

ОПТИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

УДК 551.463.5

А.А. Кумейша, А.П. Иванов, С.Л. Ощепков, О.В. Дубовик, Т.В. Лапенко, В.Д. Козлов, Н.А. Кумейша

ДИНАМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В ОКЕАНСКИХ ВОДАХ И МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗВЕСИ ПО ДАННЫМ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрены возможности диагностики динамических структур разного масштаба в океане по данным контактных гидрооптических измерений. Описан метод восстановления функций распределения органических и минеральных частиц водной взвеси по размерам из измерений угловых зависимостей показателя направленного рассеяния в диапазоне углов $1-170^\circ$ при $\lambda = 525$ нм, и приведены результаты обработки натуральных данных, полученных в водах белорусских озер.

Процесс накопления фундаментальных знаний о геофизических характеристиках вод океана и суши, а также о биологических параметрах водных биоценозов чрезвычайно длителен и трудоемок. Сдерживающим фактором здесь во многом является ограниченный арсенал возможностей стандартных гидрологических и биологических методов исследований. Вместе с тем большие перспективы имеют сегодня достаточно нетрадиционные оптические методы контроля вод, способные не только ускорить процесс получения информации, но и расширить ее содержание.

Оптические свойства вод, как известно, чрезвычайно сильно зависят от малейших изменений в составе водной взвеси, которая, в свою очередь, также чутко реагирует на любые изменения внешних гидрофизических условий. Таким образом, особенности оптических свойств могут служить индикаторами гидродинамических структур различного масштаба – от макроциркуляционных океанских систем до мелких вихревых образований, часто возникающих во фронтальных зонах.

Возможность уточнения границ распространения смежных водных масс в океане и разделяющих их течений по особенностям профилей показателя ослабления $\epsilon(H)$ иллюстрирует рис. 1. Исследования выполнялись в 1982–1986 гг. в Тихом океане на квазимеридиональном разрезе вдоль 160° в.д. между 52 и 36° с.ш. На рис. 1, *a* приведена существующая здесь структура поля температуры, согласно которой зона I соответствует области локализации субполярных вод; IV – субтропических и II, III –разделяющих их Северотихоокеанского течения с двухфронтальной структурой [1]. Типичные для выделенных зон профили показателя ослабления, а также вертикальные распределения температуры и солёности схематично изображены на рис. 1, *b–d*. Как видно, переход от субполярных (зона I) к субтропическим (IV) водам происходит через две достаточно устойчивые промежуточные оптические градации (рис. 1, *b, c*), свойственные четко выраженным областям II и III (рис. 1, *a*) субполярного фронта. В области II, где начинается опускание холодных субполярных вод, вместе с ними заглубляется и биологическая взвесь, обнаруживая максимумы на $10-20$ м, подпираемые снизу, как и в зоне I, сезонным термоклином (хотя и несколько более размытым). В зоне III холодные воды опускаются еще ниже; соответственно заглубляются до $60-75$ м и максимумы взвеси, оказываясь ниже термоклина. Любопытно отметить, что здесь максимумы взвеси залегают на глубинах, близких к горизонтам экстремумов солёности и <отслеживают> их (рис. 1, *e*). Таким образом, анализ только вертикальной структуры прозрачности позволяет делать суждения о принадлежности вод к той или иной водной массе или характерной части фронтальной зоны (течения), а также оценивать глубины максимальных градиентов гидрологических характеристик.

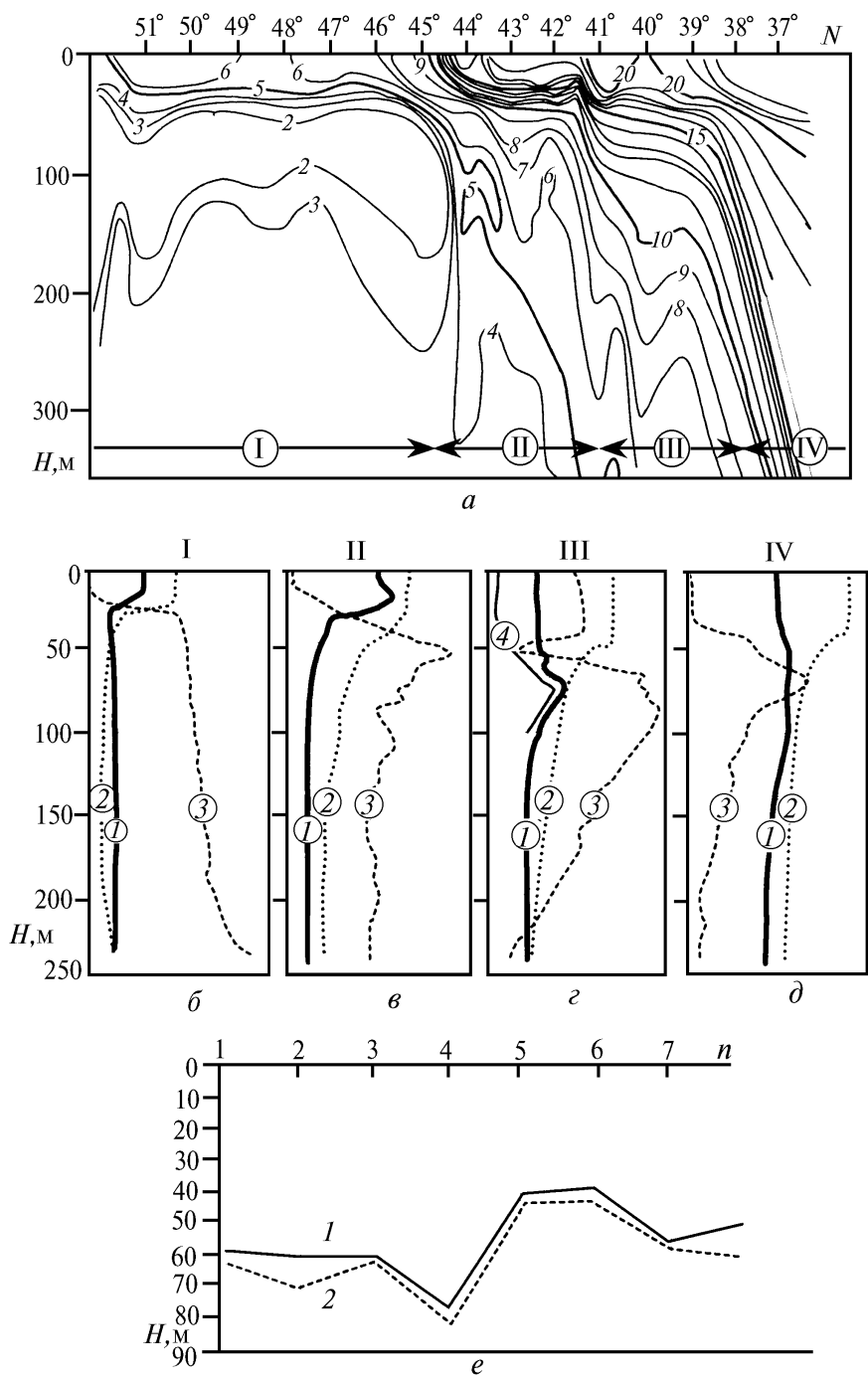


Рис. 1. Результаты исследований субполярного фронта в северо-западной части Тихого океана. А – карта изолиний температуры на разрезе; б–д – типичные распределения показателя ослабления (1), температуры (2) и солёности (3) на участках разреза, 4 – вертикальное распределение хлорофилла (а) в зоне III; е – глубины залегания максимумов показателя ослабления (1) и солёности (2) на станциях разреза в зоне III

В другом примере идентификации водных масс в океане использованы особенности угловых зависимостей светорассеяния, измеренные лабораторным индикатрисометром [2] в отобранных с поверхности пробах воды. Работы выполнялись на обширном полигоне в Гренландском и Норвежском морях. Как видно из рис. 2, где проведены изолинии солёности и у соответствующих станций проставлена температура воды, в районе работ четко прослеживалось теплое Западно-Шпицбергенское (центр рисунка) и холодные – Гренландское и Медвежинское течения (левая и правая периферии). Естественно было бы ожидать, что этим водам

Динамические структуры в океанских водах

разного происхождения присущи и устоявшиеся биоценозы, а значит, и свои специфические особенности индикатрис. В качестве индикатора особенностей индикатрис рассеяния здесь было выбрано отношение показателей направленного рассеяния при малых (3°) и больших (45°) углах, характеризующее, по сути, отношение концентраций крупной и мелкой фракций взвеси. Анализ показал, что более теплые и соленые воды Западно-Шпицбергенского течения обнаруживают высокие значения данного параметра ($2 \cdot 10^3 \div 3,3 \cdot 10^3$; кружки черного цвета – станции), в то время как воды холодных течений – низкие ($0,63 \cdot 10^3 \div 1,1 \cdot 10^3$; светлые кружки). Промежуточные значения (серая штриховка) свойственны водам пограничных областей. Таким образом, и здесь оптическая информация оказывается весьма полезной для уточнения динамики водных масс.

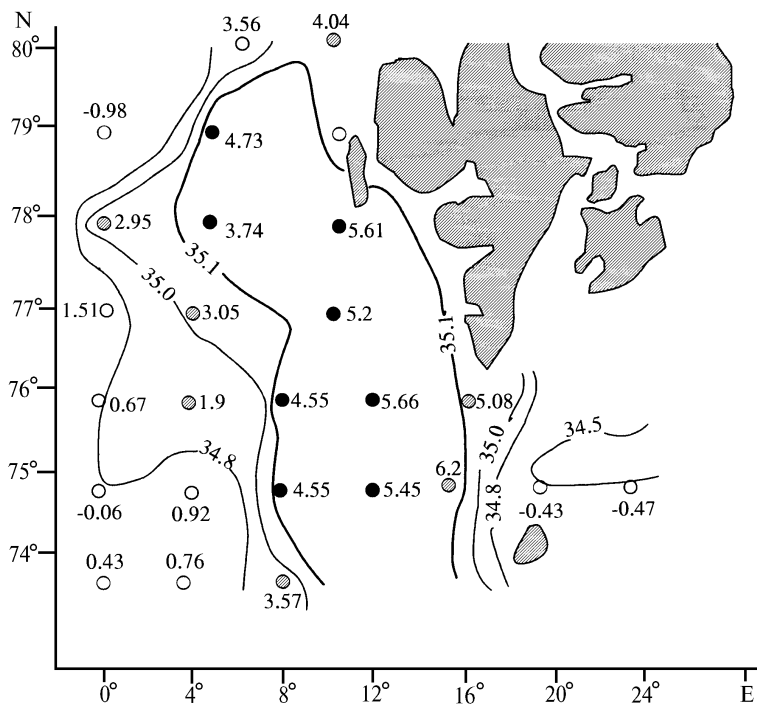


Рис. 2. Результаты исследований динамики водных масс в Гренландском и Норвежском морях

Перейдем к обсуждению возможностей диагностики более мелких синоптических динамических структур. Локальные отклонения оптических свойств среды от фоновых (естественных для данной водной акватории) могут свидетельствовать о наличии локальных аномалий внешних гидрофизических условий. Например, в зонах синоптических циклонических вихрей, где происходит подъем глубинных богатых биогенными элементами вод, наблюдается более интенсивное по сравнению с фоновыми окружающими развитие биологической взвеси, проявляющееся через повышенные значения характеристик рассеяния (ослабления) и специфический вид профилей прозрачности. В зонах же локализации антициклонических вихрей, которым присущи нисходящие движения вод, происходит относительное угнетение развития фитопланктона с соответствующим изменением оптических свойств вод.

В одной из наших работ [3] наличие и направленность синоптических вихрей диагностировались по особенностям вертикальных профилей показателя ослабления $\epsilon(H)$ на длине волны 530 нм. Благодаря показанной там возможности малопараметрического представления профилей (за счет применения аппарата эмпирических ортогональных составляющих), их основные черты (особенности) удалось охарактеризовать одной величиной – первым коэффициентом разложения по собственным векторам ковариационной матрицы и использовать его численные значения в качестве индикатора типа вод. Карта изолиний первого коэффициента разложения представлена на рис. 3, а; распределение станций по его величине – на рис. 3, б. Проведенная группировка профилей прозрачности по величине первого коэффициента разложения на обширном полигоне в Тихом океане позволила четко идентифицировать вихревые

структуры циклонической и антициклонической направленности, возникающие обычно на границе водораздела двух течений (для сравнения на рис. 3, в дана карта динамических высот по результатам гидрологической съемки).

Оптические методы в ряде случаев весьма эффективны и при диагностике придонных потоков, когда последние не отличаются от вышележащих вод по гидрологическим характеристикам, но проявляют себя через пониженную прозрачность воды за счет взмучивания осадков. Именно такая ситуация наблюдалась во время экспедиционных работ в Норвежском море, где были обнаружены резкие придонные нефелоидные слои (рис. 4). Последующие оптические исследования в этом же районе, выполненные по лучевым пересекающимся в одной точке разрезам, позволили уточнить и направление придонного течения.

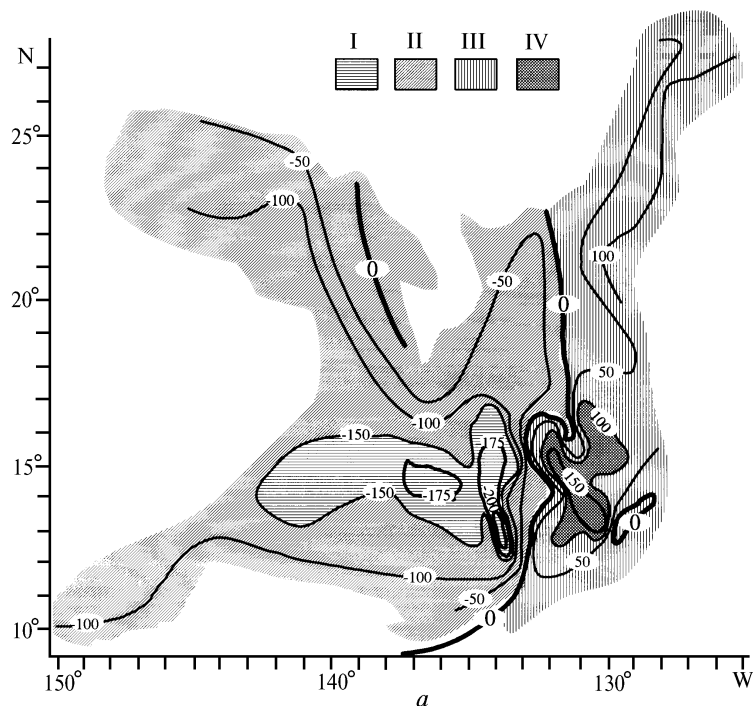


Рис. 3. Результаты исследований синоптических вихревых структур в центральной части тропической зоны Тихого океана: а – карта изолиний первого коэффициента разложения α_1 ; б – распределение числа n станций по величине первого коэффициента разложения α_1 (1 – гистограмма, 2 – сглаженная кривая в скользящем окне с утроенным шагом); римские цифры I–IV обозначают группы станций (вод), выделенные по величине первого коэффициента разложения; в – карта динамических высот на горизонте 50 м по данным гидрологической съемки для центральной части района работ

Перейдем теперь к рассмотрению возможностей определения микро-физических характеристик взвеси по данным оптических измерений. Как известно, оптические свойства вод, количественно характеризуют процессы поглощения и рассеяния света компонентами водных экосистем, аккумулируют в себе практически всю информацию об этих компонентах. Таким образом, «обращая» оптические данные, можно в принципе определить концентрацию органической фракции и содержание субмикронных минеральных частиц, функцию распределения взвеси по размерам, концентрации хлорофилла и других пигментов, концентрацию растворенного органического вещества. Здесь мы рассмотрим лишь задачу определения спектра размеров частиц по данным измерений угловых зависимостей показателя направленного рассеяния $\sigma(\gamma)$ на одной длине волны. Приведенные далее примеры относятся к обработке экспериментальных данных, полученных в водах типичных белорусских озер, однако развитые методы в полной мере применимы и для интерпретации океанских измерений.

В нашем подходе предполагается, что природный гидрозоль может быть рассмотрен в целом как двухкомпонентная система, содержащая органические (фитопланктон + детрит) и минеральные сферические частицы, различающиеся как размерами r , так и комплексными показателями преломления m ($r_{org} \geq 0,5 \mu$; $m_{org} = 1,05-0,0004 i$ и $r_{min} \leq 1 \mu$; $m_{min} = 1,15-0,0001 i$).

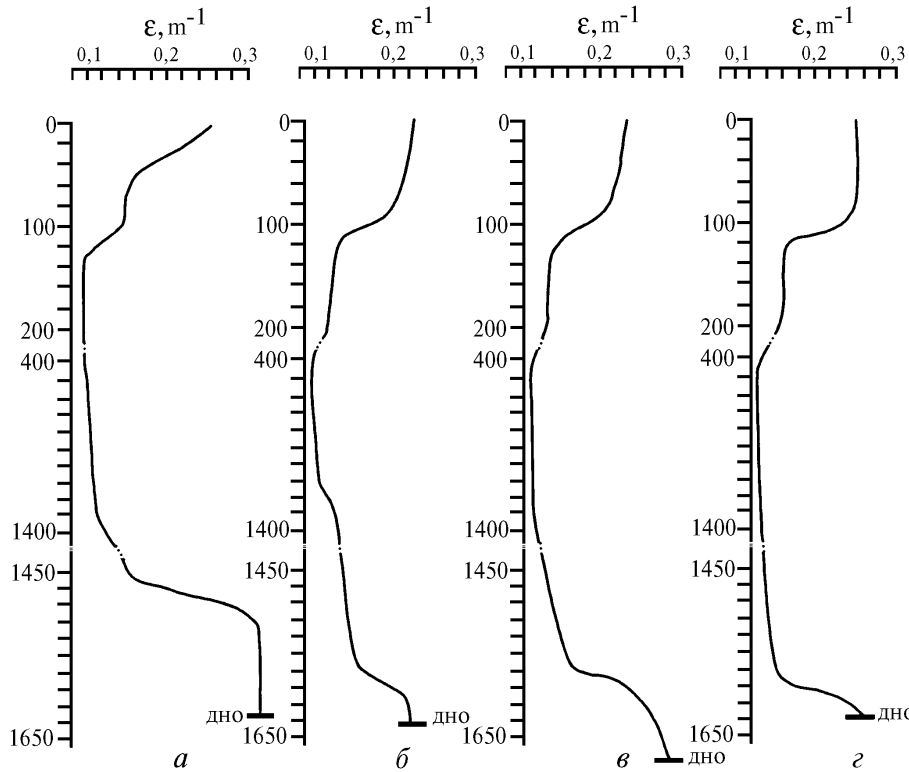


Рис. 4. Вертикальная структура показателя ослабления $\varepsilon(H)$ на четырех станциях широтного разреза в Норвежском море. Расстояние между точками a – $г$ примерно 7 миль

Известно, что $\sigma(\gamma)$ можно представить в виде суммы интегралов:

$$\sigma(\gamma) = \sum_{n=1}^2 \sigma'_n(kr, m_n, \gamma) \frac{V_n(r)}{(4/3) \pi r^3} dr, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$; λ – длина волны в дисперсионной среде; $V_n(r)$ – функции распределения органических ($n = 1$) и минеральных ($n = 2$) частиц по объемам; $\sigma'_n(kr, m_n, \gamma)$ – дифференциальное сечение рассеяния одной частицы n -й компоненты; γ – угол рассеяния. Величина $\sigma'(kr, m, \gamma)$ может быть рассчитана по формулам Ми.

При численном решении формула (1) сводится к линейной алгебраической системе посредством кусочно-линейной аппроксимации искомых $V_n(r)$. Полученная линейная система может быть обращена развитым нами и описанным ранее оригинальным методом [4]. Эта процедура для одноволновых $\sigma(\gamma)$ состоит в следующем:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{pmatrix}^{q+1} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{pmatrix}^q - H^q [(U_1^q | U_2^q)^T (\mathbf{f}^q - \mathbf{f}^*) + \begin{pmatrix} g_1 \Omega_{p_1} & | & 0 \\ \hline 0 & | & g_2 \Omega_{p_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{pmatrix}^q], \quad (2)$$

где индекс «Т» обозначает транспонированную матрицу; диагональная матрица H^q состоит из элементов

$$H_{ii}^q = \left(\sum_{k=1}^{p_1+p_2} \left\{ (U_1^q | U_2^q)^T (U_1^q | U_2^q) + \begin{pmatrix} g_1 \Omega_{p_1} & | & 0 \\ \hline 0 & | & g_2 \Omega_{p_2} \end{pmatrix} \right\}_{ik} \right)^{-1}; \quad (3)$$

а матрица U_n^q – из элементов

$$\{U_n^q\}_{j_i} = \frac{\partial \ln \sigma_j}{\partial a_{i_n}} \left(\frac{\mathbf{a}_1}{\mathbf{a}_2} \right)^q.$$

В приведенных соотношениях \mathbf{f}^* и \mathbf{a} – векторы-столбцы логарифмов измеренных ($\sigma(\gamma)$) и искомым ($V_n(r)$) величин; индексы « j », « i » обозначают порядковые номера дискретных углов рассеяния и узлов аппроксимации $V_n(r)$ для органических ($i_1 = 1, 2, \dots, p_1$) и минеральных ($i_2 = 1, 2, \dots, p_2$) частиц; q – номер итерации; Ω_{p_n} – сглаживающая матрица, используемая для ограничения вариаций вторых производных спектра размеров n -й компоненты. Параметры регуляризации g_n были подобраны в численных экспериментах.

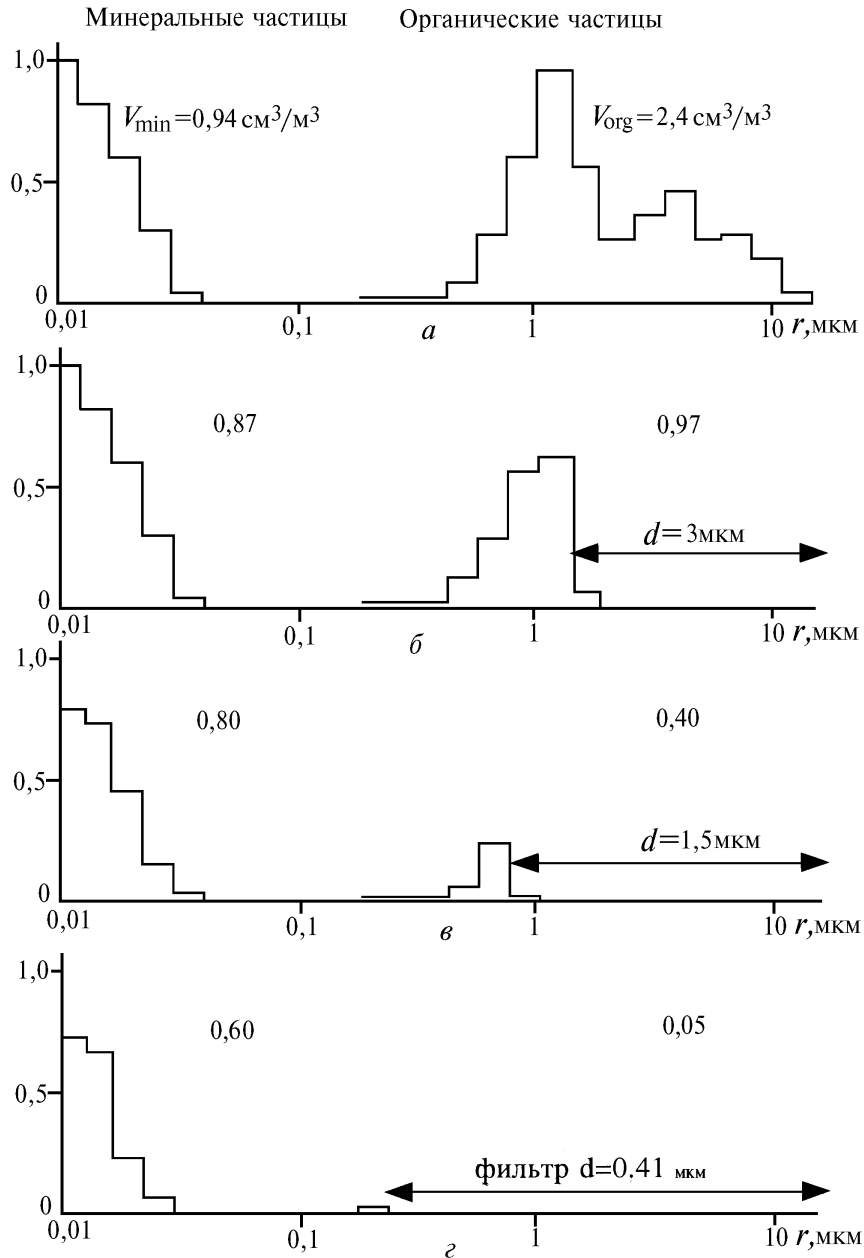


Рис. 5. Восстановленные функции распределения объемных концентраций органических и минеральных частиц для исходной пробы озерной воды (a) и трех фильтратов (b – d)

Для проверки достоверности данных, полученных методом обращения $\sigma(\gamma)$, был поставлен специальный модельный эксперимент. Его суть заключалась в измерении угловых зависимостей светорассеяния исходной пробы озерной воды и трех фильтратов (полученных последовательным пропусканием исходной пробы через фильтры с размерами пор 3; 1,5 и 0,41 мкм) с последующим восстановлением спектра размеров частиц. Полученные результаты (объемные концентрации соответствующих размерных групп) представлены на рис. 5.

Как видно из рисунка, если в исходной пробе суммарный объем крупных частиц составлял 2,4 мл/м³, то после первого фильтра уже не наблюдалось частиц крупнее 3 мкм (эффект «отсечения» хорошо виден на рисунке), вследствие чего объемное содержание крупной фракции снизилось более чем в два раза; после второго фильтра – еще в два и третий фильтр задержал практически всю крупную фракцию. Что касается мелкой взвеси, то небольшое изменение ее концентрации при фильтровании связано с естественным забиванием пор фильтров.

Развитые математические алгоритмы были использованы для восстановления спектров размеров частиц в водах типичных белорусских озер при массовых измерениях в весенне-летний период. По полученным данным построены средние (нормированные на суммарные объемы соответствующих фракций) функции распределения объемов частиц по размерам (рис. 6). Как видно, природная изменчивость (указанная стандартными отклонениями) невелика; преобладающий радиус органических частиц составлял порядка 2 м, что было подтверждено прямыми микроскопическими измерениями.

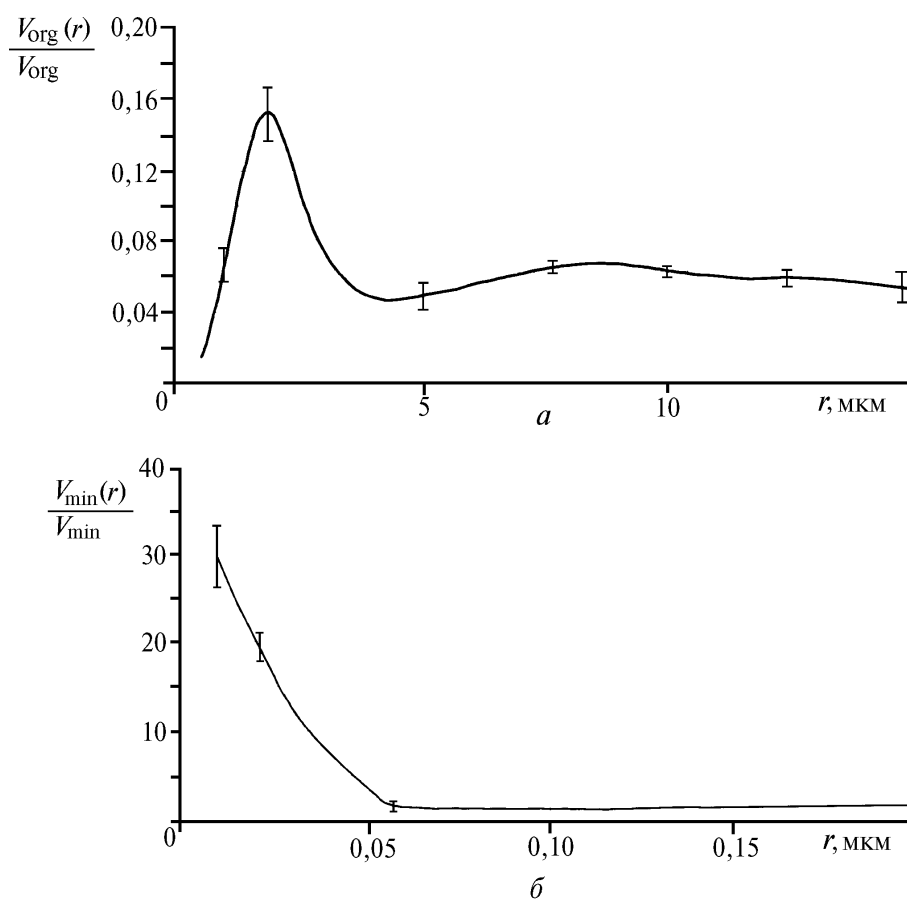


Рис. 6. Типичные для открытых вод белорусских озер функции распределения объемов частиц по размерам (нормированные на суммарные объемные концентрации соответствующих фракций) в весенне-летний период

В заключение считаем своим долгом выразить благодарность В.М. Фортусу, Г.Ю. Косолапкину и М.М. Королю за помощь в проведении экспериментальных измерений на отдельных этапах работ, а авторы А.А. Кумейша и А.П. Иванов благодарят фонд Сороса за поддержку индивидуальными грантами гидрооптической тематики.

1. Морешкин К.В., Сабинин К.Д. // Океанология. 1984. Т. 24. N 3. С. 421–426.
2. Гаврилович А.В., Иванов А.П. Установка для комплексного исследования оптических характеристик светорассеивающих сред. Минск, 1975. 19 с. (Препринт / Институт физики АН БССР).
3. Кумейша А.А. // Океанология. 1992. Т. 32. N 1. С. 22–27.
4. Дубовик О.В., Ощепков С.Л., Лапенко Т.В. // Известия РАН. Серия ФАО. 1994. Т. 30. N 1. С. 106–113.

Институт физики АН
республики Беларусь

Поступила в редакцию
17 мая 1994 г.

A.A. Kumeysya, A.P. Ivanov, S.L. Oshchepkov, O.V. Dubovik,
T.V. Laryonok, V.D. Kozlov, N.A. Kumeysya. **Dynamic Structures in Ocean Waters and
Hydrosols Microphysical Characteristics from Hydrooptical Measurements.**

The possibilities of the hydrooptical measurements to determine the dynamic structures of different scales in ocean are discussed. The inversion method to obtain the size distributions of organic and mineral water particles from volume scattering functions measurements in angular range 1 to 170° at $\lambda = 525$ nm as well as the results of processing of in situ data received for Belarus' lakes are described.