

Е.А. Агафонов, А.С. Кукушкин, Ю.А. Прохоренко

## Характерные значения вертикального распределения показателя ослабления света в верхнем слое глубоководной части Черного моря

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь*

Поступила в редакцию 19.09.2001 г.

Предлагаются семь характеристик, оптимально описывающих вертикальное распределение показателя ослабления света в верхнем слое глубоководной части Черного моря и отражающих связь с формирующими это распределение гидрологическими, химическими, биологическими и динамическими процессами в море. Приводятся статистические оценки и карты горизонтальных распределений этих характеристик за многолетний период стабильного состояния гидрооптической ситуации в Черном море.

Первичная гидрооптическая характеристика – показатель ослабления света в воде (ПОС,  $\epsilon$ ) – является одной из наиболее информативных океанологических характеристик. Структура ПОС в основном определяется содержанием в воде взвеси (органической и минеральной) и растворенного органического вещества, распределение которых, в свою очередь, зависит от различных гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов в морской среде.

Специфические условия формирования гидрологической, химической и оптической структуры вод в Черном море, обусловленные слабым водообменом между глубинными и поверхностными слоями и устойчивой циклонической системой течений, определяют достаточно стабильную их вертикальную структуру [1]. Поэтому особое значение приобретает выбор характеристик ПОС, оптимально описывающих его вертикальное распределение в верхнем слое глубоководной части моря.

Существующие с начала 60-х гг. прошлого столетия материалы инструментальных наблюдений ПОС до недавнего времени были разрозненными и трудносопоставимыми, так как получены эпизодически в отдельных участках моря с помощью различных модификаций прозрачномеров и методов обработки [1–4]. Это не позволяло эффективно использовать преимущества гидрооптических исследований (большой объем информации и оперативность ее получения, связь распределений прозрачности с различными процессами в морской воде и другие) и проводить их обобщение для построения карт распределений ПОС по всей акватории глубоководной части моря.

Г.Г. Неуйминым [1] на основе анализа многолетних инструментальных наблюдений прозрачности вод, полученных в 60–70 гг., впервые было выделено и описано четыре оптических структурных слоя, которым соответствовали слои с определенными гидрологическими, химическими и биологическими свойствами. Это поверхностный мутный слой, расположенный в эвфотической зоне моря (от поверхности до глубин 60–80 м); промежуточный слой наиболее прозрачных вод у нижней границы холодного промежуточного слоя (80–130 м); пограничный мутный слой на стыке кислородной и сероводородной зон моря (120–200 м) и глубинный слой, охватывающий сероводородную

зону (глубже 200 м). Результаты этих исследований с учетом новых данных об оптической структуре вод и закономерностях ее формирования, появившихся в период до середины 80-х гг., были уточнены, расширены и обобщены в работе [2].

Впервые набор минимального числа характерных значений ПОС, оптимально отражающих особенности его вертикального распределения и связанных с формирующими это распределение гидрологическими, химическими, биологическими и динамическими характеристиками вод в глубоководной части Черного моря, был предложен на конференции в Севастополе в 1986 г. [5]. Там же были приведены карты горизонтальных распределений некоторых из них по всей глубоководной части моря, построенные по осредненным многолетним данным оптических наблюдений.

Обоснование выбора этих характеристик ПОС и краткое их описание приводятся ниже.

1.  $\epsilon_0$ ,  $\text{м}^{-1}$  – отсчет ПОС на глубине 10 м. На этой глубине практически исключается влияние на формирование поля прозрачности мелкомасштабных плотностных неоднородностей, образующихся в летний период при штילевой погоде из-за суточного прогрева поверхностных вод. Здесь также значительно снижено влияние корпуса судна, разрушающего стратификацию ПОС в поверхностном слое моря, и неизбежных загрязнений, попадающих в море на станции с судна. Величина ПОС на этом горизонте определяется, в основном, концентрацией фитопланктона и продуктов его жизнедеятельности. Выбор значений ПОС на горизонте 10 м связан также с возможностью качественно привязать к ним наблюдаемые визуально оптические свойства вод в поверхностном слое моря – относительную прозрачность и цвет моря, определяемый по стандартной шкале цветности.

2.  $\epsilon_{\text{min}}$ ,  $\text{м}^{-1}$  – отсчет минимального значения ПОС на вертикальном профиле. Обычно это слой повышенной прозрачности, который располагается под нижней границей холодного промежуточного слоя (ХПС) и наблюдается по всему морю. Низкие значения ПОС в этом слое объясняются тем, что ХПС формируется, в основном, зимой, когда воды бедны биологической жизнью. В дальнейшем с опусканием ниже фотической зоны воды сохраняют свои оптические свойства

(высокую прозрачность), а развитие фитопланктона в них из-за низкой температуры практически не происходит.

3.  $\epsilon_{\text{cp}}$ ,  $\text{м}^{-1}$  – среднее значение отсчетов ПОС на глубинах кратных 10 м, в слое от поверхности моря до глубины залегания минимального значения. Такая дискретность отсчетов ПОС соответствует принятой практике представления экспедиционных материалов в виде табличных данных. ПОС в этом слое с глубиной, как правило, понижается. В то же время на различных глубинах в летний период часто наблюдаются слои мутности, приуроченные к слоям со скачками плотности (сезонный термоклин, галоклин и др.). Характерных особенностей положения этих слоев мутности не наблюдается. Величина  $\epsilon_{\text{cp}}$  позволяет качественно оценить количество взвешенного вещества в кислородной зоне моря и характеризует замутненность вод преимущественно взвесью биологического происхождения или, иными словами, уровень биологической продуктивности кислородной зоны моря.

4.  $\epsilon_{\text{max}}$ ,  $\text{м}^{-1}$  – отсчет максимального значения ПОС в глубинном слое мутности (ГСМ). Расположен вблизи верхней границы сероводородной зоны. По величине  $\epsilon_{\text{max}}$  бывает соизмерим со значением ПОС вблизи поверхности, а иногда и превосходит его. Обычно в ГСМ наблюдается один максимум, но иногда – несколько. Из них верхний максимум обычно имеет наибольшее значение и принимается за  $\epsilon_{\text{max}}$ .

О механизме возникновения и существования ГСМ до настоящего времени нет единого мнения. Гидрохимическими анализами обнаружено в этом слое значительное увеличение содержания органического углерода в сравнении с выше- и нижележащими слоями. Подробные исследования природы взвеси в этом слое показали, что взвесь состоит, в основном, из мертвого фитопланктона, остатков организмов и фекалий зоопланктона.

Отсутствие в ГСМ скачков плотности, на которых могут скапливаться частицы, осаждающиеся из верхней эвфотической зоны, и расположение этого слоя в зоне существования кислорода и сероводорода свидетельствуют о его связи с протекающими здесь геохимическими процессами. Согласно одной из гипотез образование ГСМ является результатом жизнедеятельности разновидностей тионовых бактерий, окисляющих соединения серы. При этом образуются сульфаты и молекулярная сера, что приводит к росту ПОС.

Последние исследования, проведенные в МГИ НАН Украины, показывают, что в ГСМ не всегда обнаруживается молекулярная сера. В ряде случаев в нем находили в значительном количестве двуокись марганца. Иногда же нет ни молекулярной серы, ни двуокиси марганца, а наблюдается повышенная концентрация органической взвеси.

5.  $Z_{\epsilon_{\text{min}}}$ , м – глубина залегания  $\epsilon_{\text{min}}$ .

6.  $Z_{\epsilon_{\text{max}}}$ , м – глубина залегания  $\epsilon_{\text{max}}$ .

Пространственная изменчивость этих параметров связана с особенностями циркуляции черноморских вод. Вследствие циклонического движения вод в Черном море на его периферии, где проходит Основное Черноморское течение, происходит заглубление бароклинных слоев, в которых определяются  $\epsilon_{\text{min}}$  и  $\epsilon_{\text{max}}$  и глубина их залегания. Кроме того, в районах образования антициклонических вихрей и меандров заглубление бароклинных слоев увеличивается.

7.  $\epsilon_{200}/\epsilon_{300}$  – отношение значений ПОС в сероводородной зоне моря на горизонтах 200 и 300 м. Горизонт 200 м соответствует верхней границе сероводородной зоны, а до горизонта 300 м получен основной объем данных измерений ПОС (глубже 300 м ПОС изменяется незначительно). В сероводо-

родной зоне характер изменения ПОС с глубиной зависит от длины волны света. В длинноволновой области видимого спектра ПОС (желтая, оранжевая и красная области) практически не изменяется с глубиной, в коротковолновой (синей, фиолетовой и в особенности в ближней ультрафиолетовой) – возрастает. Такая спектральная зависимость ПОС характерна для поглощения света так называемым «желтым» веществом – частью растворенных органических соединений, относящихся к классу гуминовых кислот. Таким образом, параметр  $\epsilon_{200}/\epsilon_{300}$  в коротковолновой области спектра может качественно характеризовать количество «желтого» вещества.

Выбранные характерные значения ПОС и глубины их залегания, по нашему мнению, оптимально отражают основные черты вертикального распределения ПОС в верхнем 300-метровом слое глубоководной части Черного моря. Они наглядно показаны на названном нами формализованном профиле ПОС (рис. 1). Осредненные по времени или пространству наблюдений формализованные профили или отдельные характерные значения ПОС можно выбрать в качестве опорных, сравнение с которыми позволит оценить пространственно-временную изменчивость значений ПОС и глубин их залегания, а также получить дополнительную информацию о гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических и динамических процессах, формирующих структуру ПОС.

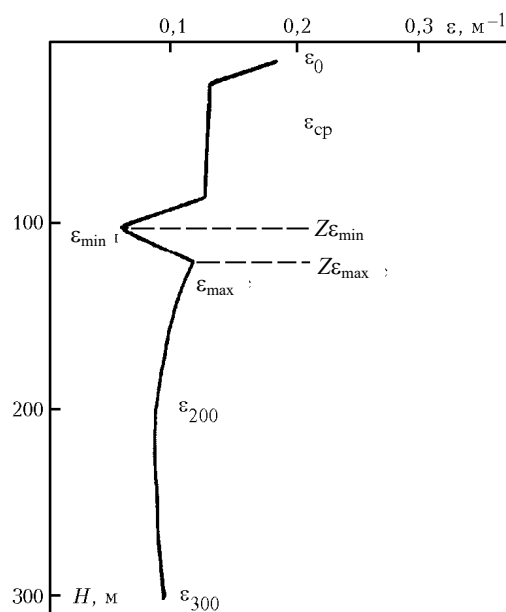


Рис. 1. Формализованный вертикальный профиль показателя ослабления света

В статье представлены результаты многолетних наблюдений ПОС с помощью зондирующего прозрачномера [6], созданного в отделе оптики МГИ НАН Украины. Полученные данные однородны, репрезентативны и сопоставимы между собой. Всего обработаны материалы 10 экспедиционных рейсов МГИ НАН Украины (около 500 станций), проведенных в течение 1978–1986 гг. Первичные результаты измерений ПОС и построенные по ним карты распределений выбранных нами оптимальных характеристик ПОС ( $\lambda_{\text{эф}} = 420\text{--}430$  нм) и глубин их залегания, а также рассчитанные их статистические оценки (математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации) по этим рейсам использованы в Атласе ПОС глубоководной части Черного моря [7].

Статистические оценки оптимальных характеристик ПОС для различных параметров

Характеристика		МО	СКО	$\nu$	$N$	Диапазон измерений
$\epsilon_0, M^{-1}$	СГ	0,22	0,1	0,46	277	0,04–0,64
	КГ	0,15	0,05	0,25	200	0,04–0,65
	ОГ	0,19	0,09	0,48	477	0,04–0,65
$\epsilon_{cp}, M^{-1}$	СГ	0,16	0,06	0,36	266	0,06–0,3
	КГ	0,1	0,04	0,4	183	0,07–0,23
	ОГ	0,13	0,06	0,46	449	0,06–0,3
$\epsilon_{max}, M^{-1}$	СГ	0,13	0,07	0,54	265	0,03–0,44
	КГ	0,12	0,06	0,5	179	0,02–0,23
	ОГ	0,13	0,07	0,54	444	0,02–0,44
$\epsilon_{min}, M^{-1}$	СГ	0,07	0,03	0,42	273	0,01–0,13
	КГ	0,07	0,03	0,42	190	0,01–0,13
	ОГ	0,07	0,03	0,42	463	0,01–0,13
$Z\epsilon_{max}, M$	СГ	124	25	0,2	263	80–210
	КГ	124	22	0,18	186	70–180
	ОГ	124	24	0,19	449	70–210
$Z\epsilon_{min}, M$	СГ	104	26	0,25	270	50–190
	КГ	106	24	0,22	192	50–160
	ОГ	105	25	0,24	462	50–190
$\epsilon_{200}/\epsilon_{300}$	СГ	0,86	0,12	0,14	261	0,5–1,0
	КГ	0,87	0,08	0,09	188	0,5–1,0
	ОГ	0,86	0,1	0,11	449	0,5–1,0

Совокупность всех полученных данных также была разделена на два периода: май–август и октябрь–декабрь, условно названные середина года (СГ) и конец года (КГ) соответственно. Сведения о статистических оценках характеристик в эти периоды и средние обще годовые (ОГ) представлены в таблице, где приняты следующие обозначения: МО – математическое ожидание, СКО – среднее квадратическое отклонение,  $\nu$  – коэффициент вариации,  $N$  – число станций. Обще годовые статистические оценки ПОС использованы при построении формализованного вертикального профиля ПОС (см. рис. 1).

Для построения карт пространственного распределения оптимальных характеристик ПОС вся акватория Черного моря по принятой в гидрографии методике была разбита на 51 стандартный прямоугольник со сторонами  $40'$  по широте и  $1^\circ$  по долготе.

Результаты наблюдений, полученные в каждом квадрате, осреднялись за исследуемый промежуток времени и относились к его центру. Карты обще годового пространственного распределения оптимальных характеристик ПОС и глубин их залегания за многолетний период (1978–1986 гг.) представлены на рис. 2.

Анализ этих результатов имеет самостоятельное значение и может быть корректно проведен с привлечением различных гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических данных. Однако даже предварительное рассмотрение результатов наблюдений показывает на зависимость распределений рассматриваемых характеристик ПОС от некоторых динамических и гидрохимических процессов.

Так, зоны с минимальными значениями этих характеристик в центральных областях западной и восточной частей моря совпадают с циклоническими круговоротами [1]. Участки моря с повышенными их значениями (юго-восточная часть моря, прибосфорский район, южные участки) связаны с зонами конвергенций и антициклонических круговоротов. Сопоставление результатов одновременных измерений глубин залегания максимума ПОС и верхней границы сероводородной зоны, полученных в 1984–1986 гг., показало достаточно близкие их значения и распределения (средние величины коэффициента корреляции 0,75–0,8).

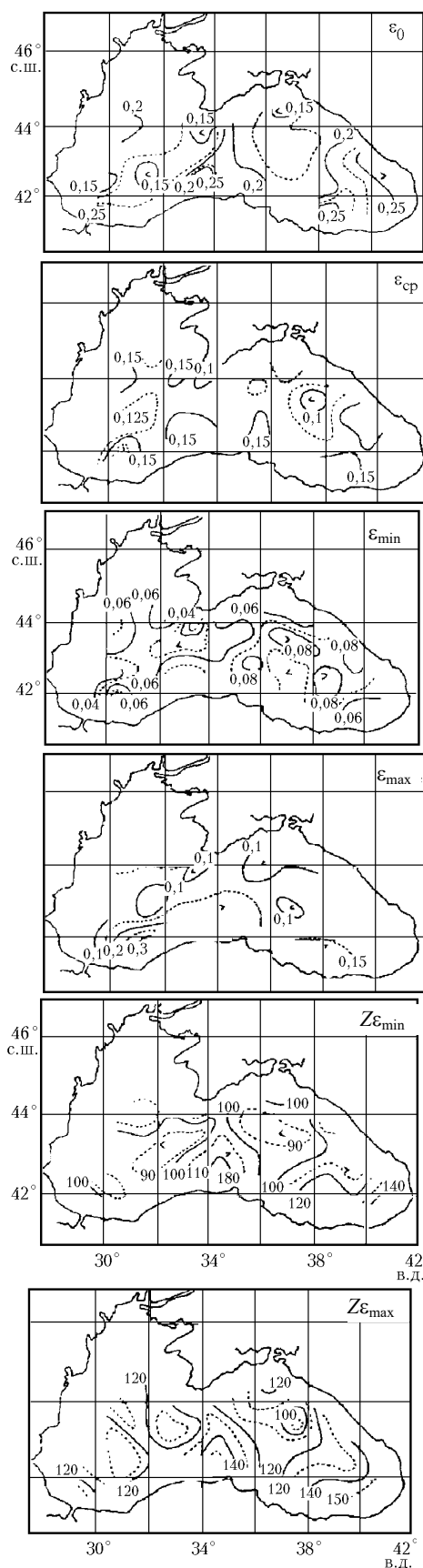


Рис. 2. Обще годовые распределения оптимальных характеристик показателя ослабления света в глубоководной части Черного моря

В заключение отметим, что приведенные результаты (формализованный вертикальный профиль, статистические оценки и карты распределений) могут быть использованы в качестве опорных, поскольку массив оптических данных формировался в период стабильного состояния гидрооптической ситуации в Черном море.

1. *Комплексные океанографические исследования Черного моря* / Отв. ред. Б.А. Нелепо. Киев: Наукова думка, 1980. 240 с.
2. *Маньковский В.И.* Оптическая структура вод Черного моря и закономерности ее формирования / Гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря. Севастополь: МГИ АН Украины, 1992. С. 7–27.
3. *Николаев В.П., Овчинников И.М., Осадчий А.С.* Гидрооптические и гидрофизические исследования в северо-восточной части Черного моря / *Океанология*. 1982. Т. 22. № 6. С. 28–36.

4. *Николаев В.П.* Новые данные об оптической структуре вод юго-восточной части Черного моря // *Оптика атмосф. и океана: Тез. докл. на X пленуме РГ по оптике океана*. Л., 1988. С. 195–196.
5. *Агафонов Е.А., Богуславский С.Г., Прохоренко Ю.А.* Оптические свойства вод Черного моря / Матер. конф. «Совершенствование управления развитием рекреационных систем». Севастополь, 23–25 октября 1986 г. Ч. II. М., 1987. С. 233–242. Деп. в ВИНТИ 11.08.1987, № 5804-B87.
6. *Ли М.Е.* Логарифмический фотометр для видимой и ближней ультрафиолетовой области спектра / *Методика и аппаратура для гидрофизических исследований*. Киев: Наукова думка, 1969. Т. 41. С. 180–189.
7. *Агафонов Е.А., Прохоренко Ю.А., Богуславский С.Г., Кукушкин А.С.* Атлас показателя ослабления света глубоководной части Черного моря. М., 2000. 101 с. Деп. в ВИНТИ, 02.02.2000, № 235-B00.

*Е.А. Агафонов, А.С. Кукушкин, Ю.А. Прохоренко.* **Optimal characteristics of vertical distribution of the light attenuation factor in the upper layer of the deep part of Black Sea.**

Seven characteristics of optimal vertical distribution of the light attenuation factor in the upper layer of deep part of Black Sea and their connection with hydrooptical, chemical, and biological processes responsible for this distribution are proposed. Statistical estimates and the maps of horizontal distribution of the characteristics for many-year period of stable state of hydrooptical situation in Black Sea are presented.