

УДК 531.521

# ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОМПЛЕКСА ОПТИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

© 2010 г. Л. И. Копрова, Б. В. Коновалов, В. В. Пелевин, Д. В. Хлебников

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН*

*117997 Москва, Нахимовский просп., 36*

*E-mail: bvkonovalov@mail.ru*

Поступила в редакцию 17.03.2009 г., после доработки 28.07.2009 г.

На основе экспериментальных проведен комплексный анализ гидрооптических и динамических параметров поверхностных вод Атлантического океана. Наглядно показано, что структурные особенности распределения основных гидрооптических параметров — таких как оптический индекс типа вод  $m$  (по классификации В.Н. Пелевина), прозрачность поверхностных вод (глубина видимости белого диска  $Z_6$ ) и параметр циркуляции (динамическая высота  $D$  на глубине 100 м), а также поля течений — подобны. На этом основании в предыдущих исследованиях авторов получены взаимосвязи этих параметров и найдены эмпирические зависимости  $Z_6(m)$ ,  $D(m)$ . Эти зависимости, а также полученные в более ранних работах зависимости между биологическими и оптическими параметрами — концентрациями хлорофилла  $c_p(m)$ , показателями ослабления света растворенным “желтым веществом” (yellow substance)  $a_{ys}(m)$  и взвесью (suspended matter)  $a_{sm}(m)$  были объединены и явились основой метода для их определения в любой точке открытого океана по измеренному (в том числе и дистанционно) параметру  $m$ . Измерения гидрооптических параметров, выполненные по проекту “Меридиан” в 14-м рейсе НИС “Академик Иоффе” в октябре–ноябре 2003 г., подтвердили правомерность расчетов изменчивости пяти указанных параметров, исходя из значений индекса  $m$ . Тем самым была показана эффективность разработанного экспресс-метода оценки изменчивости комплекса параметров по оптическому индексу типа вод  $m$ . Кроме того, предложенный в 2002 г. профессором В.Н. Пелевиным индекс “здоровья” вод  $H_w$ , равный отношению концентраций хлорофилла к растворенной органике “желтому веществу”, оказался эффективным для идентификации экологического состояния приповерхностных вод.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические свойства океанских вод зависят от гидродинамических условий — течений, вихрей, апвеллингов и др. (см., напр., [1, 2]). В данной работе для открытых вод Атлантического океана проведено сопоставление карт течений и оптических характеристик поверхностных вод.

В качестве оценки оптических свойств океанской среды использован оптический индекс типа вод  $m$ , впервые введенный профессором В.Н. Пелевиным [3]. Авторами в результате комплексного анализа большого количества экспериментальных данных о гидрооптических и гидродинамических параметрах поверхности океана [4–7] установлены количественные взаимосвязи этих параметров в виде эмпирических соотношений [8, 19]. Эти результаты и результаты более ранних работ [10] легли в основу метода комплексного определения изменчивости ряда гидрооптических, гидродинамических и гидробиологических параметров для поверхностных вод открытого океана по измеренному базовому параметру — оптическому индексу типа вод  $m$ .

В 14-м рейсе НИС “Академик Иоффе” в рамках федерального Проекта “Меридиан” были из-

мерены некоторые из указанных параметров, которые оказались близкими к расчетным значениям, полученным данным методом. Всем этим вопросам посвящена данная работа.

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРООПТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В работе использованы следующие материалы.

1. Карты распределений различных параметров водной поверхности Атлантического океана:

— карта оптического индекса типа вод Мирового океана  $m$  по классификации В.Н. Пелевина (обобщенные экспериментальные данные, полученные в течение многих лет в разное время) [3, 5–6, 8];

— карта течений на поверхности Атлантического океана [7];

— карта глубины видимости белого диска  $Z_6(m)$  [7];

— карта циркуляции Атлантического океана на глубине 100 м — динамическая высота  $D$  в условных см [7, 11].

2. Результаты работ по изучению взаимосвязей гидрооптических, гидродинамических и гидробиологических параметров поверхностных вод открытого океана:

- глубина видимости белого диска  $Z_6(m)$  [9],
- динамическая высота на глубине 100 м  $D(m)$  [8],
- концентрация хлорофилла  $c_p(m)$  [10],
- показатель ослабления света “желтым веществом”  $a_{ys}(m)$  [10],
- показатель ослабления света взвесью  $a_{sm}(m)$  [10].

3. Экспериментальные данные об измерениях приведенных величин, полученные

под руководством проф. В.Н. Пелевина в 14-м рейсе НИС “Академик Иоффе” в

Атлантическом океане на меридиональном разрезе п. Калининград — п. Ушуйя —

Антарктида, 12.10–4.12.2003, по Проекту “Меридиан” [2, 13].

### 3. ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА С РАЗЛИЧНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ В СООТВЕТСТВИЕ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Одним из основных параметров, несущим информацию о морских водах, является оптический индекс типа вод  $m$ . Этот параметр, согласно [3], определяется следующим образом:

$$m = 100\alpha_{500}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{500}$  [3, 5–6, 14] — показатель ослабления излучения в вертикальном направлении при длине волны  $\lambda = 500$  нм. В работах [3, 15–17] показано, что по известному значению  $m$  для данной акватории можно оценить спектральный состав света на разных глубинах, а также в первом приближении получить данные о концентрации хлорофилла фитопланктона, “желтого вещества” и общей концентрации взвеси в водах открытого океана.

Оптический индекс типа вод тесным образом связан и с другим оптическим параметром, характеризующим прозрачность вод, — глубиной видимости белого диска  $Z_6$  чем прозрачнее вода для солнечного излучения (чем меньше  $m$ ), тем больше глубина видимости белого диска  $Z_6$ . Этот параметр также зависит от гидрооптических характеристик воды (см., напр., [18]). В работе [9] получена формула связи глубины видимости белого диска  $Z_6$  и оптического индекса типа вод  $m$  для типичных вод открытого океана, которая примени-

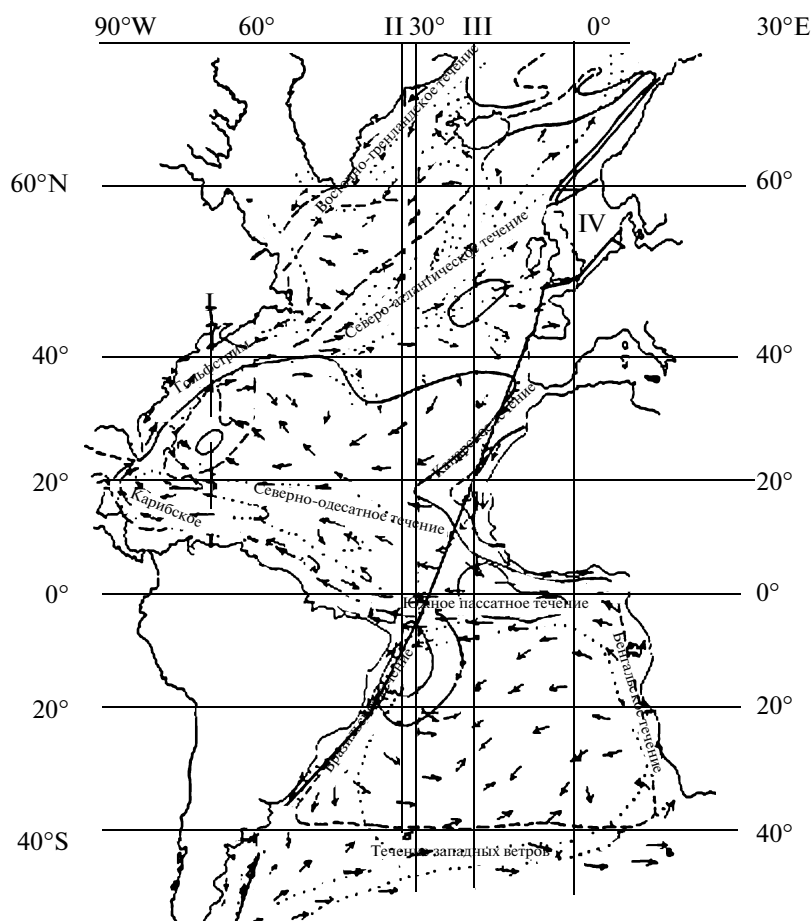
ма для практического использования, в том числе используется и в данной работе (см. ниже). Отметим, что получено огромное количество данных измерений видимости белого диска  $Z_6$ , которые обобщены в Атласах океанов [7, 19]. Этот параметр относительно легко измеряется. Однако он дает представление об относительной чистоте вод, поэтому его называют “относительной прозрачностью” — он по существу является интегральной характеристикой ослабления яркости с глубиной и измеряется наблюдателем с борта. Как указано выше, оптический индекс типа вод  $m$  дает большую информацию о водах и его можно считать главной оптической характеристикой воды, которая показывает спектральное ослабление с глубиной солнечного излучения.

Экспериментальные данные об  $m$ , полученные в различное время в разных районах были обобщены на основе оптических свойств различных типов вод Мирового океана и даны в виде карты классификации вод [3, 5–6, 10, 20]. Изменчивость оптического индекса типа вод в Мировом океане очень велика. В 5-м рейсе НИС “Дмитрий Менделеев” в 1971 г. были проведены одновременные измерения  $m$  и  $Z_6$  на полигоне [21]. Оказалось, что в центральных районах Тихого океана вблизи островов Кука наблюдалась экстремальная прозрачность вод —  $m = 1.15$ , при этом белый диск был виден на глубине 66 м. Таких больших значений  $Z_6$  в практике гидрооптических измерений больше не встречалось. Наименьшее значение  $m = 1.2$  в Атлантике наблюдалось в центре антициклонической циркуляции Саргассова моря [21]. Наибольшие для Атлантики значения  $m = 25–30$  и выше наблюдались к северу от Исландии, между о. Исландия и о. Ян-Майен, в зоне циклонической циркуляции, вызываемой ответвлением Восточно-Гренландского течения [7].

На рис. 1 показана совмещенная карта грааций оптического индекса типа вод  $m$  [3, 10] (см. табл.1) и карта течений поверхностных вод Атлантического океана [7], полученная в работе [10].

Классификация оптического индекса типа вод  $m$  по В.Н. Пелевину [3]

Градации $m$	Диапазон изменчивости $m$
1	$1.15 \leq m \leq 1.3$
2	$1.3 \leq m \leq 1.5$
3	$1.5 \leq m \leq 2.1$
4	$2.1 \leq m \leq 2.9$
5	$2.9 \leq m \leq 4.1$
6	$4.1 \leq m \leq 5.3$
7	$m > 5.3$



**Рис. 1.** Совмещенная карта распределений динамических и оптических характеристик поверхностных вод Атлантического океана, полученная в работе [8]: течений (точки), направлений течений (стрелки) по данным [7] и градаций оптического индекса типа вод  $t$  (изолинии) по классификации В.Н. Пелевина [3, 5, 6] при диапазоне изменчивости  $t$  с градациями от 1 до 7 (см. табл.). Прямые линии — меридиональные разрезы I—III (сделанные по картам океанографических параметров — оптического индекса типа вод  $t$ , глубины видимости белого диска  $Z_6$  и динамической высоты на глубине 100 м  $D$  в работах [8–9] для получения формул связи между параметрами), разрез IV — маршрут 14-го рейса НИС “Академик Иоффе”.

Анализ совмещенной карты показывает, что между  $40^\circ\text{N}$  и  $40^\circ\text{S}$  наблюдается обширная зона типичных океанических вод с  $2.1 \leq m \leq 2.9$  с некоторыми зонами более чистых вод в районах центров антициклонической циркуляции как к северу, так и к югу от экватора. Координаты центров этих областей в поле  $Z_6$  практически совпадают с координатами центров этих областей в поле  $t$  и  $D$ . Следует подчеркнуть, что такое совпадение положения центров динамических характеристик и характеристик прозрачности в структуре их полей является признаком устойчивости этих образований. Обширная зона чистых вод ограничена системой течений: к северу от экватора Гольфстрим ( $\nearrow$ ), южная ветвь Северо-Атлантического течения ( $\rightarrow$ ), Канарское течение ( $\swarrow$ ) и Северное Пассатное течение ( $\leftarrow$ ). Стрелками показано преимущественное направление течений. Эта система течений образует общую циркуляцию антицик-

лонической направленности, что и является причиной чистоты вод. В самом центре этой циркуляции в Саргассовом море наблюдаются чрезвычайно чистые воды с  $1.2 < m < 1.5$ . У восточной границы этой обширной зоны вследствие действия силы Кориолиса воды Канарского течения испытывают тенденцию отойти от побережья Африки. Здесь возникает дивергенция течений и как результат — мощный апвеллинг, в котором оптический индекс  $m$  лежит в 4, 5, 6 градациях, т.е. изменяется от 2.1 до 5.3 (см. рис. 1).

Аналогичная система течений образуется и в Южном полушарии. Бразильское течение ( $\downarrow$ ), Течение Западных Ветров ( $\rightarrow$ ), Бенгельское ( $\uparrow$ ) и Южное Пассатное ( $\leftarrow$ ) образуют также антициклоническую циркуляцию. Крутой поворот южного ответвления Южного Пассатного течения, переходящего в Бразильское течение, приводит к резкому увеличению антициклонической цирку-

ляции, т.е. к конвергенции, даунвеллингу и понижению оптического индекса вод до значений  $m$ , соответствующих 1-й и 2-й градациям. В восточной части южной Атлантики Бенгельское течение оттекает воду от берегов Южной Африки и вызывает апвеллинг, аналогичный Канарскому. В зонах дивергенции, в апвеллинговых, богатых биогенами зонах наблюдается резкий рост органического вещества в результате жизнедеятельности фитопланктона. На экваторе, между типичными обширными зонами чистых вод Северного и Южного полушарий, в результате экваториальной дивергенции течений и возникающей в результате этого узкой полосы апвеллинга увеличивается снабжение фитопланктона биогенами, что приводит к увеличению концентрации фитопланктона и повышению оптического индекса типа вод до 4-й градации:  $2.1 \leq m \leq 2.9$  (см. рис. 1).

В Северной Атлантике на более высоких широтах, севернее  $40^\circ\text{N}$  изолинии градации  $m$  вытянуты в направлении с юго-запада на северо-восток в соответствии с господствующими здесь течениями. Основная струя Северо-Атлантического течения ( $\nearrow$ ), течения Ирмингера ( $\leftarrow$ ), Восточно-Гренландского и Лабрадорского течений ( $\downarrow$ ) и течения Гольфстрима ( $\rightarrow$ ) образуют циркуляцию вод циклонического типа. Как следствие, возникают дивергенция и апвеллинг, что приводит к резкому увеличению фитопланктона. В соответствие с этим значения  $m$  переходят в 4, 5 и 6-ю градации (см. рис. 1). Так динамические процессы формируют структуру поверхностных вод с различными оптическими свойствами.

Аналогичным образом в соответствие с основными течениями организуется и структура таких параметров поверхностных вод, как прозрачность (видимость белого диска  $Z_6$  и параметр циркуляции  $D$  на глубине 100 м. Вследствие этого поля оптических параметров  $m$ ,  $Z_6$  и поле циркуляции  $D$  в Атлантическом океане оказались подобными и определялись полем течений. Это обстоятельство и позволило найти количественные связи между этими параметрами.

#### 4. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ БИООПТИЧЕСКИМИ И ДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО ИНДЕКСА ТИПА ВОД $M$

Для получения количественных данных о параметрах  $m$ ,  $Z_6$ ,  $D$  был рассмотрен их широтный ход вдоль трех трансатлантических меридиональных разрезов I–III по данным карт этих параметров [3, 7, 8], где гидрологическая ситуация была различна (см. рис. 1). Сложная и разная структура полей  $m$ ,  $Z_6$ ,  $D$  на разрезах не повлияла на основ-

ной результат: взаимозависимости между этими полями были аналогичными. По этим данным в работе [9] между параметрами  $m$  и  $Z_6$  получены простые формулы связи (2) и (3);

$$m = 50/Z_6, \quad (2)$$

$$Z_6 = 50/m \text{ [в м]}. \quad (3)$$

Подчеркнем, что одновременно сделанные измерения  $m$  и  $Z_6$  в экстремально чистых водах [21] хорошо согласуются с другими экспериментальными независимыми обобщенными данными, полученными ранее.

Большой интерес представляет получение количественной связи между оптическими и динамическими характеристиками поверхностных вод океана. Такие количественные данные были получены в работе [8] на основе анализа большого количества экспериментальных данных об исследуемых параметрах — оптического индекса типа вод  $m$  [3, 5, 6] и параметра циркуляции — динамической высоты  $D$  на глубине 100 м [7] на меридиональных разрезах I–III в Атлантическом океане и хорошо описываются следующей формулой:

$$m = 1 + 75(D - 100). \quad (4)$$

Из (4) следует обратная зависимость:

$$D = (400m - 325)/(m - 1) \text{ [в динамических см]}. \quad (5)$$

Анализ данных показывает, что, независимо от того, что на всех меридиональных разрезах разная гидрологическая ситуация и, соответственно, оптические параметры различны (сравним, например, западный и восточный разрезы), зависимость  $D$  и  $m$  имеет одинаковый характер. И на всех меридиональных разрезах наблюдается отрицательная корреляция исследуемых параметров.

Именно таким образом устанавливается взаимосвязь различных характеристик прозрачности поверхностных вод океана с циркуляцией поверхностных вод. Как следствие этого, эти взаимосвязи послужили основой для создания комплексного метода определения некоторых гидрооптических и динамических параметров при известном из измерений базовом параметре — оптическом индексе типа вод  $m$ . Кроме того, в этом методе использованы результаты работы [10], в которой на основе многих экспериментальных и теоретических данных была разработана модель биооптических параметров. Модель позволяет получить зависимости концентраций хлорофилла  $c_p$ , показателей ослабления света “желтым веществом”  $a_{ys}$ , и взвесью  $a_{sm}$  от оптического индекса типа вод  $m$  [10]. Эти зависимости для удобства использования были аппроксимированы в виде следующих простых соотношений:

$$c_p = 2.28 \times 10^{-2} m^2 + 0.15m - 0.198 \text{ [в мг/м}^3\text{]}, \quad (6)$$

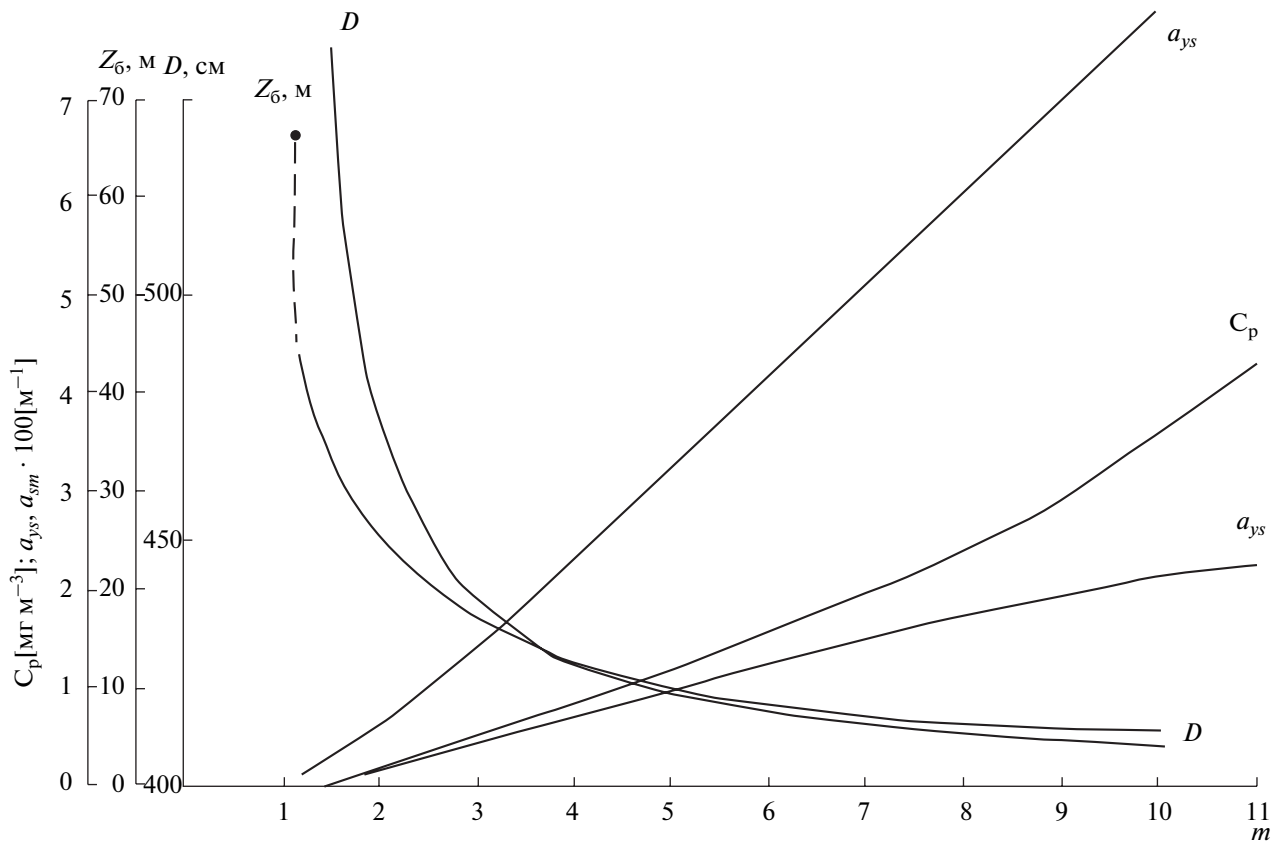


Рис. 2. Зависимость некоторых гидрооптических и динамических параметров поверхностных вод Атлантического океана от оптического индекса типа вод  $m$ : глубины видимости белого диска  $Z_6$  [9]; динамической высоты  $D$  на уровне 100 м [8], концентрации хлорофилла  $c_p$  показателей ослабления света “желтым веществом”  $a_{ys}$  и взвесью  $a_{sm}$  [10].

$$a_{ys} = -6 \times 10^{-5} m^2 + 0.0031 m - 0.0043, \quad (7a)$$

при  $m \geq 2$  [в  $m^{-1}$ ],

$$a_{ys} = 10^{-4} e^{1.23m}, \quad \text{при } m < 2 \text{ [в } m^{-1}\text{]}, \quad (7b)$$

$$a_{sm} = -9.1 \times 10^{-3} m - 0.0123, \quad \text{при } m > 2 \text{ [в } m^{-1}\text{]}, \quad (8a)$$

$$a_{sm} = 8 \times 10^{-4} e^{0.69m}, \quad \text{при } m < 2 \text{ [в } m^{-1}\text{]}. \quad (8b)$$

Возможно решить и обратную задачу: по одному из известных биопараметров определить оптический параметр  $m$ .

Итак, по известному параметру – оптическому индексу типа вод  $m$  можно определить пять параметров –  $Z_6$ ,  $c_p$ ,  $a_{ys}$ ,  $a_{sm}$  и  $D$ . Оптический индекс типа вод  $m$  является базовым, определяется экспериментально независимыми традиционными методами, в том числе и дистанционно. Открывается возможность по дистанционным измерениям  $m$ , в том числе и со спутников, судить о чистоте вод той или иной акватории, а также узнавать о расположении зон конвергенции и дивергенции, апвеллинга и даунвеллинга.

Таким образом, на основе результатов работ [8–10] разработан универсальный метод оценки изменчивости комплекса гидрооптических и ди-

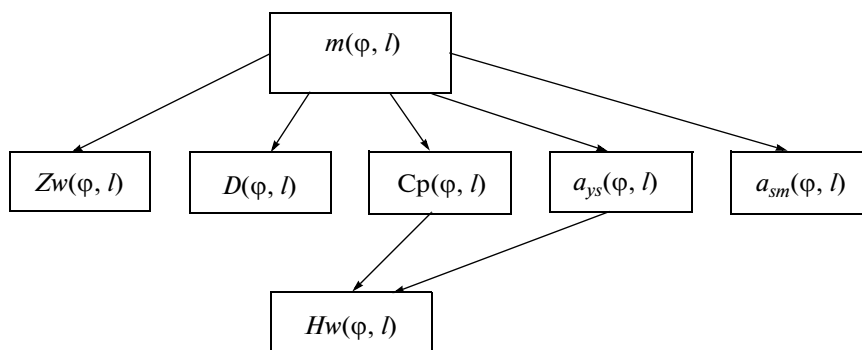
намических параметров  $Z_6$ ,  $D$ ,  $c_p$ ,  $a_{ys}$ ,  $a_{sm}$  по значению индекса  $m$  (см. рис. 2). Отметим, что основные формулы (2–8) комплексного метода получены на основе независимых экспериментальных данных, полученных не одновременно. Поэтому при детальном сравнении расчетных данных между собой и данными, измеренными в ходе 14-го рейса НИС “Академик Иоффе”, не следует ожидать точного совпадения.

Кроме того, по этому методу можно определить еще один 6-й параметр, введенный впервые профессором В.Н. Пелевиным – так называемый параметр “здоровья” вод  $H_w$ . Этот параметр определяется следующим образом:

$$H_w(\varphi, l) = c_p(\varphi, l) / a_{ys}(\varphi, l). \quad (9)$$

Здесь  $c_p(\varphi, l)$  – концентрация хлорофилла,  $a_{ys}(\varphi, l)$  – показатель поглощения “желтым веществом” на длине волны  $\lambda = 354$  нм, который авторы считают в первом приближении пропорциональным концентрации “желтого вещества”. Оба этих параметра измерялись в рейсах с помощью флуоресцентных лидаров (см. ниже).

Индекс “здоровья” вод  $H_w$ , являющийся по своей сути отношением концентрации “живого”



**Рис. 3.** Схема метода комплексного определения 6-ти биооптических и динамических параметров в заданной точке поверхностных вод открытого океана Атлантики с координатами  $(\varphi, l)$  по известному базовому параметру  $m(\varphi, l)$ .

вещества к “неживому”; может служить для первичной оценки экологического состояния вод, или, иными словами, в качестве индикатора экологически неблагополучных районов мирового океана. Например, зачастую в прибрежных водах, находящихся под сильным антропогенным воздействием, значения индекса понижены из-за высоких содержаний загрязняющих веществ органического происхождения, а в зонах апвеллингов — наоборот, повышены. Подобная изменчивость индекса  $H_w$  неоднократно наблюдалась при измерениях лидарами с борта движущегося судна в водах разного типа в различных экспедициях.

Комплексный метод схематично представлен на рис. 3.

Итак, как видно из схемы (рис. 3), метод оценки изменчивости параметров очень прост и основан на экспериментальных данных. Существующие объективно физические взаимосвязи искоемых параметров выражаются с помощью простых эмпирических соотношений (2–9).

В данной работе с помощью комплексного метода были рассчитаны указанные выше параметры вдоль маршрута 14-го рейса НИС “Академик Иоффе”, который работал по Программе “Меридиан” [12] в октябре–ноябре 2003 г. Расчеты проводились по базовому параметру  $m$  в нескольких вариантах:

1) по обобщенным данным о распределении в Атлантическом океане оптического индекса  $m(\varphi, l)$  [10];

2) определялся диапазон изменчивости каждого из параметров по данным о диапазоне изменчивости  $m(\varphi, l)$  вдоль маршрута [10];

3) по величинам  $m(\varphi, l)$  полученным по измерениям с помощью лидара УФЛ-7 в 14-м рейсе (см. ниже (12, 22)).

Наряду с расчетными значениями исследуемых параметров были использованы данные измерений биооптических параметров в 14-м рейсе НИС “Академик Иоффе”:

1) оптического индекса типа вод  $m$  (с помощью лидара);

2) концентраций хлорофилла  $c_p$  “желтого вещества”  $a_{ys}$  и взвеси  $a_{sm}$ , определяемые по пробам океанской воды [13];

3) концентраций хлорофилла  $c_p$ , показателей ослабления света “желтым веществом”  $a_{ys}$  и взвесью  $a_{sm}$ , полученные путем прямых измерений лидаром.

Методы измерений параметров в рейсе описаны в следующем разделе данной работы.

Широтно-долготный ход параметров  $Z_0(\varphi, l)$  и  $D(\varphi, l)$  вдоль маршрута 14-го рейса

НИО “Академик Иоффе” был определен также по картам этих параметров [7].

Подчеркнем, что новейшие экспериментальные данные об исследуемых параметрах, полученные в 14-м рейсе, представляют особый интерес, поскольку они малочисленны из-за трудности их получения в открытых водах океана. Кроме того, эти данные и данные карт [7], являющиеся еще одним независимым источником, служат одновременно и проверкой расчетных по комплексному методу параметров. Отметим также, что используемые в методе формулы, полученные на основе обобщенных данных на разрезах I–III в Атлантическом океане (см. рис. 1), в данной работе были применены к другому району океана — “косому” разрезу в Атлантике от

Калининграда до Ушуайя, который являлся маршрутом 14-го рейса НИС “Академик Иоффе”.

## 5. ИЗМЕРЕНИЯ БИООПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В 14-м РЕЙСЕ НИС

“Академик Иоффе” по проекту “Меридиан” в октябре–ноябре 2003 г.

По проекту “Меридиан” в 14-м рейсе НИС “Академик Иоффе” измерялся ряд биооптических параметров: концентрация хлорофилла  $c_p$ , показатели ослабления света желтым веществом

$a_{ys}$  и взвесью  $a_{sm}$ , а также определялся оптический индекс типа вод  $m$ . Для дистанционных измерений этих параметров на ходу судна в рейсе использовался ультрафиолетовый флуоресцентный автоматический лидар УФЛ-7. Его устройству посвящен данный раздел статьи. Одновременно брались пробы воды для последующей фильтрации и определения указанных выше параметров в лаборатории спектрофотометрическими методами [23, 24].

Ультрафиолетовый флуоресцентный судовой лидар УФЛ-7 [22], как и другие лидары серии УФЛ, был разработан в Лаборатории исследования океана аэрокосмическими средствами Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН под руководством профессора В.Н. Пелевина совместно с Всероссийским электротехническим институтом им. В.И. Ленина (рис. 4). Приборы успешно применялись при исследованиях вод Атлантики, а также Черного, Балтийского, Северного, Карского, Аральского, Китайского морей в ряде экспедиций на научно-исследовательских судах Института океанологии РАН (В.Н. Пелевин и др., 2001–2009),

Лидары УФЛ предназначены для экспрессных определений концентрации в морской воде растворенных и взвешенных органических веществ, хлорофилла фитопланктона, оценки общей концентрации взвешенного вещества, а также для обнаружения на морской поверхности и в приповерхностном слое загрязняющих органических веществ, в частности, нефтепродуктов.

Основные параметры лидара УФЛ-7: длина волны лазера — 355 нм; частота зондирования — до 2 Гц; энергия зондирующего импульса — 2 мДж; длительность импульса — 10 нс; входная апертура приемника — 100 мм; рабочий диапазон дальностей — 1–10 м; количество спектральных каналов приемника — 11 (355, 385, 404, 424, 440, 460, 495, 530, 620, 651, 685 нм); вес прибора — 20 кг; электропитание — от бортовой сети 220 В либо автономное 12 В. Подробнее характеристики и примеры карт концентраций, полученных с помощью лидаров серии УФЛ, приведены в работе [22].

Спектр флуоресценции, индуцированной лазерным излучением на длине волны 355 нм, используется для определения 3-х биопараметров — концентрации хлорофилла фитопланктона  $c_p$  и показателя ослабления света “желтым веществом”  $a_{ys}$  и взвесью  $a_{sm}$ .

Мощностные характеристики лазера, чувствительность приемного тракта и специально разработанные алгоритмы выделения флуоресцентного отклика среды на фоне шума позволяют получать уверенный сигнал флуоресценции при самых низких концентрациях флуорентов, работе

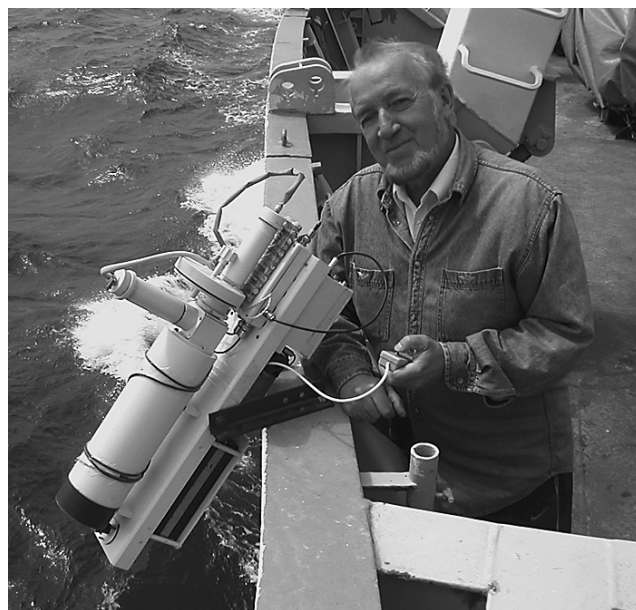


Рис. 4. Профессор В.Н. Пелевин на борту НИС “Академик Иоффе” с лидаром УФЛ-7.

на судне с высоты более 10 метров и условиях дневной солнечной засветки.

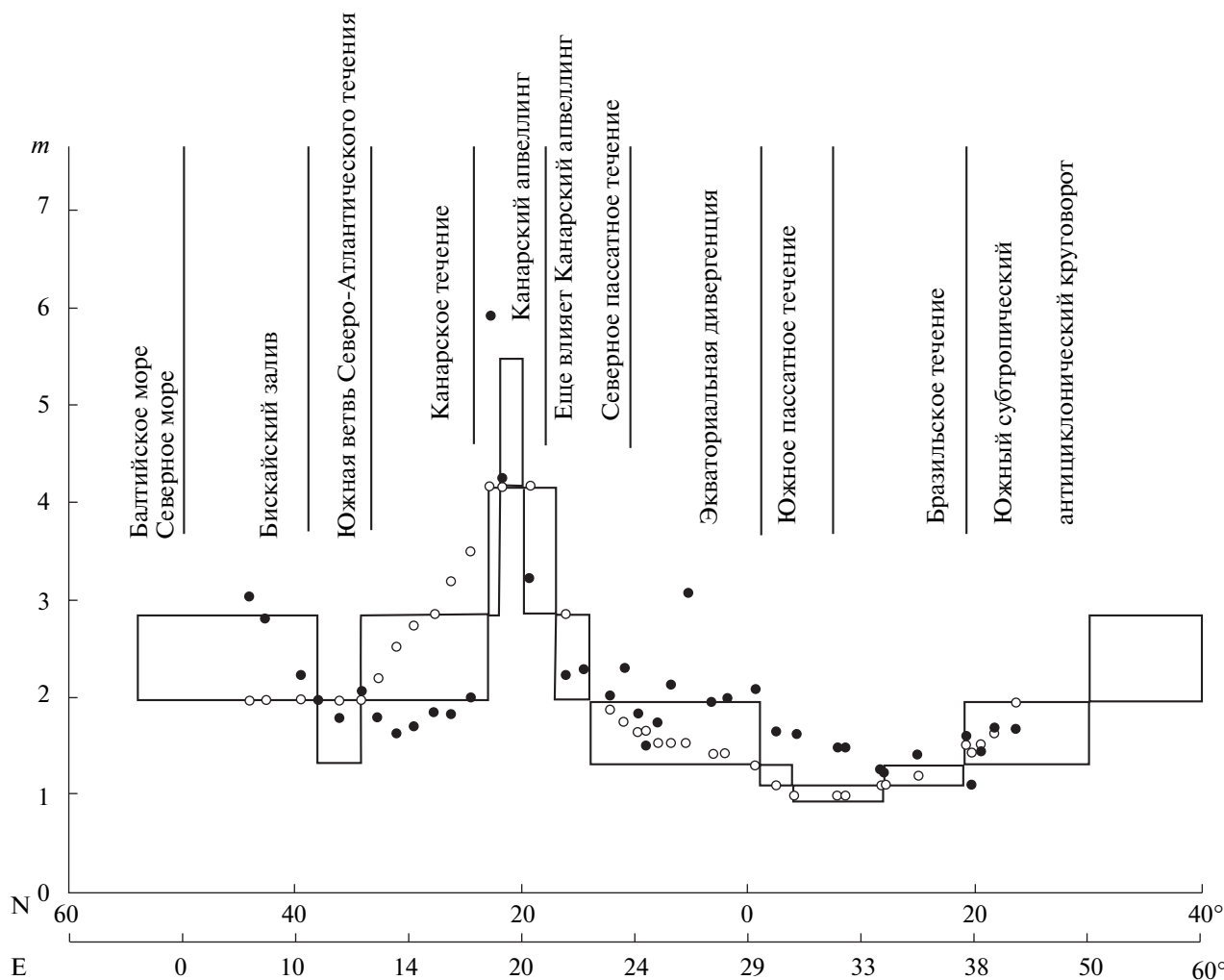
Во время 14-го рейса НИС “Академик Иоффе” лидар размещался на борту судна (рис. 6); зондирующий луч направлялся на поверхность воды под углом 20–45° к вертикали. Вошедший в океанскую воду ультрафиолетовый лазерный импульс вызывал флуоресценцию органических веществ, растворенных в толще воды, либо находящихся на поверхности, а также комбинационное (рамановское) рассеяние непосредственно водой. Флуоресцентное свечение в спектральном диапазоне 380–690 нм, а также сигнал упругого рассеяния при 355 нм в результате формировали спектр флуоресценции или “флуорограмму океана”.

Для ультрафиолетового лазера, используемого в лидаре УФЛ-7, толщина слоя в открытых океанских водах, в котором определяются средние концентрации, для хлорофилла составляет примерно 2–3 м, а для показателя ослабления “желтого вещества” и взвеси составляет около 10 м.

Остановимся подробнее на методике определения с помощью лидара оптического индекса типа вод  $m$ .

Приемное устройство лидара с ФЭУ, снабженное узкоугольным линзовым объективом и сменными светофильтрами, позволяет измерять рассеянный свет от океана, неба и “идеального” белого отражателя.

Направляя последовательно приемник лидара на морскую поверхность, на небо и на освещенный Солнцем белый диффузный отражатель, можно измерять спектральные яркости восходя-



**Рис. 5.** Трансатлантическая изменчивость оптического индекса типа вод  $m(\phi, 1)$  вдоль маршрута 14-го рейса НИС “Академик Иоффе” “косой” разрез IV в Атлантике от Калининграда до Ушуайя):  $\circ$  – оптический индекс типа вод  $m$  и  $\square$  – диапазон изменчивости  $m$  – по обобщенным данным классификации В.Н. Пелевина [3, 8];  $\bullet$  –  $m$  по данным измерений в 14-м рейсе с помощью лидара;

щего над океаном излучения  $U_n$  неба  $U_n$  и белого отражателя  $U_{60}$  и далее вычислить:

$$\rho_\lambda = (U_o - 0.02U_n)/U_{60}, \quad (10)$$

где  $\rho_\lambda$  – коэффициент спектральной яркости (КСЯ) океана.

Тогда (по В.Н. Пелевину):

$$m = 1.3 + 3.5(\rho_{560}/\rho_{430}); \quad (11)$$

где  $\rho_{560}$  – КСЯ океана на длине волны  $\lambda = 560$  нм,  $\rho_{430}$  – КСЯ океана при  $\lambda = 430$  нм.

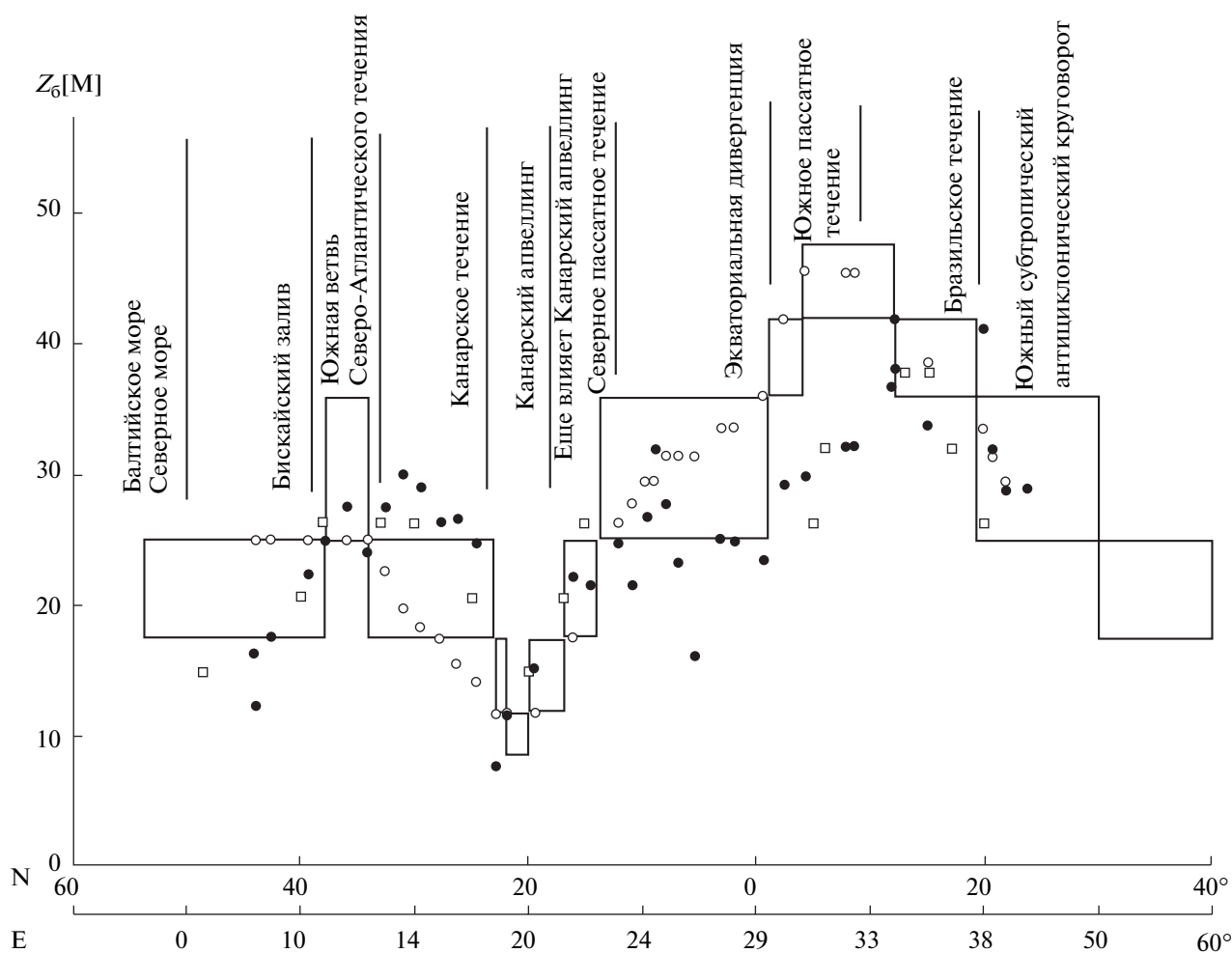
Измерения проводились при ясном небе и умеренной высоте Солнца. При отсутствии благоприятных погодных условий для расчета  $t$  применялась эмпирическая формула (12). Она была получена в 10 и 11 рейсах НИС “Академик Иоффе” в различных водах Атлантики по результатам

одновременных измерений спектров флуоресценции морских вод лидаром и оптического индекса типа вод  $m$  р-метром конструкции В.А. Матюшенко (спектрометром, измеряющим непрерывную спектральную яркость нисходящего и восходящего света на уровне поверхности океана и отраженного от “идеального отражателя”). Эта формула отражает статистическую зависимость  $t$  от интенсивности флуоресценции “желтого вещества” при 460 нм, нормированной на сигнал комбинационного рассеяния непосредственно на молекулах воды.

$$m = 1 + 1.5n_{460}/n_{404}, \quad (12)$$

где  $n_{460}$  – сигнал флуоресценции “желтого вещества” вблизи своего максимума,  $n_{404}$  – сигнал комбинационного рассеяния воды (оба измеряются лидаром УФЛ-7).





**Рис. 6.** Трансатлантическая изменчивость относительной прозрачности вод 20 по маршруту 14-го рейса НИС “Академик Иоффе”, вычисленная с помощью эмпирической зависимости  $Z_6(\varphi, 1)$  (3) [9]: ○ — по оптическому индексу типа вод  $m$  и □ — диапазону изменчивости  $m$  — по обобщенным данным классификации В.Н. Пелевина [3, 8]; ● — по  $m$ , измеренным в 14-м рейсе с помощью лидара; □ —  $Z_6$ , по данным карты прозрачности воды [7].

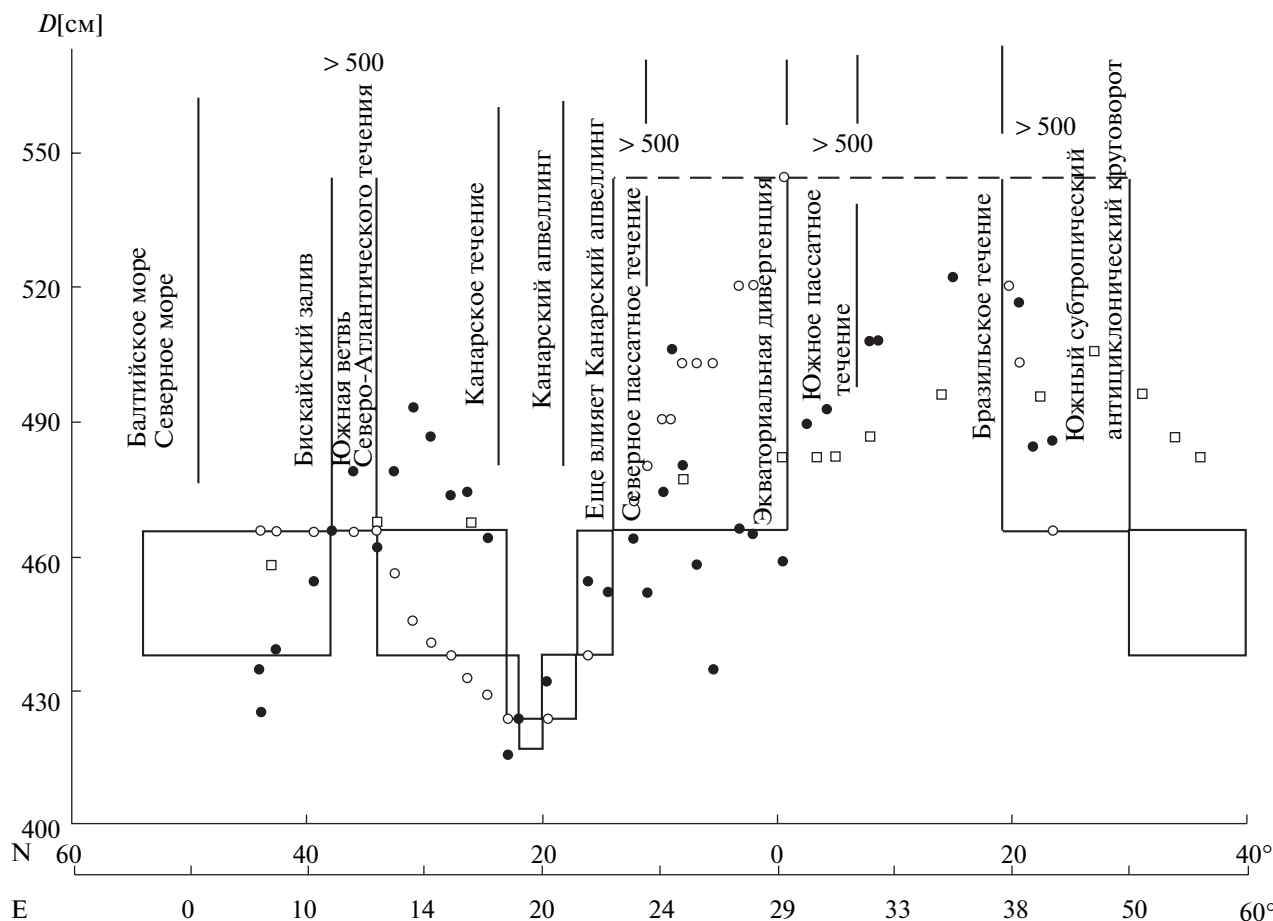
По данным об оптическом индексе типа вод  $m(\varphi, 1)$  с помощью комплексного метода были рассчитаны искомые параметры (см. выше варианты 2, 3).

Далее последовательно оценим изменчивость каждого из 6-ти параметров вдоль маршрута 14-го рейса НИС “Академик Иоффе” в октябре 2003 г., рассчитанных по предлагаемому методу.

#### 6. ТРАНСАТЛАНТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО ИНДЕКСА ТИПА ВОД $m$ ВДОЛЬ МАРШРУТА 14-го РЕЙСА НИС “АКАДЕМИК ИОФФЕ”

Маршрут НИС “Академик Иоффе” в 14-м рейсе представляет собой широтно-долготный разрез (см. рис. 1) от Балтийска до Ушуайя (Аргентина). НИС “Академик Иоффе” пересекал зоны с различными типами вод, включая Канар-

ский апвеллинг и области чистых вод в Бразильском течении. На рис. 5 представлен широтно-долготный ход оптического индекса типа вод  $m(\varphi, 1)$  (вариант расчета 1) и диапазон его изменчивости (вариант расчета 2) вдоль маршрута 14-го рейса НИС “Академик Иоффе” по данным классификации В.Н. Пелевина (см. рис. 1, [3, 6, 10]). Здесь же показана пестрая изменчивая гидрологическая ситуация на маршруте: воды, омывающие Европу, воды открытого океана, Канарское течение, Канарский апвеллинг, Северно-Пассатное течение, далее идет узкая полоса типично чистых вод, затем Экваториальный апвеллинг, Южно-Пассатное, Бразильское течения и далее влияние Ла-Платы. Соответственно этой картине изменяется и оптический индекс типа вод  $m$ . При этом наблюдается широкий диапазон его изменчивости — от 1.15 и более 5.3 (каждый прямоугольник на рис. 5 соответствует определенной



**Рис. 7.** Трансатлантическая изменчивость параметра циркуляции  $D$  по маршруту 14-го рейса НИС “Академик Иоффе”, вычисленная по эмпирической формуле (5) [8] по нескольким вариантам, указанным выше: ○ — по оптическому индексу типа вод  $m$  и диапазону изменчивости  $m$  и □ — по обобщенным данным классификации В.Н. Пелевина [3, 8]; ● — по  $m$ , измеренным в 14-м рейсе с помощью лидара. □ —  $D$  по данным карты циркуляции [7].

градации индекса  $m$  (см. табл.), аналогичные обозначения и для других параметров (см. рис. 6–10).

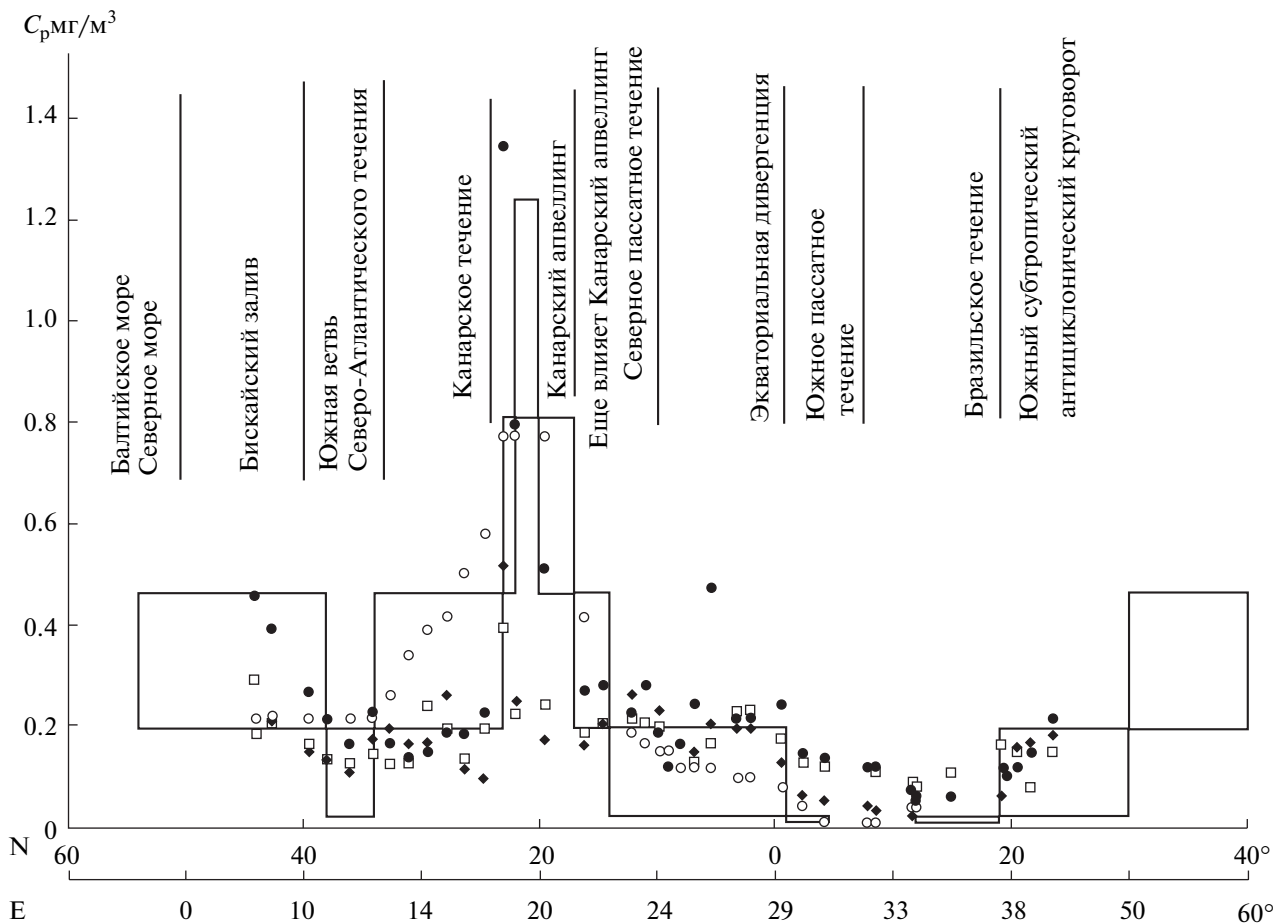
Необходимо подчеркнуть, что участки шкалы по долготе 1 на рис. 5 (и на последующих рис. 6–10) в начале и в конце маршрута 14-го рейса нелинейны. Это связано со схемой расположения станций измерений.

Следует отметить, что данные об оптическом индексе типа вод  $m(\varphi, l)$  по классификации В.Н. Пелевина основаны на экспериментальных данных, полученных к тому периоду в разное время и в разных районах, т.е. эти данные районированы, обобщены и по ним построена карта  $m$  для открытых вод Мирового океана. Тем не менее, как видно на рис. 5, широтно-долготный ход  $m(\varphi, l)$  отслеживает всю гидрологическую структуру вод на маршруте. Наиболее чистая вода западнее Гибралтара соответствует 3-й градации с  $1.5 < m < 2.1$ , затем следует Канарский апвеллинг, в максимуме которого достигается 6-я градация с  $m > 5.3$ . Затем

“косой” разрез по маршруту пересекает обширную область чистых вод, градации  $m$  уменьшаются до 1,  $m$  достигает малых значений:  $1.3 < m < 1.5$ . И такая закономерность наблюдается по маршруту и далее.

На рис. 5 нанесены также данные измерений  $m$ , выполненные на маршруте НИС

“Академик Иоффе” с помощью лидара. Сравнение широтного хода  $m(\varphi, l)$  по обобщенным экспериментальным данным и данным измерений в рейсе показывает, что они согласуются по абсолютным значениям, находятся в рамках диапазона изменчивости  $m$  и объективно отражают гидрологическую ситуацию. Эти данные об  $m(\varphi, l)$  примем за базовые данные при нахождении широтного хода других гидрооптических и гидродинамических параметров с помощью комплексного метода.



**Рис. 8.** Трансатлантическая изменчивость концентрации хлорофилла  $c_p$  по маршруту 14-го рейса НИС “Академик Иоффе”, вычисленная с помощью формулы (6):  $\circ$  — по оптическому индексу типа вод  $m$  и  $\text{—}$  — диапазону изменчивости  $m$  — по обобщенным данным классификации В.Н. Пелевина [3, 8];  $\bullet$  — по  $m$ , измеренным в 14-м рейсе с помощью лидара.  $\bullet$  — Широтно-долготный ход  $c_p, l$ , полученный по измерениям с помощью забора проб воды;  $\square$  —  $c_p(\varphi, l)$  по прямым лидарным измерениям в 14-м рейсе НИС “Академик Иоффе”.

#### 7. ОЦЕНКА ТРАНСАТЛАНТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ШИРОТНОГО ХОДА ПРОЗРАЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ (ГЛУБИНЫ ВИДИМОСТИ БЕЛОГО ДИСКА $Z_6$ ) ВДОЛЬ МАРШРУТА 14-ГО РЕЙСА НИС “АКАДЕМИК ИОФФЕ”

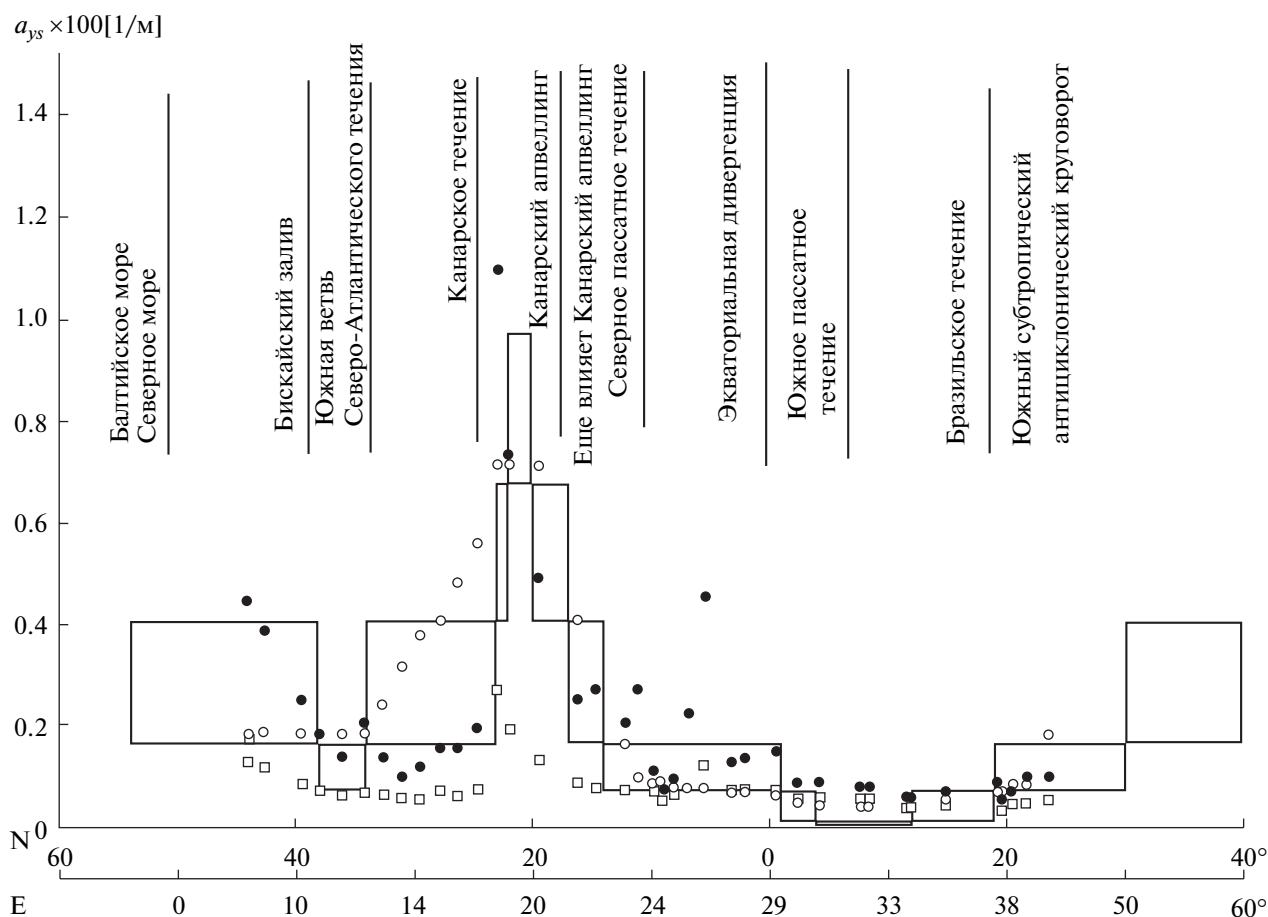
На рис. 6 показан широтно-долготный ход глубины видимости белого диска  $Z_6(\varphi, l)$ , рассчитанный по трем указанным выше вариантам широтного хода  $m(\varphi, 1)$  с помощью формулы (3), а также по данным карты  $Z_6$  [7].

Сравнение широтно-долготного хода, рассчитанного с помощью комплексного метода по трем вариантам, показывает, что абсолютные значения параметра прозрачности  $Z_6$  вдоль всего маршрута 14-го рейса практически совпадают, несмотря на то, что гидрологическая ситуация довольно изменчива. Эти результаты подтверждаются и экспериментальными данными независимого источника — данными карты прозрачности поверхно-

сти воды  $Z_6$  [7]. Полученные результаты расчетов прозрачности по оптическому индексу  $m$  классификации В.Н. Пелевина [3, 6, 8], а также по измеренному в рейсе оптическому индексу типов вод  $m(\varphi, 1)$  оказались близкими, независимо от гидрологической ситуации на маршруте 14-го рейса НИС “Академик Иоффе”. Это свидетельствует об эффективности комплексного метода оценки изменчивости прозрачности  $Z_6(\varphi, l)$  по оптическому индексу типа вод  $m$ .

#### 8. ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРА ЦИРКУЛЯЦИИ $D$ НА ГЛУБИНЕ 100 м (ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ В УСЛОВНЫХ СМ) НА МАРШРУТЕ 14-ГО РЕЙСА НИС “АКАДЕМИК ИОФФЕ”

Аналогично  $Z_6(\varphi, l)$  с помощью формулы (5) рассчитаем параметр циркуляции поверхностных вод Атлантического океана на глубине 100 м (динамическую высоту  $D$  в условных см). Этот пара-



**Рис. 9.** Трансатлантическая изменчивость показателя ослабления света “желтым веществом”  $a_{ys}$  по маршруту 14-го рейса НИС “Академик Иоффе”, вычисленная по формуле (7):  $\circ$  — по оптическому индексу типа вод  $m$ , и  $\square$  — диапазону изменчивости  $m$  — по обобщенным данным классификации В.Н. Пелевина [3, 8];  $\bullet$  — по  $m$ , измеренным в 14-м рейсе с помощью лидара;  $\square$  —  $a_{ys}(\varphi, l)$  по прямым лидарным измерениям в 14-м рейсе НИС “Академик Иоффе”.

метр так же, как и параметр прозрачности  $Z_b(\varphi, l)$ , демонстрирует отрицательную корреляцию с оптическим индексом типа вод  $m$ . На рис. 7 представлены результаты расчета широтно-долготной изменчивости параметра циркуляции  $D$  на маршруте рейса.

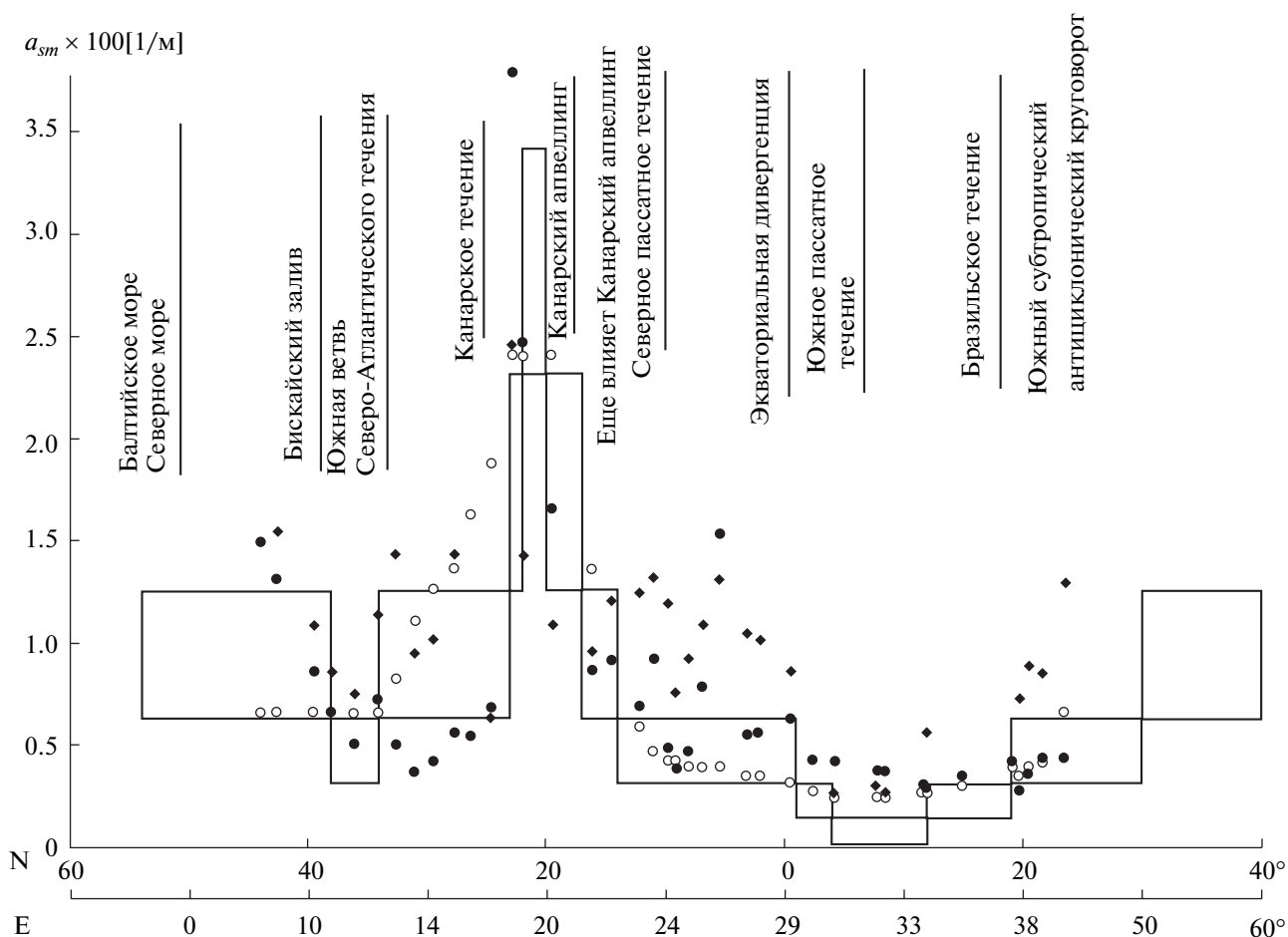
На этом “косом” разрезе значения параметра  $D = 440\text{--}420$  см наблюдаются в области относительно чистых вод с градацией 4, что соответствует по классификации В.Н. Пелевина изменению  $m$  от 2.1 до 2.9. Далее, при пересечении более чистых вод с градацией 3, где оптический индекс типа вод  $m$  изменяется от 1.5 до 2.1, параметр циркуляции  $D$  резко возрастает до  $D \geq 500$  см. Затем, в Канарском апвеллинге градация в максимуме возрастает до 6, при этом  $4.1 < m < 5.3$ , а параметр циркуляции  $D$  уменьшается до 420 см. Далее при пересечении обширной области чистых вод начинается повышение параметра циркуляции  $D$ , а в области очень чистых вод, где индекс  $m = 1.15\text{--}1.3$ , динамическая высота  $D$  превышает значение

500 см. Таким образом, наглядно видно, как оптические параметры связаны с динамикой вод.

Аналогичный ход  $D(\varphi, 1)$  по “косому” разрезу был получен с помощью формулы (5) по измерениям  $m(\varphi, 1)$  в 14-м рейсе лидаром. При сравнении этих результатов с полученными по обобщенным данным об  $m(\varphi, 1)$  показало их полное согласование. Независимые экспериментальные данные о параметре циркуляции  $D$  вдоль маршрута 14-го рейса по данным карты [7] также подтвердили полученные результаты. Таким образом, метод определения параметра циркуляции  $D$  по оптическому индексу типа вод  $m$  оказался довольно эффективным.

#### 9. ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ БИООПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВДОЛЬ МАРШРУТА 14-ГО РЕЙСА НИС “АКАДЕМИК ИОФФЕ”

На рис.8 дана изменчивость  $c_p(\varphi, l)$  концентрации хлорофилла на маршруте 14-го рейса, вычисленная по формуле (6) по обобщенным данным



**Рис. 10.** Трансатлантическая изменчивость показателя ослабления света “звесью”  $a_{sm}$  по маршруту 14-го рейса НИС “Академик Иоффе”, вычисленная с помощью формулы (8):  $\circ$  — по оптическому индексу типа вод  $m$ , и  $\square$  — диапазон изменчивости  $m$  — по обобщенным данным классификации В.Н. Пелевина [3, 8];  $\bullet$  — по  $m$ , измеренному в 14-м рейсе с помощью лидара.  $\bullet$  — Широтно-долготный ход  $a_{sm}(\varphi, l)$ , полученный по измерениям с помощью забора проб воды.

об  $m(\varphi, l)$  [10] и по измерениям  $m(\varphi, l)$  в рейсе с помощью лидара. Кроме трех расчетных вариантов широтно-долготного хода хлорофилла, в этом рейсе были получены и данные новейших измерений. Прежде всего, это — непосредственные измерения концентрации  $c_p(\varphi, l)$  с помощью лидара. Кроме того, одновременно по всему маршруту проводился непосредственный забор проб воды, по которым путем последующей спектральной обработки была определена концентрация хлорофилла [10, 12] (методику измерений см. в работе [23]).

Сравнение расчетных и измеренных концентраций хлорофилла показало, что все данные согласуются между собой, и на протяжении всего маршрута четко “отслеживают” гидрологическую ситуацию. Как видно из рис. 8, отчетливо прослеживается Канарский апвеллинг. По всем данным его положение находится в широтной зоне  $0-34^\circ\text{N}$ . На периферии апвеллинга концентрация хлорофилла мала и резко возрастает, достигая в

центральной части (около  $20-23^\circ\text{N}$ ) максимума концентрации до  $1.4 \text{ мг/м}^3$ .

Сравнение данных о широтно-долготном ходе оптического индекса типа вод  $m$  (рис. 5) и концентрации хлорофилла  $c_p$  (рис. 8) показало, что эти два параметра по расчетным и измеренным новейшим данным имеют высокую корреляционную связь, несмотря на изменчивую гидрологическую ситуацию вдоль маршрута.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности метода оценки концентрации хлорофилла по оптическому параметру — индексу типа вод  $m$ .

Таким же способом, с помощью формул (7) и (8) были проведены аналогичные вычисления широтно-долготного хода показателя поглощения света “желтым веществом”  $a_{ys}$  и показателя поглощения света “взвесью”  $a_{sm}$  (см. рис. 9 и 10). К сожалению, определение параметра  $a_{ys}$  по пробам воды представляет определенные трудности. Методику измерений параметра концентрации

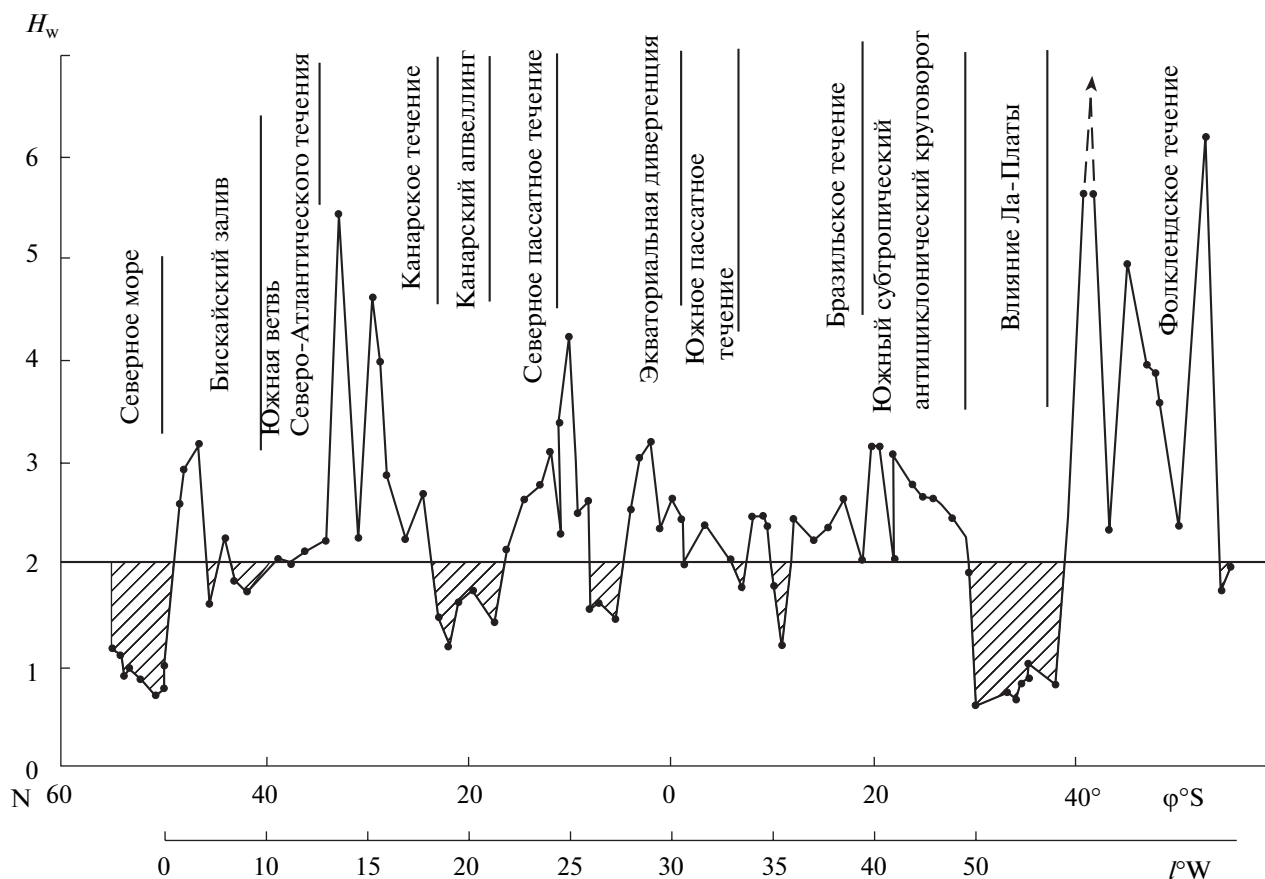


Рис. 11. Трансатлантическая изменчивость индекса “здоровья”  $H_w$  по маршруту 14-го рейса НИС “Академик Иоффе”, полученная по лидарным измерениям биопараметров по формуле (9).  $H_w$  — линия раздела чистых и загрязненных вод. В верхней части рисунка показана гидрологическая ситуация на маршруте.

$a_{sm}$  по пробам воды см. в работе [4]. Все расчетные и измеренные данные этих трех параметров согласуются между собой даже по абсолютным величинам. Следует отметить высокую степень корреляции всех трех параметров между собой, не зависимо от гидрологической ситуации и от способа их получения.

Отметим один важный результат. Все рассчитанные и измеренные разными способами параметры по предлагаемому методу вдоль маршрута 14-го рейса практически находились в пределах их изменчивости, которая оценивалась по диапазону изменчивости оптического индекса типа вод  $m$  (вариант расчета 2).

Таким образом, оценки изменчивости биооптических параметров с помощью комплексного метода эффективны, подтверждаются новейшими данными измерений, выполненных в 14-м рейсе НИС “Академик Иоффе” и этот метод можно использовать для практических приложений.

Отметим, что применение комплексного метода для определения гидрооптических и гидродинамических параметров поверхностных вод для акватории Северной Атлантики [25] также дало положительные результаты: расчеты исследуе-

мых параметров вдоль маршрута 13-го рейса НИС “Академик Иоффе” (долготный разрез по 60°N) с помощью экспресс метода подтвердились данными измерений в рейсе.

#### 10. ТРАНСАТЛАНТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИНДЕКСА “ЗДОРОВЬЯ” ВОД $H_w$

Профессор В.Н. Пелевин для оценки экологического состояния поверхностных вод океана предложил ввести новый параметр — индекс “здоровья” вод  $H_w$ . Определение этого параметра включено в комплексный метод оценки параметров (см. выше) и следует из формулы (9). В.Н. Пелевиным предложен также пограничный критерий удовлетворительного “здоровья” вод, при котором  $H_w = 2$ .

По данным лидарных измерений в 14-м рейсе НИС “Академик Иоффе” был получен широтно-долготный ход индекса “здоровья” вод  $H_w$  вдоль “косого” разреза, пересекающего Атлантический океан с северо-востока на юго-запад (см. маршрут на рис. 1).

На рис. 11 показана изменчивость индекса чистоты вод  $H_w$  вдоль маршрута 14-го судна. Как



видно на рис. 11, при  $H_w > 2$  вода условно чистая в Бискайском заливе, в Канарском течении, в Северо-Пассатном течении, в водах открытого океана, в Фолклендском течении. Напротив, в Северном море, вблизи берегов Испании, в Канарском апвеллинге  $H_w < 2$ . На отрезке маршрута 30–38°W сказывалось влияние Ла-Платы, где резко уменьшается индекс “здоровья вод”  $H_w$ . Особенно резко индекс “здоровья” вод изменялся при подходе к продуктивным водам апвеллинга вблизи восточного побережья Южной Америки. Неоднократно отмечено, что критическое значение  $H_w = 2$  указывает на подобный переход от условно загрязненных к “здоровым” водам. Это, например, видно, когда из вод открытого океана судно входит в Канарское течение или из зоны влияния Ла-Платы входит в Фолклендское течение. Следовательно, критерий  $H_w = 2$  действительно указывает на границу перехода из зоны чистой воды в зону замутненной и наоборот.

Таким образом, индекс “здоровья” вод  $H_w$ , введенный В.Н. Пелевиным, является достаточно информативным для экспрессной оценки экологического состояния поверхностных вод океана, а также неплохо отслеживает гидрологическую ситуацию.

Авторы посвящают эту работу профессору В.Н. Пелевину. Он является одним из основоположников биогидрооптики — нового самостоятельного научного направления в океанологии. Помимо этого он создал научное теоретическое и экспериментальное направление — изучение формирования оптических свойств среды под влиянием гидродинамических процессов для акваторий Мирового океана. В рамках этого направления под его руководством, в частности, была создана экспериментальная база для измерений комплекса гидрооптических и гидробиологических параметров в натурных условиях открытого океана — серия судовых флуоресцентных лидаров,  $\rho$ -метров и других гидрооптических приборов, с успехом применяющихся в разных экспедициях в Мировом океане. По инициативе В.Н. Пелевина и при его непосредственном участии и руководстве в течение 2002–2005 гг. были проведены биогидрооптические работы в шести трансатлантических рейсах на НИС “Академик Иоффе” в рамках федерального Проекта “Меридиан”. Авторы выражают благодарность Г.Г. Карлсену, А.Б. Грабовскому и В.А. Матюшенко за помощь в работе.

## ВЫВОДЫ

На основе анализа большого объема экспериментальных данных о динамических параметрах и комплекса гидрооптических и гидробиологиче-

ских характеристик поверхностных вод Атлантического океана получены следующие результаты:

1. На конкретном экспериментальном материале показано, как оптические свойства поверхностных вод открытого океана формируются под влиянием главных течений Атлантического океана и создаваемых ими зон дивергенции и конвергенции.

2. Структуры полей поверхностных течений, оптического индекса типа вод  $t$ , относительной прозрачности (глубины видимости белого диска  $Z_6$ ) и динамической высоты  $p$  на глубине 100 м, характеризующей циркуляцию поверхностных вод океана, оказались подобными.

3. На основе установленных связей параметра  $t$  с параметрами:  $Z_6$ ,  $D$ ,  $c_p$ ,  $a_{ys}$ ,  $a_{sm}$ ,  $H_w$  [9–11] предложен метод экспрессной оценки этих параметров поверхностных вод в океане по одному измеряемому параметру — оптическому индексу типа вод  $t$ .

4. С помощью комплексного метода была рассчитана изменчивость параметров поверхностных вод  $Z_6$ ,  $D$ ,  $c_p$ ,  $a_{ys}$ ,  $a_{sm}$ ,  $H_w$  вдоль маршрута 14-го рейса ВИС “Академик Иоффе”.

5. Расчеты трансатлантической изменчивости 6-ти параметров проводились по данным об  $t(\varphi, 1)$  в соответствии с указанными выше вариантами 1–3. Кроме того, результаты расчетов сравнивались с данными по картам  $Z_b$  и  $D$  [7], а также с данными измерений параметров в 14-м рейсе НИС “Академик Иоффе”. В итоге, все способы оценок искомых параметров (как расчетных, так и измеренных) показали близкие результаты как по абсолютным значениям, так и по их связи с гидрологической ситуацией вдоль маршрута судна.

6. Предложенный комплексный метод оценки гидрооптических и гидробиологических параметров, а также параметра циркуляции поверхностных вод, подтвержденный новейшими измерениями и более ранними классическими измерениями, имеет практическое значение.

7. Классификация типов поверхностных вод Мирового океана, согласно В.Н. Пелевину и В.А. Рутковской [3] по оптическому индексу типа вод  $t$  имеет большую практическую значимость.

8. Индекс “здоровья вод”  $H_w$  является информативным параметром для экспрессной оценки экологического состояния вод.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерлов Н. Г. Оптическая океанография. М: Мир, 1970. 224 с.
2. Оптика океана / Под ред. А.С. Мониной. М.: Наука, 1983. 371 с.

3. *Пелевин В.Н., Рутковская В.А.* О классификации океанских вод по спектральному ослаблению солнечного света // *Океанология*. 1977. Т. 17. № 1. С. 50–54.
4. *Шифрин. К.С.* Оптика океана // *Океанология*. М.: Наука, 1978. С. 366–367.
5. *Рутковская В.А., Пелевин В.Н.* О проникновении фотосинтетически активной солнечной радиации в воды Атлантического океана // *Океанология*. 1982. Т. 22. № 3. С. 398–403.
6. *Пелевин В.Н., Рутковская В.А.* Цвет океана и оптическая классификация вод // *Оптика моря и атмосферы* / Под. Ред. К.С. Шифрина. М.: Изд-во ГОИ, 1988. С. 304–305.
7. Атлас океанов. Атлантический и Индийский океаны. Министерство обороны СССР. Военно-морской флот. 1977. 306 с.
8. *Пелевин В.Н., Копрова Л.И.* О связи между циркуляцией поверхностных вод Атлантики и их оптическими характеристиками // *Оптика атмосферы и океана*. 2004. Т. 17. № 8. С. 666–670.
9. *Пелевин В.Н., Копрова Л.И.* О зависимости между глубиной видимости белого диска, оптическим индексом типа вод и циркуляцией вод Атлантического океана. // *Оптика атмосферы и океана*. 2004. Т. 17. № 9. С. 759–763.
10. *Pelevin V.N., Rostovtseva V.* Modelling of bio-optical parameters of open ocean waters // *Oceanologia*. 2007. № 43. № 4. Р. 469–477.
11. *Шулейкин В.В.* Физика моря. М.: Наука, 1968. 1083 с.
12. Комплексные исследования Мирового океана. Проект “Меридиан”. Ч. 1. Атлантический океан. / Под ред. М. В. Флинта. М.: Наука, 2008. 334 с.
13. *Коновалов Б.В., Пелевин В.Н., Матюшенко В.А. и др.* Хлорофилл и растворенное “желтое вещество” в поверхностных водах Атлантики // *Комплексные исследования Мирового океана. Проект “Меридиан”. Ч. 1. Атлантический океан* / Под ред. М.В. Флинта. М.: Наука, 2008. С. 205–215.
14. *Океанология*. Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана / Под ред. В.М. Каменковича, А.С. Мони-на. М.: Наука, 1979. 456 с.
15. *Пелевин В.Н.* Оптические явления на поверхности океана / Под ред. А.С. Мони-на, В.П. Красицкого. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 375 с.
16. *Пелевин В.Н., Ростовцева В.В.* Определение концентрации примесей в морской воде по спектру восходящего солнечного излучения // *Оптика атмосферы и океана*. 1997. Т. 9. № 12. С. 1745–1751.
17. *Пелевин В.Н., Ростовцева В.В.* Оценка концентрации светопоглощающих и светорассеивающих веществ в различного типа вод открытого океана // *Оптика атмосферы и океана*. 1997. Т. 10. № 9. С. 989–995.
18. *Оптика океана* / Под ред. К.С. Шифрина. М.: На-ука, 1983. Т. 2. 236 с.
19. Атлас океанов. Тихий океан. Министерство оборо-ны СССР. Военно-морской флот. 1974. 302 с.
20. *Пелевин В.Н., Рутковская В.А.* Об ослаблении фо-тосинтетически активной солнечной радиации в водах Тихого океана // *Океанология*. 1978. Т. 18. № 4. С. 619–625.
21. *Очаковский Ю.Е., Пелевин В.Н., Карлсен Г.Г. и др.* Распространение естественного излучения в океа-не // *Гидрофизические и гидрооптические иссле-дования в Атлантическом и Тихом океанах* М.: На-ука, 1974. С. 166–190.
22. *Айбулатов Н.А., Завьялов П.О., Пелевин В.В.* Осо-бенности гидрофизического самоочищения рос-сийской прибрежной зоны Черного моря близ устьев рек // *Геоэкология*. 2008. № 4. С. 301–310.
23. ГОСТ 17.1.04.02-90. “Вода. Методика спектрофо-тометрического определения хлорофилла а”. М.: Изд-во стандартов Госкомприроды, 1990. 16 с.
24. *Коновалов Б.В.* Определение показателя поглоще-ния света компонентами сестона по спектру по-глощения его осадка на мембранном фильтре // *Океанология*. 1992. Т. 32. Вып. 3. С. 588–593.
25. *Пелевин В.Н., Копрова Л.И., Хлебников Д.В.* Гидро-оптические и динамические параметры поверх-ностных вод Северной Атлантики // *Арктика и Антарктика*. М: Наука, 2008. 6(40). С. 76–86.