей [12]. Таким образом, проточная цитофлуориметрия позволила получить данные о распределении по размерам только клеток ультрафитопланктона /размерный диапазон 1-8 мкм/, в состав которого входит другая, важная для оптико-биологических исследований, фракция - пикопланктонная /размерный диапазон 1-3 мкм/. Следует отметить, что концентрация более крупных клеток фитопланктона в природных водах на несколько порядков

ниже, чем исследованных нами размерных групп и поэтому, вероятность определения их в пробе объемом 0,2 мл /даже при многократном повторении анализа/ практически равна нулю. Сгущение пробы морской воды на отечественных нуклеопоровых фильтрах с различным диаметром пор не привело к положительным результатам [II] .

Анализ экспериментальных данных. Исследования охватывали различные районы Атлантического океана, поэтому весь массив измерений /I3I спектр коэффициента яркости, I24 пробы хлорофилла и 85 проб численности и биомассы/ был разделен на 5 групп соответствующих географическим районам /табл. I/.

Таблица I.

Распределение измерений в 40 рейсе НИС "Академик Вернадский" по районам Атлантического океана.

№	Район	Количество измерений: Месяц		
		спектров хлорофил. числ. и биом.		
1.	Северное и Норвежское моря	23	23	15 сентябрь
2.	Северная периферия Северо-атлантического круговорота	12	12	7 сентябрь
3.	Саргассово море и центр круговорота	29	27	16 октябрь
4.	Полигон в Восточной части Тропической Атлантики:			
	1 съемка	29	29	21 октябрь
	2 съемка	20	17	20 ноябрь
5.	Полигон у м.Кап-Блан	18	17	6 ноябрь
Всего:		I3I	I24	85

Воды в исследуемых районах океана сильно различаются по оптико-биологическим характеристикам, поэтому полученный массив данных охватывает весь диапазон изменчивости оптических характеристик океанских вод. На рис. I приведены средние спектры коэффициента яркости водной толщи для указанных районов. Спектральная кривая коэффициента яркости водной толщи, полученного в чистых фиолетовых водах Саргассова моря /концентра-

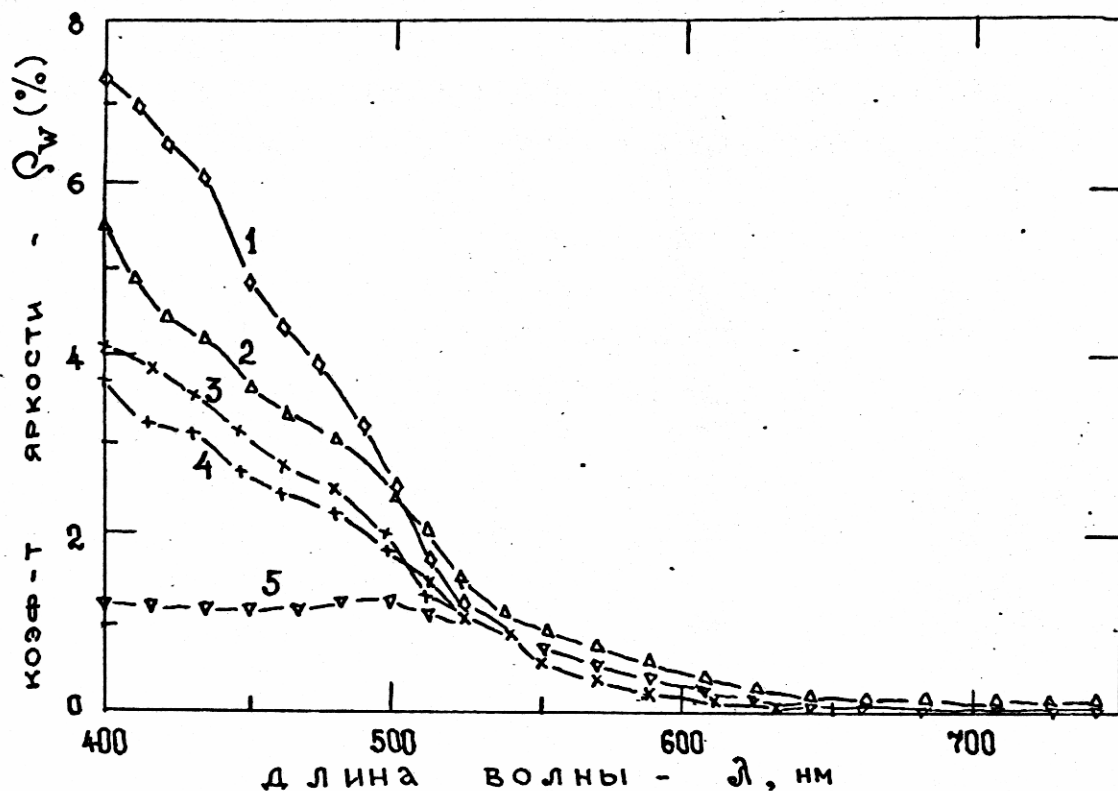


Рис. I. Типичные профили спектрального коэффициента яркости водной толщи $Q_w(\lambda)$, соответствующие районам исследования:

- 1- Саргассово море и центр Североатлантического круговорота; 2- Восточная часть Тропической Атлантики; 3- Северная периферия Североатлантического круговорота; 4- Норвежское и Северное моря; 5- район мыса Кап-Блан.

ция пигментов $0,03-0,04 \text{ мг/м}^3$ монотонно возрастает в коротковолновой области спектра и достигает абсолютных значений свыше 7%, в то время как в зеленых высокопродуктивных водах у мыса Кап-Блан /концентрация пигментов до 2 мг/м^3 /, максимальные значения коэффициента яркости не превышают 1,5%, а его спектральная кривая не имеет ярко выраженного максимума. Спектральные кривые коэффициента яркости вод других исследованных районов занимают промежуточное положение между двумя вышеуказанными крайними ситуациями.

Рассчитанные по спектрам коэффициента яркости координаты цветности излучения водной толщи показаны на рис. 2. Здесь изображен locus цветности в системе координат XYZ /МКО-31 г./ относительно источника освещения типа D -65, соответствующего излучению, создаваемому прямым излучением Солнца и рассеянным излучением небосвода [7]. Расположение точек на локусе цветности иллюстрирует реально существующую закономерность изменения видимого цвета водной толщи, определяемую доминирующей длиной волны λ_{dw} , значения которой варьируют от 465 нм /сине-фиолетовый цвет/ до 550 нм /желтовато-зеленый цвет/. Насыщенность цвета водной толщи, характеризуемая величиной чистоты цвета P , изменяется от 9% до 88%. Изменчивость цветовых параметров обусловлена различным содержанием взвешенных и растворенных веществ, непосредственно влияющих на спектральный состав восходящего из воды излучения. Это влияние иллюстрируется рис.3, где в трехмерных координатах показано семейство спектров коэффициента яркости водной толщи, полученное путем интерполяции экспериментальных данных, измеренных в водах с различными значениями концентрации пигментов фитопланктона. /12 измерений/. Здесь хорошо прослеживается связь величин коэффициента яркости в диапазоне длин волн от 400 до 550 нм и значений общей концентрации пигментов /хлорофилл "а" + феофитин "а"/, что дало основание использовать регрессионный анализ, описываемый далее, для исследования количественной связи между цветовыми параметрами и содержанием пигментов в морской воде.

Анализ данных о численности клеток ультрафитопланктона, его биомассе и концентрации пигментов фитопланктона показал большую изменчивость этих параметров в районах исследований,

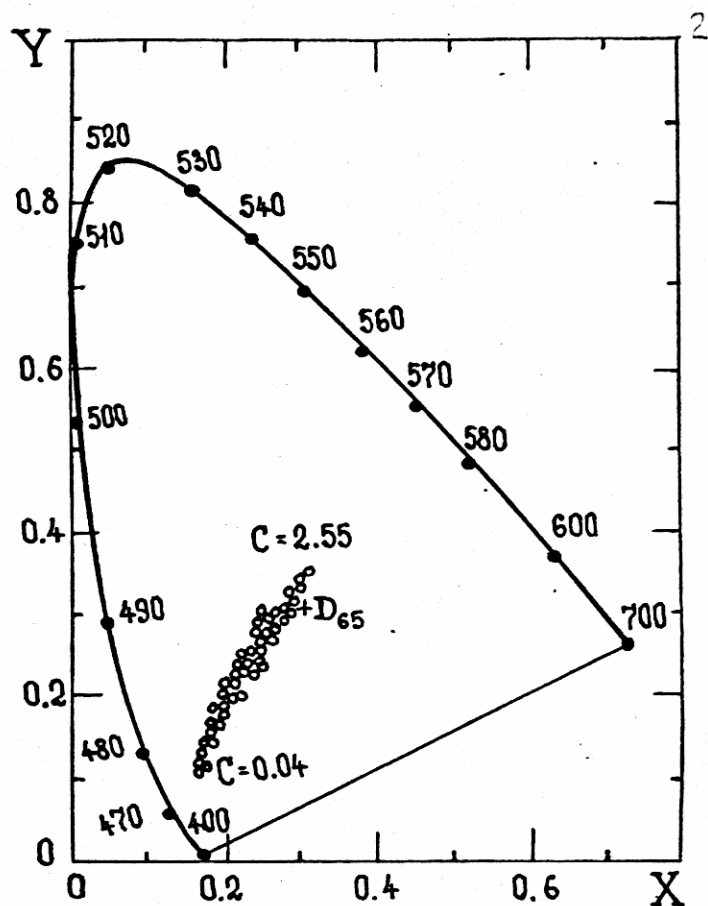


Рис.2. Распределение цветности вод исследованных районов океана на локусе цветности системы XYZ относительно координат источника типа D-65 /МКО-ЗІ г./. Диапазон изменения концентрации пигментов фитопланктона от 0,04 до 2,55 мкг/л; цифры, поставленные у точек кривой локуса соответствуют значениям доминирующей длине волны λ_D .

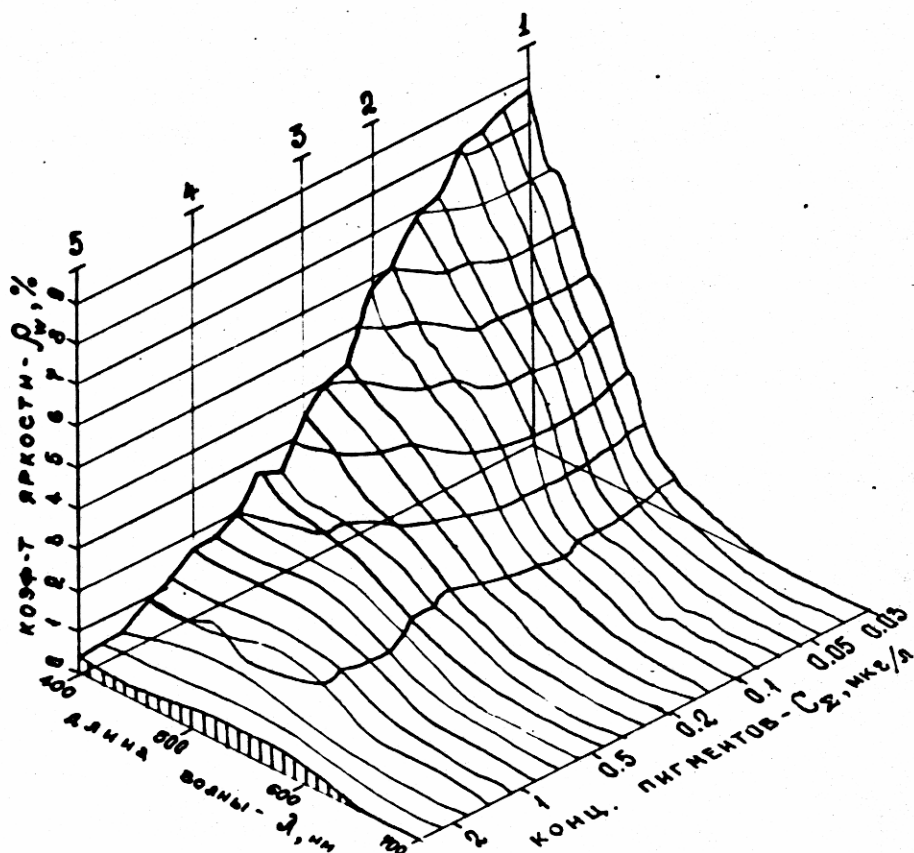


Рис.3. Изменение профилей спектрального коэффициента яркости водной толщи $S_w(\lambda)$ в зависимости от содержания пигментов фитопланктона C в поверхностном слое океана. Цифрами отмечены типичные спектры коэффициента яркости, характерные для районов исследования: 1- Саргассово море и центр Североатлантического круговорота /цвет воды фиолетово-синий/; 2- Восточная часть Тропической Атлантики; 3- Северная часть Североатлантического круговорота; 4- Норвежское и Северное моря; 5- район мыса Кап-Блан /цвет воды ярко зеленый/.

что иллюстрируется рис.4.

Минимальные значения численности клеток пикопланктона /размер клеток 1-3 мкм/ и ультрафитопланктона /размер клеток 1-8 мкм/ наблюдались в Саргассовом море и центре круговорота и составляли 230-250 кл./мл. В этих же районах отмечена и минимальная биомасса- 0,25-0,3 мкгС/л. Максимальные значения численности, превышающие 5300 кл./мл и максимальная биомасса /более 8,5 мкгС/л/ отмечались в Северной Атлантике. Распределение средних значений численности пико- и ультрафитопланктона, биомассы и их средние квадратические отклонения в исследуемых районах представлены на рис.4в и 4б.

На рис.4а приведены аналогичные распределения для концентрации хлорофилла "а" и суммарной концентрации хлорофилла "а" и феофитина "а". Минимальные значения концентрации /0,03-0,04 мг/м³/ наблюдались в Саргассовом море, а максимальные /около 2 мг/м³/ - в продуктивных водах у мыса Кап-Блан.

Большой объем полученных экспериментальных данных о спектральном коэффициенте яркости водной толщи позволил провести его статистическую обработку по методу ортогональных эмпирических функций [9]. Этот анализ был необходим для описания всего массива данных малым числом информативных параметров, ответственных за изменчивость спектрального коэффициента яркости.

Спектральный коэффициент яркости рассматривался как 36-ти мерный вектор /в диапазоне длин волн от 400 до 750 нм с шагом 10 нм/, описывающий j-ю реализацию коэффициента яркости $R_j \sim$ в виде линейной комбинации соответствующих собственных векторов $E_i \sim$:

$$R_j \sim = \langle R \rangle \sim + \sum_{i=1}^n A f_{ij} \times E_i, \quad (8)$$

где $\langle R \rangle \sim$ - среднее значение коэффициента яркости;

$A f_{ij}$ - весовой фактор i-го собственного вектора в j-й реализации R_j ;

E_i - эмпирическая ортогональная функция, соответствующая i-му собственному вектору;

n - количество собственных векторов, по которому выполняется разложение (8).

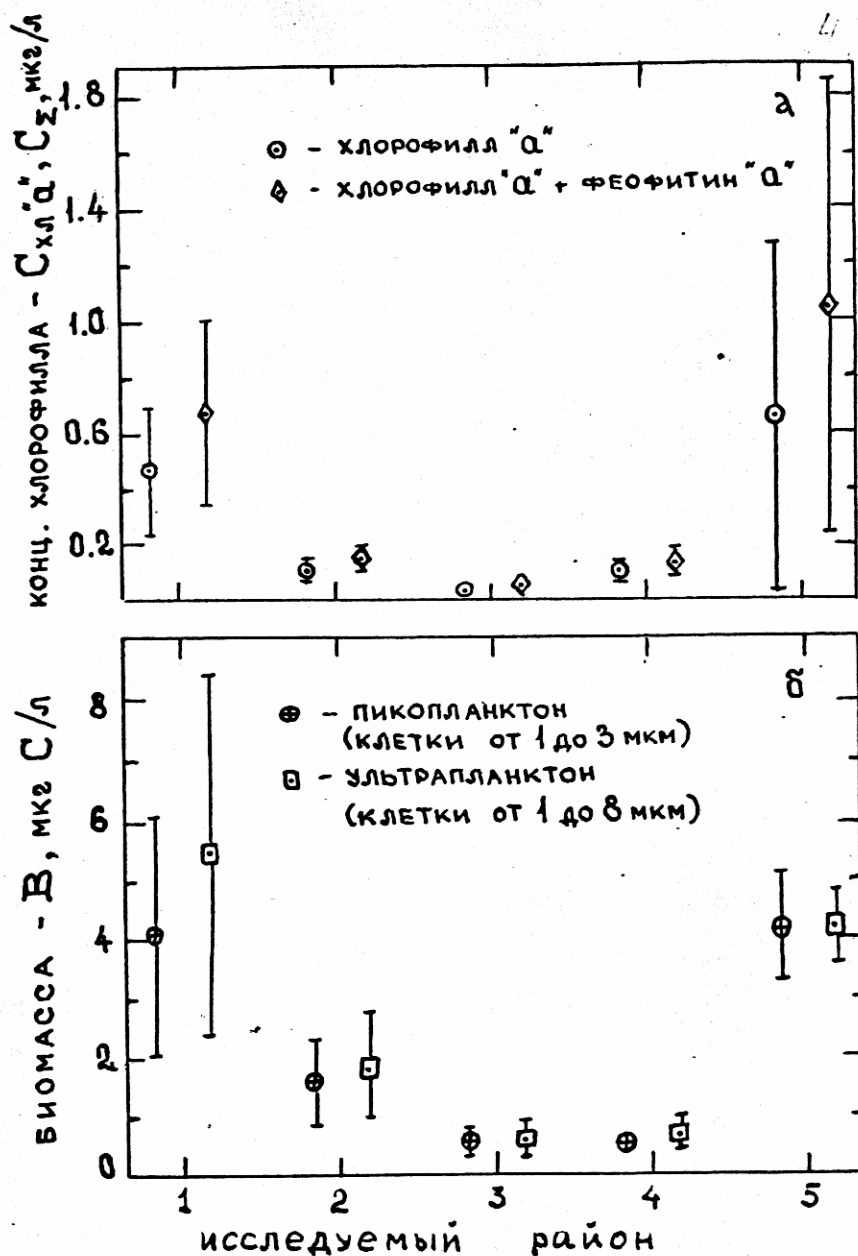


Рис.4. Средние величины и их среднеквадратические отклонения биологических параметров в исследованных районах Атлантического океана:
 а- концентрация хлорофилла "а" и суммы хлорофилла "а" и феофитина "а";
 б- биомасса пико- и ультрафитопланктона.

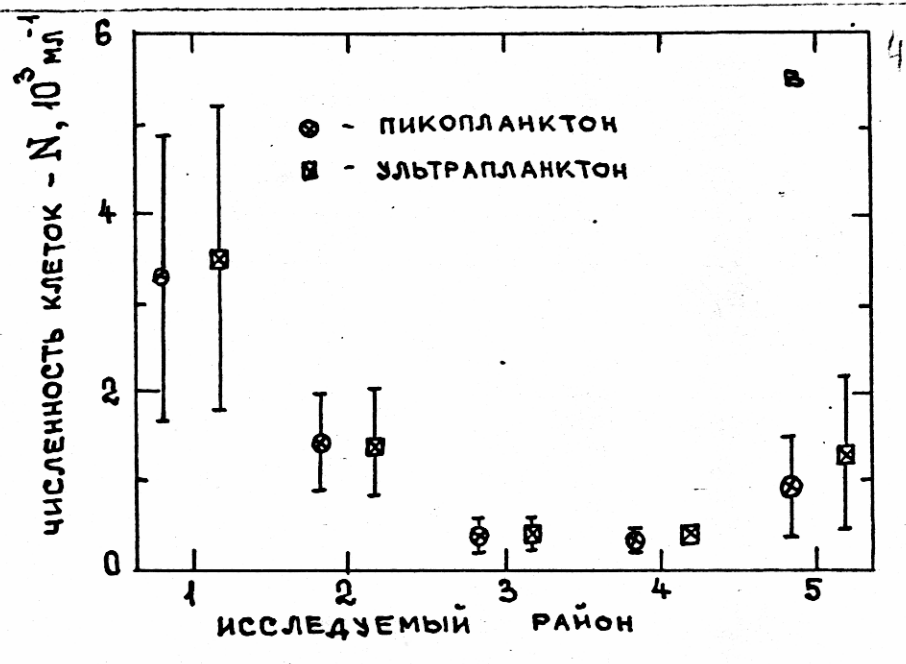


Рис.4 в- численность клеток пико- и ультрафитопланктона.
Номер района соответствует обозначениям рис.1.

По всему массиву спектров была сформирована нормированная матрица ковариации размером 36 на 123, по которой были рассчитаны 10 первых собственных векторов и собственных значений. Средний спектр коэффициента яркости по всему массиву и среднеквадратичное отклонение показаны на рис.5а, первые три собственных вектора приведены на рис.5б, а величина остаточной дисперсии первых 10-ти собственных значений представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Процент дисперсии, описываемый десятью первыми собственными векторами.

Номер СЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% дисперсии	94,1	4,2	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,07	0,06
Суммарная	94,1		98,98		99,5		99,8		99,9	
дисперсия, %		98,3		99,3		99,6		99,9		100

Как видно из табл.2, первый собственный вектор описывает 94% изменчивости спектров коэффициента яркости, первые два собственных вектора- 98%, а первые три- 99%. Следовательно, спектр коэффициента яркости с точностью не хуже погрешностей измерений может описываться не более чем тремя параметрами. Для проверки этого вывода была оценена погрешность восстановления спектров коэффициента яркости одним, двумя и тремя первыми собственными векторами. Спектральный ход погрешностей восстановления приведен на рис.5в, из которого видно, что при использовании первого собственного вектора погрешность восстановления весьма различна по спектру и достигает 45-50%. При использовании 2-х первых собственных векторов спектральная неравномерность погрешности резко уменьшается /до 15%/ почти во всем диапазоне, за исключением коротковолновой области /30-35%/. При добавлении третьего собственного вектора погрешность восстановления спектров коэффициента яркости уменьшается до 10-12% и становится практически неселективной по спектру. Это согласуется с ранее полученными результатами [4, 5].

Таким образом, проведенный анализ показал, что представление спектрального коэффициента яркости в виде свертки из небольшого числа параметров /доминирующая длина волны и чистота

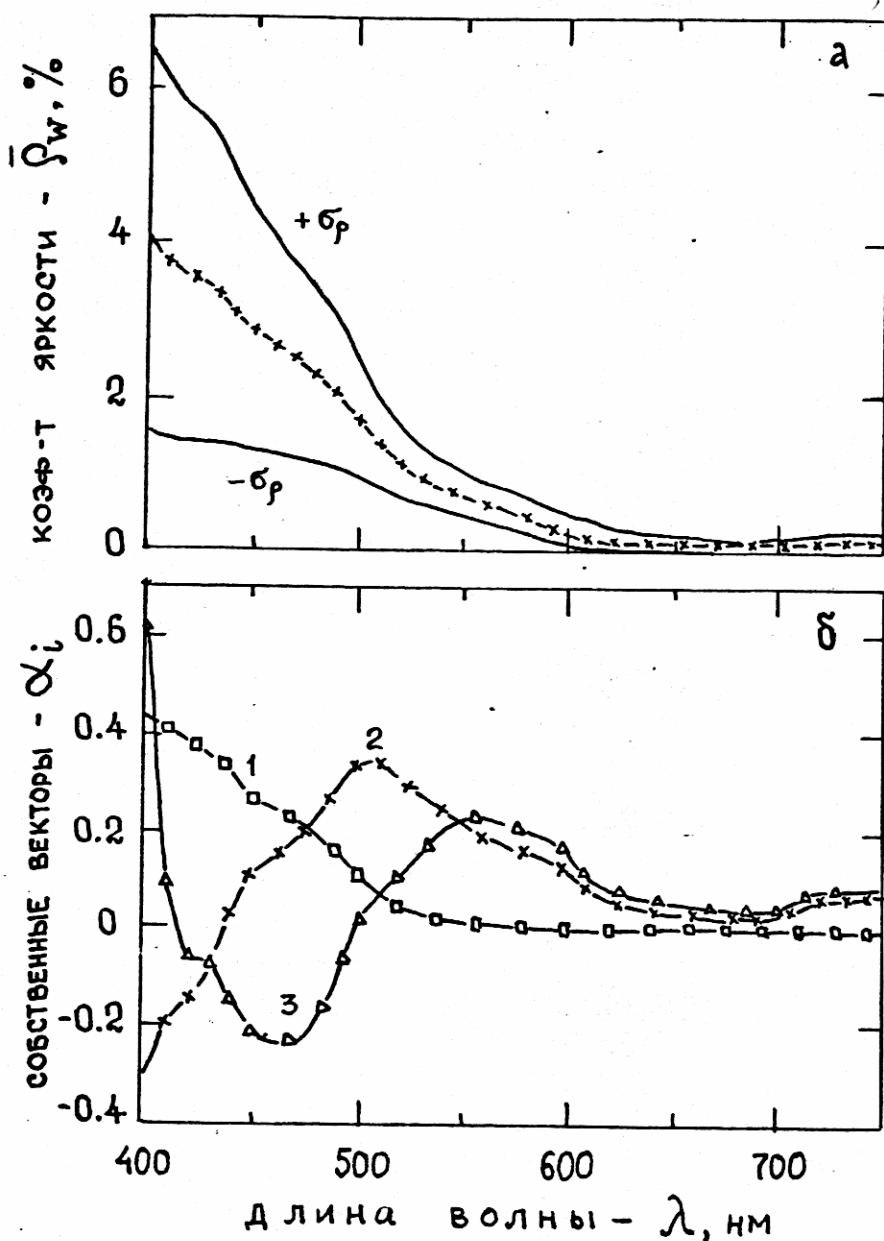


Рис.5. Спектральные распределения коэффициента яркости и его ортогональных компонент, рассчитанных по всему массиву данных /I23 спектра/:

а- профили среднего коэффициента яркости $\bar{\rho}_w(\lambda)$ и его среднеквадратического отклонения $\pm \sigma_p(\lambda)$

б- профили первых трех собственных векторов нормированной матрицы ковариации

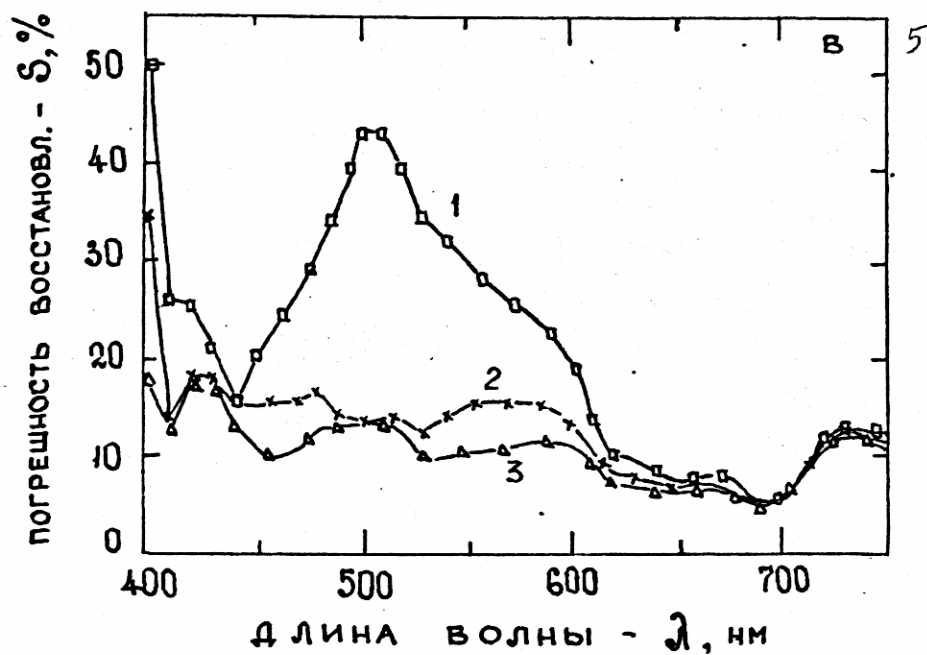


Рис.5 в- погрешность восстановления $S_w(\lambda)$ первым /1/, двумя /2/ и тремя /3/ собственными векторами.

цвета, либо координаты цветности/ обосновано не только с физической точки зрения, но имеет и статистическое подтверждение.

Регрессионный анализ. Большой объем данных, полученный в районах океана с различной биологической продуктивностью, позволил провести регрессионный анализ с целью выявления связей между цветовыми параметрами восходящего излучения, концентрацией пигментов фитопланктона, биомассой и численностью ультрафитопланктона.

Уравнения регрессии, связывающие доминирующую длину волны L_{dw} , рассчитанную по спектрам коэффициента яркости водной толщи $R_w(\lambda)$, с общей концентрацией хлорофилла "а" и феофитина "а" C_{tot} , биомассой V_{uph} и численностью клеток ультрафитопланктона N_{uph} , имеют следующий вид:

$$C_{tot} = 10 \quad (-36,17 + 0,0741 L_{dw}) \quad (9)$$

$$r=0,86; s=23\%; n=126$$

$$V_{uph} = 10 \quad (-30,22 + 0,0634 L_{dw}) \quad (10)$$

$$r=0,75; s=28\%; n=85$$

$$N_{uph} = 10 \quad (-23,23 + 0,0547 L_{dw}) \quad (11)$$

$$r=0,71; s=28\%; n=85$$

Соответствующие этим уравнениям поля точек и линии регрессии изображены на рис.6.

Чистота цвета /насыщенность цветового тона/ P_w , определенная из спектров коэффициента яркости водной толщи $R_w(\lambda)$, хорошо коррелирует с рассматриваемыми биологическими характеристиками / C_{tot} , V_{uph} , N_{uph} /. Полученные для этого случая уравнения регрессии выражаются в виде:

$$C_{tot} = 10 \quad (0,0236 - 0,0012 \lg P_w - 0,0002 \lg P_w \lg P_w) \quad (12)$$

$$r=0,84; s=29\%; n=126$$

$$V_{uph} = 10 \quad (1,1402 - 0,0185 \lg P_w - 0,00001 \lg P_w \lg P_w) \quad (13)$$

$$r=0,73; s=24\%; n=85$$

$$N_{uph} = 10 \quad (3,9910 - 0,0232 \lg P_w - 0,0001 \lg P_w \lg P_w) \quad (14)$$

$$r=0,75; s=16\%; n=85$$

Институт биологии
Тихих морей АН УССР

БИБЛИОТЕКА

№ 296 деп.

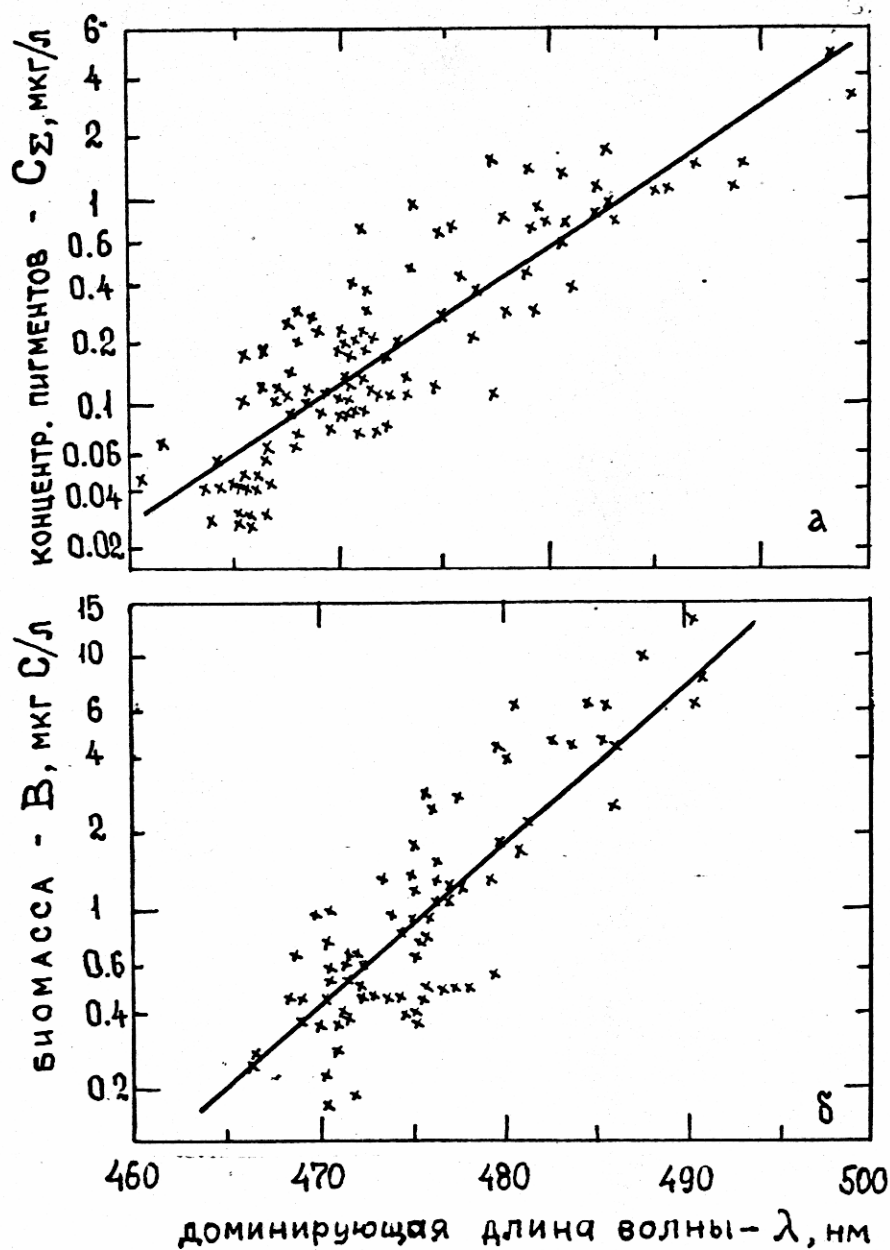


Рис.6. Связь биологических характеристик океанских вод с доминирующей длиной волны λ_D нм :

а- концентрации пигментов фитопланктона ,

б- биомассы ультрафитопланктона.

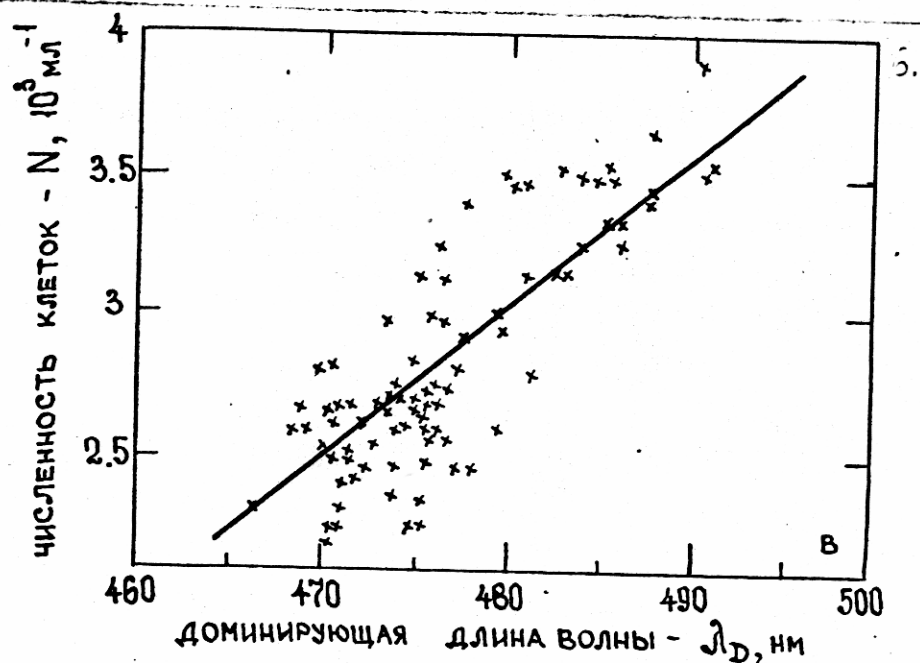


Рис.6 в- численности клеток ультрафитопланктона.

Массив экспериментальных точек и соответствующие линии регрессии изображены на рис.7. Несмотря на заметное рассеяние точек относительно линий регрессии, обнаруживается тесная связь между анализируемыми параметрами, что является основанием для использования приведенных уравнений при экспрессном определении вышеуказанных биологических параметров по цветовым характеристикам.

Как показал проведенный выше анализ спектров коэффициента яркости по методу ортогональных эмпирических функций, изменчивость спектров $Rw(\lambda)$, наиболее заметная в коротковолновой области, описывается первым собственным вектором, весовой фактор которого (Alf_1) охватывает более 94% вариаций СКЯ. Поэтому представляет интерес изучение связей весового фактора Alf_1 с биологическими параметрами C_{tot} , V_{uph} и N_{uph} , на основе которых можно судить о возможной физической интерпретации этого фактора. На рис.8 приведены поля точек и линии регрессии, связывающие величины весового фактора первого собственного вектора нормированной матрицы ковариации Alf_1 со значениями биологических параметров C_{tot} , V_{uph} , N_{uph} . Соответствующие уравнения регрессии имеют вид:

$$C_{tot} = 10 \quad (-0,9012 - 0,076 Alf_1 + 0,0036 Alf_1 Alf_1) \quad (15)$$

$$r=0,85; s=25\%; n=126$$

$$V_{uph} = 10 \quad (-0,0803 - 0,0783 Alf_1 + 0,005 Alf_1 Alf_1) \quad (16)$$

$$r=0,83; s=21\%; n=85$$

$$N_{uph} = 10 \quad (2,7577 - 0,07 Alf_1 + 0,046 Alf_1 Alf_1) \quad (17)$$

$$r=0,83; s=24\%; n=85$$

Характер расположения точек на рис.8 свидетельствует о том, что эта зависимость имеет нелинейный характер, а поведение кривой совпадает с линией регрессии, полученной для чистоты цвета P /рис.7/.

Можно предположить, что весовой фактор Alf_1 имеет смысл некоего интегрального цветового параметра, характеризующего цветовую насыщенность излучения водной толщи, нелинейность которого возникает при малых значениях биологических параметров. По-видимому, это может быть следствием двух причин: во-первых,

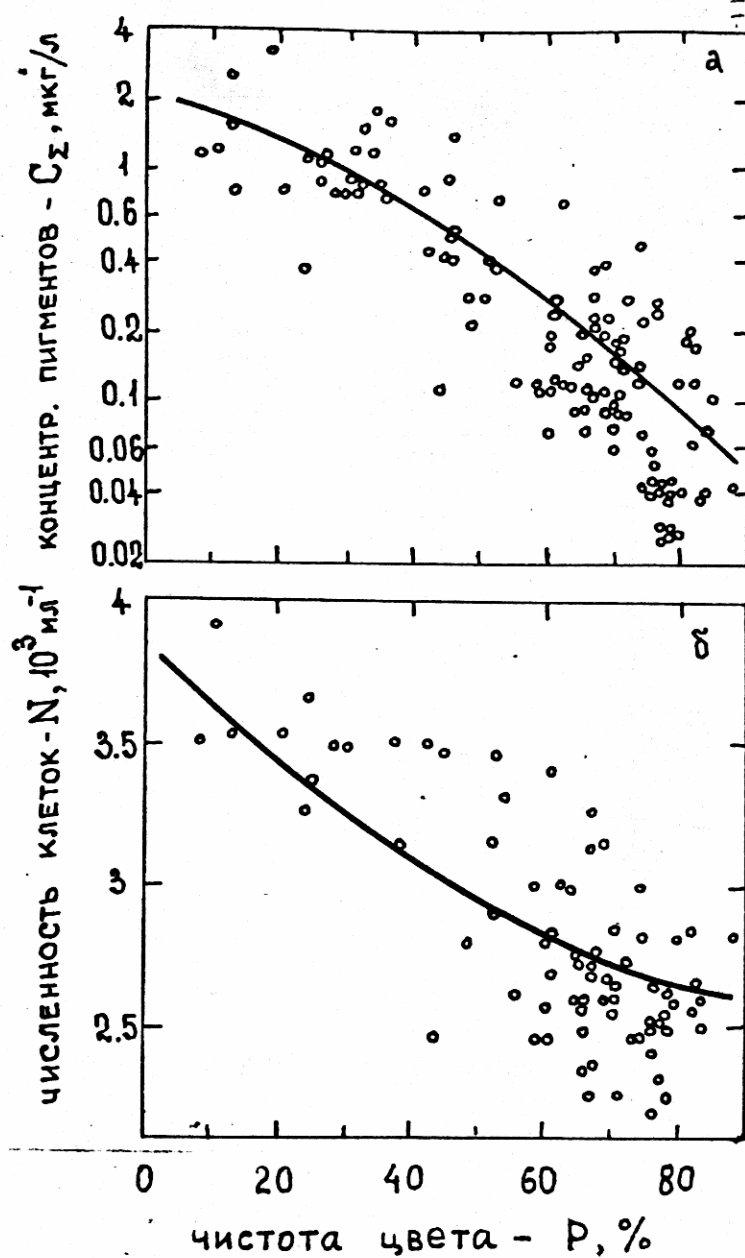


Рис.7. Связь биологических характеристик с чистотой цветового тона $P \text{ } \%$:

- а- концентрации пигментов фитопланктона,
- б- численности клеток ультрафитопланктона.

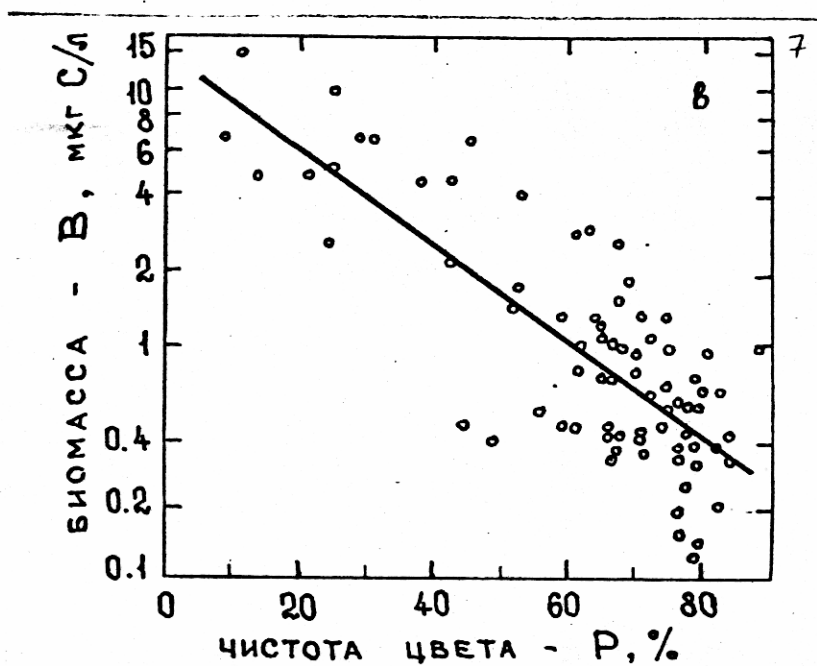


Рис.7 в- биомассы ультрафитопланктона.

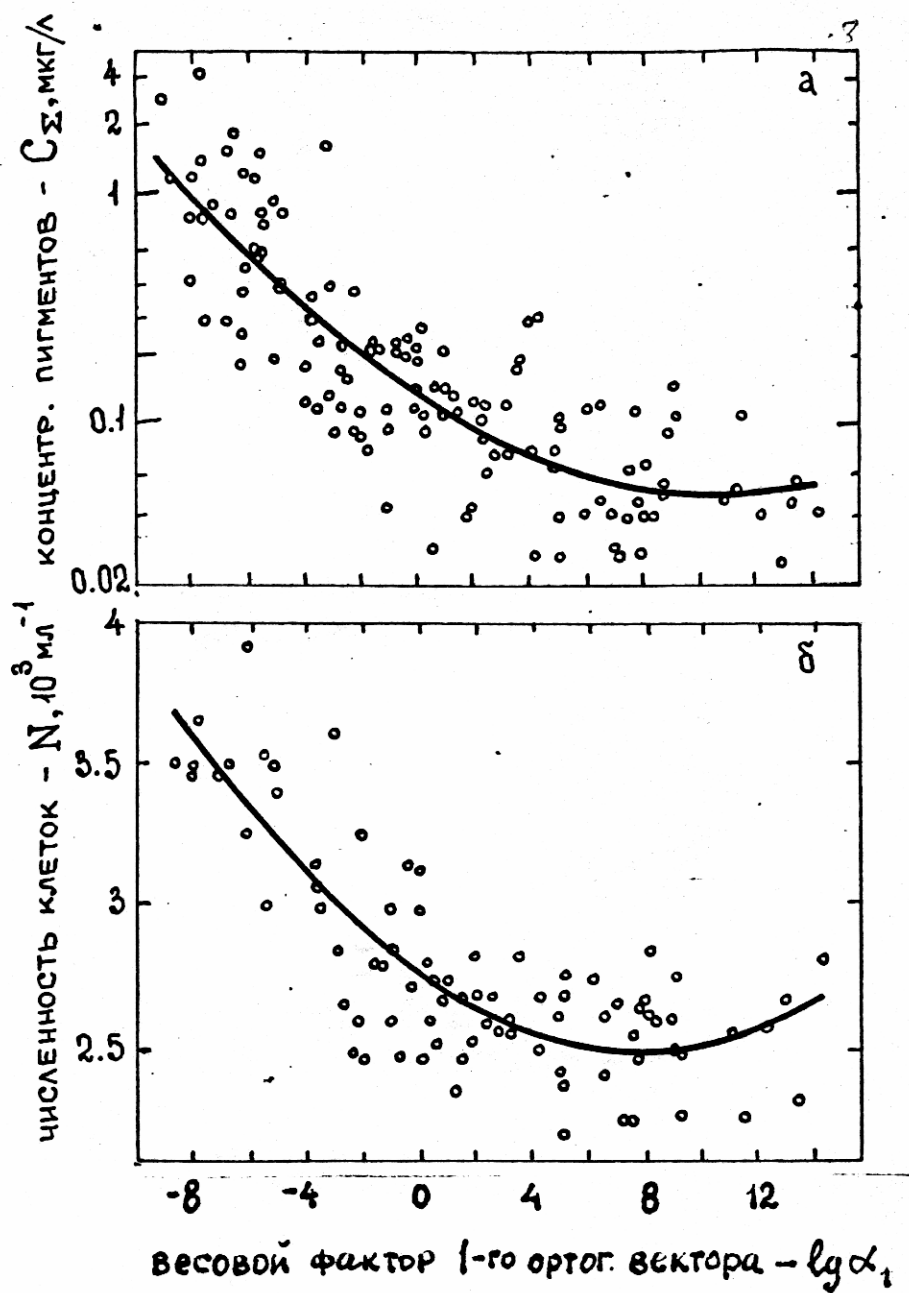


Рис.8. Связь биологических характеристик с весовым фактором I-го эмпирического ортогонального вектора:
 а- концентрации пигментов фитопланктона,
 б- численности клеток ультрафитопланктона.

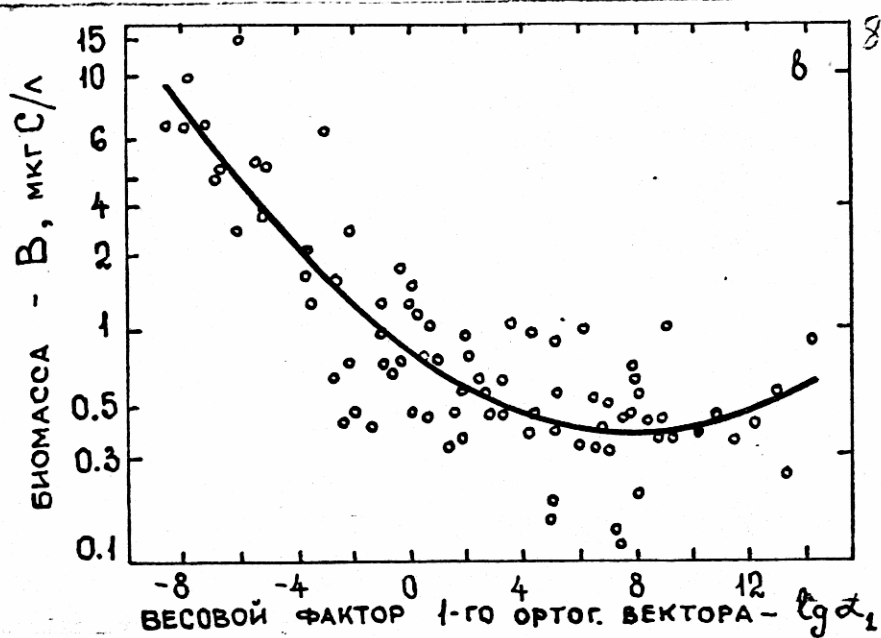


Рис.8 в- биомассы ультрафитопланктона.

увеличением относительных ошибок определения биологических параметров при малых их концентрациях, и, во-вторых, почти полным отсутствием красящих пигментов в воде, обусловленным незначительным содержанием живых микроорганизмов.

Во многих случаях практического использования экспрессных методов оценки биологических параметров вод океана необходимо иметь уравнения, связывающие эти параметры между собой. Уравнения регрессии, полученное на достаточном статистическом материале, позволяющее определить величину V_{uph} по C_{tot} для поверхностных вод океана, имеет вид:

$$V_{uph} = 10^{(0,6965 + 0,8164 \log(C_{tot}))} \quad (18)$$

$$r=0,84; s=24\%; n=85$$

Массив измеренных значений C_{tot} и V_{uph} и линия регрессии, полученная по уравнению (18), изображены на рис.9.

Для оценки погрешности восстановления биологических параметров воды по оптическим характеристикам, были построены выборочные одномерные гистограммы распределения погрешностей для рассматриваемых величин: C_{tot} , V_{uph} и N_{uph} . На рис. 10 приведены гистограммы распределения погрешностей восстановления искомых параметров по доминирующей длине волны Ldw . Гистограммы, полученные при восстановлении биологических параметров по весовому фактору первого собственного вектора Alf_1 и по чистоте цвета Pw , имеют аналогичный вид. В таблице 3 приведена относительная частота попаданий /в % /в 25 и 50% интервалы погрешностей значений биологических параметров, восстановленных по оптическим характеристикам /уравнения 10-18/.

Таблица 3.

Погрешности восстановления биологических параметров по дистанционным оптическим характеристикам.

Вычисляемые биологичес- кие параметры	Оптические характеристики					
	интервалы погрешностей восстановления					
	25%	50%	25%	50%	25%	50%
	44	63	54	79	52	77
	47	68	52	75	49	72
	44	66	46	82	41	58

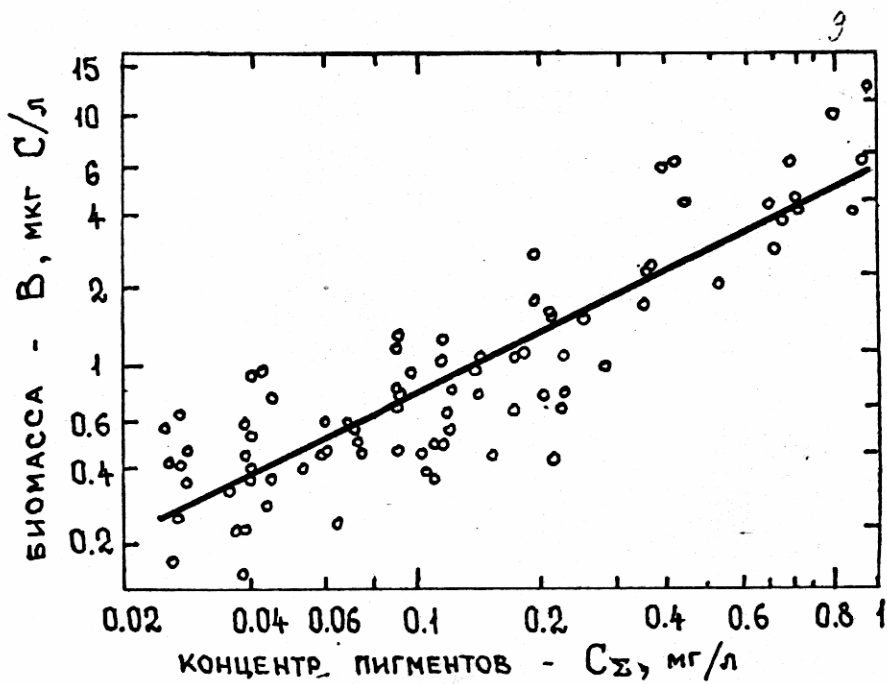


Рис.9. Связь биомассы ультрафитопланктона /В/ с суммарной концентрацией хлорофилла "а" и феофитина "а" /C_Σ /. Прямой линией отмечено уравнение регрессии /18/.

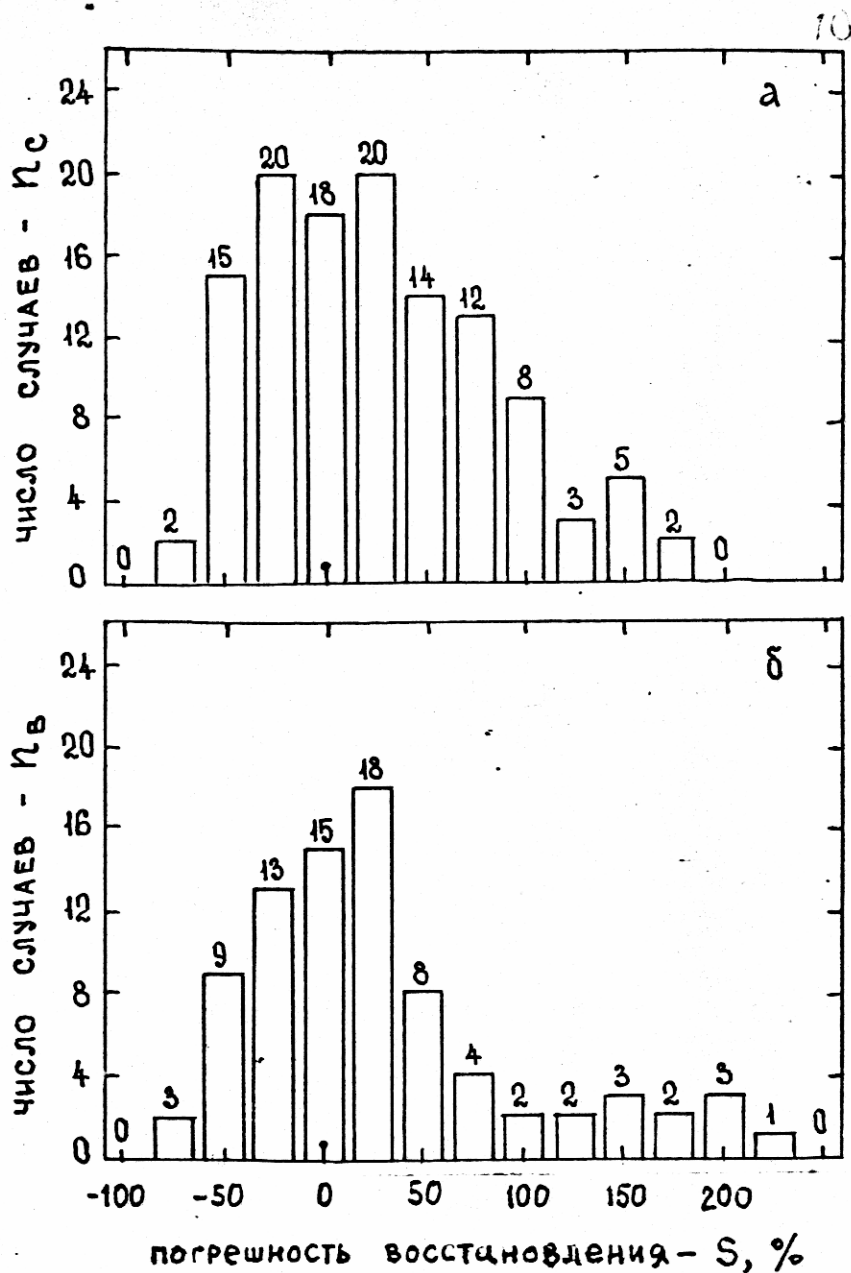


Рис.10. Гистограммы погрешностей восстановления биологических характеристик по доминирующей длине волны λ_d (нм) :

а- концентрации пигментов фитопланктона,
 б- биомассы ультрафитопланктона.

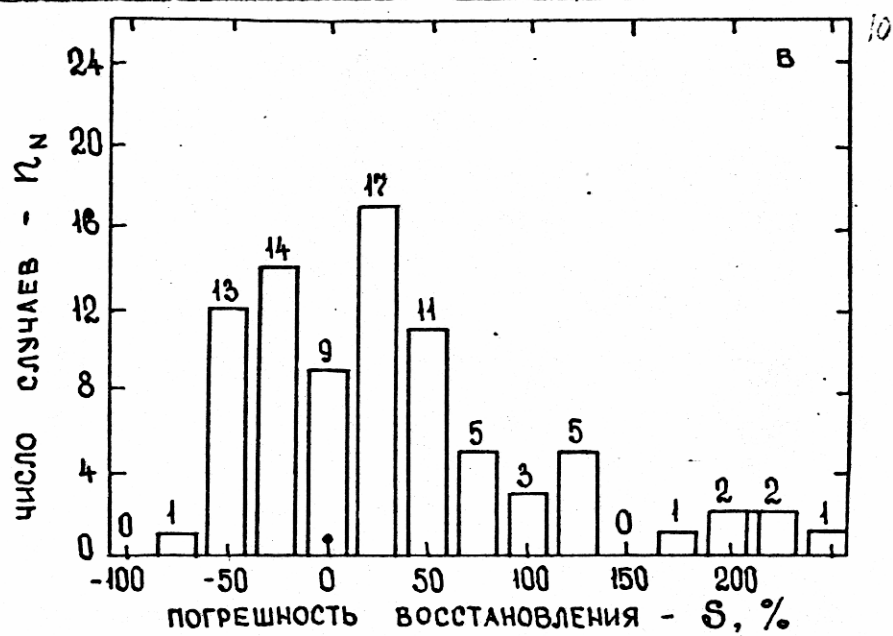


Рис.10 в- численности клеток ультрафитопланктона.

Максимальные погрешности восстановления биологических параметров по любой из оптических характеристик в единичных случаях достигают 300% /рис.10/.

Представляет интерес исследование зависимости величины погрешности восстановления биологических параметров от значений исходных оптических характеристик. На рис.11 изображены результаты такого исследования, когда для восстановления использовался весовой фактор первого собственного вектора Alf_1 . Видно, что величина погрешности восстановления δ не зависит от значения исходной оптической характеристики и равномерно рассеяна по всему диапазону изменчивости последней. Аналогичная картина рассеяния погрешностей наблюдалась и при использовании других оптических характеристик (Ldw и Pw).

Проверка регрессионных связей. Проверка полученных регрессионных зависимостей проводилась по независимым массивам измерений спектров коэффициента яркости моря и концентрации хлорофилла "а" + феофитина "а", которые были получены в экспедиции 41 рейса НИС "Академик Вернадский" по тем же методикам. Эти измерения выполнены в прибрежных районах Западной части Тропической Атлантики, прилегающих к району выноса амазонских вод, в районах открытого океана и вблизи о.Барбадос, т.е. измерениями был охвачен весь диапазон оптических типов океанских вод.

Для оценки качества восстановления значений концентрации пигментов сравнивались измеренные значения и величины, рассчитанные по установленным ранее зависимостям. На рис.12 приведены результаты проверки регрессионного уравнения (9). В качестве входного параметра для расчета общей концентрации пигментов C_{tot} использовались значения доминирующей длины волны

Lw , полученной из спектров коэффициента яркости водной толщи Rw ; измеренные значения C_{tot} принимались за истинные. Рассеяние экспериментальных точек на рис.12 относительно прямой I, которая иллюстрирует идеальную связь между величинами X и Y, показывает, что расчетные значения C_{tot} в большинстве случаев укладываются в границы погрешностей расчетов и измерений. Это свидетельствует об универсальности полученных связей и применимости их для оценки биологических характеристик вод различных районов Атлантического океана.

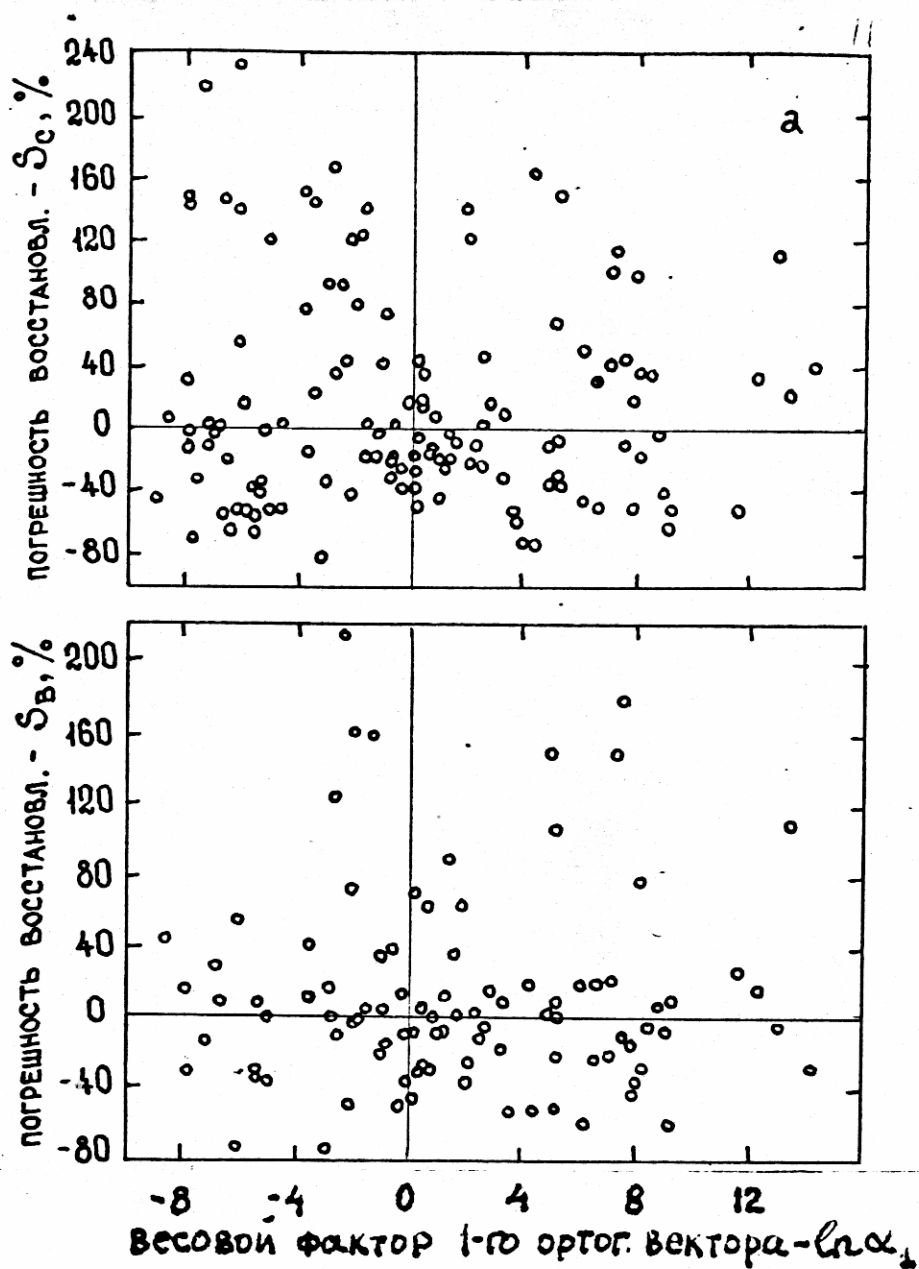


Рис. II. Рассеяние погрешностей восстановления биологических характеристик по весовому фактору I-го ортогонального вектора $\ln \alpha_1$:

а- концентрации пигментов фитопланктона,
 б- биомассы ультрафитопланктона.

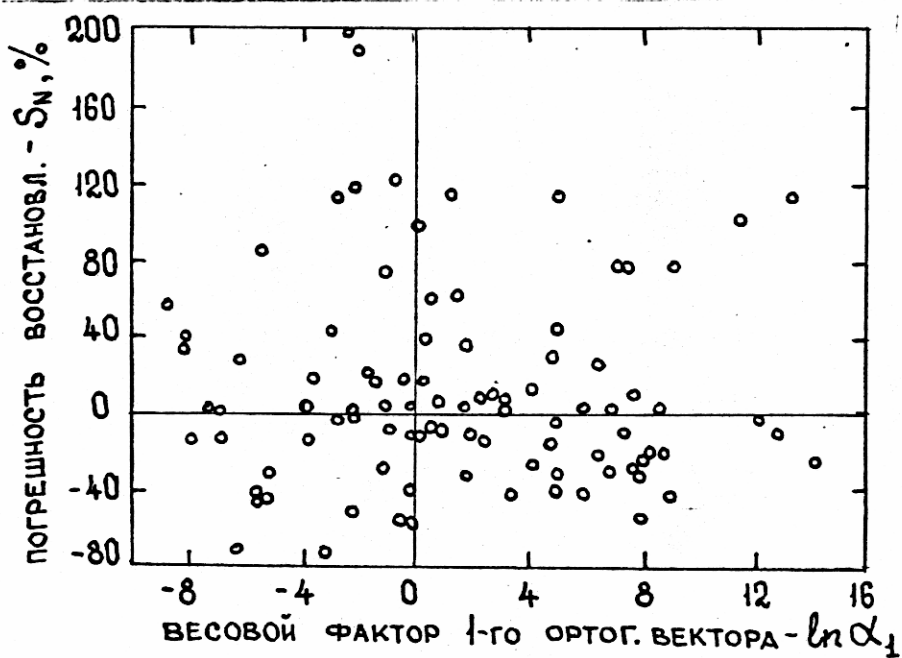


Рис. II в- численности клеток ультрафитопланктона.

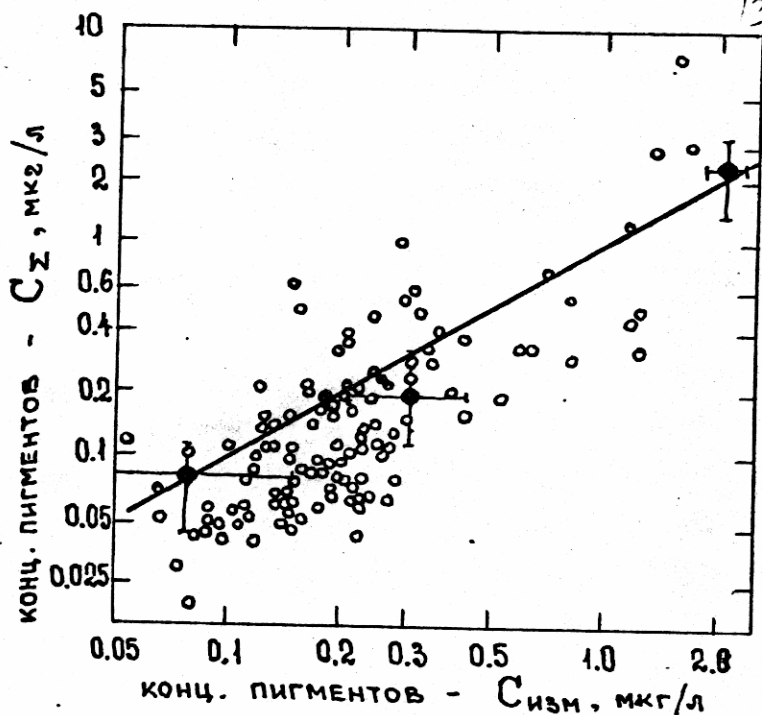


Рис.12. Проверка регрессионного уравнения /9/ по независимому экспериментальному массиву величин концентрации пигментов. Прямая соответствует линейному уравнению, связывающему расчетные C_z и измеренные значения $C_{изм.}$; для трех областей экспериментальных точек показаны среднеквадратические отклонения погрешностей определения концентрации пигментов расчетным путем /вертикальные линии/ по доминирующей длине волны λ_p и прямым измерениям /горизонтальные линии/.

В 41 рейсе НИС "Академик Вернадский" не проводились измерения проточным цитофлуориметром, поэтому оценка качества восстановления величин биомассы была проведена косвенным путем. По уравнению (18) рассчитывались величины V_{uph} , принимаемые за истинные значения, с которыми сравнивались величины V_{uph} , полученные из уравнения (10). На рис 13 приведена гистограмма распределения погрешностей восстановления величин биомассы ультрафитопланктона, рассчитанных по доминирующей длине волны λ_{dw} :

$$s = 100\% (V_{uphc} - V_{uphm}) / V_{uphm}, \quad (19)$$

где V_{uphc} - рассчитанные и V_{uphm} - измеренные значения биомассы.

Форма гистограммы свидетельствует, что распределение погрешностей восстановления близко к нормально-логарифмическому закону, максимум распределения смещен в отрицательную область /примерно на 25%/. Тем не менее, смещение максимума гистограммы попадает в диапазон погрешностей расчета биомассы. Таким образом, предложенные уравнения, связывающие биомассу ультрафитопланктона с оптическими характеристиками, вполне применимы для экспрессной оценки величины биомассы в водах Атлантики.

Заключение. В результате исследований получены универсальные регрессионные уравнения, позволяющие экспрессно определять биологические параметры /биомассу и численность ультрафитопланктона и суммарную концентрацию хлорофилла "а" и феофитина "а"/ по дистанционно определяемым цветовым характеристикам восходящего излучения водной толщи /доминирующая длина волны, чистота цвета/. Проведен анализ ковариационной матрицы спектров коэффициента яркости водной толщи по методу ортогональных эмпирических функций, который показал правомерность представления спектров коэффициента яркости малым числом параметров /99% дисперсии СКЯ описывается тремя первыми собственными векторами/. Установлена тесная корреляционная связь весового фактора первого собственного вектора λf_1 , доминирующей длины волны и чистоты цвета излучения с биологическими параметрами поверхностного слоя океана.

Предложенные уравнения статистически обеспечены экспериментальными данными, полученными в различных районах океана

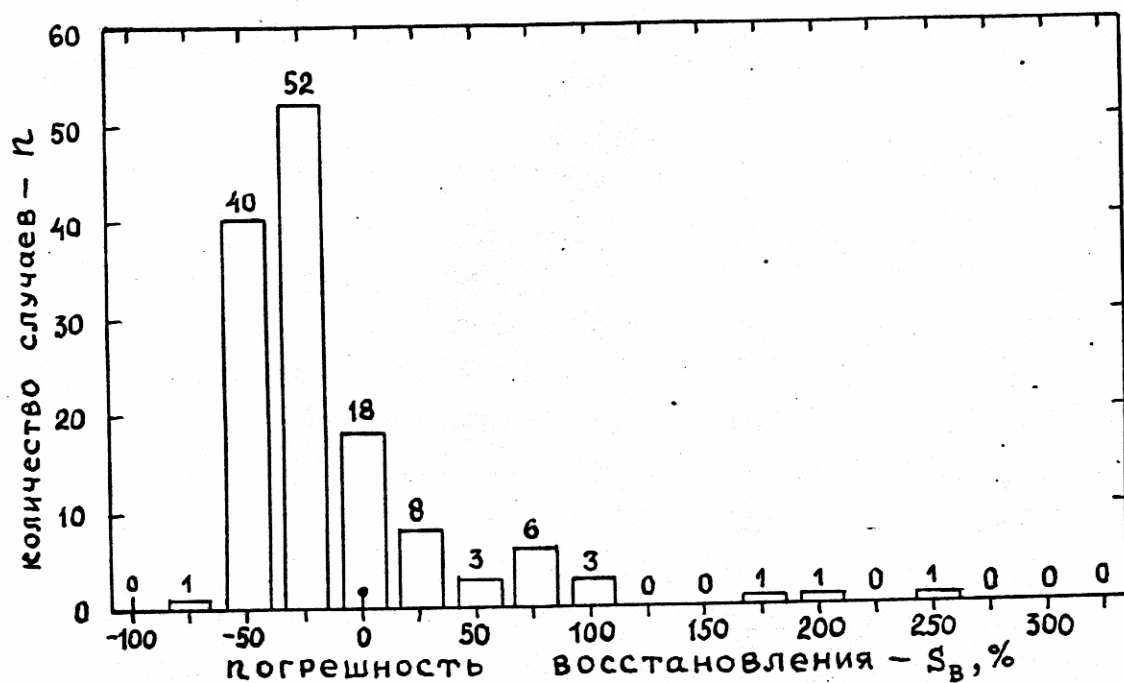


Рис.13. Гистограмма распределения погрешностей восстановления величин биомассы ультрафитопланктона, определенных по доминирующей длине волны λ_D /уравнение 10/.

в водах всех оптических типов. Эти уравнения проверены на независимом массиве данных; проверка показала хорошее соответствие расчетных и измеренных значений. Погрешности восстановления величин биологических параметров в большинстве случаев не превышают 50%.

Очевидно, что найденные регрессионные связи нуждаются в дальнейшем совершенствовании, однако и в предложенном виде они пригодны для использования в малопараметрических моделях экспрессной оценки биологических параметров океанских вод по дистанционным оптическим измерениям.

Л и т е р а т у р а

1. Афонин Е.И., Кравцов Г.Л. Аппаратура для исследования светового поля в системе океан-атмосфера.-В кн.: Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы/Под ред. Урденко В.А., Циммермана Г. Вып. ИКИ АН ГДР, Москва-Берлин-Севастополь, 1987 г., Т.2, Ч.1, С.174-209.
2. Афонин Е.И., Крашенинникова М.А. Статистические связи между оптико-биологическими характеристиками вод и параметрами восходящего из моря излучения.-Там же, Ч.2, С.57-80.
3. Владимиров В.Л., Мишонов А.В., Мартынов О.В. и др. Автоматизированная система сбора и обработки данных дистанционного зондирования морской поверхности в видимом диапазоне спектра с борта научно-исследовательского судна.-В кн.: Гидрофизические исследования в 37 рейсе НИС "Академик Вернадский", Ч.2. Гидрофизика Тропической Атлантики /Под ред. Булгакова Н.П./ МГИ АН СССР, Севастополь, 1990. Деп. в ВИНИТИ № 3491-В90, С.195-207.
4. Игнатов А.М., Мишонов А.В. Статистические характеристики спектрального коэффициента яркости морской поверхности.- В кн.: Исследование океана дистанционными методами: Труды 6 Всесоюзного совещания-семинара по спутниковой гидрофизике. Севастополь, 3-8 апреля 1989 г. Морск. гидрофиз. инс-т АН СССР Севастополь, 1989. Деп. в ВИНИТИ № 6176-В89, С.18-31.
5. Игнатов А.М., Мишонов А.В. Изменчивость коэффициента спектральной яркости вод Западной части Тропической Атлантики.- В кн.: Гидрофизические исследования в 37 рейсе НИС "Академик Вернадский", Ч.2. Гидрофизика Тропической Атлантики /Под ред. Булгакова Н.П./ МГИ АН СССР, Севастополь, 1990. Деп. в

ВИНИТИ, № 3491-B90, С.181-194.

6. Капуста Н.А., Мишонов А.В. Программное обеспечение ввода информации измерительных датчиков в персональный компьютер.- В кн.: Интерфейсные средства систем автоматизации гидрофизических исследований. Севастополь, МГИ АН УССР, 1990. Деп. в ВИНИТИ 1.08.90, №4412-B90, С.59-67.
7. Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения, М., Энергоатомиздат, 1990, 240 с.
8. Луизов А.В. Цвет и свет, Л., Энергоатомиздат, ЛО, 1989, 256 с.
9. Обухов А.М. О статистических ортогональных разложениях эмпирических функций.- Изв. АН СССР, сер. геофизика, № 3
10. Юнев О.А., Берсенева Г.П. Флуориметрический метод определения концентрации хлорофилла "а" и феофитина "а" в фитопланктоне.- Гидробиол. журнал, 1986, Т.22, №2, С.102-108.
11. Юнев О.А. Определение размерной структуры ультрафитопланктона Атлантического океана методом проточной цитофлуориметрии.- В кн.: Океан-космос: эксперимент Атлантика-89. Морской гидрофизический институт АН УССР. Севастополь 1990. Деп. в ВИНИТИ, № 4496-B90, С.166-181.
12. Юнев О.А., Салдан Н.В., Финенко З.З. и др. Анализ черноморского фитопланктона методом проточной цитофлуориметрии.- Океанология, 1990, Т.30, №3, С.515-521.
13. Cox C., Munk W. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter.- Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Univ. Calif., 1956, V.6, P.401-488.
14. Eppley R.W. An incubation method for estimating the carbon content of phytoplankton in natural samples.- Limnol. and Oceanogr., 1968, V.13, N4, P.574-582.

-37-

В печать -

Тир. /

Зак. 32792

Производственно-издательский комбинат ВИНТИ

Люберцы, Октябрьский пр., 403

Печатается в соответствии с решением
Редакционно-издательского Совета Инс-
титута биологии южных морей АН УССР №3
от "13 " декабря 1990 г. -