

Бурлаков

ПРОВОЗ 98

АКАДЕМИЯ НАУК УССР
Морской гидрофизический институт

Э.А.Михайлов, Н.П.Булгаков,
М.П.Каба, З.П.Бурлакова

**ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ОПТИЧЕСКОЙ
СТРУКТУРОЙ ВОД И ОСНОВНЫМИ
КОМПОНЕНТАМИ ВЗВЕШЕННОГО
ВЕЩЕСТВА В ВОДАХ ГВИНЕЙСКОГО
СЕКТОРА АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА**

Препринт

ПРОВ 2010

**АКАДЕМИЯ НАУК УССР
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**Э.А.Михайлов, Н.П.Булгаков,
М.Л.Каба, Э.П.Бурлакова**

**ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ОПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ВОД И
ОСНОВНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В
ВОДАХ ГВИНЕЙСКОГО СЕКТОРА АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА**

Препринт

**Севастополь
1989**

0102 80911

УДК 551.453.5

Взаимосвязь между оптической структурой вод и основными компонентами взвешенного вещества в водах Гвинейского сектора Атлантического океана / Э.А.Михайлов, Н.П.Булгаков, М.Л.Каба, Э.П.Бурлакова; АН УССР. Мор. гидрофиз. ин-т. - Препр. - Севастополь, 1989. - 67 с.

Работа содержит результаты пространственного распределения прозрачности вод региона, влияние различных факторов на её связь с распределением биологических и других характеристик вод.

Описаны изменчивость прозрачности вод, приведены средние многолетние вертикальные профили для одноградусных квадратов.

Проанализирована связь прозрачности с концентрацией хлорофилла в водах региона. Приведены уравнения регрессии этих параметров, как для вод шельфа, глубоководной зоны, так и для всего района в целом.

Работа рассчитана на специалистов в области океанологии, гидрооптики, гидробиологии.

Ил. II. Табл. 6. Библиогр. 57 назв.

Рецензент д-р биол. наук
З.З.Финенко

©

Морской гидрофизический
институт АН УССР, 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

В работе рассматривается распределение прозрачности вод в экоэкономической зоне Гвинейского шельфа (район Атлантического океана, примерно от 9° до 11° с.ш. и от 13° до 18° з.д.) Описывается пространственно-временная изменчивость этой характеристики по акватории региона во взаимосвязи с гидробиологическими, гидрологическими и гидрохимическими характеристиками, с динамикой вод. Приводятся результаты как отдельных съемок, так и осредненные многолетние данные.

Район отличается сложной динамикой вод и характеризуется наличием взаимодействующих течений, фронтальных зон, вихревых образований, что приводит к межгодовой, межсезонной и внутрисезонной изменчивости. А эта изменчивость в свою очередь приводит к миграциям и перераспределению мест скопления промышленных объектов и, вероятно, к вариациям погоды.

Значительный интерес представляет район и с точки зрения общих глобальных задач гидрооптики. Это объясняется, во-первых, широким диапазоном изменения гидрооптических характеристик. Во-вторых, в силу своего уникального природного положения данный регион имеет все основные источники оптически активных веществ, характерных для Мирового океана. Это мощный золотой вынос в сухой сезон; интенсивный речной вынос растворенных и взвешенных веществ — во влажный сезон; высокое содержание в воде фитопланктона и хлорофилла, благодаря значительному поступлению биогенных веществ с речным выносом и водами апвеллинга. Все это позволяет изучать влияние различных факторов на гидрооптические характеристики вод и вопросы формирования и изменчивости этих характеристик.

Гидрооптические исследования в регионе проводятся с 1977г.

и за прошедшее время накоплен достаточный, с нашей точки зрения, для обобщения материал.

Основной объем экспериментальных данных, использованных в работе получены авторами, или при их непосредственном участии во время экспедиций научных-исследовательских судов МГИ АН УССР в Гвинейский сектор Атлантического океана. В работе использованы также данные нескольких экспедиций, в которых авторы не участвовали, и материалы которых хранятся в научных фондах Научно-исследовательского центра (г. Конакри). Все использованные данные были получены в 1977-1987г. в рамках межправительственного соглашения между СССР и Гвинейской республикой.

I. Средние многолетние характеристики поля показателя ослабления излучения.

Как уже отмечалось в /44, 45 /, приборы для измерения оптических характеристик вод океана с удовлетворительной точностью, появились лишь в последние десятилетия. И, к настоящему времени, отсутствует унифицированная аппаратура и методики для гидрооптических измерений как во всемирном масштабе, так и внутри отдельных стран, занимающихся оптикой океана. Этот факт, а также то, что гидрооптическая аппаратура является, как правило, сложной, дорогой и требует высококвалифицированного обслуживания, привели к тому, что оптические исследования в океане проводятся эпизодически, лишь в отдельных рейсах научно-исследовательских судов.

В результате в научной литературе почти отсутствуют данные о гидрооптических характеристиках осреднённых на периодах сезон - несколько лет, за исключением данных по глубине видимости белого дна /44 / и цвету вод по стандартной шкале /49 /. В качестве исключения можно назвать, например, распределение индекса цвета вод, построенное для ряда регионов Мирового океана по многолетним данным /37 /; карту распределения оптических типов вод /44 /, построенную по результатам измерений подводной облучённости; крупномасштабное

распределение показателя ослабления излучения в тропической Атлантике /52/. Однако следует заметить, что, в большинстве случаев, это не осреднённые за какой-либо период данные, а просто собранные воедино данные измерений, выполненные за этот период.

Ещё хуже обстоит дело с данными о вертикальных профилях гидрооптических характеристик. Нам известна лишь одна работа, в которой приводится средний многолетний вертикальный профиль - это раздел по гидрооптике в монографии о Чёрном море /35/, где приведён такой профиль для летнего сезона. Можно указать ещё работу /38/, в которой приведены "типичные" вертикальные профили для десятиградусных квадратов Марсдена в тропической Атлантике по многолетним данным. Однако авторы /38/ не пишут какие критерии использовались для оценки "типичности" и не приводят статистику измерений.

Таким образом, в отличие от гидрологических параметров Мирового океана, климатические характеристики большинства районов которого достаточно хорошо известны, и в настоящее время идёт лишь их уточнение /53/, "оптический климат" океана ещё предстоит исследовать и описать. Важность и актуальность этой задачи не вызывает сомнений, особенно в связи с увеличивающимся в последние годы загрязнением океана. Это вызвано широким использованием оптических методов при исследованиях и мониторинге загрязнения Мирового океана, а для уверенного выделения ряда искусственных загрязнений необходимо знать климатические значения оптических характеристик и статистические параметры их естественной изменчивости.

1.1. Вертикальные профили показателя ослабления излучения.

Гидрооптические измерения в водах гвинейского сектора Атлантического океана были начаты в 1977 г. в 15 рейсе НИС "Академик Вернадский". До настоящего времени гидрооптические съёмки в этой зоне с судов МГИ АН СССР выполнялись четырнадцать раз, из них восемь раз проводились измерения вертикальных профилей показателя ослабления излучения.

В табл. 4.1 приведена сводка рейсов, в которых выполнялись измерения. Как следует из таблицы, измерения проводились только в переходный от влажного к сухому и в сухой сезоны. Данные для влажного сезона отсутствуют, поэтому все приведённые далее средние характеристики относятся к сухому и переходному от влажного к сухому сезонам.

Основной массив данных был получен для спектрального диапазона 485-495 нм (синие-зелёная область спектра). В некоторых случаях результатов измерений в этом диапазоне не имелось, а были данные для диапазона 420-425 нм. В этом случае $\xi(420 \text{ нм})$ пересчитывалось в $\xi(490 \text{ нм})$ с использованием следующего коэффициента:

$$\xi(490 \text{ нм}) = 0,8 \xi(420 \text{ нм}),$$

Коэффициент определён по данным работы /29/, в которой приведены средние спектры показателя ослабления излучения для вод Тропической Атлантики.

Измеренные вертикальные профили показателя ослабления излучения были разнесены по градусным квадратам (принятая нами нумерация квадратов на рис. 1.1.1). Затем для каждого квадрата

Таблица 4.1

Рейсы НИС МГИ АН УССР, во время которых проводились исследования
в гвинейском секторе Атлантического океана.

№ : пп :	Название научно-исследо- вательского судна	№ : рейса :	Период проведения измерений	Примечания
1.	"Академик Вернадский"	15	апрель-май 1977 г.	
2.	"Михаил Ломоносов"	36	октябрь 1978 г.	
3.	"--"	38	январь 1980 г.	
4.	"--"	40	ноябрь 1980 г.	
5.	"Академик Вернадский"	23	март-апрель 1981 г.	Единичные измерения ϵ
6.	"--"	25	апрель 1982 г.	
7.	"--"	26	октябрь 1982 г.	Измерения ϵ не прово- дились
8.	"--"	27	январь 1983 г.	
9.	"Профессор Колесников"	8	март 1984 г.	
10.	"Михаил Ломоносов"	43	январь 1985 г.	
11.	"Профессор Колесников"	11	май 1985 г.	Измерения ϵ не прово- дились
12.	"--"	13	апрель-июль 1986 г.	Измерения ϵ не прово- дились
13.	"Михаил Ломоносов"	45	декабрь 1986 г.	Измерения ϵ не прово- дились
14.	"Профессор Колесников"	15	январь-май 1987 г.	Измерения ϵ не прово- дились

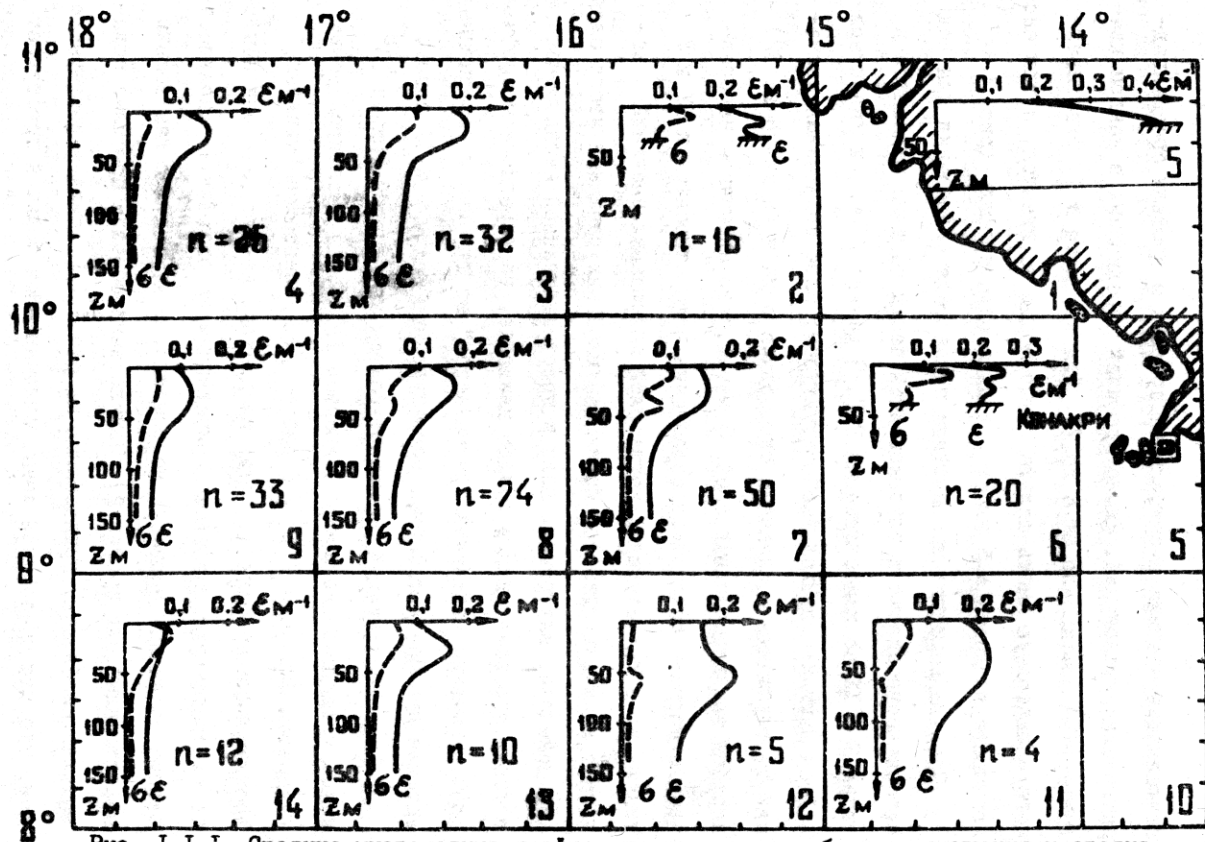


Рис. I.I.I. Средние многолетние профили показателя ослабления излучения и средне-квадратического отклонения (σ). В нижнем правом углу - номер квадрата

вычислялись средние вертикальные профили и профили среднеквадратических отклонений. Число профилей осреднённых в каждом квадрате (n) составляло от 4 до 74. Для квадрата № I, охватывающего мелководную часть шельфа, информации не имеется, а для анологичного квадрата № 5 имеется только один профиль (рис. 4.4.1).

Средние вертикальные профили показателя ослабления для вод материкового склона и глубоководной части региона относятся к типам III и IV по классификации Г.Г. Неуймина /34/, и характеризуются двух или трёхслойной структурой: слой повышенных значений ϵ , глубокие прозрачные однородные воды и (в квадрате I2) - верхний квазиоднородный слой. Отметим, что единичные неосреднённые профили показателя ослабления чаще относятся к IV и V типам, но в тех случаях, когда слой повышенных значений залегает не очень глубоко. Из-за вертикальных смещений этого слоя под действием внутренних волн и пространственной неоднородности глубины его залегания в каждом квадрате, на осреднённом профиле слой повышенных значений "размывается" по глубине и осреднённые профили приобретают форму, промежуточную между III и IV типом.

Весь исследуемый регион относится ко второму (южнее 10° с.ш.) и тридцать восьмому (севернее 10° с.ш.) десятиградусным квадратам Марсдена /50/. В работе /38/ приведены "типичные" вертикальные профили для этих квадратов. Качественно они неплохо соответствуют профилям, приведённым на рис. 4.4.1 (количественное сравнение провести невозможно, т.к. в /38/ дан только качественный вид профилей). Однако разнообразие профилей показателя ослабления, приведённых на рис. 4.4.1 свидетельствует о том, что для прибрежной зоны, отличающейся большой пространственной неоднородностью распределения оптических характеристик

по десятиградусным квадратам даёт слишком грубое приближение, и в этой зоне необходимо использовать более мелкую сетку.

Рассмотрим средние вертикальные профили показателя ослабления в одноградусных квадратах (рис. 1.1.4). В квадратах, целиком расположенных в мелководной части шельфа, где глубина менее 50 м (квадраты 2, 5, 6) во всей водной толще наблюдаются довольно высокие значения $\bar{\epsilon}$, не ниже $0,17 \text{ м}^{-1}$. Причём, кроме подповерхностного слоя повышенных значений показателя ослабления, здесь наблюдается ещё придонный слой, залегающий непосредственно у дна. Существование этого слоя обусловлено взмучиванием токондисперсных осадков приливо-отливными движениями вод. Среднеквадратичные отклонения от средних профилей в данной зоне имеют высокие значения во всей водной толще.

В районе материкового склона и в глубоководной части региона основная изменчивость вертикального профиля $\bar{\epsilon}$ сосредоточена в верхнем 75+100 метров слое, глубже показатель ослабления $\bar{\epsilon}$ уменьшается и слабо меняется с глубиной. Это объясняется тем, что основная масса "оптически активных" веществ сосредоточена в данном районе в верхнем слое океана. Обращает на себя внимание второй максимум на кривой среднеквадратичного отклонения в квадрате 7, расположенный на глубине около 40 м. Его существование, очевидно, обусловлено тем, что северо-восточная часть квадрата захватывает мелководную зону шельфа, с глубинами менее 50 м, где, как уже отмечалось, наблюдаются природные мутьевые потоки.

В целом значения показателя ослабления закономерно уменьшаются с удалением от берега в направлении с северо-востока на юго-запад. Генеральное направление изменения прозрачности направлено перпендикулярно изобатам (которые на глубинах 50+500

матров хорошо повторяют контур береговой линии) и характеризует, в первую очередь, направление наименьших расстояний до основного источника "оптически активных" веществ, которым (прямо или косвенно) в данном районе является материк.

Такой характер изменения показателя ослабления излучения подтверждается и в изменении интегральных характеристик (табл.

1.2); среднего в слое 0+150 м показателя ослабления излучения $\bar{\epsilon}_{150}$ и среднего в этом же слое среднеквадратичного отклонения для одноградусных квадратов:

$$\bar{\epsilon}_{Z_m} = \frac{1}{Z_m} \int_0^{Z_m} \epsilon(z) dz; \quad \bar{\sigma}_{\epsilon} = \frac{1}{Z_m} \int_0^{Z_m} \sigma_{\epsilon}(z) dz;$$

где Z_m равно 150 м, или предельной глубине измерения, если она меньше 150 м.

Из данных таблицы видно, что как $\bar{\epsilon}_{150}$, так и $\bar{\sigma}_{\epsilon}$ закономерно уменьшаются с северо-востока на юго-запад, так же изменяется и средний коэффициент вариации $\bar{V}_{\epsilon} = \bar{\epsilon}_{150} / \bar{\sigma}_{\epsilon}$. Исключение составляют лишь квадраты 9 и 14, где значения $\bar{V}_{\epsilon}$ снова возрастают до 0,4. Вероятно, это вызвано двумя причинами. Во-первых, в этих квадратах наблюдаются наиболее прозрачные воды ($\bar{\epsilon}_{150} = 0,05+0,07$), а среднеквадратичные отклонения показателя ослабления здесь в глубинных водах уже почти не уменьшаются по сравнению с соседними квадратами, так как во многом обусловлены не физической изменчивостью, а погрешностями измерений. Во-вторых, именно в этих квадратах в некоторых из рейсов был обнаружен район с повышенными значениями показателя ослабления излучения /27/, обусловленный подъемом вод в результате дивергенции течений.

Таблица 4.2

Средние значения показателя ослабления излучения, среднеквадратичного отклонения и коэффициента вариации в слое 0+150 м для всех квадратов кроме 2, 5 и 6, где глубина осреднения 0+40 м.

№ квadrата : I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
$\bar{\epsilon}_{150}$	-	0,22	0,11	0,09	0,36	0,22	0,11	0,10	0,07	-	0,17	0,17	0,09	0,05
$\bar{\sigma}_{\epsilon}$	-	0,10	0,03	0,02	-	0,09	0,04	0,03	0,03	-	0,03	0,02	0,02	0,02
$\bar{V}_{\epsilon}$	-	0,45	0,27	0,22	-	0,40	0,36	0,30	0,42	-	0,17	0,12	0,22	0,40

1.1. Пространственное распределение показателя ослабления излучения.

Средние многолетние пространственные распределения показателя ослабления излучения в экономической зоне Гвинейской республики строились на основании средних вертикальных профилей для одноградусных квадратов (рис. 1.1.1) также только для сухого и переходного от влажного к сухому сезонам совместно. На рис. 1.2.1 , 1.2.2 и 1.2.3 представлены карты пространственного распределения показателя ослабления соответственно на горизонте 0 м, на горизонте 20 м (в слое пониженной прозрачности) и осреднённого в слое 0+150 м (или до дна, при глубинах менее 150 м).

Видно, что как и указывалось выше, основное изменение показателя ослабления происходит примерно по нормали к береговой линии. Максимальные градиенты показателя ослабления наблюдаются в мелководной части шельфа и, очевидно, они были бы гораздо большими, если бы имелись данные измерений на глубинах менее 20 м в квадратах I, 5, 6. Несколько увеличенные значения ϵ на горизонте 0 м и осреднённого в слое 0+150 м в квадратах II, I2 и нарушение общей тенденцией направленности изолиний в этой зоне объясняется следующим. Измерения в этих квадратах были произведены только в 15 рейсе НИО "Академик Вернадский" весной 1977 г. и во время этой съёмки в данном районе наблюдались повышенные значения ϵ на стыке циклонического и антициклонического круговорота. вполне возможно, что это явление носило локальный характер и проявляться при повторных измерениях здесь в последующие годы не будет.

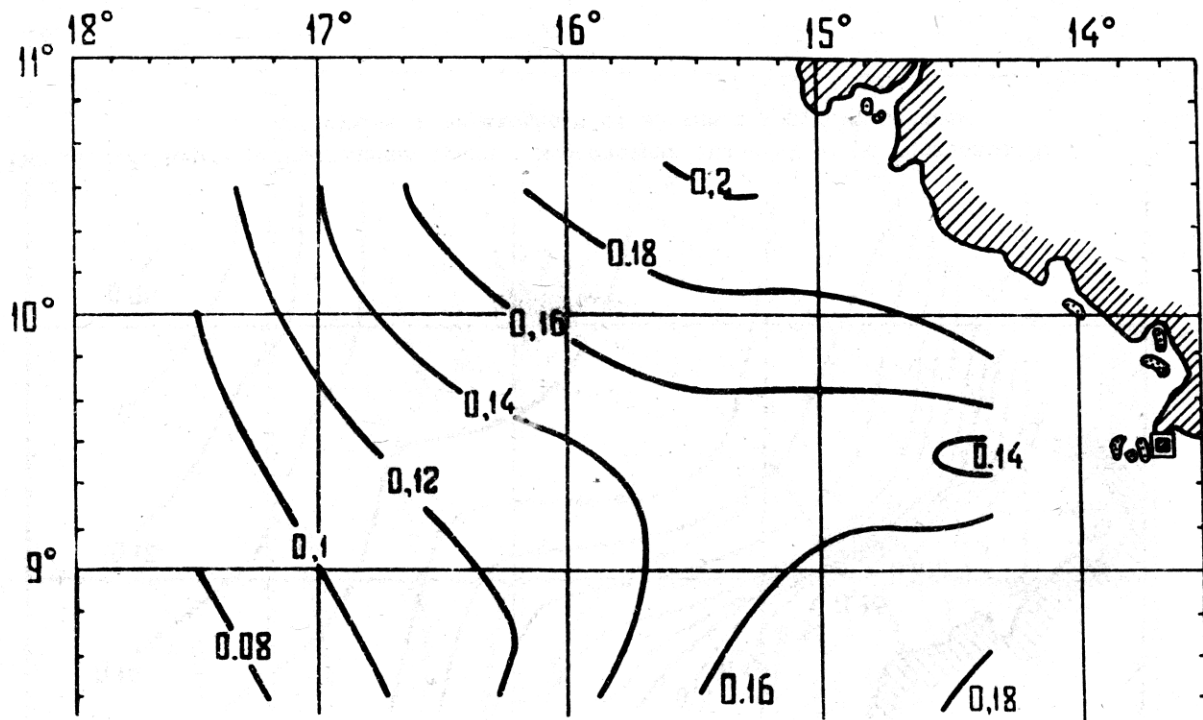


Рис. 1.2.1. Карта распределения средних многолетних значений ε на горизонте 0 м для сухого и переходного от влажного к сухому сезонам

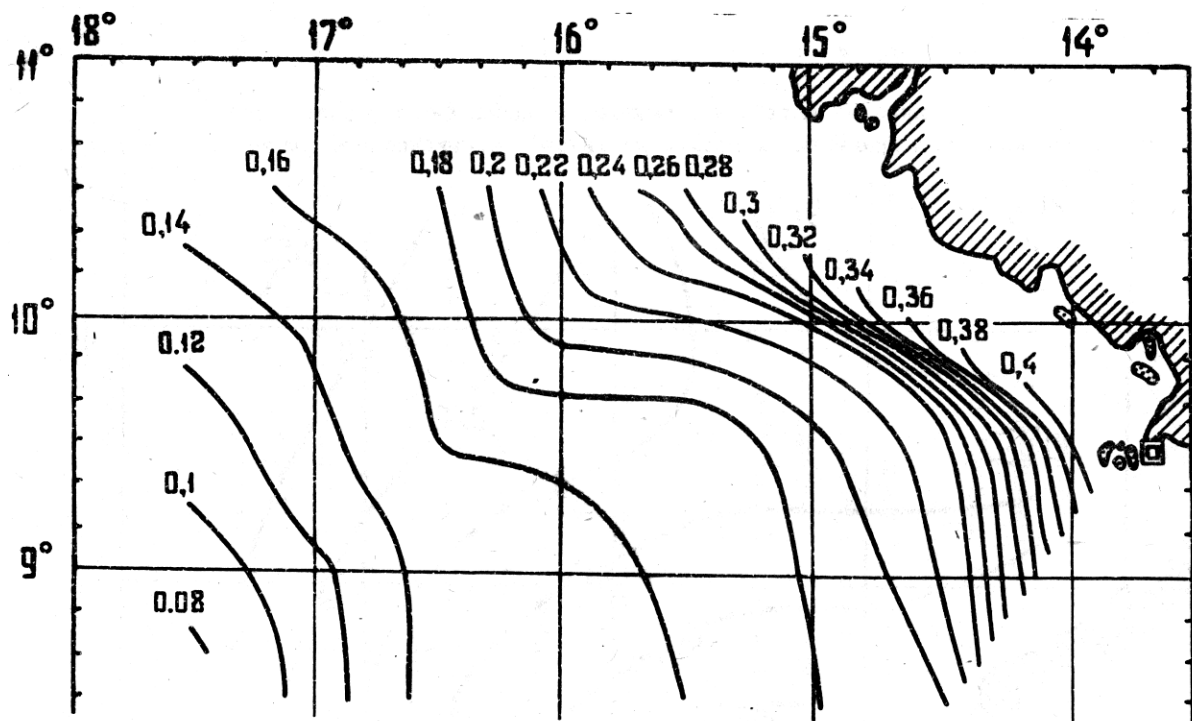


Рис. 1.2.2. Карта распределения средних многолетних значений ϵ на горизонте 20 м для сухого и переходного от влажного к сухому сезонам

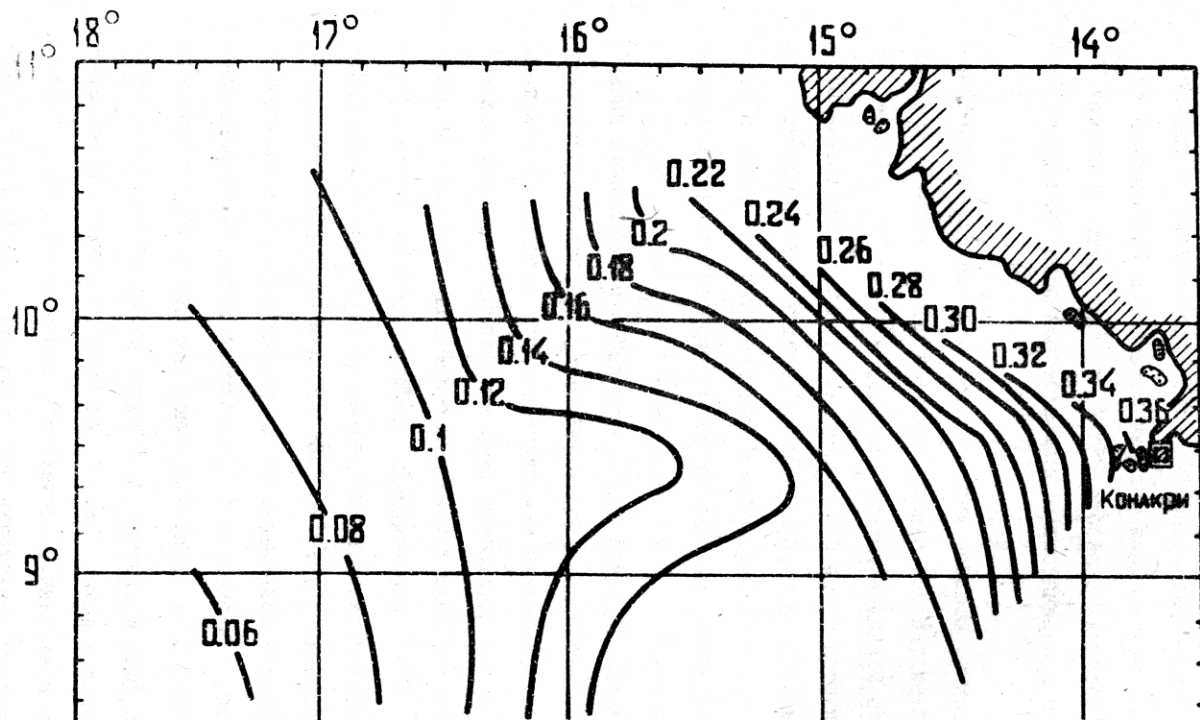


Рис. 1.2.3. Карта распределения средних многолетних значений ε в слое 0 - 150 м для сухого и переходного от влажного к сухому сезонам

В целом данные распределения хорошо согласуются с крупномасштабными распределениями прозрачности вод в Тропической Атлантике, построенными в работе /52/, и существенно уточняют структуру поля прозрачности в экономической зоне Гвинейской Республики.

Как известно, среднее многолетнее распределение гидрофизических характеристик вод океана является важной характеристикой его режима. Но в каждом конкретном году в различных районах океана наблюдаются более или менее значительные отклонения от вычисленных многолетних норм /53/. Исследование межгодовой изменчивости представляет большой интерес, так как ведёт в последующем к разработке методов прогноза гидрооптических характеристик вод океана.

Относительно короткий ряд наблюдений с нерегулярной дискретностью, имеющейся на сегодняшний день, не позволяет провести какой-либо статистический анализ частотного состава многолетних колебаний. Поэтому рассмотрим лишь качественную картину межгодовой изменчивости поля показателя ослабления излучения в регионе. На рис. 1.2.4 представлены графики изменения средних значений показателя ослабления излучения на горизонте 0 м по одноградусным квадратам с 1977 по 1985 гг. Для большинства квадратов ход показателя ослабления за указанный период не имеет заметного тренда, а значения $\bar{\epsilon}$ колеблются около некоторого среднего. Амплитуда этих колебаний может достигать 30% от среднего значения. Для ряда квадратов, в которых измерения по годам представлены наиболее полно (6+9, 3, 4) заметно наличие преобладающего периода колебаний. К сожалению, длина рядов и их дискретность не позволяют утверждать это достоверно. По данным В.Ф.Су-

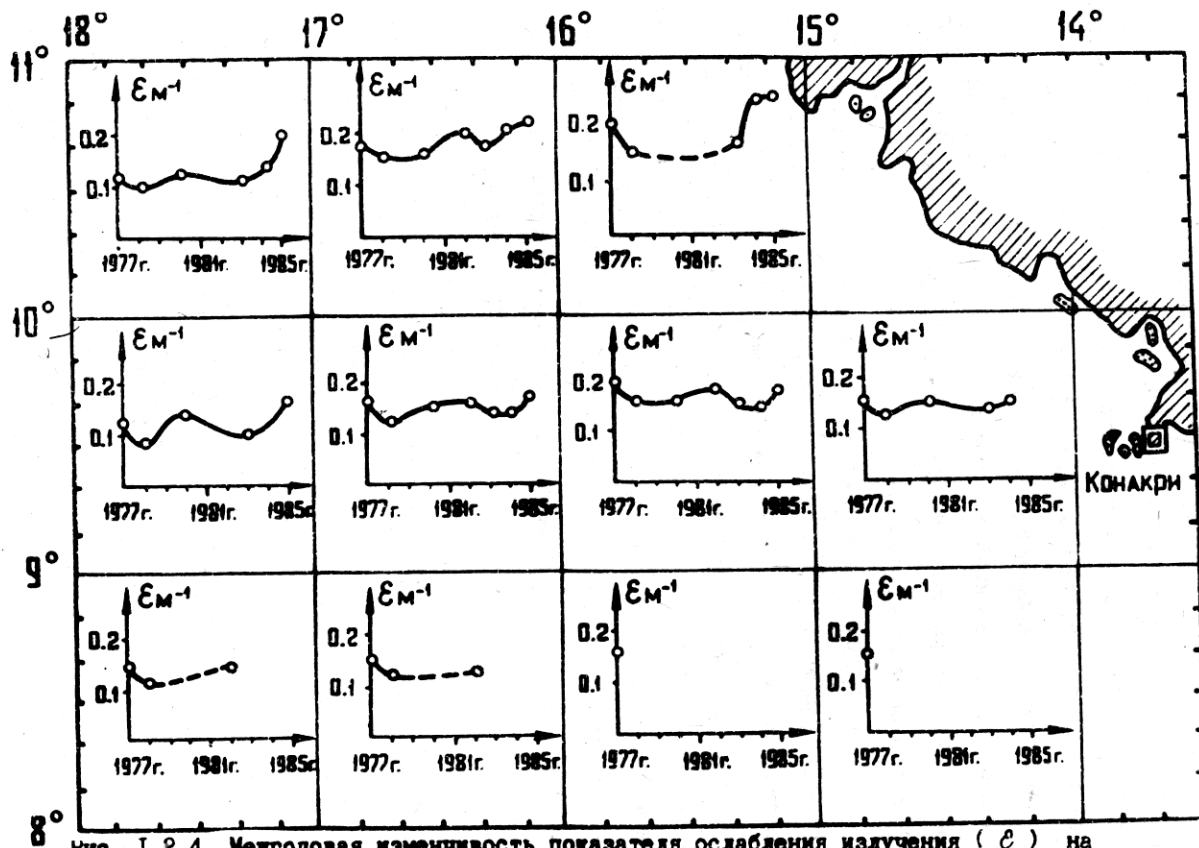


Рис. 1.2.4. Межгодовая изменчивость показателя ослабления излучения (ϵ) на горизонте 0 м

хвой / 53 / в северной части Атлантического океана в колебаниях интенсивности течений и гидрометеорологических элементов наблюдаются периоды 5,2 - 5,5; 2,9 - 3,1 и 2 - 2,2 гг.

Мы не можем сравнить полученные результаты с данными о многолетних колебаниях каких-либо других океанографических характеристик в регионе, так как такие данные, насколько нам известно, нигде не публиковались.

В заключение необходимо подчеркнуть необходимость дальнейшего регулярного проведения гидрооптических измерений в данном регионе и накопления данных таких измерений, что откроет путь к прогнозу гидрооптической и гидробиологической ситуации на исследуемой акватории. О недостаточности имеющегося материала ярко свидетельствует следующий факт. В двух десятиградусных квадратах, охватывающих экономическую зону Гвинейской Республики к началу 80-х годов выполнено около 4 000 гидрологических станций / 4 / и только около 300 гидрооптических станций.

1.3. Короткопериодные изменения гидрооптических характеристик.

Исследование временной изменчивости оптических характеристик вод в фиксированных точках региона на временных масштабах порядка несколько часов - несколько суток, а в отдельных случаях и несколько недель, играет большую роль с точки зрения достоверности карт и разрезов, построенных по результатам съёмок. По определению А.С. Монина с соавторами /30/ этот интервал относится к мезомасштабной изменчивости. Выше было показано, что факторы определяющие формирование поля оптических характеристик и их вертикальные профили различны на разных участках региона, поэтому рассмотрим временную изменчивость оптических характеристик отдельно.

Глубоководная часть региона

Временную изменчивость вертикальных профилей показателя ослабления излучения в глубоководной части региона можно проследить по результатам измерений, выполненных в 36-м рейсе НИС "Михаил Ломоносов" 22-25.09.1978 г. у северо-западной границы 9-го квадрата (ст.3238). Рис. 4.4.1. Эти измерения выполнялись на разрезе, ориентированном параллельно изобате 3 500 м. Разрез состоял из II станций, центральная - у выставленной здесь АБС, и по 5 станций от неё на северо-восток и юго-запад. Разрез был повторен 7 раз с интервалом времени между повторными измерениями в тех же самых точках около 8 часов. Так как дрейф АБС не наблюдался, то было обеспечено надёжное повторение измерений в заданных точках.

По результатам этих измерений нами были рассчитаны средние вертикальные профили $\bar{\epsilon}(z)$ на каждом разрезе (пространственная изменчивость в районе исследуемой точки) и по повторным измерениям в каждой точке разреза (временная изменчивость в исследуемом районе). Часть этих профилей приведена на рис. 1.3.1. Как видно, эти профили являются промежуточными между средними профилями 9 и 14 квадратов (рис. 1.1.1). Они характеризуются наличием верхнего квазиоднородного слоя на глубинах 0-20 м (иногда с понижением прозрачности к поверхности). Слой повышенных значений ϵ залегает на глубинах 30-50 метров, затем прозрачность несколько повышается, и на глубинах 100 ± 150 м практически не меняется. Эта структура вертикального профиля хорошо согласуется с гидрологической структурой вод в данном районе, где наблюдался поверхностный квазиоднородный слой на глубинах до 20 м и сезонный термоклин на глубинах 20-90 м.

В верхнем квазиоднородном слое зарегистрирована не высокая изменчивость ϵ , коэффициенты вариации здесь составили 0,05 - 0,15. В зоне повышенных значений ϵ коэффициенты вариации резко возрастают до 0,20 ± 0,55 и затем снова уменьшаются, со средним значением на горизонтах 100 - 150 м - 0,12. Коэффициенты вариации средних профилей, вычисленные для фиксированных точек и для разрезов значимо не различаются, что свидетельствует об отсутствии в данном районе (в исследуемых масштабах) преобладающей роли временной или пространственной изменчивости. Кроме этого, важным является то, что гидрооптическая структура вод в данной зоне региона была стабильной в течение нескольких суток, а коэффициенты вариации для средних профилей здесь существенно меньше, чем коэффициенты вариации для средних профилей, вычисленных по ряду рейсов за один сезон для прилегающих к этой точке

Показатель ослабления излучения, м^{-1}

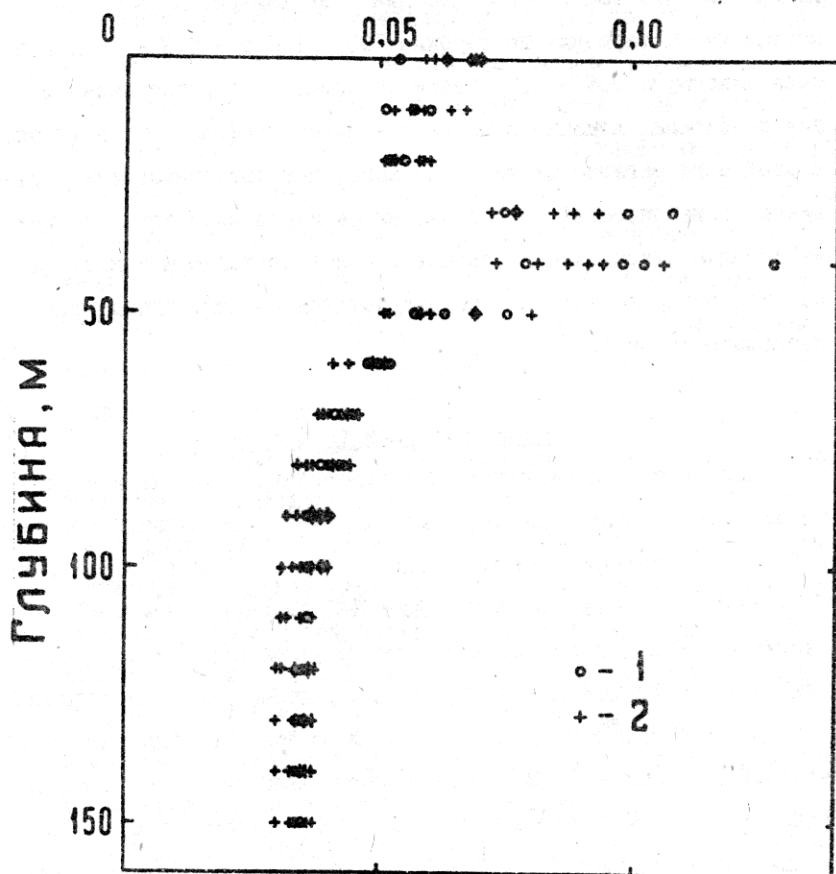


Рис. 1.3.1. Средние вертикальные профили ϵ на многосуточной станции 3238. 1 - при осреднении по времени; 2 - при осреднении по пространству

квадратов (см. табл. 4.2). Для этих квадратов (№ 9, 14) коэффициенты вариации на глубине 100 - 150 м - 0,3 - 0,5, а в слое максимума 0,4 - 1,0. Таким образом, пространственная и внутрисезонная изменчивость вертикальных профилей ε в глубоководной зоне региона значительно выше, чем пространственно-временная изменчивость в окрестностях фиксированной точки за время порядка суток, что позволяет строить достоверные карты и разрезы распределения ε по результатам съёмки, занимающих несколько суток.

Район материкового склона.

Для этого района, характеризующегося резкими изменениями глубины, мы располагаем данными измерений вертикальных профилей ε на суточной станции 4016, с координатами $10^{\circ}10'$ с.ш. и $17^{\circ}15'$ в.д., выполненной в 40 рейсе НИС "Михаил Ломоносов" (ноябрь 1980 г.) и данным измерений индекса цвета и вертикальных профилей флуоресценции хлорофилла, проведённых на суточной станции 3603 (10° с.ш. и 17° в.д.) в 26 рейсе НИС "Академик Вернадский" в октябре 1982 г. Обе станции были выполнены в одном районе, ст. 4016 в юго-западной части 4 квадрата, а ст. 3603 в точке соприкосновения 3, 4, 8 и 9 квадратов. Индекс цвета, представляющий отношение яркостей излучения, восходящего из толщи моря в спектральных диапазонах 540 и 420 нм, измерялся с помощью специального прибора, размещённого у нижнего среза сквозной шахты, имеющейся на НИС "Академик Вернадский" /11/. Флуоресценция хлорофилла измерялась "in situ" макетом импульсного зондирующего флуориметра.

Для ст. 4016 результаты измерений представлены в виде семи профилей, полученных осреднением результатов 6 - 7 зондирований, выполнявшихся в течение каждых трех часов. Оценка изменчивости проводилась по коэффициенту вариации этих семи осреднённых профилей. Чтобы сопоставить эту величину с изменчивостью в глубоководной зоне региона была рассчитана аналогичная величина для этой зоны, т.е. коэффициент вариации средних профилей (которые осреднялись примерно по такому же числу зондирований). Оказалось, что коэффициенты вариации, определённые подобным образом, для зоны материкового склона в I, 5 - 2 раза выше, чем в глубоководной зоне региона.

Можно предположить, что такая повышенная изменчивость гидрооптических характеристик в данной зоне определяется в основном значительной пространственной изменчивостью, особенно в направлении, перпендикулярном изобатам. Это предположение хорошо подтверждается результатами измерений в 26 рейсе НИС "Академик Вернадский" (ст. 3603). Результаты этих измерений представлены на рис. 4.3.4. Работы на этой станции проводились в дрейфе в районе выставленной АБС в течение суток. Их можно разбить на два периода. Первый - с 6 ч утра до 15 ч 8 октября. В этот период наблюдался дрейф судна поперёк изобат и глубина за 9 ч изменилась на 100 м. Затем с 15 до 17 ч судно совершило переход, зайдя мористее буя, и с 17 ч 8 октября по 6 ч 9 октября наблюдался дрейф изобаты 500 м.

На этой станции проводились непрерывные измерения индекса цвета (в дневное время) и температуры на глубине 6 м через шахту в днище судна. Во время дрейфа измерялись вертикальные профили флуоресценции хлорофилла с помощью зондирующего флуориметра до глубины 250 м. На рисунке приведены результаты

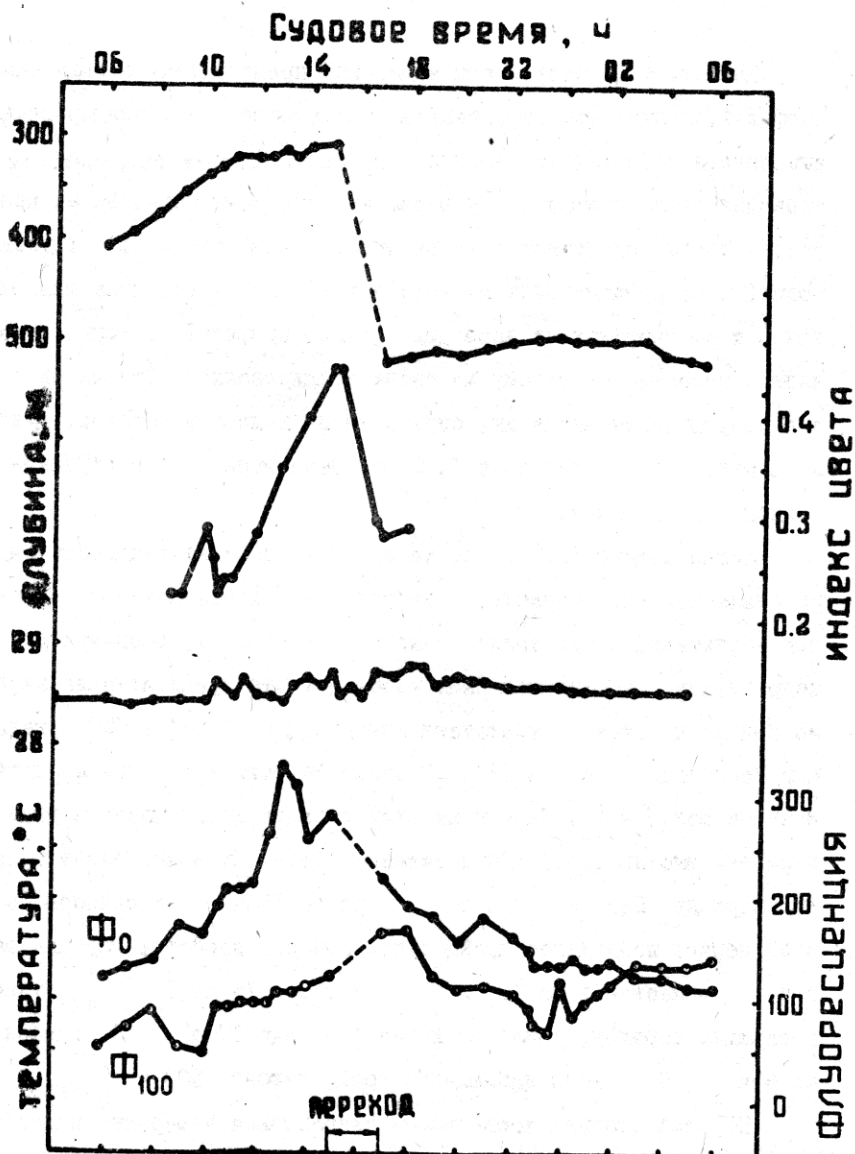


Рис. 1.3.2. Изменения глубины места, индекса, цвета, температуры на глубине 6 м, флуоресценции в поверхностном слое (Φ_0) и на глубине 100 м (Φ_{100}) во время суточной станции 3603

измерений глубины места, индекса цвета, температуры и флуоресценции на горизонтах I и 100 м. Видно, что на первом участке дрейфа наблюдалось резкое изменение оптических характеристик вод и, с уменьшением глубины, индекс цвета и флуоресценция возросли примерно в 2 раза. После перехода флуоресценция изменялась значительно слабее (индекс цвета во втором периоде изменялся только в течение часа, до захода Солнца). В изменениях температуры никакого тренда не наблюдалось, она колебалась около значения $28,5^{\circ}$. Таким образом, гидрооптические характеристики вод фотического слоя в области материкового склона характеризуются значительной изменчивостью на масштабах порядка нескольких миль в направлении перпендикулярном изобатам.

Шельфовый район.

Для района шельфа отсутствуют данные по одно или многослойным сериям гидрооптических зондирований, а в мелководной зоне, ограниченной изобатами 20 м, зондирования вообще не проводились. Поэтому изменчивость прозрачности в этом районе оценим по измерениям глубины видимости белого диска, выполненным с а/с "Океанограф". Эти измерения показывают, что вариации прозрачности на временных масштабах часы - сутки здесь могут быть очень велики. Так, например, на трёхсуточной станции, проведённой северо-западнее островов Лос, глубина видимости диска изменялась от 2 и до 9 м, т.е. в 4,5 раза (глубина места 13 м). А при повторном проведении измерений в точке с координатами $10^{\circ}02,2'$ с.ш. и $14^{\circ}15,3'$ з.д. (глубина места 4 м) через трое суток глубина видимости белого диска изменилась с

I до 0,1 м , т.е. в 10 раз. Такие изменения происходят в основном за счёт приливо-отливных движений, взмучивающих тонкодисперсную фракцию донных осадков.

С учётом того, что в первом приближении, глубина видимости диска Z_0 и показатель ослабления излучения ϵ связаны зависимостью /28/

$$\epsilon = C / Z_0 ,$$

где C - постоянная,

можно утверждать, что примерно во столько же раз будет изменяться и показатель ослабления излучения.

Таким образом, из изложенного можно сделать вывод, что пространственно-временные вариации показателя ослабления излучения в экономической зоне Гвиней (на масштабах порядка суток - миль) закономерно возрастают по мере уменьшения глубины и особенно резко - на глубинах менее 20 м . Из этого следует, что нужно относиться с большой осторожностью к интерпретации результатов разовых измерений в зоне материкового склона и шельфа и учитывать при этом динамику вод в точке измерения, в особенности приливо-отливные движения.

2. Взаимосвязь между показателями ослабления излучения и концентрацией хлорофилла в водах региона.

Одним из важнейших гидробиологических показателей вод Мирового океана является концентрация фотосинтетических пигментов фитопланктона, и в первую очередь - хлорофилла "а", /11, 55 /, так как именно они определяют первичную продукцию океана, получаемую в результате фотосинтеза. Данные по концентрации хлорофилла позволяют решать две важные и актуальные задачи гидробиологии: рассчитывать первичную продукцию и исследовать пространственную неоднородность распределения фитопланктона в океане /16, 54 /.

Общепринятые методы определения концентрации хлорофилла, основанные на фильтрации проб воды и последующем определении концентрации хлорофилла по поглощению или флуоресценции ацетонового экстракта осадка, весьма трудоёмки и позволяют получить данные лишь в дискретных (как правило редко расположенных) точках. Поэтому в последние годы интенсивно развиваются оптические контактные и дистанционные методы, позволяющие (пусть даже, в некоторых вариантах, и с какой-то потерей в точности) экспрессно измерять непрерывные или квазинепрерывные профили распределения концентрации хлорофилла "in situ".

Одним из таких (контактных) методов является оценка концентрации хлорофилла в морской воде с помощью измерений показателя ослабления излучения погруженными прозрачномерами. Возможность такой оценки определяется поглощением излучения фотосинтетическими пигментами фитопланктона и рассеиванием света мелкими планктонными организмами.

Взаимосвязь между показателем ослабления и концентрацией хлорофилла в водах региона последовалась нами на материале синхронных измерений этих двух параметров с помощью прозрачномера, оснащённого автоматической кассетой батометров,

При исследовании взаимосвязи между значениями показателя ослабления и концентрацией хлорофилла важно знать, в каком спектральном диапазоне (из имеющихся в прозрачномере) эта взаимосвязь будет более тесной. Для выбора такого диапазона рассмотрим известные из литературы данные о спектральном распределении показателя ослабления излучения. Большинство из этих данных получено в водах Атлантики, Карибского, Средиземного и Чёрного морей с дискретностью 40 - 50 нм. В работах /8, 22 / исследуется тонкая структура (с разрешением 2 - 5 нм) спектров. Эти исследования показали, что спектры показателя ослабления немонотонны и имеют промежуточные экстремумы, что связано с селективным характером поглощения света пигментами фитопланктона и продуктами их превращения в процессе его жизненного цикла.

Кроме фитопланктона, существенный вклад в изменение формы спектров показателя ослабления, особенно в коротковолновой части, вносит поглощение света "жёлтым веществом" - компонентом растворённой органики, образующимся (в открытом океане) в основном за счёт деструкции планктонных организмов. Количество образующегося жёлтого вещества зависит не только от концентрации планктона, но и от фазы развития - в старых популяциях его относительное количество выше.

Спектр поглощения жёлтого вещества в видимой области монотонно спадает с увеличением длины волны λ и этот спад хорошо аппроксимируется следующей зависимостью /43 /:

$$K_{\text{ж.в.}}(\lambda) \sim \exp(-0,045\lambda),$$

где λ — длина волны в нанометрах.

Спектр же хлорофилла в видимой области спектра имеет основные максимумы на 430 — 440 и 675 — 680 нм. Для получения максимальной чувствительности к изменениям концентрации хлорофилла заманчиво было бы проводить измерения показателя ослабления в области одного из этих максимумов. Однако в области 430 — 440 нм велико влияние жёлтого вещества и его вклад в суммарное поглощение здесь составляет 60 — 80% /43/. В области 670 — 680 нм вклад жёлтого вещества пренебрежимо мал, но в этой области уже существенно сказывается поглощение излучения самой водой, которое составляет 95 — 99% суммарного, и на этом фоне вариации показателя ослабления, вызванные изменениями концентрации хлорофилла, с помощью существующей аппаратуры выделить практически невозможно.

Рассеяние света взвесью (в том числе и фитопланктоном) почти не селективно и его интенсивность слабо падает с увеличением длины волны излучения.

Таким образом с учётом выше изложенного, для установления взаимосвязи между показателем ослабления и хлорофиллом желательно выбрать длину волны в диапазоне 450 — 520 нм с тем, чтобы уменьшить влияние поглощения света жёлтым веществом и чистой водой. С этой точки зрения подходит имеющийся в прозрачном мере светофильтр с максимумом пропускания на $\lambda = 485$ нм. Показатель поглощения жёлтого вещества на этой длине волны, по сравнению с $\lambda = 420$ нм, меньше в 2,7 раза. В то же время, судя по данным работы /22/, показатель ослабления света пигментами фитопланктона здесь уменьшается в среднем не более, чем на 15%.

Об этом же свидетельствуют и результаты работы, проведённой в Институте биологии южных морей В.З. Финенко и Г.П. Берсеновой, которые получили, что в спектрах поглощения света у многих видов испытывавшихся водорослей, значения в области 470 - 495 нм имеют примерно ту же величину, что и в области 440 нм.

2.1. Влияние различных факторов на изменение величины показателя ослабления излучения.

Для детального описания взаимодействия физико-химических и биологических процессов и влияния на них динамики вод, для различных ограниченных районов Мирового океана составляются подробные динамические модели /42/. Такой подход сулит большие преимущества в детализации описываемых явлений и точности получаемых оценок. Однако, этот подход ещё недостаточно развит, а, главное, в настоящее время ещё очень трудоёмок, чтобы его можно было использовать для получения экспресс-оценок биологических параметров морской среды. Для получения таких оценок нами были использованы гораздо более простые статистические модели. Своим анализом постараемся охватить такие параметры, которые, с одной стороны, достаточно доступны для измерений, а с другой стороны, могут оказывать влияние на биологические показатели. Исходя из этих соображений, были использованы следующие параметры: гидрологические - температура, солёность; гидрохимические - фосфаты, кислород; гидрооптические - ослабление излучения и гидробиологические - хлорофилл, взвешенный органический углерод. Комплексный эксперимент, в котором удалось провести такие измерения достаточно совершенной аппаратурой, позволяющей брать пробы воды в непосредственной близости от датчиков, был проведён вблизи побережья Гвинеи на полигоне $10^{\circ}30' - 9^{\circ}05' \text{ с. ш. и } 14^{\circ} - 18^{\circ} \text{ з. д.}$ Всего было получено 672 пробы (Рис. 1.1.1). На шельфе пространственная изменчивость океанологических параметров выше и измерения проводились чаще, чем на склоне. В обработку включены только те измерения, кото-

рые можно отнести к фотическому слою (до 100 м на склоне, до дна на шельфе, глубина шельфа порядка 40 м).

Статистическая обработка данных проводилась отдельно для шельфа и для склона, так как эти районы различаются (табл. 2.1). Фотический склон шельфа имеет почти постоянную температуру, тогда как в районе материкового склона температура в нём подвержена большой изменчивости. Солёность на шельфе ниже и её колебания больше, чем на склоне, хотя измерения проводились в сухой сезон. Воды шельфа заметно более мутные. Несмотря на примерно одинаковое содержание фосфатов, концентрации хлорофилла в фотическом слое шельфа в среднем в два раза, а взвешенного органического углерода в полтора раза выше, чем на склоне. Содержание кислорода примерно одинаково, но на склоне изменчивость выше.

В табл. 2.2 представлены парные коэффициенты корреляции между измеренными параметрами. Верхние значения корреляции на шельфе, нижние - на склоне.

Для предварительного анализа полученных корреляционных связей была использована факторная модель. Идея факторного анализа - объяснение корреляционной зависимости между измеренными параметрами действием на них гипотетических факторов, которые в некоторых случаях могут трактоваться как неизмеренные параметры или их комбинация. Первый вопрос, на который можно ответить используя эту идею - сколько факторов необходимо для объяснения всех корреляционных связей. Второе - попытаться дать физическую интерпретацию факторам - отождествить их с какими-то реальными, но не измеренными параметрами морской среды. Понятно, что в рамках статистического анализа такая задача не может быть решена.

Таблица 2.1

Средние и стандартные отклонения параметров
морской среды, измеренных на Гвинейском полигоне.

Район исследований	Значения	П а р а м е т р ы						
		Темпе- ратура, °C	Соль- ность, ‰	Ослабле- ние света, м	Фосфаты, мг-ат/л	Кислород, мл/л	Хлорофилл, мкг/л	Своб., мкг/л
Шельф (N = 236)	среднее $\bar{x}$	22,51	34,73	0,272	0,521	4,01	0,687	148,79
	станд.откл.	0,12	0,75	0,120	0,472	0,31	0,788	85,37
Материковый склон (N = 386)	среднее $\bar{x}$	20,34	35,31	0,188	0,684	3,53	0,310	89,16
	станд.откл.	4,26	0,37	0,094	0,584	1,34	0,294	49,57

Таблица 2.2

Коэффициенты корреляции между параметрами, измеренными на
полигоне в районе Гвинейской Республики.

	Хл	C _{вов}	P	O ₂	T	S	E
Хлорофилл	I	0,727 0,342	-0,084 -0,075	0,274 0,086	-0,039 -0,059	0,139 -0,181	0,641 0,755
Взв. орг. угл. C _{вов} , мкг/л	0,727 0,342	I	-0,331 -0,467	0,384 0,565	0,164 0,487	-0,080 -0,45	0,513 0,347
Фосфаты	-0,084 -0,075	-0,331 -0,467	I	-0,868 -0,886	-0,804 -0,884	0,475 0,375	-0,165 -0,248
P, мг-ат/л	0,274 0,086	0,384 0,565	-0,868 -0,886	I	0,761 0,914	-0,504 -0,585	0,332 0,328
Кислород O ₂ , мл/л	-0,099 0,059	0,164 0,487	-0,804 -0,884	0,761 0,914	I	-0,787 -0,487	0,088 0,259
Температура T, °C	0,139 -0,181	0,080 -0,450	0,475 0,375	-0,504 -0,585	-0,787 -0,487	I	-0,045 -0,406
Солёность, S, ‰	0,641 0,755	0,513 0,347	-0,165 -0,248	0,332 0,328	0,088 0,259	-0,045 -0,406	I
Ослабление света E, м ⁻¹							

Используя факторную модель, здесь мы лишь высказываем гипотезу, которая затем подтверждается на основе физических представлений. Основное предположение факторного анализа можно записать в виде равенства, связывающего отклонения P измеренных параметров со значениями K факторов:

$$X(t) = L F(t) + \eta(t), \quad /2.1.1/$$

здесь p -мерный вектор $X(t)$ - центрированные значения параметров, измеренных в t -ом эксперименте $t = 1, 2, \dots, N$. Для шельфа N равно 236, для склона N равно 386, $x_1(t)$ - температура, $x_2(t)$ - солёность, $x_3(t)$ - ослабление, $x_4(t)$ - фосфаты, $x_5(t)$ - кислород, $x_6(t)$ - хлорофилл, $x_7(t)$ - концентрация взвешенного органического углерода.

$\eta(t)$ - p -мерный вектор остатка, полученный в t -ом эксперименте.

$F(t)$ - k -мерный вектор факторов.

L - $p \times k$ -мерная матрица факторных нагрузок.

По величине элементов матрицы факторных нагрузок $f_{ij}(t)$ можно судить о влиянии различных факторов $f_j(t)$ на измеренные параметры. Если значение факторной нагрузки велико, то, согласно гипотезе/2.1.1/ поведение i -того параметра $x_i(t)$, $t = 1, 2, \dots, N$ определяется j -тым фактором.

Относительно вероятностных свойств векторов F, η, X делаются следующие предположения:

$\eta(t)$, $t = 1, 2, \dots, N$ - независимые нормально распределённые p -мерные векторы с нулевым средним и диагональной ковариационной матрицей V .

$$V = E \{ \eta(t) \eta^T(t) \} \quad /2.1.2/$$

где $\eta^T(t)$ - вектор, транспонированный к $\eta(t)$.

$E\{\mathcal{X}\}$ - математическое ожидание величины $\mathcal{X}$,

$F(t)$, $t=1,2,\dots,N$ - нормально распределённый K -мерный случайный вектор, не зависящий от $\eta(t)$,
 $t=1,2,\dots,N$ с нулевым средним и единичной ковариационной матрицей I .

$$\begin{aligned} E\{F(t)F^T(t)\} &= I \\ E\{F(t)\eta^T(t)\} &= 0 \end{aligned} \quad /2.1.3/$$

Таким образом $X(t)$, $t=1,2,\dots,N$ в силу (2.1.3) есть последовательность независимых P -мерных нормально распределённых векторов с нулевым средним и ковариационной матрицей C .

$$C = LL^T + V.$$

Теперь в терминах корреляционных связей, которые мы собираемся анализировать, можно наглядно представить основную идею факторного анализа. Гипотетическая корреляционная матрица разбивается на две. Матрицу V , объясняющую чисто случайные явления - шумы измерений и матрицу LL^T ранга $K < P$, которая объясняет изменения измеренных параметров действием на них гипотетических факторов.

Наиболее существенное из сделанных нами допущений, которое может стать источником ошибок, это гипотеза/2.1.1/- основное уравнение факторного анализа. Но, если мы готовы делать какие-либо выводы именно по корреляционной матрице, т.е. выявлять линейные зависимости, то уравнение/2.1.4/ следует принять. Остальные предположения - равенство нулю средних (замена средних их оценками), замена ковариационной матрицы корреляционной, предположение о нормальности законов распределения $F(t)$, $\eta(t)$, $t=1,2,\dots,N$ а, следовательно, и $X(t)$, $t=1,2,\dots,N$ мы сделали для упрощения расчётов и надеемся, что при числе наблюдений которым мы располагаем (N для шельфа 236, для

склона N равно 386), эти допущения незначительно отразятся на полученных результатах.

Оценки L и V получали по методу максимального правдоподобия /24/. Матрицу ошибок V будем определять так, чтобы максимизировать величину, пропорциональную условной плотности вероятности $P(A/C)$

$$A = \sum_{t=1}^N X(t) X^T(t),$$

где A - наблюдаемое значение корреляционной матрицы (таблица 2.2). Тогда как показано в /46/, поиск минимума $P(A/C)$ сводится к решению системы уравнений:

$$\text{diag}(A - LL^T - V) = 0$$

$$L^T = \mathcal{J} L^T V^{-1} (A - V), \quad /2.14/$$

где $\text{diag } A$ - p -мерный вектор, состоящий из элементов диагонали матрицы A ;

$\mathcal{J}$ - диагональная матрица.

Система уравнений /2.14/ решалась методом итераций. Критерий достижения стационарного решения был задан в виде

$$|tr V^{(i)} - tr V^{(i-1)}| < 0,001,$$

где $tr V^{(i)}$ - след матрицы V , полученный в i -той итерации.

Для того, чтобы итерационный процесс "сошёлся", необходимо задать нулевое приближение $L^{(0)}$ достаточно близкое к L . В качестве $L^{(0)}$ взяты первые K собственных векторов матрицы A . Действительно, матрица A симметрична и положительно определена, а поэтому может быть представлена в виде

$$A = \sum_{j=1}^P \lambda_j u_j u_j^T = \sum_{j=1}^K \lambda_j u_j u_j^T + \sum_{j=K+1}^P \lambda_j u_j u_j^T,$$

где $U_j, U_j^T \cdot U_j = 1, j = 1, 2, \dots, P$ - собственные векторы матрицы A , а

λ_j - соответствующие собственные значения. λ_j пронумерованы в порядке убывания их значений.

Рассматривая λ_j можно сделать определённые выводы о вариации исходных параметров $X(t)$ на полигоне (анализ главных компонент). Произведение $U_j^T X(t)$ даёт нам ряд некоррелированных величин (компонент) $Y_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, P$ с дисперсиями λ_j , убывающими с увеличением j . При этом $tr(A) = \sum_{j=1}^P \lambda_j$, т.е. суммарная дисперсия переменных $X_j(t)$ равна суммарной дисперсии некоррелированных компонент $Y_j(t)$. Другими словами, матрица U , составленная из векторов U_j вводит линейное преобразование исходных параметров $U^T X(t)$ сохраняющее дисперсию неизменной.

Рассматривая вклад каждой компоненты $Y_j(t)$ в общую дисперсию $tr(A)$ можно сказать какое их количество необходимо для объяснения, в основном, изменчивости океанологических признаков $X(t)$ на полигоне. Так, относительный вклад первой компоненты в общую изменчивость параметров для шельфа составил 52%, для склона - 57%. Суммарный вклад первой и второй компоненты равен 81% и 79% для шельфа и для склона соответственно. Добавка третьей компоненты к общей дисперсии уже менее существенна и составляет 7,4% для шельфа и 8% для склона. Таким образом, для объяснения 80% общей дисперсии океанологических параметров на полигоне как для шельфа, так и для склона достаточно двух компонент.

Анализ факторной модели начнём с анализа матрицы рассогласования наблюдаемой корреляционной матрицы A (табл.2.3) с модельной корреляционной матрицей C . Матрица $A - C = A - LL^T - V$

Таблица 2.3

Матрица остаточных корреляций факторной модели.

(Верхняя строка - данные получены на шельфе, нижняя - на склонной части полигона).

	$X_{\text{г}}$	$C_{\text{вov}}$	P	O_2	T	S	E
Хлорофилл $X_{\text{г}}$, мкг/л	I	0,01 0,02	0,03 -0,01	-0,0002 -0,002	0,005 -0,008	-0,02 0,04	0,014 0,007
Взв.орг.угл. $C_{\text{вov}}$, мкг/л	0,01 0,02	I	-0,03 0,03	-0,04 0,01	0,006 -0,008	-0,028 -0,08	-0,03 -0,078
Фосфаты P, мкг-ат/л	0,03 -0,01	-0,03 0,03	I	-0,09 -0,002	0,01 -0,009	-0,14 -0,12	0,05 0,01
Кислород O_2 , мл/л	-0,0002 -0,002	-0,04 0,01	-0,09 -0,002	I	-0,018 -0,003	0,07 -0,044	0,06 -0,02
Температура T, °C	0,005 -0,008	0,006 -0,008	0,01 -0,009	-0,018 -0,003	I	0,07 0,015	0,008 0,03
Солёность S, ‰	-0,02 0,04	-0,028 -0,08	-0,14 -0,12	0,07 -0,044	0,07 0,015	I	-0,045 -0,07
Ослабление E, м ⁻¹	0,014 0,007	-0,03 -0,078	0,05 0,01	0,06 -0,02	0,008 0,03	-0,045 -0,07	I

(табл. 2.4) есть матрица корреляций, которые мы не смогли объяснить действием двух факторов. Как следует из таблицы, остаточные корреляции невелики. Максимальная остаточная корреляция наблюдается между концентрацией фосфатов и солёностью (0,14 и -0,12 для шельфа и для склона соответственно.). Это позволяет сделать вывод о том, что корреляции между измеренными параметрами можно в основном объяснить действием двух факторов. Хотя компонентный и факторный анализ прямо не связаны между собой, - в одном случае анализируется общая дисперсия, в другом - корреляция, выводы, сделанные, компонентному и факторному анализу матрицы A, совпадают, что вряд ли случайно.

Значения матрицы факторных нагрузок приведены в табл. 2.4. Нагрузки второго, как для шельфа, так и для склона, максимальны в концентрации хлорофилла "а" (близки к единице), концентрации взвешенного органического углерода и показателе ослабления света. Согласно модели /2.1/ можно допустить, что поведение этих параметров определяется вторым фактором. Таким образом, мы выделяем эти параметры в определённую группу по предположительному влиянию на них одной переменной. При этом факторные нагрузки легко объяснить, если предположить, что этим параметром является концентрация фитопланктона, теснейшим образом связанная с концентрацией хлорофилла.

Таблица 2.4

Факторные нагрузки для параметров,
измеренных на полигоне в районе Гвинейской Республики.
(Верхняя строка нагрузки для параметров, измеренных
на шельфе, нижняя - на склоновой части полигона).

Факторы	I	2
Параметры		
Хлорофилл Хл, мкг/л	0,094 0,087	0,93 0,94
Взвешенный органич. углерод $C_{\text{взв}}$, мкг/л	0,32 0,56	0,73 0,30
Фосфаты Р, мкг/ат/л	-0,88 -0,91	-0,03 0,082
Кислород O_2 , мл/л	0,88 0,97	0,20 -0,001
Температура Т, °С	0,94 0,95	-0,20 -0,14
Солёность S, %	-0,71 -0,56	0,24 -0,18
Ослабление ϵ , м ⁻¹	0,22 0,36	0,65 0,76

2.2. Основные причины связи между концентрацией хлорофилла и показателем ослабления излучения.

Как показано в /31, 32 / коэффициенты корреляции между показателем ослабления излучения для длины волны 495 нм и концентрацией хлорофилла "а" в водах региона имеют достаточно высокие значения. Рассмотрим причины существования связи между этими параметрами. Приблизённо можно считать, что для вод, содержащих большое количество взвешенных частиц, показатель ослабления излучения для $\lambda = 495$ нм не зависит от показателя поглощения света хлорофиллом "а", а определяется только рассеянием света на взвешенных частицах /45 /. Отсюда показатель ослабления света может быть связан с хлорофиллом только через концентрацию взвешенных частиц, и, в частности, взвешенных частиц, содержащих хлорофилл. Однако из /31 / следует, что коэффициент корреляции между ξ и хлорофиллом выше, чем между ξ и концентрацией взвешенного органического углерода, отражающей концентрацию взвеси на полигоне. Объяснение этого кажущегося противоречия дано в работе /32 /.

Из теории рассеяния света малыми частицами известно, что значение показателя ослабления для заданной длины волны зависит от весовой концентрации взвеси $P(a)$ и некоторой функции $f(a, m)$ от диаметра частиц - "а" и их показателя преломления - "m", то есть

$$\xi = P(a) \cdot f(a, m).$$

Существование линейной зависимости экспериментально подтверждено многими авторами по результатам лабораторных испыта-

ний и непосредственных измерений в море /45, 48, 54, 52, 45 /. Значение функции $f(\alpha, m)$ оценивалось теоретически и экспериментально. Теоретическая оценка использовалась при расчёте показателя ослабления по данным измерений в Средиземном море /45 /. Оказалось, что расчётные значения ξ примерно в четыре раза меньше измеренных значений. Отсюда автором /45 / делается вывод в том, что основной вклад в формирование поля прозрачности ($\approx 3/4$) вносят частицы, диаметры которых менее 10 мкм. Частицы с диаметром меньше 1 мкм при расчёте ξ не учитывались.

В работе /48 / приводятся экспериментально полученные графики $f(\alpha, \lambda_j, m_j)$ для двух длин волн ($\lambda = 726$ нм и $\lambda = 436$ нм) и двух различных по составу и по показателю преломления m типов взвеси. Из графиков видно, что функция $f(\alpha, m)$ имеет ярко выраженный максимум в районе $\alpha = 2$ мкм и быстро убывает при уменьшении диаметра частиц. Выделим на рисунках, приведённых в /48 /, интервал изменения α (0,5–10 мкм), в котором сосредоточена большая часть площади, заключённая под кривой $f(\alpha, m)$, и назовём его "окном минимальной прозрачности". В море взвесь содержит частицы, имеющие различные радиусы, и, следовательно, $\xi = \int_0^{\alpha_{\max}} P(\alpha) f(\alpha, \bar{m}) d\alpha$. Частицы, размеры которых лежат в "окне минимальной прозрачности", в большинстве случаев определяют формирование поля прозрачности. В то же время их относительный вес в общей взвеси в большинстве случаев невелик. Допустим, что спектр распределения по размерам взвешенных частиц равномерный: $P(\alpha) = \text{const}$ при $\alpha = 0,5-60$. Близкое к подобному распределение взвеси в зависимости от размеров получено Шелдоном для субтропических районов открытой части Атлантического океана и Тихого океана /57 /.

Проинтегрировав с постоянным весом функцию $f(a, \lambda_2, m_1)$, заданную таблично в /18/ ($\lambda = 436$ нм, состав взвеси каолин), было определено, что взвесь с диаметром частиц 0,5–10 мкм составляет по весу 19% от веса взвеси и обеспечивает 64% от общей величины показателя ослабления. Для длины волны $\lambda = 726$ нм и другого состава взвеси (глинистый ил) 19% её весового состава с диаметром частиц 0,5–10 мкм обеспечивает 51% от значения показателя ослабления.

Таким образом, значительные вариации спектра распределения взвеси по размерам в диапазоне изменения a 10 мкм приведут к большому значению концентрации общей взвеси и практически не отразятся на показателе ослабления света. Этим, в частности, объясняются значительные вариации коэффициента корреляции между весовой концентрацией взвеси и показателем ослабления света /2,25/. Отсюда следует, что высокая корреляция показателя ослабления света будет наблюдаться с тем параметром морской среды, который линейно связан с концентрацией взвеси, преобладающие размеры которой расположены в "окне минимальной прозрачности". Постараемся показать, что таким параметром с близкими свойствами для района Гвинейского шельфа является концентрация хлорофилла "а".

Связь между концентрацией взвешенных частиц различных размеров и хлорофиллом "а". Под общей взвесью понимаются взвешенные в воде частицы различного происхождения: биогенного (организмы, их выделения и остатки) терригенного (приносённые с суши), хемогенного и вулканогенного.

Концентрация взвеси в воде, соотношение в ней частиц различного происхождения зависит от физико-географических, биотических

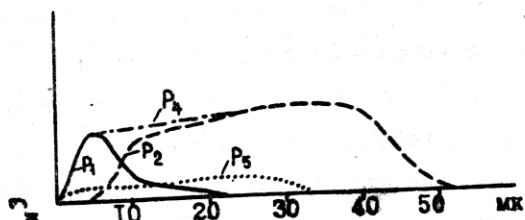
условий района и физико-химических свойств воды.

Из работ /21, 31, 49, 51 / известно, что во взвеси резко преобладают биогенные и терригенные компоненты. Причём в поверхностном слое вод в открытых частях океана в районе Северо-Западной Африки преобладает взвесь биогенного происхождения. На шельфе и особенно вблизи устьев рек увеличивается концентрация терригенной взвеси. Исходя из этого, разделим условно данные по взвеси, присутствующей в воде полигона, на три фракции: взвешенные частицы биологического происхождения, содержащие хлорофилл "а" и продукты его распада (живой и отмирающий фитопланктон); взвешенные частицы биогенного происхождения, не содержащие хлорофилл (детрит, бактериопланктон, микрзоопланктон); терригенные частицы.

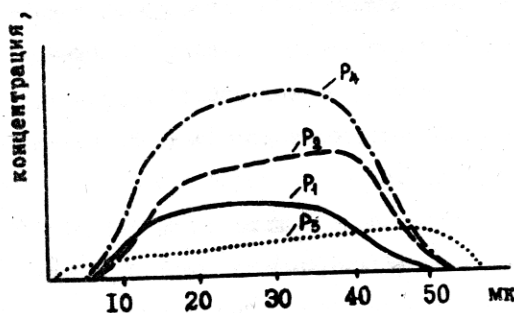
Для океанической и склоновой части полигона 70-90% массы фитопланктона составляют мелкие, порядка 2,5-15,0 мкм, пиропитовые и жгутиковые водоросли. На преобладающую роль микрофлгеллат в водах побережья Западной Африки указывает работа /56 /. Для шельфовой зоны видовой состав разнообразней, с преобладанием более крупных видов водорослей. Основную растительную массу здесь составляют диатомовые, численность и биомасса которых достигает иногда 60% от всего фитопланктона /23 /.

Основную массу второй фракции образует детрит с характерными размерами 1-50 мкм / ? /. Бактериопланктон (неагрегированный и агрегированный) имеет размеры менее 0,6 мкм и более 10 мкм. Микрзоопланктон имеет размер ≥ 15 мкм.

Терригенный материал взвеси имеет размер в основном около 1 мкм, но на шельфе встречаются частицы с размерами до 10 мкм и более /49 /. На рис. 2.2.1 приведены: $P_T(a)$ - концентра-



а



б

Рис. 2.2.1. Концентрация взвешенных частиц в зависимости от размера взвеси: а - для вод фотической зоны глубоководной части полигона; б - для шельфа

ция взвешенных частиц биогенного происхождения, содержащих хлорофилл "а"; $P_2(a)$ - концентрация взвешенных частиц биогенного происхождения, не содержащих хлорофилл; $P_3(a)$ - терригенные частицы; $P_4(a)$ - суммарная концентрация биогенных частиц. Отсюда следует, что поле прозрачности на склоне определяется мелким фитопланктоном, размеры которого целиком лежат в "окне минимальной прозрачности". Данные линейной зависимости биомассы фитопланктона от концентрации хлорофилла "а" получены экспериментально /54/.

В шельфовой части полигона поле прозрачности в основном определяется фитопланктоном и детритом. Фитопланктон здесь более крупный и его размеры лишь частично попадают в "окно минимальной прозрачности". Таким образом, необходимо проверить, является ли зависимость между общей концентрацией биогенной взвеси и концентрацией хлорофилла "а" линейной. В качестве альтернативы линейной гипотезе предложим следующий механизм образования линейности: с ростом концентрации взвеси концентрация хлорофилла должна расти опережающими темпами для того, чтобы компенсировать недостаток освещения.

Измерявшаяся в 38-ом рейсе НИС "Михаил Ломоносов" концентрация взвешенного органического углерода ($C_{\text{БОВ}}$) является интегральной характеристикой, хорошо отражающей концентрацию биогенной взвеси,

$$C_{\text{БОВ}} \approx M \int_{0,45}^{130} P_4(a) da$$

Значения коэффициентов для уравнения линейной зависимости $C_{\text{БОВ}} = C_1 + C_2 \cdot X$ мг/м³, для склона $C_1 = 67$; $C_2 = 78$; $X = 0,34$ мг/м³; $C_{\text{БОВ}} = 94$ мг/м³, для шельфа $C_1 = 106$; $C_2 = 69$; $X = 0,75$ мг/м³ $C_{\text{БОВ}} = 157$ мг/м³. Для расчетов использовались только те измерения, которые были сделаны в слое 0-100 м и на

тех станциях, на которых имелись надёжные совместные измерения ξ , $C_{\text{вов}}$ и X_L . Количество таких измерений на шельфе 57, на склоне 69. Квадратическая аппроксимация $C_{\text{вов}} = D_1 + D_2 X_L + D_3 X_L^2$, для склона $D_1 = 51$, $D_2 = 181$, $D_3 = -96$; для шельфа $D_1 = 105$, $D_2 = 72$, $D_3 = -0,97$. Эти результаты показывают, что связь для шельфа линейная; для склона отмечена значительная нелинейность, однако это скорее не подтверждение существования предложенного механизма, а следствие других причин и в первую очередь значительной неоднородности вод района. (табл. 1 /34/).

Количественные оценки зависимости показателя ослабления излучения от концентрации хлорофилла "а" получены по совместным измерениям этих величин в 38 и 40 рейсах НИС "Михаил Ломоносов" на глубинах 0-100 м, коэффициенты A и B рассчитывались по методу наименьших квадратов прямой $\xi = A_1 + B_1 X_L$ и обратной $X_L = A_2 + B_2 \xi$ зависимостей показателя ослабления излучения от концентрации хлорофилла "а".

Для станций, относённых к глубоководной части полигона $\text{Corr}(\xi, X_L) = 0,68$; $X_L = 2,38 \text{ мг/м}^3$; $A_1 = 0,106$; $B_1 = 0,187$; $A_2 = -0,066$; $B_2 = 2,571$. Дисперсия ошибки для этой прямой зависимости $D\xi = \frac{1}{N} - \frac{1}{N} \sum (\xi - \bar{\xi})^2 = 0,00496 \text{ м}^{-2}$. Относительное уменьшение дисперсии показателя ослабления 46%.

Для станций, расположенных на шельфе $\text{Corr}(\xi, X_L) = 0,69$; $X_L = 0,71 \text{ мг/м}^3$; $A_1 = 0,041$; $B_1 = 0,073$; $A_2 = -0,703$; $B_2 = 4,86$. Дисперсия ошибки $D\xi = 0,0075 \text{ м}^{-2}$. Относительное уменьшение дисперсии 36%.

Приведённые выше сведения свидетельствуют о различии факторов, определяющих связь между концентрацией хлорофилла и показателем ослабления излучения для шельфа и для склона. Это

подтверждается и анализом гипотезы о равенстве коэффициентов уравнения регрессии А и В для этих двух зон /32/. При стандартных допущениях о величинах $\chi^2_{\text{д}}$ статистики коэффициенты А и В симметричны относительно истинных значений А и В и их распределение быстро сходится к нормальному /20/. Чтобы учесть значительную корреляцию между А и В в /32/ рассматриваются эллипсы рассеяния этих величин. Для станций, выполненных на материковом склоне, получены следующие параметры эллипса рассеяния

$\sigma_A = 0,011; \sigma_B = 0,021; r(A,B) = -0,73$. Для станций на шельфе $\sigma_A = 0,0142; \sigma_B = 0,0127; r(A,B) = -0,63$. Эллипсы рассеяния для А и В приведены на рис. 2.2.2, 1 - для измерений на материковом склоне, 2 - на шельфе. Вероятность попадания в первый внутренний эллипс - 0,394, во второй - 0,865, в третий - 0,989. Эллипсы рассеяния А и В для склона и шельфа не пересекаются, т.е. принятое районирование обосновано и значения коэффициентов, связывающих $\bar{C}$ и $\chi^2_{\text{д}}$ для шельфа и склона различны.

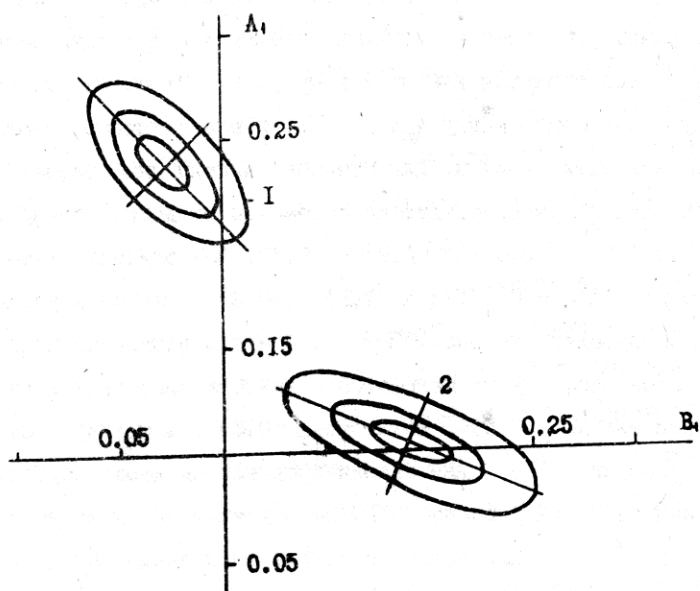


Рис. 2.2.2. Эллипсы рассеяния оценок коэффициентов
линейной зависимости показателя ослабления от
хлорофилла

2.3. Эмпирические регрессионные зависимости между показателем ослабления излучения и концентрацией хлорофилла в воде.

Даже чисто качественный визуальный анализ вертикальных профилей показателя ослабления излучения и хлорофилла, полученных на одних и тех же станциях показывает, что эти профили аналогичны (рис. 2.3.1) и при выборе соответствующей нормировки хорошо совпадут друг с другом.

Для количественного описания аналогии в характере изменения хлорофилла и прозрачности с глубиной был рассчитан коэффициент аналогичности (K) этих двух кривых. Он вычислялся следующим образом /34/. Определялись профили отклонения концентрации хлорофилла X_L и показателя ослабления $\dot{\epsilon}$ от средних по глубине значений

$$\dot{\epsilon}(h) = \epsilon(h) - \frac{1}{H - H_0} \int_{H_0}^H \epsilon(h) dh; \quad \dot{X}_L(h) = X_L(h) - \frac{1}{H - H_0} \int_{H_0}^H X_L(h) dh,$$

где H_0 - минимальная глубина, на которой проводились измерения, H - максимальная глубина.

Далее профили вертикального распределения $\dot{\epsilon}(h)$ и $\dot{X}_L(h)$ приводились к единому масштабу. В качестве масштабирующего множителя принималась величина, обратная средне-квадратичному отклонению, отнесённому к единице глубины.

$$\hat{\epsilon}(h) = \dot{\epsilon}(h) / \left[\frac{1}{H - H_0} \int_{H_0}^H \dot{\epsilon}^2(h) dh \right]^{1/2} \quad \hat{X}_L(h) = \dot{X}_L(h) / \left[\frac{1}{H - H_0} \int_{H_0}^H \dot{X}_L^2(h) dh \right]^{1/2}$$

Тогда квадрат расстояния между двумя профилями $\hat{\epsilon}(h)$ и $\hat{X}_L(h)$, приведённый к единице глубины (ρ^2) равен

$$\rho^2(\hat{\epsilon}, \hat{X}_L) = \frac{1}{H - H_0} \int_{H_0}^H [\hat{\epsilon}(h) - \hat{X}_L(h)]^2 dh = 2 - 2 \frac{1}{H - H_0} \int_{H_0}^H \hat{\epsilon}(h) \hat{X}_L(h) dh.$$

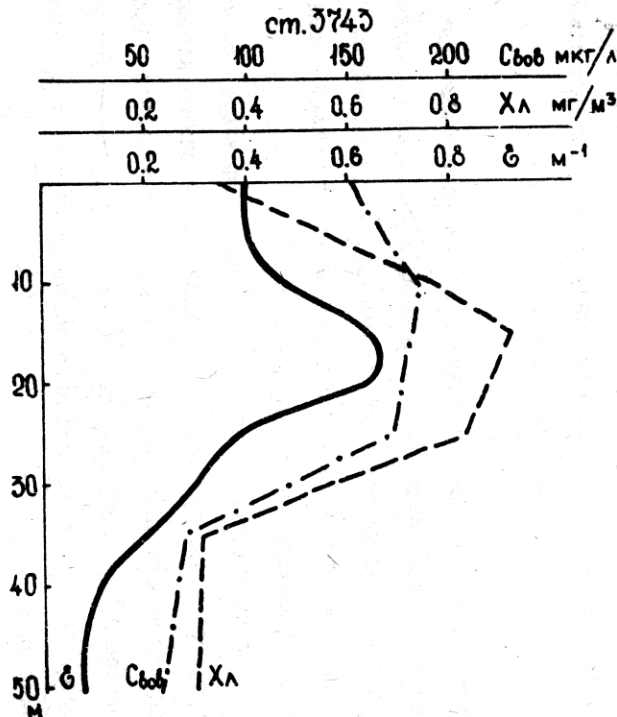
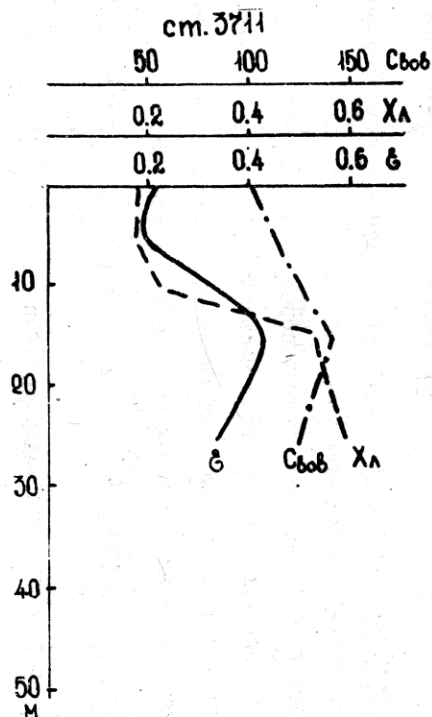


Рис. 2.3.1. Вертикальные профили распределения: ϵ - показателя ослабления излучения; X_A "а" - хлорофилла "а"; $C_{\text{воб}}$ - взвешенного органического вещества на шельфе (ст.3711) и на материковом склоне (ст. 3743)

Значение $\rho^2(\hat{\epsilon}, \hat{X}_\lambda)$ лежит в интервале 0-4, поскольку

$$\left| \frac{1}{N-N_0} \int_{N_0}^N \hat{\epsilon}(h) \hat{X}_\lambda(h) dh \right| \leq \left[\frac{1}{N-N_0} \int_{N_0}^N \hat{\epsilon}^2(h) dh \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{1}{N-N_0} \int_{N_0}^N \hat{X}_\lambda^2(h) dh \right]^{1/2} = 1.$$

При полном совпадении профилей $\hat{\epsilon}(h)$ и $\hat{X}_\lambda(h)$ квадрат расстояния между ними ρ^2 обращается в ноль.

Удобнее пользоваться не величиной ρ^2 , а коэффициентом аналогичности K

$$K = \frac{1}{N-N_0} \int_{N_0}^N \hat{\epsilon}(h) \hat{X}_\lambda(h) dh = \frac{2 \cdot \rho^2}{2}.$$

Формально пределы изменения коэффициента корреляции и коэффициента аналогичности совпадают, но они имеют разный физический смысл. Точность определения коэффициента K определяется точностью аппроксимации сравниваемых профилей вертикального распределения $\hat{\epsilon}(h)$ и $\hat{X}_\lambda(h)$.

По материалам, полученным в 38 рейсе НИС "Михаил Ломоносов", коэффициент аналогичности для станций, выполненных на шельфе, имеет среднее значение 0,70 при среднеквадратичном отклонении 0,26. Для материкового склона $K = 0,87$ и среднеквадратичное отклонение 0,12. Количество станций на шельфе - 17, на материковом склоне - 18. По результатам измерений в 40 рейсе НИС "Михаил Ломоносов" для шельфа и материкового склона соответственно средние значения коэффициента аналогичности 0,72 и 0,79, среднеквадратичные отклонения 0,17 и 0,14, число станций 10 и 20.

Таким образом, в сухой сезон коэффициенты аналогичности имеют достаточно высокие (в некоторых случаях до 0,94) и устойчивые значения, что свидетельствует об аналогичном вертикальном ходе распределения хлорофилла и показателя ослабления излучения в регионе. При этом коэффициенты аналогичности на шельфе ниже,

чем на материковом склоне, что объясняется большим влиянием на формирование вертикального профиля прозрачности на шельфе терригенной взвеси, особенно в поверхностном и придонном слое.

Коэффициент аналогичности позволяет анализировать "схожесть" вертикального распределения показателя ослабления излучения и концентрации хлорофилла, однако не даёт возможности оценивать величину одного из этих параметров по величине другого, если измерялся только один из них. То есть, коэффициент аналогичности характеризует условия, или причины, формирующие сравнимые профили, а не абсолютные величины исследуемых параметров. В принципе, возможен случай, когда коэффициент аналогичности близок к единице, и, в то же время, какая-либо связь между абсолютными величинами параметров в том же наборе профилей отсутствует.

Для установления взаимосвязей между величинами исследуемых параметров широко используется удобный аппарат корреляционно-регрессивного анализа. Вычисляют эмпирический коэффициент корреляции r

$$r = \frac{1}{(n-1)\sigma_x \sigma_y} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) ;$$

где x_i, y_i - текущие значения исследуемых параметров;
 $\bar{x}, \bar{y}, \sigma_x, \sigma_y$ - соответственно средние значения и средние квадратичные отклонения этих параметров;

n - число пар совместных измерений x_i и y_i ;

и определяют эмпирические уравнения регрессии y на x и x на y , позволяющие со статистической достоверностью, заданной коэффициентом корреляции, предсказывать значения y по x и наоборот:

$$y - \bar{y} = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}) ;$$

$$x - \bar{x} = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y - \bar{y}) .$$

Для удобства пользования уравнения регрессии обычно преобразуют к виду:

$$y = A + Bx ; \quad x = A^* + B^*y .$$

Так как уравнения регрессии и коэффициент корреляции характеризуют лишь линейную связь между x и y , то при нелинейных зависимостях, их предварительно линеаризуют, используя логарифмические, гиперболические, степенные и другие трансформации величины x и y .

Коэффициенты корреляции и уравнений регрессии для концентрации хлорофилла t показателя ослабления излучения вод фотической зоны (для $\lambda = 495$ нм) были получены в работе /32/. Из указанных работ видно, что при выявлении связи между ξ и концентрацией хлорофилла желательно проводить районирование, разделяя данные, полученные на шельфе (на глубинах менее 150 м), и на материковом склоне - на больших глубинах /31, 32, 36/. При таком разделении наблюдается значимая связь между этими величинами, близкая к линейной. Приведём уравнения регрессии, определённые в вышеупомянутых работах.

Для данных 38 рейса НИС "Михаил Ломоносов":

на склоне $X_d = -0,066 + 2,571 \xi$; $r = 0,68$; $n = 90$;

на шельфе $X_d = -0,703 + 4,860 \xi$; $r = 0,60$; $n = 62$.

Для данных 40 рейса НИС "Михаил Ломоносов":

на склоне $X_d = -0,025 + 3,48 \xi$; $r = 0,69$; $n = 93$;

на шельфе $X_d = -0,408 + 5,29 \xi$; $r = 0,65$; $n = 129$,

где: X_d в /мг.м⁻³/, ξ - в /м⁻¹/.

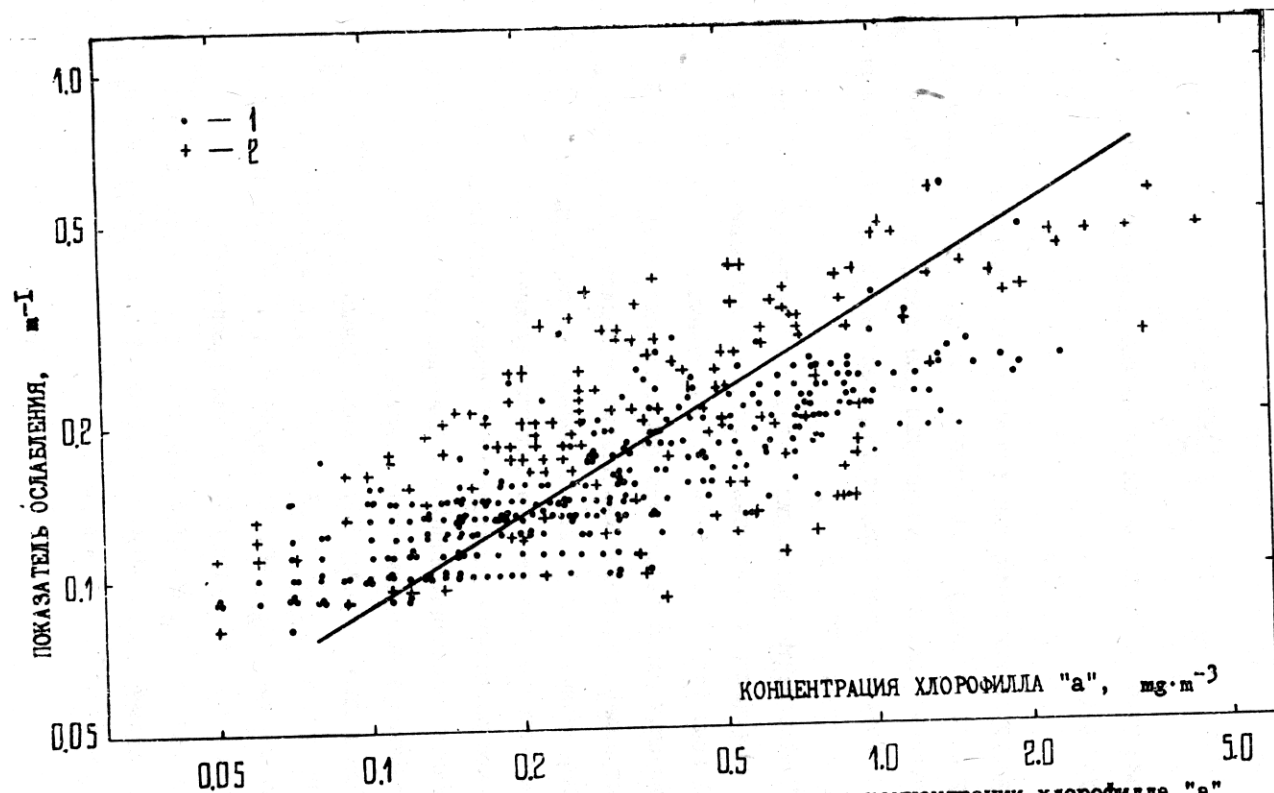


Рис. 2.3.2. Зависимость показателя ослабления излучения от концентрации хлорофилла "a",
 1 - 40 рейс НИС "Михаил Ломоносов", 2 - 38 рейс

Полученные в этих двух случаях уравнения несколько отличаются, что затрудняет их использование. Кроме того уравнения для шельфа и для склона не "стыкуются" между собой. То есть их можно использовать для восстановления поля концентрации хлорофилла по измерениям показателя излучения лишь для шельфа и для склона раздельно. В том случае, когда выполненная съёмка охватывает и ту другую зоны (что бывает наиболее часто), построить целостную картину распределения хлорофилла на полигоне невозможно из-за резких скачков концентрации в районе изобаты 150 м, при переходе от одного уравнения к другому.

С учётом изложенного мы провели совместную обработку всех имеющихся данных по региону и получили следующие уравнения регрессии:

для склона $X_d = -0,153 + 2,914 \xi$; $r = 0,71$; $n = 386$;

для шельфа $X_d = -0,369 + 4,680 \xi$; $r = 0,65$; $n = 236$.

Для объединённых данных шельфа и склона наиболее оптимальным оказалось двойное логарифмическое преобразование данных и уравнение регрессии для этого случая имеет следующий вид (рис. 2.3.2)

$$\lg X_d = 0,800 + 1,697 \lg \xi; \quad r = 0,75; \quad n = 622$$

$$\text{при } 0,05 \leq X_d \leq 4,41; \quad 0,075 \leq \xi \leq 0,56.$$

Среднеквадратичное отклонение точек от линии регрессии характеризуется множителем 1,74, то есть в 70% случаев значение, определённое по уравнению регрессии, отличается от измеренного не более, чем в 1,74 раза. Все результаты совместных измерений хлорофилла и ξ , выполненных в 38 и 40 рейсах НИС "Михаил Ломоносов", приведены на рис. 2.3.2. Сплошная линия на рисунке соответствует вышеприведённому уравнению регрессии.

В последние годы широкое распространение получили измерения прозрачности в поверхностном водном слое с помощью буксируемых приборов /33/, или через сквозную шахту, имеющуюся на некоторых типах научно-исследовательских судов /11/. В связи с этим представляют интерес уравнения регрессии, связывающие концентрацию хлорофилла и показатель ослабления излучения в поверхностном слое. Априори можно полагать, что связь между этими величинами в данном случае будет более тесной, чем для всей фотической зоны, из-за большей однородности внешних условий. И действительно, в работе /29/ на основе большого материала, собранного в тропической зоне Атлантики, Карибском, Средиземном и Черном морях получено следующее уравнение регрессии для поверхностного слоя (глубина 5 - 6 м) в спектральном диапазоне $\lambda - 4^{th}$ нм:

$$\lg X_{\lambda} = -2,07 + 6,75 \lg \varepsilon; \quad z = 0,80; \quad n = 120.$$

Мы получили следующее уравнение ($\lambda = 495$ нм, горизонт 0 м):

$$\lg X_{\lambda} = 0,591 + 1,639 \lg \varepsilon; \quad z = 0,79; \quad n = 66,$$

при $0,05 \leq X_{\lambda} \leq 2,65$ $0,09 \leq \varepsilon \leq 0,56$.

В 70% случаев отклонение точек от линии регрессии не превышает 1,6 раза.

Отметим, что полулогарифмическое преобразование, использованное в /29/ даёт не намного худший результат и им также можно пользоваться, уравнение регрессии в этом случае имеет следующий вид:

$$\lg X_{\lambda} = -1,239 + 3,083 \cdot \varepsilon; \quad z = 0,77.$$

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Агафонов Е.А., Воскресенский В.Н., Доля Н.Н., Аверкиева Г.В. Оптическая структура вод северо-восточной части Тропической Атлантики, прилегающей к побережью Гвинеи // Мор.гидрофиз. исслед. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1980. - № . - С.14-21.
2. Агафонов Е.А., Виток Д.М., Ковалев А.В. О возможности ориентировочной оценки распределения концентрации взвеси в морской воде по показателю излучения // Мор.гидрофиз. исслед. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1978. - № 2. - С.172-179.
3. Агафонов Е.А., Михайлов Э.А., Неуймин Г.Г. Гидрооптическая структура вод Гвинейского района северо-восточной части Тропической Атлантики // Экспериментальные исследования гидрофизических полей. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1983. - С.161-165.
4. Артамонов Д.В. Океанографические условия северо-западного побережья Африки // Там же. - С. 97-104.
5. Берсенева Г.П. Первичная продукция и содержание хлорофилла "а" в северо-восточной части Тропической Атлантики // Океанология. - 1981. - 21, вып. 2. - С. 337-343.
6. Берсенева Г.П., Франк Н.А., Апенасенко А.Д. Содержание хлорофилла "а" в планктоне Черного моря в период летней стратификации // Экология моря. - Киев: Наук.думка, 1983. - №12. - С. 15-21.
7. Богданов Д.А., Лисицын А.П., Романкевич Е.А. Органическое вещество во взвеси и в донных осадках Мирового океана // Органическое вещество современных и ископаемых осадков. - М.: Наука, 1971. - С. 37-42.
8. Буренков В.И., Кельбалиханов Б.Ф., Стефанцев Л.А. Спектры первичных гидрооптических характеристик // Изменчивость океана и атмосферы в экваториальной Атлантике. - М.: Наука, 1982. - С. 156-161.
9. Булгаков Н.П., Ковешников Л.А., Михайлов Э.А. Основные задачи и предварительные результаты исследований в 38 рейсе НИС "Михаил Ломоносов" в экономической зоне Гвинейской республики // Океанология. - 1981. - 21, вып.3. - С. 566-570.

10. Бурлакова З.П., Юнев О.А. Распределение хлорофилла в центральной части Карибского моря // *Океанографические исследования Карибского моря и прилегающих районов*. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1980. - С. 102-109.
11. Владимиров В.Л., Мартынов О.В., Неуймин Г.Г. Комплекс оптической аппаратуры для измерений на ходу судна в поверхностном слое океана и некоторые результаты его испытаний // *Оптика океана и атмосферы*. - Баку. 1983. - С. 356-362.
12. Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. - М.: Наука, 1978. - 328 с.
13. Гидрооптический зондирующий комплекс с устройством для отбора проб воды. / Голован А.И., Михайлов Э.А., Старков К.А. и др. // *Автоматизация научных исследований морей и океанов*. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1981. - С. 34-40.
14. Ерлов Н. Оптическая океанография. - М.: Мир, 1970.
15. Ерлов Н. Оптика моря. - Л.: Гидрометеониздат, 1980. - 248 с.
16. Заика В.Е., Макарова Н.П. К определению первичной продукции по содержанию хлорофилла в море // *Экология моря*. - Киев: Наук.думка. - 1982. - № 11. - С. 9-15.
17. Зенкевич Л.А. Общая характеристика биогеоценозов океана и их сравнения с биогеоценозами суши // *Программа и методика изучения биогеоценозов. Биогеоценозы морей и океанов*. - М.: Наука, 1970.
18. Иванов К.И. Изменения коэффициента ослабления света в зависимости от изменения диаметров взвешенных в водах частиц. ДАН СССР. - 1950. - 54, № 5. - С. 925-928.
19. Иванов А. Введение в океанографию. - М.: Мир, 1978. - 574с.
20. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. - М.: Наука, 1973. Т. 2. - 392 с.
21. Кленова М.В. Некоторые результаты исследования взвешенных веществ в Атлантическом океане и южной части Индийского океана // *Тр. МГИ АН УССР*. - 1964. - Т. 30. - С. 81-97.
22. Коновалов Б.В. Некоторые особенности спектрального поглощения взвеси морской водой // *Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов*. - Новосибирск: Наука, 1979. - С. 58-65.

23. Лепухин А.С., Георгиева Л.В. Фитопланктон и распределение хлорофилла "а" в акватории Гвинейского сектора Атлантики // Экология моря. - Киев: Наук.думка, 1982. - № 13. - С.17-21.
24. Лоули О., Максвелл А. Факторный анализ, как статистический метод. - М.: Мир, 1967. - 144 с.
25. Маньковский В.И., Романов В.И., Сорокина Н.А. К вопросу об определении взвеси в море по значениям показателя ослабления света водой // Гидрофизические исследования Тихого и Атлантического океанов в кругосветном плавании НИС "Михаил Ломоносов" (20-й рейс). - Севастополь, 1967.
26. Маньковский В.И. К вопросу об оптической классификации вод // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. - Талин: АН ЭССР, 1980. - 124 с.
27. Маньковский В.И., Ли М.Е., Афонин Е.И., Башарин В.И. Оптические исследования вод Тропической Атлантики у западного побережья Африки // Мор.гидрофиз.исслед. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1978. - № 3(82). - С. 188-197.
28. Маньковский В.И. Эмпирическая формула для оценки показателя ослабления света в морской воде по глубине видимости белого диска // Океанология. - 1978. - 18, вып. 4. - С. 750-753.
29. Маньковский В.И., Земляная Л.А. Спектры показателя ослабления света поверхностных вод бассейна Атлантического океана // Оптика океана и атмосферы. (Тезисы докладов). - Ленинград, 1984. - С. 67-68.
30. Монин А.С., Каменкович В.М., Корт В.Г. Именчивость Мирового океана. - Л.: Гидрометеоиздат, 1974.
31. Михайлов Э.А., Бурлакова З.П., Мартынов М.В. Распределение показателя ослабления излучения, хлорофилла и взвешенного органического углерода вблизи Гвинейского побережья // Экспериментальные исследования гидрофизических полей. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1983. - С. 117-125.
32. Михайлов Э.А., Бурлакова З.П., Мартынов М.В. Зависимость показателя ослабления света от концентрации хлорофилла "а" в районе Гвинейского побережья // Там же. - С. 126-132.

33. Неуймин Г.Г. Аппаратура и методы морских гидрооптических исследований. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1981. - 54 с.
34. Неуймин Г.Г. Исследование неоднородностей распределения оптических характеристик вод морей и океанов // Мор.гидрофиз. исслед. - Севастополь. - 1969. - № 3(45). - С. 126-159.
35. Неуймин Г.Г. Оптические характеристики вод Черного моря // Комплексные океанографические исследования Черного моря. - Киев: Наук.думка; 1980. - С. 198-215.
36. Структура фотического слоя вод Атлантического океана в районе материкового склона Гвинейского побережья (по данным химических, биологических и оптических наблюдений / Неуймин Г.Г., Бурлакова З.П., Мухомин В.М. и др. // Океанология. - 1984. - 24, вып. 3. - С. 445-452.
37. Неуймин Г.Г., Земляная Л.А., Мартынов О.В., Соловьев М.В. Оценка концентрации хлорофилла по измерениям индекса цвета в различных районах Мирового океана // Океанология. - 1982. - 22, вып. 3. - С. 380-385.
38. Неуймин Г.Г., Сорокина Н.А. Общие закономерности распределения прозрачности вод Тропической Атлантики // Мор.гидрофиз.исслед. - Севастополь МГИ АН УССР, 1982. - С. 165-182.
39. Неуймин Г.Г., Сорокина Н.А. О корреляции между вертикальными распределениями оптических и гидрологических характеристик в океане // Океанология. - 1976. - 16, вып.3.-С.441-450.
40. Неуймин Г.Г., Михайлов Э.А., Перов М.Г. Предварительные результаты экспедиционных исследований в 40 рейсе НИС "Михаил Ломоносов" // Вестник АН УССР. - 1982. - № 4.
41. Неуймин Г.Г., Сорокина Н.А. Об оптических рассеивающих слоях в море // Океанология. - 1974. - 4, вып. 1. - 51 с.
42. Новиков В.Э., Цуканов А.В., Копытов Д.П. Снижение размерности при построении математической модели биосистемы // Биология моря. - Киев: Наук.думка. - 1977. - Вып. 40. - С. 51-54.
43. Оптика океана. I.I. Физическая оптика океана. - М.: Наука, 1983. - 372 с.

44. Оптика океана. I.II. Прикладная оптика океана. - М.: Наука, 1983. - 236 с.
45. Очаковский Д.Е. О зависимости показателя ослабления света от содержащейся в море взвеси // Тр. ИО АН СССР. - 1965. - № 7. - С. 29-40.
46. Парчевская Д.С. Статистика для радиоэкологов. - Киев: Наук. думка, 1969.
47. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. Об оптической классификации океанских вод по спектральному ослаблению солнечного излучения // Океанология. - 1977. - 17, вып. I. - С. 50-54.
48. Подвинцев Ю.В., Горбенко Д.А. Факторное представление морских микробиологических систем // Биология моря. - Киев: Наук. думка, 1977. - Вып. 40. - С. 86-91.
49. Пустельников О.С. Распределение и состав взвеси в юго-восточной части Атлантического океана // Тр. ИО АН СССР. - 1973. - № 95. - С. 193-210.
50. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. - Л.: Гидрометеоиздат, 1977. - С. 297-333.
51. Самышев Э.З., Сенин Ю.М. Общая взвесь и взвешенное органическое вещество в поверхностных водах шельфа Западной Африки и открытой части Гвинейского залива // Продуктивная зона Экваториальной Атлантики и условия её формирования // Тр. АтлантНИРО, Калининград, 1971. - Вып. 36. - С. 201-215.
52. Сорокина Н.А., Земляная Л.А. Связь глубины видимости белого диска с показателем вертикального ослабления дневного света в некоторых районах Мирового океана // Мор. гидрофиз. исслед. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1970. - № 4(50). - С. 179-185.
53. Сухолей В.Ф. Изменчивость гидрологических условий Атлантического океана. - Киев: Наук. думка, 1977. - 216 с.
54. Финейко З.З. Первичная продукция южных морей // Вопросы биоокеанографии. - Киев: Наук. думка, 1967. - С. 69-74.
55. Яковлев В.Н. О биологической продуктивности Мирового океана // Записки Калининградского отдела Географического общества. - Л.: 1972. - Вып. I. - С. 69-72.

56. Hobson L.A. Relationships between particulate organic carbon and micro-organisms in upwelling areas off Southwest Africa. *Inv. Pesq.*, 1971, v. 35, p. 195-208.
57. Sheldon R.W., Prakash A., Sutcliffe W.H. The size distribution of particles in ocean. - *Limnol.Oceanogr.*, 1972, v. 17, N 3, p. 327-340.

АКАДЕМИЯ НАУК УССР
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

МИХАЙЛОВ Эдуард Александрович,
БУЛГАКОВ Николай Петрович,
КАБА Мохамед Ламин,
БУРЛАКОВА Земфира Петровна

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ОПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ВОД И
ОСНОВНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В
ВОДАХ ГВИНЕЙСКОГО СЕКТОРА АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

Препринт

Утвержден к печати редакционно-издательским
советом МГИ АН УССР от 31.05.88 г.

Редактор Т.П.Лощина

Подписано к печати 06.02.89	БЯ 08037
Формат бумаги 60х84/16	Бумага типографская
Офсетная печать	Усл.печ.л. 3,2 Уч.-изд.л. 2,9
Тираж 100 экз.	Зак.520 Цена 30 к.

Адрес редакции:
335000, Севастополь, ул. Ленина, 28
Морской гидрофизический институт АН УССР,
тел. 52-36-21

СКТБ МГИ АН УССР
Севастополь, ул.Ленина, 28