

Препр
М-73

Морской гидрофизический институт НАН Украины

Институт биологии южных морей НАН Украины

Препринт

Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин Е.И., Мищенко А.В.,
Соловьев М.В., Аннинский Б.Е., Георгиева Л.В., Юнев О.А.

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ В
ЧЕРНОМ МОРЕ И ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВИВШИЕ ЕЕ СИЛЬНОЕ
СНИЖЕНИЕ В КОНЦЕ 80-х НАЧАЛЕ 90-х ГОДОВ

Севастополь
1996 г

Морской гидрофизический институт НАН Украины

Институт биологии южных морей НАН Украины

Препринт

Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин Е.И., Мишонов А.В.,
Соловьев М.В., Аннинский Б.Е., Георгиева Л.В., Юнев О.А.

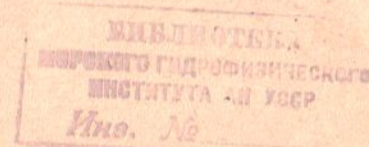
**МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ В
ЧЕРНОМ МОРЕ И ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВИВШИЕ ЕЕ СИЛЬНОЕ
СНИЖЕНИЕ В КОНЦЕ 80-х НАЧАЛЕ 90-х ГОДОВ**

Препр.

М-73

*Маньковский В.И.
Многолет. изменчив.
прозрачн. воды...;
Сев. 1996г.*

Севастополь
1996 г



Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обуславливающие ее сильное снижение в конце 80-х годов / Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин Е.И., Мишонов А.В., Соловьев М.В., Аннинский Б.Е., Георгиева Л.В., Юнев О.А. - Севастополь, 1996. - 32 с. - (Препр./НАН Украины. Мор.гидрофиз. ин-т).

Проанализирован 72-х летний (1923-1995 гг) ряд наблюдений прозрачности воды в Черном море, определявшейся с помощью измерений глубины видимости белого диска.

В глубоководной области моря прозрачность воды (среднегодовое значение Z_d) подтверждена значительной многолетней изменчивости - в рассматриваемый период она изменялась от 21,3 до 6,2 м, т.е. более чем в три раза. Наибольшая межгодовая изменчивость Z_d наблюдалась с 1986 по 1995 год, когда ее величина уменьшилась от 16 м в 1986 г до 6,2 м в 1992 г и снова увеличилась до 17,7 м в 1995 г.

Выявлено, что на многолетнюю изменчивость прозрачности воды в глубоководной области моря в этот период влияли: циклическое изменение солнечной активности (11-ти летние циклы), антропогенная эвтрофикация вод, вселение в море гребневика *Mnemiopsis*.

В период сильного снижения прозрачности воды (конец 80-х годов) в море отмечено резкое изменение состояния фитоплана, выразившееся в массовом развитии микроводорослей, основную часть которых составляли кокколитофориды.

На изменение состояния фитоплана большое влияние оказал гребневик *Mnemiopsis*, появившийся в море в начале 80-х годов и быстро размножившийся в огромных количествах.

Модельные оценки оптических характеристик вод моря с учетом массового развития кокколитофорид показали, что наблюдавшиеся в конце 80-х годов изменения прозрачности морской воды могут быть объяснены имевшими место изменениями в численном и видовом составе фитопланктона.

Табл. 8. Рис. 14. Библиогр.: с.29 (45 назв.)

Рецензент кандидат физ.-мат. наук
М.Е. Ли

Утверждено к печати НИСО МГИ НАН Украины

© Морской гидрофизический институт НАН Украины, 1996.

© Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин Е.И.,
Мишонов А.В., Соловьев М.В.,
Аннинский Б.Е., Георгиева Л.В., Юнев О.А.

Введение	4
1. Многолетняя изменчивость прозрачности воды	4
2. Многолетняя динамика численности фитопланктона	10
3. Факторы, обусловившие рост численности фитопланктона в Черном море в 80-е годы	17
4. Модельные оценки показателей прозрачности воды в Черном море при массовом развитии кокколитофорид	20
5. Результаты расчетов	25
Заключение	28
Литература	29
Abstract	32

Выводы

В конце 80-х начале 90-х годов в глубоководной области Черного моря стали наблюдаться очень малые значения прозрачности воды, не характерные для этих районов по измерениям в предыдущие годы. До 80-х годов прозрачность воды, определяемая по глубине видимости белого диска Z_d , в глубоководной области в летний период, как правило, была в пределах от 15 до 17 м и нередко были значения более 20 м. В 1990-1992 гг здесь уже не наблюдалось значений Z_d более 15 м, а типичные значения составляли 5-10 м. Летом 1992 г более половины глубоководной акватории занимали воды с Z_d менее 6 м, при этом треть вод имели прозрачность от 2 до 4 м, что ранее никогда в глубоководной области не наблюдалось.

Сильное снижение прозрачности воды в Черном море послужило поводом к проведению исследований ее многолетней изменчивости [13, 22]. Настоящая работа является продолжением предыдущих исследований и целью ее является:

- исследование закономерностей многолетней изменчивости прозрачности воды в Черном море с учетом новых данных, собранных в банке океанографических данных МГИ НАНУ;
- выявление прямых и косвенных факторов, приведших к сильному снижению прозрачности воды в конце 80-х начале 90-х годов.

1. Многолетняя изменчивость прозрачности воды

Мы будем рассматривать две характеристики прозрачности воды - глубину видимости белого диска Z_d и показатель ослабления направленного света E . Глубина видимости белого диска является наиболее наглядным показателем прозрачности. В гидрооптике эта величина называется относительной прозрачностью, мы будем называть ее сокращенно - прозрачность. Показатель ослабления направленного света E также характеризует прозрачность воды - чем он больше, тем величина Z_d меньше, так как они связаны обратно - пропорциональной зависимостью $Z_d \sim 1/E$.

1.1 Многолетний ход среднегодовых величин Z_d . Для расчета среднегодовых величин Z_d , как и в работах [13, 22], использовались данные наблюдений в глубоководной области моря на значительном удалении от берегов (за изобатой 1000 м), так как на шельфе и в прибрежных районах прозрачность воды подвержена сильной пространственной и временной изменчивости вследствие влияния множества переменных факторов: речного и дождевого стоков, антропогенных сбросов, ветровых течений, сгонно-нагонных явлений, взмучивания донных осадков во время штормов и др. В глубоководной области прозрачность воды более стабильна, ее изменения здесь обусловлены, главным образом, сезонной динамикой численности фитопланктона.

Расчеты велись для акватории, ограниченной координатами:

1. 41°45' - 43°00' с.ш. 29°00' - 31°00' в.д.
2. 42°20' - 44°15' с.ш. 31°00' - 38°00' в.д.
3. 41°30' - 43°00' с.ш. 38°00' - 40°00' в.д.

При расчете Z_d учитывалась сезонная изменчивость прозрачности воды. Для этого наблюдаемые величины Z_d умножались на коэффициент сезонной изменчивости $K_{сез}$, представляющий собой отношение среднего многолетнего значения Z_d в рассматриваемом районе за весь период наблюдений к среднегоднему значению Z_d для данного месяца. Сезонный ход

Z_d показан на рис. 1. Результаты расчетов Z_d представлены в таблице 1 и на рис. 2.

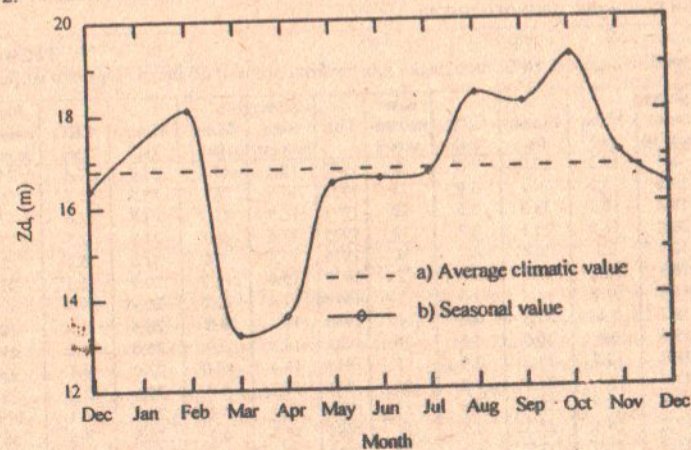


Рис. 1. Сезонный ход глубины видимости белого диска в глубоководной области Черного моря. Среднегодовые данные за 1922-1985 гг.

a) среднегодовое климатическое значение; b) средние месячные значения

В 20-х годах воды Черного моря характеризовались высокой прозрачностью. В течение пяти лет с 1923 по 1927 гг наблюдалось повышение Z_d с 18,5 м до 20,8 м. В эти же годы зарегистрирована максимальная за все годы наблюдений величина $Z_d=30,5$ м (апрель 1925 г, в точке 42°39' с.ш., 33°30' в.д.) [18]. В 1937 и 1938 гг величины Z_d по сравнению с 20-ми годами были ниже - 12,5 м и 14,9 м. С 1953 до 1986 г Z_d колебалась в пределах 12,7 - 21,3 м при среднем уровне около 16-17 м. После 1986 г прозрачность воды тремя скачками - в 1987, 1990 и 1992 гг снизилась до 6,2 м. Однако, после 1992 г процесс пошел в обратную сторону, причем, с большой скоростью - за три года Z_d увеличилась на 11,5 м, составив в 1995 г 17,7 м, т.е. достигнув среднего уровня существовавшего до 80-х годов.

Анализируя временной ряд величин Z_d , мы обратили внимание на то, что в их колебаниях прослеживается периодичность близкая к 11-летним циклам солнечной активности. Сопоставление с временным ходом солнечной активности, представленной на рис.2 числами Вольфа - N_w , показало следующее. На рис.2 показаны пунктирной линией средние значения Z_d в первой и второй половинах каждого солнечного цикла. Видно, что в 19-м, 20-м и первой половине 21-го цикла (по Цюрихской нумерации) средняя величина Z_d в полциклах изменялась в соответствии с ритмом солнечной активности - она повышалась примерно на 2 м во второй половине цикла, возвращаясь на прежний уровень в первой половине следующего цикла. Такая закономерность наблюдалась до 1980 г, после которого во второй половине 21-го цикла вместо повышения прозрачности воды произошло ее снижение относительно первой половины данного цикла. Уменьшение прозрачности воды, начавшееся во второй половине 21-го цикла, продолжалось еще более быстрыми темпами в первой половине 22-го цикла. Однако, во второй половине 22-го цикла прозрачность воды стала быстро увеличиваться и, хотя цикл еще не закончился, похоже, что прежняя закономерность ее внутрицик-

личного изменения повторится, так средняя величина Z_d за три года второй половины цикла 1993-1995 гг уже превысила на 0,4 м среднюю величину в первой половине данного цикла.

Таблица 1
Глубина видимости белого диска для глубоководной области Черного моря

Год	Средне- годо- вые (м)	Мин. (м)	Макс. (м)	СКО (м)	К-во наблю- дений	Год	Средне- годо- вые (м)	Мин. (м)	Макс. (м)	СКО (м)	К-во наблю- дений
1923	18.5	17.3	21.0	1.3	5	1972	18.1	11.7	25.0	3.4	21
1924	19.6	13.6	26.2	3.9	21	1973	14.9	7.7	18.5	3.1	7
1925	19.2	10.2	33.3	4.5	30	1974	18.9	15.2	24.8	2.6	17
1927	20.8	16.0	25.1	2.7	10	1975	17.6	9.0	21.9	2.5	72
1937	12.5	9.1	20.6	4.7	4	1976	13.7	7.6	23.0	5.1	5
1938	14.9	12.0	17.9	2.9	2	1978	16.4	12.7	20.9	2.1	23
1953	15.8	14.8	17.7	1.0	5	1979	17.6	12.0	20.1	3.3	4
1955	12.7	7.0	17.6	4.3	4	1980	16.2	9.0	20.5	3.3	18
1956	13.6	8.0	20.0	4.1	10	1981	14.7	4.1	26.6	4.2	29
1957	18.2	12.2	24.3	2.9	38	1982	16.4	10.0	27.0	4.1	45
1958	17.7	6.1	27.4	6.8	25	1983	14.5	8.7	20.6	2.7	25
1960	16.8	13.9	19.4	1.6	11	1984	14.7	5.1	22.1	3.1	149
1961	17.7	14.1	24.3	2.5	14	1985	14.5	6.1	26.5	4.5	56
1962	21.3	13.6	33.2	5.2	12	1986	16.0	6.1	23.5	4.6	19
1963	16.2	11.4	21.5	2.9	16	1987	12.3	7.0	22.6	3.1	87
1964	17.0	3.4	25.0	4.1	33	1988	13.2	1.0	23.0	4.3	73
1965	14.5	9.1	20.7	2.9	15	1989	13.3	1.8	29.9	6.0	198
1966	15.7	11.1	22.1	3.9	14	1990	7.5	2.7	13.0	2.4	101
1967	16.0	10.9	20.9	3.9	4	1991	8.4	5.1	12.9	1.7	116
1968	16.5	8.3	23.6	5.3	5	1992	6.2	2.0	11.0	2.3	72
1969	14.0	10.6	16.7	2.1	6	1993	10.8	5.4	18.5	3.0	108
1970	17.8	7.7	21.9	4.8	6	1994	14.0	9.1	17.5	1.8	44
						1995	17.7	8.6	26.5	4.9	13

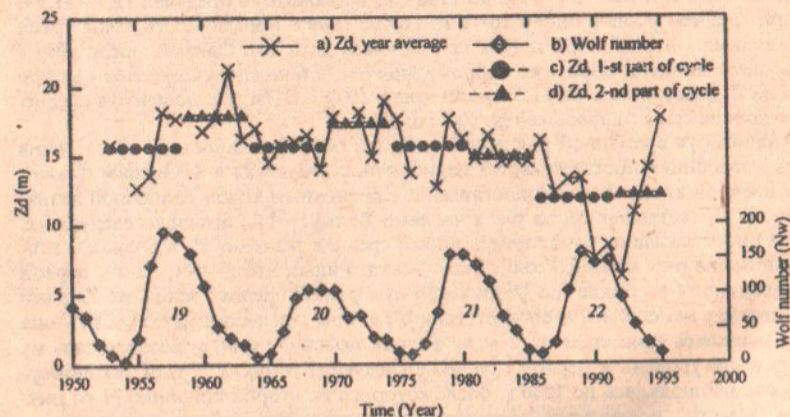


Рис. 2. Временной ход среднегодовых величин Z_d в глубоководной области Черного моря (а) и индексов солнечной активности N_w (б).

Горизонтальными пунктирными линиями показаны средние значения Z_d в первой (с) и второй (д) половинах 11-летних солнечных циклов. Числами внутри кривой (б) обозначен номер цикла солнечной активности по Цюрихской нумерации.

Таблица 2
Среднее значение глубины видимости белого диска в 11-летних циклах солнечной активности

N цикла солнечной активности по Цюрихской нумерации	Годы	За весь цикл	В первой половине цикла	Во второй половине цикла
19	1953-1964	16.8	15.6	18.0
20	1964-1975	16.5	15.6	17.4
21	1975-1986	15.3	15.6	15.0
22 (неполный)	1986-1995	12.0	11.8	12.2

С учетом 11-летней цикличности рассмотрим вопрос о многолетнем тренде прозрачности воды в море. Для его выявления сравним средние значения Z_d в солнечных циклах (табл. 2). Сравнение показывает их практически одинаковые величины (16,8 м и 16,5 м) в 19-ом и 20-ом циклах, но в 21-ом цикле средняя величина Z_d снизилась относительно предыдущих циклов на один с лишним метр, что говорит о появлении тренда. Уточнить начало тренда можно по средним значениям Z_d в первой и второй половине 21-го цикла (табл. 2). В первой половине прозрачность воды была на уровне наблюдавшемся в предыдущих циклах, т.е. до 1980 г тренда не было. Тренд появился во второй половине цикла, когда прозрачность воды вместо увеличения, как это наблюдалось в 19-м и 20-ом циклах, относительно первой половины 21-го цикла снизилась на 0,6 м.

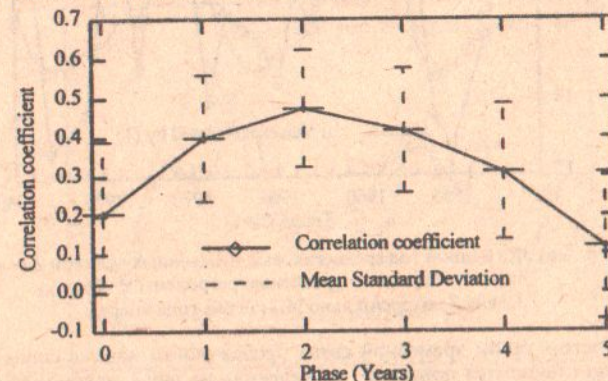


Рис. 3. Величина коэффициента корреляции между индексами солнечной активности N_w и среднегодовой величиной Z_d в глубоководной области моря при сдвиге сравниваемых величин во времени. По оси абсцисс отложена фаза сдвига $\Delta T = T_{Zd} - T_{Nw}$, где T_{Zd} и T_{Nw} годы наблюдения Z_d и N_w .

Для стабильного, т.е. без тренда, периода с 1953 по 1980 г была рассчитана корреляция между Z_d и N_w . Расчет велся со сдвигом Z_d относительно N_w . Сдвиг $\Delta T = T_{Zd} - T_{Nw}$ был выбран таким образом, чтобы сравнивалась величина Z_d с N_w в текущем году и с N_w за предыдущие пять лет. Временной ход коэффициента корреляции показан на рис.3. Видно, что изменение солнечной активности сказывается на прозрачности воды с задержкой во времени: оно проявляется максимально на второй год и почти также значительно че-

рез три года, а затем быстро падает. При сдвиге величин Z_d относительно N_w на два года уравнение регрессии имеет вид:

$$Z_d(t-2) = 14,6 + 0,0259 \cdot N_w \quad (1)$$

Коэффициент корреляции $r = 0,447 \pm 0,141$, среднеквадратическая ошибка регрессии $\sigma_{Z_d} = 1,7$ м. Степень корреляции повышается, если сопоставлять средние за два года величины Z_d и N_w при том же двухлетнем сдвиге Z_d вперед относительно N_w , тогда:

$$\langle Z_d \rangle_{(t-2)} = 14,2 + 0,035 \cdot N_w \quad (2)$$

Коэффициент корреляции $r = 0,610 \pm 0,120$, среднеквадратическая ошибка регрессии $\sigma_{Z_d} = 1,2$ м.

На рис. 4 а) и б) показан временной ход реальных величин Z_d и рассчитанных по уравнениям (1) и (2). Видно, что регрессионные кривые, неплохо отображают реальный ход среднегодовых величин прозрачности воды.

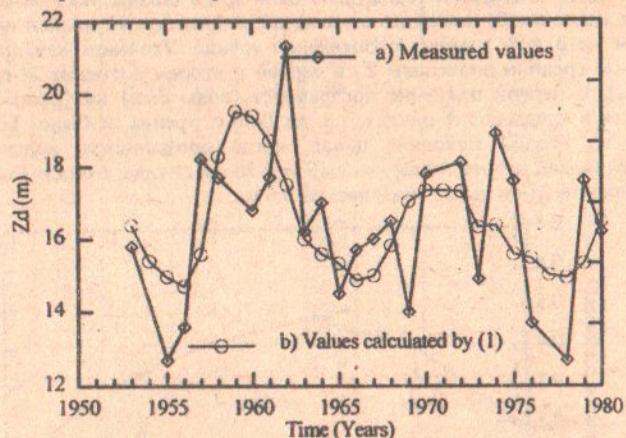


Рис. 4 а). Временной ход среднегодовых измеренных величин Z_d - а) и рассчитанных по уравнению регрессии (1) - б). Сдвиг Z_d относительно N_w - на два года вперед.

С учетом такой временной связи прозрачности воды с солнечной активностью становится понятной, приведенная на рис. 2, закономерность изменения в течение солнечного цикла средних за половину цикла величин Z_d . Они отражают не средние величины солнечной активности в первой и второй половинах данного цикла, которые в каждом цикле примерно равны, а средние за 5-6 лет величины N_w со сдвигом назад на 2-3 года. В таком случае, как видно из рис. 2, в первой половине цикла пониженным величинам Z_d соответствуют и пониженные величины N_w , а во второй половине цикла соответственно повышенным Z_d также повышенные N_w .

Одиннадцатилетняя цикличность в изменении прозрачности воды, видимому, свидетельствует о существовании такой же цикличности в многолетней динамике фитопланктона в открытых районах моря, поскольку там он является главным фактором, обуславливающим изменчивость прозрач-

ностью фитопланктона в открытых районах, чтобы ответить на этот вопрос непосредственно, но в связи с ним укажем на работу [42], в которой установлена связь с одиннадцатилетними циклами солнечной активности среднегодовой биомассы и видового состава фитопланктона в шельфовой зоне Болгарского побережья (период наблюдения 1954-1990 гг.). Механизм влияния солнечной активности на процессы развития фитопланктона в работе [42] не обсуждается. Мы тоже пока не имеем по этому вопросу надлежащей информации и можем высказать лишь предположения. Возможно, что это влияние изменчивости стока рек и гидрологического режима моря. Например, в [17] установлено, что в стоке Дуная, а это примерно 2/3 стока всех рек в море, имеется 11-летняя цикличность. Может быть также влияние метеоусловий - таких как средняя скорость ветра и число штормовых дней, с которыми связаны процессы вертикального обмена в поверхностных слоях и вынос биогенов в эвфотическую зону. Наконец, это может быть непосредственная реакция фитоценоза с некоторой инерцией во времени на изменение солнечной активности. Вопрос этот остается открытым, но ясно, что при изучении многолетней изменчивости состояния фитоценоза и прозрачности воды в Черном море влияние циклического изменения солнечной активности следует учитывать. Особый интерес при этом представляет отставание по фазе на несколько лет максимальной реакции биооптической системы моря на изменение солнечной активности, что дает возможность для многолетнего прогнозирования ее состояния.

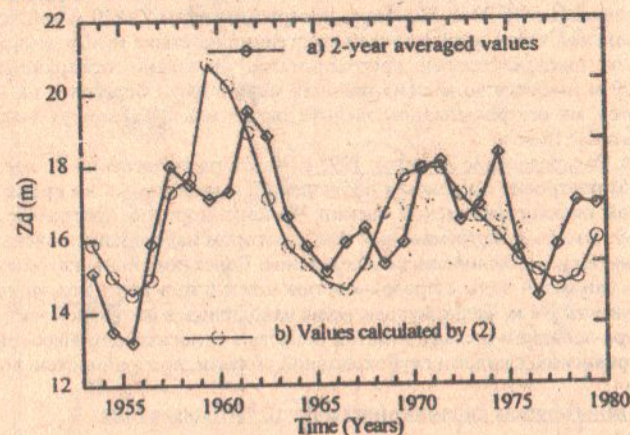


Рис. 4 б). Временной ход средних за два года величин Z_d - а), и рассчитанных по уравнению регрессии (2) - б).

1.2. Показатель ослабления света. Количество данных измерений показателя ослабления света недостаточно для расчета его среднегодовых величин. Для сравнения с многолетней динамикой Z_d взяты значения E в летне-осенний период июнь - октябрь. В таблице 3 приведены средние значения E в поверхностном однородном слое моря для относительно стабильного периода 1977-1980 гг., предшествовавшего периоду резкого снижения прозрачности воды, и в годы с ее необычно низкими значениями - 1990, 1991, 1992.

Результаты сравнения показывают, что характер многолетней и межгодовой изменчивости E и Z_d , как и следовало ожидать, одинаков и количественно изменения обоих показателей прозрачности воды близки. Так, отношение средних величин E в 1977-1980 гг и в 1990-1992 гг составило 2,15, а величин $1/Z_d$ - 2,36.

1.3. Климатическое распределение Z_d . При расчете климатического распределения Z_d в море мы ограничились периодом наблюдений до 1980 г, в течение которого, как было

Таблица 3
Показатель ослабления света E (410-420 нм), m^{-1} в поверхностном однородном слое глубоководной области моря в летний сезон

Годы	Среднее	Макс.	Мин.	СКО
1977-1985	0.55	1.38	0.23	0.32
1990	1.17	1.86	0.78	0.23
1991	1.03	2.16	0.69	0.21
1992	1.70	2.76	0.55	0.60

установлено, тренда не наблюдалось. Исходя из обеспеченности наблюдениями и учитывая сезонный ход величин Z_d , для построения климатического поля взят внутригодовой период с июня по октябрь; на него приходится около 90 % всех наблюдений, а относительные изменения среднемесячных величин (рис.1) в это время невелики - менее 15%. Массив данных наблюдений составил 1640 единиц, что позволило получить достаточную статистическую обеспеченность поля средних величин по всему морю.

Климатическое поле прозрачности воды (рис. 5) имеет следующие особенности. Большая часть глубоководной области (около 80%) занята водами с прозрачностью 16-20 м. Наиболее прозрачные воды $Z_d > 20$ м наблюдаются в центральной части моря в зоне конвергенции на стыке между восточным и западным циклоническими круговоротами. Довольно прозрачные воды $Z_d = 15-20$ м имеются во многих районах моря вблизи берегов и на шельфе. Например, на северо-западном шельфе около мыса Тарханкут выделяется область с $Z_d > 16$ м.

1.4. Распределение Z_d летом 1992 г. Карта распределения Z_d летом 1992 г (рис. 6) построена по данным наблюдений, выполненных во время международной океанографической съемки Черного моря по программе CoMS-Black -92. Это был экстремальный год, в котором наблюдались очень низкие величины Z_d и необычное их распределение. Более половины глубоководной области занимали воды с прозрачностью менее 6 м, а треть вод здесь имели прозрачность 2-4 м. Такие мутные воды находились в восточной части моря. На северо-западном шельфе заметна область с относительно высокой (до 10 м), по сравнению с водами глубоководной области, прозрачностью воды.

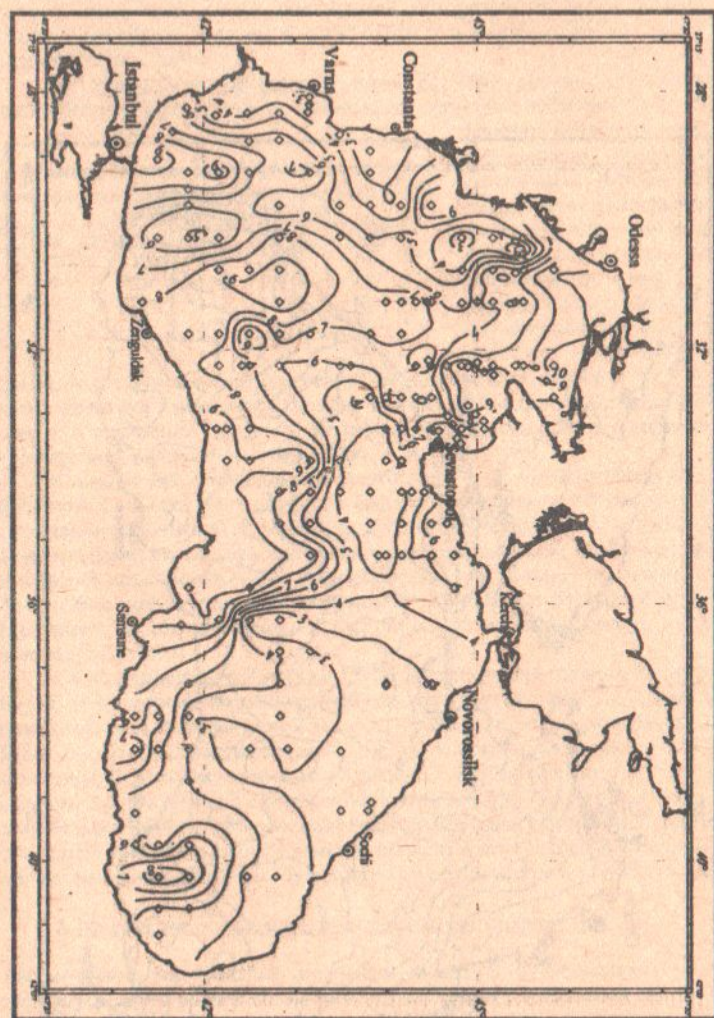
2. Многолетняя динамика численности фитопланктона

Рассмотрение многолетней динамики численности фитопланктона играет первоочередную роль в понимании происходящих изменений прозрачности воды в море. Это видно из следующего. Прозрачность морской воды зависит от содержания в ней органической (фитопланктон, детрит) и минеральной взвеси и растворенных органических соединений. Влияние этих компонентов морской воды на изменчивость ее прозрачности не одинаково для различных длин волн. При определении прозрачности воды визуально - с помощью белого диска, важна спектральная область, в которой наблюдается наименьшее ослабление света водой, так называемое окно прозрачности. Для вод Черного моря оно находится в области длин волн 500-550 нм [6, 19, 26]



Рис. 5. Климатическое распределение глубины видности белого диска (в метрах) за период 1922-1980 гг.

Рис. 6. Распределение глубины видности белого диска (в метрах) в июле 1992 г.



Согласно [27], в данной спектральной области более 90 % вклада в дисперсию показателя дает органическая взвесь.

При исследовании многолетней динамики фитопланктона мы ограничились западной глубоководной частью моря, по которой имеется наибольшее количество наблюдений. Так как численность фитопланктона имеет сезонный ход, то для лучшей сопоставимости были использованы данные, полученные в относительно стабильный период развития фитоценоза - с мая по сентябрь. В этот период продукция фитопланктона в море минимальна и не испытывает резких колебаний [2, 3, 9]. Важно отметить, что основная масса водорослей в это время сконцентрирована в верхнем перемешанном слое моря, располагающемся над сезонным термоклином, т.е. до глубин ~15-20 м. В таблице 4 и на рис. 7 приведены данные по численности фитопланктона в эвфотическом слое для глубоководной области западной части моря в мае - сентябре с 1951 по 1992 год.

Таблица 4
Средняя численность фитопланктона в эвфотическом слое западной части Черного моря

Год	Месяц	Численность млн кл·м ⁻³
1951	август	27
1958	август	10,6
1960	июнь	17,2
1962	октябрь	23,9
1969	май	16,9
1970	сентябрь	8,4
1972	август	20,8
1987	сентябрь	63
1989	июль-август	1445
1990	май	1400
1991	июнь-август	688
1992	июль	1400

В 1951-1972 гг численность фитопланктона колебалась в пределах 8,4 - 27 млн кл·м⁻³, т.е. была довольно стабильной. Для ориентировочной оценки динамики фитопланктона в период с 1973 по 1986 г, по которому данных нет, воспользуемся концентрацией хлорофилла. По данным работы [3], содержание хлорофилла "а" в слое фотосинтеза в западной глубоководной области моря в мае - сентябре в период 1964-1978 гг было относительно постоянным и в среднем составило 0,18 мг·м⁻³. В начале 80-х годов содержание хлорофилла значительно возросло и за 1980-1984 гг этот показатель был равен 0,31 мг·м⁻³. По нашим данным за 1980-

1984 гг получена такая же средняя величина хлорофилла в слое фотосинтеза - 0,32 мг·м⁻³. Таким образом, можно считать, что до конца 70-х годов численность фитопланктона оставалась на относительно невысоком стабильном уровне и стала увеличиваться в начале 80-х годов.

Годы с 1987 по 1992, в течение которых произошло необычное снижение прозрачности воды в море, удачно освещены ежегодными (кроме 1988 г) измерениями концентрации фитопланктона, определением его видового и размерного состава. В 1987 г численность заметно увеличилась по сравнению с предыдущими годами и составила в слое 0-75 м $6,3 \cdot 10^7$ кл·м⁻³. После 1987 г она резко возросла и в 1989-1992 гг была в пределах $6,9 \cdot 10^8$ - $1,4 \cdot 10^9$ кл·м⁻³.

Столь высокая концентрация фитопланктона после 1987 г возникла благодаря массовому развитию довольно мелкой (5-12 мкм в диаметре) кокколитоины *Emiliania huxleyi*, H.h. (Lohm.) Hay a. Mohler, численность которой на отдельных горизонтах достигала $4 \cdot 10^9$ кл·м⁻³. Ее количество иногда составляло до 96% всего фитопланктона.

Следует отметить, что кокколитофориды долгое время считались редкими видами для Черного моря. Вспышки в развитии кокколитофорид в открытом море впервые были отмечены в начале 50-х годов [25]. Впоследствии

нами также отмечались отдельные вспышки развития кокко-литифорид в открытых районах моря, но не в таких огромных количествах, как в 1989-1992 гг.

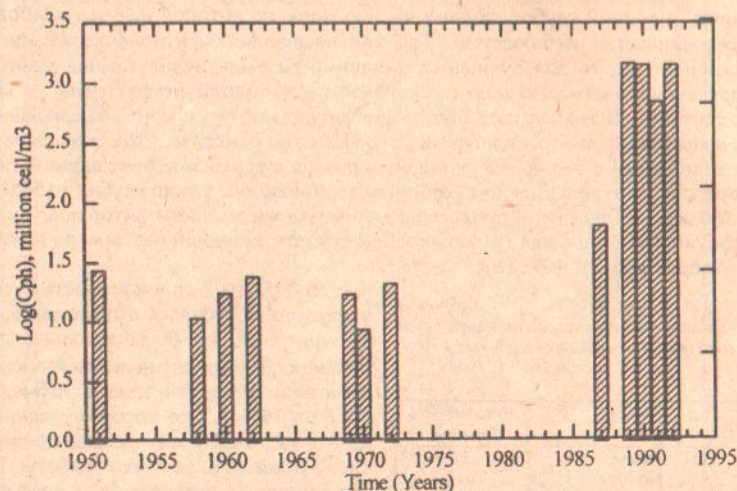


Рис. 7. Динамика численности фитопланктона C_{ph} в эвфотическом слое в западной глубоководной области Черного моря в период 1950-1992 гг.

Кроме кокколитофорид, начиная с 1987 г, также сильно возросло количество перидиниевых водорослей. В результате массового развития кокколитофорид и перидиниевых произошли изменения в структуре фитоценоза. Если раньше численно преобладали диатомовые, то в 1987-1992 гг кокколитофориды и перидиниевые. Сообщество фитопланктона после 1987 г значительно помельчало и более 90%, а в некоторых случаях до 99% его количества составлял нанопланктон.

Мы рассмотрели динамику численности фитопланктона во всем эвфотическом слое, но для прозрачности воды, определяемой по белому диску, важна его численность лишь в верхних слоях моря толщиной порядка Z_d . В связи с этим рассмотрим данные о средней численности фитопланктона и его составе в верхнем 10-метровом слое моря (табл. 5). Численность водорослей здесь была примерно в два раза выше, чем во всем эвфотическом слое и имела несколько иной временной ход. Наблюдалось два максимума численности: в 1990 г - $3,6 \cdot 10^9$ кл·м⁻³ и в 1992 г - $2,4 \cdot 10^9$ кл·м⁻³.

В размерном составе фитоценоза в верхнем слое моря, также как и во всем эвфотическом слое, было подавляющее количество нанопланктона 94-99%, а в видовом составе преобладали кокколитофориды, особенно в 1990 и 1992 гг - 83% и 91%. Последнее обстоятельство представляет особый интерес с оптической точки зрения, так как у кокколитофорид на внешней оболочке клеток имеются известковые диски - кокколиты в количестве 15 шт. Диаметр их 1 мкм, толщина 0,25 мкм. Клетки вида *Emiliania huxleyi* могут сбрасывать кокколиты и тогда их количество в воде по отношению к количеству клеток может быть значительно больше, по данным [37] - до 400, а их концентрация в воде порядка 10^{10} - 10^{11} шт·м⁻³. При таких высоких концентрациях кокколи-

ты производят сильное рассеяние света, значительно снижая прозрачность воды. Вода приобретает при этом характерный белесый цвет, что и наблюдалось в отдельных районах Черного моря в эти годы.

На рис. 8 показан временной ход численности фитопланктона в поверхностном 10-метровом слое и концентрация хлорофилла в эвфотической зоне совместно с глубиной видимости белого диска в западной части моря в 1985-1993 гг. Видна четкая временная связь прозрачности воды с численностью водорослей.

Таблица 5

Биологические и оптические характеристики вод в западной глубоководной части моря (в 1987-1991 гг). Средние значения в период май-сентябрь

N	Характеристика	1987	1988	1989	1990	1991	1992
1	Численность фитопланктона в слое 0-10 м (млн кл·м ⁻³)	125	-	1448	3588	1309	2419
2	Содержание нанопланктона (%)	94.4	-	98.8	99.6	98.5	96.3
3	Содержание кокколитофорид (%)	68.8	-	-	83.2	45.5	91.4
4	Концентрация хлорофилла "а" и феофитинов в эвфотическом слое (мг·м ⁻³)	-	0.3*	0.39	0.60*	0.48	0.70
5	Глубина видимости белого диска (м)	14.0	10.7	10.7	6.8	8.2	6.8

Примечание: знаком * отмечены данные работы [3]

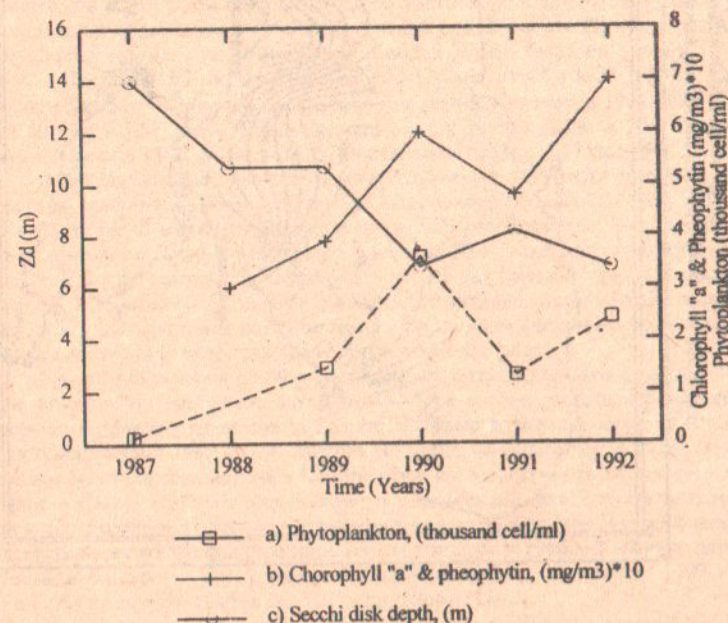


Рис. 8. Биологические и оптические характеристики вод в западной глубоководной части моря в 1987-1992 гг (средние значения в период май-сентябрь).

a) - численность фитопланктона в слое 0-10 м, тыс.кл·мл⁻¹;
b) - концентрация хлорофилла "а" и феофитинов в эвфотической зоне, мг·м⁻³*10;
c) - глубина видимости белого диска, м.

Рис. 9. Распределение средней численности фитопланктона (млн. кл.·м⁻³) в слое 0-20 м в северной части моря в июле 1992 г.



На рис. 9 приведено распределение средней численности фитопланктона в верхнем перемешанном слое в северной части моря летом 1992 г. Сравнение его с рис. 6 объясняет главные особенности распределения прозрачности воды, наблюдавшиеся в это время в Черном море - они определялись распределением численности микроводорослей. Обращает внимание локальная область необычно высокой концентрации фитопланктона (10^{10} кл.·м⁻³, 96% кокколитофориды), в восточной части моря в районе между Сочи и Туапсе. Прозрачность воды здесь составляла 2 м.

3. Факторы, обусловившие рост численности фитопланктона в Черном море в 80-е годы

Рост численности фитопланктона в глубоководных районах моря, начавшийся в 80-е годы, связывают с эвтрофикацией его вод, вызванной поступлением в море различными путями больших количеств биогенных веществ антропогенного происхождения. Основное их количество приносится в море с водами рек (Дунай, Днепр, Днестр и др.), протекающих через районы с большой плотностью населения, высоким уровнем индустриализации и интенсивным сельскохозяйственным производством с применением химических удобрений. По данным [33] содержание нитритов, нитратов и фосфатов в стоке рек в северо-западную часть моря к началу 80-х годов увеличилось по сравнению с 1958-1959 гг в 5-6 раз. В работе [8] приводятся такие цифры: концентрация нитратов в водах Дуная была на уровне 12 мкг ат·л⁻¹ в 50-е годы, 68 мкг ат·л⁻¹ в 80-е и 50-136 мкг ат·л⁻¹ в 1987-1988 гг. Среднегодовое поступление в море фосфатов с речным стоком в 1981-1985 гг более 50 тыс.т [32] значительно превышало их поступление в 50-х годах из глубинных вод 13-17,6 тыс.т [10, 11] и с речным стоком 16,7 тыс.т [1].

В результате поступления в море огромных количеств биогенных веществ на северо-западном шельфе, куда происходит основной сток рек, уже в 70-х годах было отмечено возрастание в 5-10 раз биомассы фитопланктона по сравнению с 50-60-ми годами, а в начале 80-х годов здесь регистрировались еще более высокие ее величины - до 20 раз больше "нормы" прежних лет [29]. В начале 80-х годов антропогенная эвтрофикация вод стала проявляться и в центральных районах моря - продукция фитопланктона и содержание хлорофилла возросли здесь примерно в два раза [3].

Со второй половины 80-х годов кроме антропогенного фактора большое влияние на состояние фитоценоза в море оказал желетелый вселенец - гребневик *Mnemiopsis mccradyi* Mayer. Впервые в Черном море *Mnemiopsis* был обнаружен в 1982 г [28]. Занесен сюда он, по-видимому, с балластными водами судов, приходивших в Черное море из Атлантического океана от побережья США, где этот вид обитает в распресненных водах лагуны и эстуариев. Подходящие условия обитания (низкая соленость вод Черного моря) и отсутствие жесткой конкуренции со стороны автохтонной фауны способствовали быстрому росту численности *Mnemiopsis* - уже летом 1989 г его биомасса в море составила около 1 млрд. тонн [35].

Mnemiopsis является хищным пелагическим животным длиной 10-13 см. Состав пищи - планктонные животные с размерами от сотен микрон (инфузории) до 10-15 мм (крупные калянусы, сагитты, личинки рыб). Преимуществом является область обитания - воды верхнего перемешанного слоя моря до термоклина.

Mnemiopsis сильно потеснил аборигена желтелых Черного моря медузу *Aurelia aurita*, которая до его появления была основным макропланктонным хищником. Но, главное, в результате хищнического пресса огромных масс *Mnemiopsis* произошли существенные изменения в сообществе мезозoopланктона, повлекшие за собой изменения в структуре и численности фитоценоза.

В таблице 6 и на рис. 10, по данным работ [4, 5, 15, 36, 41] и по нашим данным, приведены по годам для летнего периода май-сентябрь средние величины биомассы в открытых районах моря: *Mnemiopsis*, *Aurelia aurita*, мезозoopланктона в целом и отдельно его мелких форм (мелкие копеподы, кладоцеры). Стремительный рост биомассы *Mnemiopsis* к 1989 г до $2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ (на этом же уровне она оставалась и в 1990 г) привел в эти годы к снижению биомассы мезозoopланктона в два раза, а мелких его форм в 3,5-4 раза по сравнению с периодом 1978-1987 гг. В последующие годы, несмотря на уменьшение биомассы *Mnemiopsis* и желтелых в целом, хищнический пресс на зоопланктон продолжал снижать его запасы в верхних горизонтах моря, где в основном обитает *Mnemiopsis*. В 1992 г по сравнению с периодом 1978-1987 гг они сократились для мезозoopланктона в целом в 13, а для мелких его форм в 20 раз. Из зоопланктона практически исчезли мелкие копеподы *Oithona nana*, другие виды - *Paracalanus*, *Penilia*, *Evadna* стали встречаться реже.

Таблица 6

Средняя биомасса желтелых и мезозoopланктона в Черном море в период май-сентябрь

N	Видовой состав	Годы					
		1978-1987	1988	1989	1990	1991	1992
1.	Гребневик <i>Mnemiopsis macleayi</i> Mayer, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$	0	350	1910	1970	330	200
2.	Медуза <i>Aurelia aurita</i> , $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$	350	770	130	140	110	250
3.	Желтелые (медузы и гребневники), $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$	0.5	0.7	1.15	1.40	0.60	0.57
4.	Кормовой зоопланктон, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$	26.1	14.6	10.9	12.8	5.7	2.1
5.	Микрозоопланктон (копеподы и кладоцеры), $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$	11.6	5.5	2.7	3.4	1.2	0.6

В результате снижения численности мелкого растительноядного зоопланктона уменьшился его пресс на фитопланктон, что способствовало росту численности последнего. Одновременность этих событий видна при сравнении рис. 8 и рис. 10. Следует при этом отметить такой факт - при снижении размеров планктофагов уменьшаются оптимальные размеры их пищевых объектов. Таким образом, уменьшение количества микрозоопланктона должно было сопровождаться увеличением численности мелкоразмерных клеток водорослей, что и наблюдалось в структуре фитоценоза в годы его массового развития, в котором подавляющую часть составлял наупланктон.

Кроме влияния *Mnemiopsis* на численность фитопланктона по трофической цепи он оказывает существенное влияние на формирование среды обитания фитоценоза через продукты своей жизнедеятельности. В процессе жизнедеятельности гребневик продуцирует большое количество слизи (при биомассе $3-6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ до 50 г сырой слизи в сутки), с которой в воду поступают органические соединения способствующие образованию пищевой среды для бактерий и миксотрофных водорослей [16].

Учитывая рассмотренные факторы, влиявшие на прозрачность воды в глубоководных районах моря в период 80-х начале 90-х годов, можно следующим образом интерпретировать наблюдавшуюся ее межгодовую изменчивость.

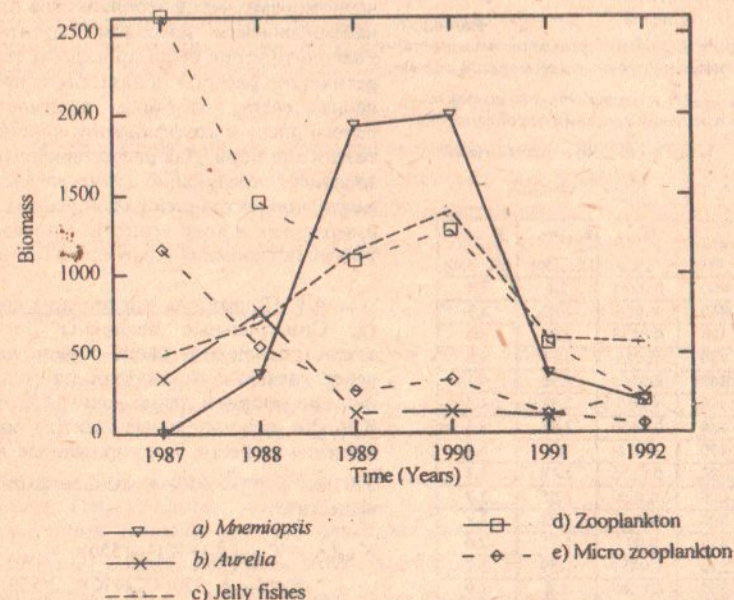


Рис. 10. Межгодовая динамика биомассы желтелых и зоопланктона в Черном море в период 1987-1992 гг: (а) - мнемипсис, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$; (б) - аурелия, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$; (с) - желтелые, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot 10^2$; (д) - зоопланктон, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot 10^2$; (е) мелкий зоопланктон, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot 10^2$.

До 1980 г (конец первой половины 21-го солнечного цикла) наблюдалось динамически устойчивое биооптическое состояние морской системы, проявлявшееся в ритмичном изменении прозрачности воды в соответствии с 11-летним циклом изменения солнечной активности, с отставанием от нее по фазе на два-три года.

В начале 80-х годов в глубоководных районах моря стала проявляться антропогенная эвтрофикация, нарушившая 11-летний ритм в результате чего во второй половине 21-го солнечного цикла вместо "закономерного" повышения прозрачности воды произошло ее снижение.

Драматическая ситуация с необычно низкой прозрачностью воды в море, сложившаяся во второй половине 80-х начале 90-х годов, явилась следствием наложения трех факторов, воздействовавших на морскую систему: антропогенной эвтрофикации, массового развития гребневика *Mnemiopsis* и солнечной активности, так как период 1986-1992 гг пришелся на первую половину 22-го солнечного цикла, когда в соответствии с изменением солнечной активности, прозрачность воды в море должна снижаться.

4. Модельные оценки показателей прозрачности воды в Черном море при массовом развитии кокколитофорид

Для количественной оценки влияния на оптические характеристики черноморских вод фитопланктона при наблюдавшемся массовом развитии кокколитофорид были проведены теоретические расчеты показателя ослабления света, глубины видимости белого диска и коэффициента яркости толщи вод моря. Для расчетов использовались следующие соотношения между концентрацией растворенных и взвешенных в воде веществ и показателями поглощения и рассеяния света.

Таблица 7.

Спектральное распределение показателя поглощения света чистой морской водой

$K_{\text{чмв}}(\lambda)$, относительного показателя поглощения клетками фитопланктона

$K_{\text{кф}}^{\text{отн}}(\lambda, 550)$ и кокколитами

$K_{\text{кок}}^{\text{отн}}(\lambda, 550)$

λ , нм	$K_{\text{чмв}}(\lambda)$, м ⁻¹	$K_{\text{кф}}^{\text{отн}}(\lambda, 550)$	$K_{\text{кок}}^{\text{отн}}(\lambda, 550)$
400	0.0171	2.8	3.1
410	0.016	2.82	3.3
420	0.0153	2.86	3.6
430	0.015	2.93	3.8
440	0.0145	2.96	4.1
450	0.015	2.82	4.2
460	0.0156	2.67	4.3
470	0.016	2.4	4.4
480	0.0176	2.19	4.2
490	0.021	2.05	3.7
500	0.0257	1.93	3.1
510	0.035	1.75	2.6
520	0.0477	1.59	2.3
530	0.0507	1.4	1.9
540	0.0558	1.22	1.4
550	0.0638	1.0	1.0
560	0.0708	0.84	0.78
570	0.084	0.70	0.70
580	0.108	0.61	0.60
590	0.18	0.58	0.70
600	0.244	0.56	0.70
610	0.28	0.52	0.61
620	0.309	0.51	0.60
630	0.314	0.57	0.67
640	0.329	0.56	0.70
650	0.36	0.52	0.60
660	0.40	0.70	0.70
670	0.42	1.31	1.78
680	0.45	1.58	2.1
690	0.55	0.70	1.07
700	0.67	0.35	0.4

[37]: $K_{\text{кф}}^{\text{отн}}(550) = 1,17 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2 \cdot \text{кл}^{-1}$. По данным этой же работы рассчитана величина $K_{\text{кок}}^{\text{отн}}(550) = 1,35 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 \cdot \text{шт}^{-1}$. Относительные спектры поглощения клетками фитопланктона $K_{\text{кф}}^{\text{отн}}(\lambda, 550) = K_{\text{кф}}(\lambda) / K_{\text{кф}}(550)$ и кокколитами: $K_{\text{кок}}^{\text{отн}}(\lambda, 550) = K_{\text{кок}}(\lambda) / K_{\text{кок}}(550)$, рассчитаны по [44].

4.1. Показатель поглощения света. Спектральные величины показателя поглощения света определены через удельные показатели поглощения при опорной длине волны 550 нм $K_{\text{ув}}(550)$, относительные спектры поглощения веществ, нормированные на 550 нм $K_{\text{отн}}(\lambda, 550)$ и концентрацию веществ C :

$$K_{\text{ув}}(\lambda) = K_{\text{чмв}}(\lambda) + K_{\text{ув}}^{\text{отн}}(550) \cdot K_{\text{кф}}^{\text{отн}}(\lambda, 550) \cdot C_{\text{кф}} + K_{\text{ув}}^{\text{отн}}(550) \cdot K_{\text{кок}}^{\text{отн}}(\lambda, 550) \cdot C_{\text{кок}} + K_{\text{ув}}^{\text{отн}}(550) \cdot \exp(-\mu \lambda) \cdot C_{\text{жв}} \quad (3)$$

Индексы обозначают: чмв - морская вода, чмв - чистая морская вода, жв - желтое вещество, кф - клетки фитопланктона, кок - кокколитами. Поглощение света терригенными частицами не учитывалось, так как оно незначительно [27].

Величины $K_{\text{чмв}}(\lambda)$ (табл. 7) взяты из работы [45]. Параметры желтого вещества по [27, 43] составили: $K_{\text{жв}} = 181 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ [43]; $\mu = 0,015 \text{ м}^{-1}$ [27].

Удельный показатель поглощения света клетками фитопланктона взят из

Таким образом, формула, использовавшаяся для расчета спектральных величин показателя поглощения света морской водой, имеет вид:

$$K_{\text{ув}}(\lambda) = K_{\text{чмв}}(\lambda) + 181 \cdot \exp(-0,015 \cdot \lambda) \cdot C_{\text{жв}} + 1,17 \cdot 10^{-11} \cdot K_{\text{кф}}^{\text{отн}}(\lambda, 550) \cdot C_{\text{кф}} + 1,35 \cdot 10^{-13} \cdot K_{\text{кок}}^{\text{отн}}(\lambda, 550) \cdot C_{\text{кок}} \quad (4)$$

4.2. Показатель рассеяния света. Формула для расчета спектральных величин показателя рассеяния получена следующим образом. Компонентами морской воды, определяющими ее рассеивающие свойства, являются: чистая морская вода, клетки фитопланктона, кокколитами, терригенные частицы, т.е.:

$$\sigma_{\text{ув}}(\lambda) = \sigma_{\text{чмв}}(\lambda) + \sigma_{\text{кф}}(\lambda) + \sigma_{\text{кок}}(\lambda) + \sigma_{\text{тр}}(\lambda) \quad (5)$$

В [37] установлено, что спектральная изменчивость показателя рассеяния света назад $\sigma_{\uparrow}(\lambda)$ взвесью клеток фитопланктона и кокколитов в морской воде при цветении *Emiliania huxleyi* пропорциональна $\lambda^{-0,8}$, т.е. для опорной длины волны $\lambda = 550 \text{ нм}$, принятой в наших расчетах, можно записать:

$$\sigma_{\uparrow}^{\text{чмв}} + \sigma_{\uparrow}^{\text{кф}} + \sigma_{\uparrow}^{\text{кок}} = [\sigma_{\uparrow}^{\text{чмв}}(550) + \sigma_{\uparrow}^{\text{кф}}(550) + \sigma_{\uparrow}^{\text{кок}}(550)] \cdot (550/\lambda)^{0,8} \quad (6)$$

Известно, что общий показатель рассеяния связан с показателем рассеяния назад соотношением $\sigma = \sigma_{\uparrow}(k+1)$, где k - коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния, равный отношению показателей рассеяния вперед и назад:

$$k = \sigma_{\downarrow} / \sigma_{\uparrow} = (\sigma - \sigma_{\uparrow}) / \sigma_{\uparrow} \quad (7)$$

По нашим измерениям индикатрисы рассеяния света (использовался нефелометр [23]) в пробах морской воды, содержащих выращенную в лабораторных условиях культуру *Emiliania huxleyi* в концентрациях $5 \cdot 10^7$ - $5 \cdot 10^9$ шт $\cdot \text{м}^{-3}$, коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния для $\lambda = 520 \text{ нм}$ варьировал в пределах 65-75 единиц. С учетом [24] для $\lambda = 550 \text{ нм}$ в среднем приняли $k+1=70$. Таким образом, формула (6) может быть представлена так:

$$\sigma_{\text{ув}}(\lambda) = [\sigma_{\uparrow}^{\text{чмв}}(550) + \sigma_{\uparrow}^{\text{кф}}(550) + \sigma_{\uparrow}^{\text{кок}}(550)] \cdot 70 \cdot (550/\lambda)^{0,8} + \sigma_{\uparrow}^{\text{тр}}(550) \cdot (550/\lambda)^p \quad (8)$$

Удельный показатель рассеяния света назад клетками фитопланктона для $\lambda = 546 \text{ нм}$ по [37] составил: $\sigma_{\uparrow}^{\text{кф}}(546) = 5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 \cdot \text{кл}^{-1}$, а для кокколитов установлена зависимость:

$$\sigma_{\uparrow}^{\text{кок}}(546) = 0,00128 + 1,2896 \cdot 10^{-13} \cdot C_{\text{кок}} - 8,4063 \cdot 10^{-26} \cdot C_{\text{кок}}^2 \quad (9)$$

В формуле (9) при нулевой концентрации кокколитов показатель рассеяния не равен нулю, а за счет первого члена имеет значительную величину, физический смысл которой неясен, поэтому для расчетов рассеяния света кокколитами мы использовали другую аппроксимацию данных измерений, представленных в [37]:

$$\sigma_{\uparrow}^{\text{кок}}(546) = 1,1 \cdot 10^{-13} \cdot C_{\text{кок}} \quad (10)$$

Показатель рассеяния света назад для чистой морской воды определялся через общий показатель рассеяния $\sigma_{\uparrow}^{\text{ув}} = 0,5 \cdot \sigma_{\text{чмв}}$, который был рассчитан по формуле [40]:

$$\sigma_{\text{чв}}(\lambda) = 5,133 \cdot 10^8 \cdot \lambda^{-4,32} \quad (11)$$

Удельный показатель рассеяния света терригенными частицами определен по таблицам светорассеяния [34] при следующих параметрах: показатель преломления частиц относительно воды $m=1,2$, минимальный и максимальный радиусы частиц $r_{\text{мин}}=0,02$ мкм, $r_{\text{макс}}=1,3$ мкм, распределение числа частиц по размерам $N(r) \sim r^{-4}$ [27]. Для принятого распределения числа частиц по размерам переход от массовой концентрации частиц M к их численной концентрации N , производился по формуле:

$$N = M \cdot (r_{\text{мин}}^3 - r_{\text{макс}}^3) / (4\pi d \cdot (\ln r_{\text{макс}} - \ln r_{\text{мин}}) r_{\text{мин}}^3 r_{\text{макс}}^3) \quad (12),$$

где d - плотность частиц в г·см⁻³, тогда N имеет размерность шт·см⁻³. Величина удельного показателя рассеяния составила $\sigma_{\text{тр}}(550) = 0,707$ м²·г⁻¹. Параметр n , характеризующий спектральную изменчивость рассеяния света терригенными частицами, принят равным 1,7 [27].

В окончательном виде формула для расчета спектральных величин показателя рассеяния света имеет вид:

$$\sigma_{\text{чв}}(\lambda) = [3,72 \cdot 10^{-4} + 5,4 \cdot 10^{-12} \cdot C_{\text{кф}} + 1,1 \cdot 10^{-13} \cdot C_{\text{кок}}] \cdot 70 \cdot (550/\lambda)^{0,8} + 0,707 \cdot C_{\text{тр}} (550/\lambda)^{1,7} \quad (13)$$

где концентрация веществ выражена: клеток фитопланктона и кокколотов - шт·м⁻³, терригенных частиц - г·м⁻³.

Значения удельных показателей рассеяния для клеток фитопланктона и кокколотов, найденные в [35] при длине волны 546 нм, мы отнесли к опорной длине волны 550 нм, принятой в наших расчетах, так как эти длины волн близки.

4.3. Показатель ослабления света. Его величина определялась по формуле:

$$E_{\text{чв}}(\lambda) = K_{\text{чв}}(\lambda) + \sigma_{\text{чв}}(\lambda) \quad (14)$$

4.4. Глубина видимости белого диска. Для вод Черного моря в [21] по экспериментальным данным получена формула, связывающая глубину видимости белого диска с показателем ослабления света при длине волны 528 нм:

$$Z_d = 7,17 / (E + 0,09) \quad (15)$$

Эта формула была модифицирована с учетом того, что произведение $E \cdot Z_d$ растет при увеличении вероятности выживания фотона $\Lambda = \sigma/E$ [12], а также вероятность выживания фотона Λ растет при увеличении показателя ослабления света [12]. В результате получена следующая формула для определения глубины видимости белого диска:

$$Z_d = (5,2 + 2,8 \cdot E^{0,5}) / (E + 0,09) \quad (16)$$

При $E = 0,5$ м⁻¹, что является средней величиной показателя ослабления света при натурных наблюдениях, по которым в [21] получена формула (15), выражение (16) переходит в (15). При проведении расчетов по формуле (16) вводится ограничение на максимальную величину выражения, стоящего в числителе, обусловленное тем, что согласно [12] при $E > 1,0$ м⁻¹ величина Λ

не изменяется. Поэтому при $E > 1,0$ м⁻¹ числитель в формуле (16) принимается постоянным и равным 8,0.

4.5. Коэффициент яркости водной толщи. Для расчета спектральных величин коэффициента яркости водной толщи использовалась формула Гордона [38]:

$$\rho(\lambda) = 0,628 \cdot [0,3244 \cdot X(\lambda) + 0,1425 \cdot X^2(\lambda) + 0,1308 \cdot X^3(\lambda)] \quad (17)$$

где $X(\lambda)$ - параметр Гордона, определяемый через показатель рассеяния назад и показатель поглощения:

$$X(\lambda) = \sigma \uparrow_{\text{чв}}(\lambda) / [\sigma \uparrow_{\text{чв}}(\lambda) + K_{\text{чв}}(\lambda)] \quad (18)$$

Величина $K_{\text{чв}}(\lambda)$ рассчитывалась по формуле (4), а $\sigma \uparrow_{\text{чв}}(\lambda)$ по формуле:

$$\sigma \uparrow_{\text{чв}}(\lambda) = [3,72 \cdot 10^{-4} + 5,4 \cdot 10^{-12} \cdot C_{\text{кф}} + 1,1 \cdot 10^{-13} \cdot C_{\text{кок}}] \cdot (550/\lambda)^{0,8} + 2,02 \cdot 10^{-2} \cdot (550/\lambda)^{1,7} \cdot C_{\text{тр}} \quad (19)$$

Удельный показатель рассеяния света назад терригенными частицами в формуле (19) $\sigma \uparrow_{\text{тр}}(550) = 2,02 \cdot 10^{-2}$ был определен из $\sigma_{\text{тр}}(550)$; через коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния данных частиц, рассчитанный по таблицам [34] он составил $k = 34$.

4.6. Концентрация веществ. При расчетах гидрооптических характеристик были использованы наблюдаемые численности фитопланктона. Для кокколитофорид число кокколотов на одной клетке принималось равным 15 [31]. Так как концентрации желтого вещества и терригенных частиц во время биологических наблюдений не определялись, для расчетов брались их средние величины в открытых районах моря.

При оценке средней концентрации желтого вещества использовались данные о показателе вертикального ослабления дневного света $\alpha \downarrow$, опубликованные в [26] и наши собственные измерения. Для средней части видимой области спектра, где велись наши измерения, согласно [14]:

$$K_{\text{чв}} = 0,81 \cdot \alpha \downarrow \quad (20)$$

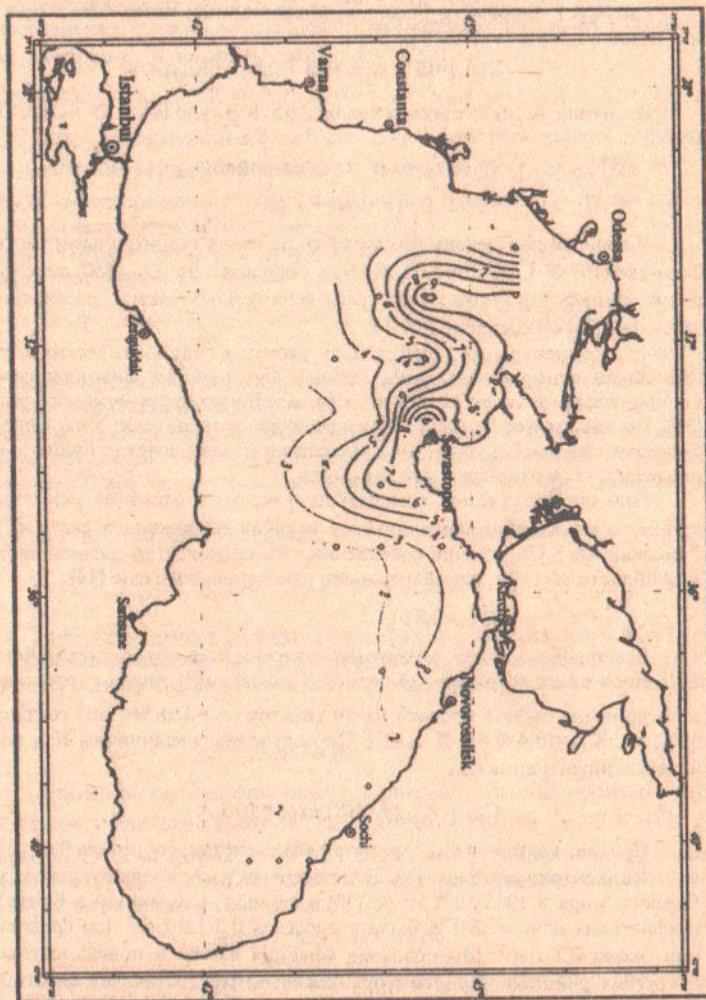
В эвтрофных водах, к каковым отнесены воды открытых районов Черного моря в рассматриваемый период ($C_{\text{жв}} > 0,4$ г·м⁻³), вклад желтого вещества в поглощение света в средней части спектра ($\lambda = 510-540$ нм) составляет 40-65%, т.е. $K_{\text{жв}} = (0,4 + 0,65) K_{\text{чв}}$ [27]. По полученным величинам $K_{\text{жв}}$ рассчитывалась концентрация $C_{\text{жв}}$:

$$C_{\text{жв}} = K_{\text{жв}}(\lambda) / 181 \cdot \exp(-0,015 \cdot \lambda) \quad (21)$$

Средняя величина $C_{\text{жв}}$, принятая для расчетов, составила 0,6 г·м⁻³.

Концентрация общей взвеси в поверхностных водах открытых районов Черного моря в 1985-1992 гг по [30] и данным, собранным в банке океанографических данных МГИ была в пределах 0,5-1,0 г·м⁻³ при среднем значении около 0,7 г·м⁻³. Минеральная фракция взвеси в поверхностных водах открытых районов Черного моря, согласно [7], составляет около 30%, т.е. средняя концентрация терригенных частиц $C_{\text{тр}} = 0,2$ г·м⁻³. Для вод северо-западного шельфа, с глубинами 50-200 м в соответствии с [28] принимали удвоенную концентрацию терригенных частиц, т.е. $C_{\text{тр}} = 0,4$ г·м⁻³.

Рис. 11. Распределение глубины видимости белого диска (в метрах) в июле 1992 г., рассчитанное через численность фитопланктона по модельным формулам.



5. Результаты расчетов

5.1. Глубина видимости белого диска. На рис. 11 показано распределение глубины видимости белого диска в северной части моря в июле 1992 г., рассчитанное по модельным формулам, в которых численность фитопланктона задавалась величинами, наблюдаемыми в 37-ом рейсе НИС "Профессор Водяницкий" (табл. 8). Сравнение рассчитанного поля Z_d (Рис. 11) с фактическим (Рис. 6) показывает их удовлетворительное согласие, как в характере

Таблица 8

Численность фитопланктона и глубина видимости белого диска в северной части Черного моря в июле 1992 г.

Дата	N ст.	Широта	Долгота	Слой. (м)	Общая численность млн шт·м ⁻³	Численность кокколитофорид. млн шт·м ⁻³	Z_d Наблюд. (м)	Z_d Вычисл. (м)
5.07	4992	45°32'	32°40'	0	443	349	-	10.5*
6.07	4994	45°25'	32°15'	0-15	718	634	8.0	9.1*
6.07	4996	45°30'	31°15'	0-20	606	505	7.0	9.5*
7.07	4998	45°30'	30°30'	0	4016	165	2.0	2.5**
8.07	5000	44°30'	31°15'	0-20	750	592	7.0	10.4
8.07	5003	44°00'	31°15'	0-20	2488	2254	7.0	5.0
10.07	5018	44°30'	32°15'	0-10	3721	3562	6.0	3.6
11.07	5024	43°30'	32°15'	0-20	3496	3224	6.0	3.8
12.07	5029	44°50'	33°15'	0-20	1546	1350	-	7.2
12.07	5031	44°30'	33°15'	0-20	505	309	8.0	12.3
13.07	5033	44°00'	33°15'	0-20	4209	4018	4.0	3.3
15.07	5038	44°00'	34°15'	0-10	1657	1380	-	7.0
15.07	5040	43°30'	35°15'	0	7407	6700	-	1.9
16.07	5041	44°00'	35°15'	0-20	6975	6663	3.0	2.1
16.07	5043	44°40'	35°15'	0-15	3945	3672	-	3.5
18.07	5048	44°30'	37°15'	0-10	4425	3219	3.0	3.3
18.07	5049	44°00'	37°15'	0-15	7606	7032	2.5	1.9
20.07	5055	43°50'	39°05'	0-20	10337	9878	2.0	1.4
27.07	5061	42°30'	40°15'	0	4600	4160	-	3.0
27.07	5063	42°50'	40°15'	0-15	6590	6190	-	2.2
27.07	5065	43°10'	40°15'	0	4980	4500	-	2.8

Примечание: *) Концентрация терригенных частиц $0.4 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ (северо-западный шельф, глубина 50-200 м)

**) Концентрация терригенных частиц $2.0 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ (около устья Дуная).

В остальных случаях $C_{тр} = 0.2 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$

пространственного распределения, так и в численных величинах. Соотношение между рассчитанными величинами Z_d и наблюдаемыми на том же судне, где производились измерения численности фитопланктона, показано на рис. 12. Максимальное расхождение между моделью и экспериментом составляет около 50%. Имеющиеся расхождения в пространственном распределении и численных значениях наблюдаемых и рассчитанных величин Z_d могут быть обусловлены несколькими причинами. Во-первых, пространственно - временной изменчивостью оптических и биологических характеристик. Здесь следует отметить такие факторы. При расчетах Z_d брались средние значения концентрации фитопланктона в слое 0 - 20 м, а не в слое от 0 до Z_d . Большинство измерений Z_d , по которым построена карта, приведенная на рис. 6, производилось в другие дни и не на том же судне, на котором проводились биологические наблюдения. Во-вторых, при модельных расчетах использо-

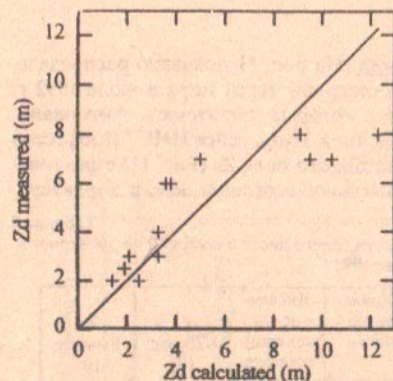


Рис. 12. Соотношение между вычисленными и наблюдаемыми величинами Z_d в июле 1992 г. Сплошной линией показана идеальная регрессия, когда $Z_{d \text{ измеренное}} = Z_{d \text{ рассчитанное}}$

вались не реальные величины концентрации желтого вещества и терригенных частиц, а их средне-многолетние значения. Возможно есть еще какие-то другие факторы, не учитываемые в модели.

5.2. Спектральное распределение показателя ослабления света. На рис. 13 представлены функции $E(\lambda)$, измеренные в пробах воды лабораторным прозрачномером [20] и рассчитанные по модели. Верхняя пара кривых относится к культуре фитопланктона *Emiliania huxleyi*, выращенной в лабораторной установке, нижняя пара - к пробе морской

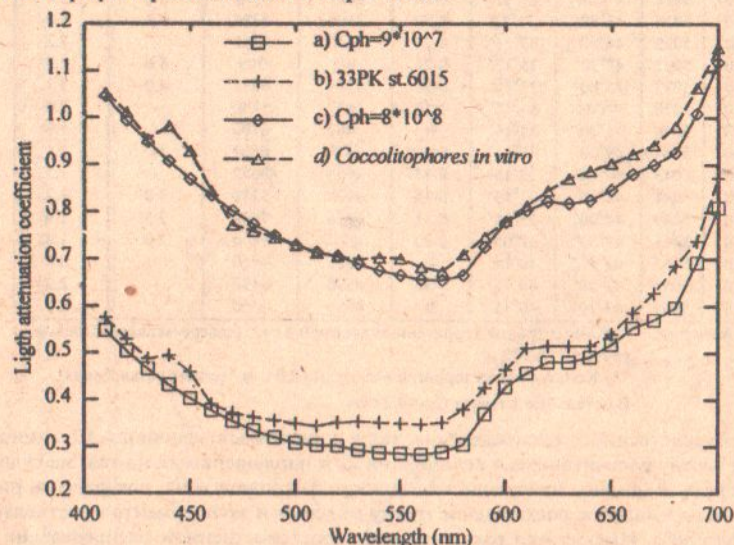


Рис. 13. Измеренные и рассчитанные функции спектрального распределения показателя ослабления.

Нижняя пара кривых - биологические и оптические измерения в 33-м рейсе НИС "Профессор Колесников": (а) - модель при параметрах: $C_{kf} = 6 \cdot 10^7 \text{ кл} \cdot \text{м}^{-3}$, $C_{кок} = 2,4 \cdot 10^8 \text{ шт} \cdot \text{м}^{-3}$, $C_{жв} = 0,6 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, $C_{тр} = 0,2 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, (б) - эксперимент. Глубина видимости белого диска на станции была 15 м, рассчитанная по формуле (16) - 17,2 м.

Здесь можно констатировать хорошее согласие экспериментальных и теоретических функций $E(\lambda)$. Во всех модельных расчетах: $C_{жв} = 0,6 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, $C_{тр} = 0,2 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$.

Следует сделать замечание по модельной функции $E(\lambda)$ для лабораторной культуры кокколитофорида. При ее расчетах концентрация желтого вещества и терригенных частиц принята такой же, как и в море, так как культура выращивалась в морской воде, которая была отфильтрована только на крупную взвесь. Терригенные частицы имеют небольшие размеры (менее 1-2 мкм) и фильтром они, также как и растворенное в воде желтое вещество, не улавливались.

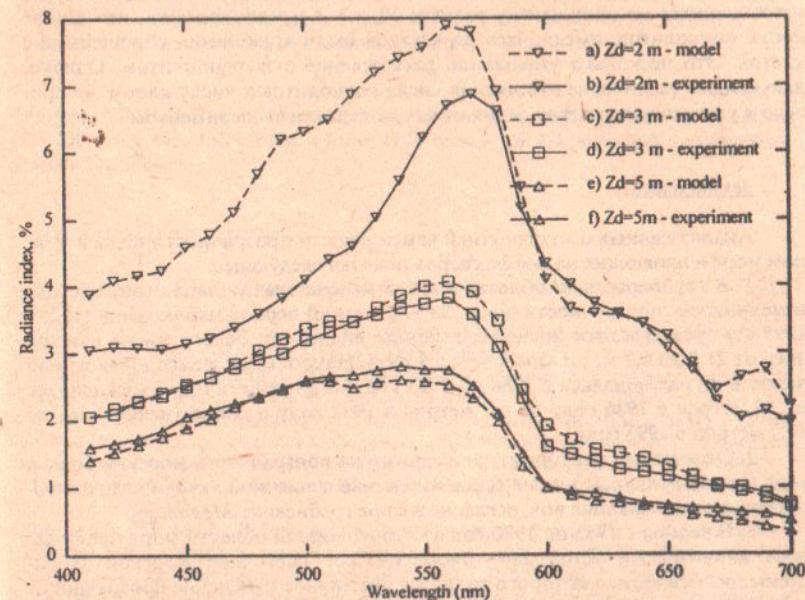


Рис. 14. Измеренные и рассчитанные функции спектрального распределения коэффициента яркости моря:

- 1) $Z_d = 2 \text{ м}$, (а) - расчет по модели: $C_{kf} = 1 \cdot 10^{10} \text{ кл} \cdot \text{м}^{-3}$, $C_{кок} = 3 \cdot 10^{11} \text{ шт} \cdot \text{м}^{-3}$, (б) - эксперимент;
- 2) $Z_d = 3 \text{ м}$, (с) - расчет по модели: $C_{kf} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ кл} \cdot \text{м}^{-3}$, $C_{кок} = 4,5 \cdot 10^{10} \text{ шт} \cdot \text{м}^{-3}$, (д) - эксперимент;
- 3) $Z_d = 5 \text{ м}$, (е) - расчет по модели: $C_{kf} = 1,4 \cdot 10^9 \text{ кл} \cdot \text{м}^{-3}$, $C_{кок} = 1,3 \cdot 10^{10} \text{ шт} \cdot \text{м}^{-3}$, (ф) - эксперимент.

5.3. Спектральное распределение коэффициента яркости моря. Экспериментальные функции $P(\lambda)$, представленные на рис. 14, измерены прибором [38] в июле 1992 г на НИС "Профессор Колесников" (29-й рейс), работавшем в тех же районах, в которых производились биологические наблюдения на НИС "Профессор Водяницкий" (37 рейс). При расчетах взяты величины численности фитопланктона на станциях наиболее близко распо-

лагавшихся к тем, на которых производились измерения спектров яркости моря. Для двух спектров $\rho(\lambda)$, измеренных в водах с $Z_d=5$ м и $Z_d=3$ м получено хорошее согласие между измеренными и рассчитанными спектрами. Спектр $\rho(\lambda)$, измеренный в восточной части моря, где наблюдалась максимальная концентрация фитопланктона, 96% которого составляли кокколитофориды ($Z_d=2$ м), недостаточно хорошо смоделирован в коротковолновой области. При числе кокколитов на одну клетку равно 15, принятым во всех расчетах, модельный спектр проходил значительно ниже экспериментального. Спектр $\rho(\lambda)$, показанный на рис. 14, рассчитан при числе кокколитов, приходящихся на одну клетку равным 30, т.е. в предположении, что в воде кроме кокколитов, имеющихся на клетках были кокколиты, сброшенные с клеток. Это несколько уменьшило расхождение с экспериментом. Однако, дальнейшее увеличение отношения числа кокколитов к числу клеток не привело к уменьшению расхождения между моделью и экспериментом.

Заклучение

Анализ данных о многолетней изменчивости прозрачности воды в Черном море и влияющих на нее факторов показал следующее:

1. В глубоководной области моря отмечена значительная многолетняя изменчивость прозрачности воды. За 72-х летний период наблюдений (1923 - 1995 гг) среднегодовое значение глубины видимости белого диска изменялось от 21,3 до 6,2 м, т.е. более чем в 3 раза. Наибольшая межгодовая изменчивость Z_d наблюдалась в 1986 по 1995 год, когда ее величина уменьшилась от 16 метров в 1986 году до 6,2 метров в 1992 году и снова увеличилась до 17,7 метров в 1995 году.

2. Основными факторами, влиявшими на прозрачность морской воды в этот период являлись: циклическое изменение солнечной активности, антропогенная эвтрофикация вод, вселение в море гребневика *Mnemiopsis*.

3. В период с 1953 по 1980 год в глубоководной области моря наблюдалось динамически устойчивое биооптическое состояние морской экосистемы, особенностью которого являлось ритмичное изменение прозрачности морской воды в соответствии с 11-ти летним циклом солнечной активности с отставанием от нее по фазе на два - три года.

4. Процесс антропогенной эвтрофикации вод Черного моря, начавшийся в 60-х годах с северо-западного шельфа, в 80-е годы распространился на глубоководные районы, вследствие чего здесь стала увеличиваться численность фитопланктона. Это нарушило 11-летний биооптический цикл, появился отрицательный тренд в многолетней изменчивости прозрачности морской воды.

5. Во второй половине 80-х годов произошло резкое изменение состояния фитоплана в море, выразившееся в массовом развитии микроводорослей. Подавляющую часть их составляли кокколитофориды. Одновременно отмечалось значительное уменьшение прозрачности морской воды.

6. Большое влияние на состояние фитоплана в этот период оказал вселенец - гребневик *Mnemiopsis*, появившийся в море в начале 80-х годов. Быстро размножившись в огромных количествах, *Mnemiopsis* истреблял растительный зоопланктон, способствуя тем самым снижению пресса последнего на фитопланктон.

7. Модельные оценки оптических характеристик вод Черного моря в годы массового развития кокколитофорид показали удовлетворительное согласие рассчитанных и наблюдаемых величин. Таким образом, теоретические расчеты показали, что происходившие в конце 80-х начале 90-х годов изменения прозрачности морской воды могут быть объяснены имевшими место изменениями в численном и видовом составе фитопланктона.

Полученные данные о закономерности межгодовой изменчивости оптических и биологических характеристик вод Черного моря могут быть использованы для разработки методов диагностики и прогнозирования состояния морской экосистемы. Для получения более точных и статистически обеспеченных характеристик изменчивости параметров биооптической системы необходимо проведение регулярных ежегодных наблюдений в глубоководной области моря в различные сезоны.

The research described in this publication was made possible in part by Grant № U1V200 from the Joint Fund of the Government of Ukraine and International Science Foundation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алмазов А.М. Гидрохимия устьевых областей рек // Киев. Изд. АН УССР, 1962, 253 с.
2. Берсенева Г.П. Сезонная динамика концентрации хлорофилла "а" // Планктон Черного моря. Киев. "Наукова Думка", 1993. с.92-109.
3. Ведерников В.И., Демидов А.Б. Первичная продукция и хлорофилл в глубоководных районах Черного моря // Океанология. 1993. Т.33. N 2. С. 229-235.
4. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А. Массовое развитие гребневика *Mnemiopsis* как проявление антропогенного воздействия на экосистему моря // Практическая экология морских регионов. Черное море. Киев: "Наукова Думка". 1990. С. 94-106.
5. Виноградов М.Е., Сапожников В.В., Шушкина Э.А. Экосистема Черного моря. М: Наука. 1992. 112 с.
6. Возняк Б., Хаптер Р., Ведерников В.И. Поступление фотосинтетически активной радиации в эвфотическую зону Черного моря в апреле - мае 1984 г // Исследования экосистемы пелагиали Черного моря. ИО АН СССР. М., 1986. С. 198-221.
7. Витюк Д.М. Взвешенное вещество и его биогенные компоненты // Киев. "Наукова Думка". 1983, 210 с.
8. Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Буланая З.Т. Современные тенденции изменений гидрохимических условий северо-западной части Черного моря // Изменчивость экосистемы Черного моря. Естественные и антропогенные факторы. М., Наука, 1991. С. 104-116.
9. Георгиева Л.В. Видовой состав и динамика фитоплана // Планктон Черного моря. Киев. "Наукова думка". 1993, с.31-55.
10. Добржанская М.А. Характер вертикального распределения кислорода в зависимости от времени года в верхней 100-метровой толще центральной части Черного моря // Тр. Севастопольской биол. ст., 1959. Т. 11. С. 285-289.
11. Добржанская М.А. Основные черты гидрохимического режима Черного моря // Тр. Севастопольской биол. ст., 1960. Т.13. С. 325-373.
12. Доллин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения // Л. Гидрометиздат. 1991. С. 104-116.
13. Еремеев В.Н., Владимиров В.Л., Крашенинников Б.Н. Долговременная изменчивость прозрачности вод Черного моря // Гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря // Севастополь: изд. МГИ НАНУ, 1992. С. 28-30.

14. Иванов А.П. Физические основы гидрооптики //Минск, "Наука и техника", 1975, 503 с.
15. Ковалев А.В., Мельников В.В., Островская Н.А., Прусова И.Ю. Макропланктон //Планктон Черного моря. Киев: "Наукова Думка". 1993. С. 183-193.
16. Корнеева Г.А., Шиганова Т.А. Влияние железеющих организмов на формирование пула нейтральных протеаз в морской воде //Океанология. 1995. Т. 35, N 1. С. 82-87.
17. Кочерга Ю.П., Чеберкус В.И., Альтман Э.И. Прогнозирование взаимосвязанных процессов //Автоматика, 1985, N 6. С.74-79.
18. Книпович Н.М. Гидрологические исследования в Черном море //Гр. Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции. Вып.10, М. 1932, 272 с.
19. Левин И.М., Николаев В.П. Об оценке вертикального ослабления квантовой облученности в области фотосинтетически активной радиации в Черном море //Океанология. 1992. Т. 32. N 2& С. 240-245.
20. Маньковский В.И., Кайгородов М.Н. Лабораторный автоколлимационный прозрачномер с переменной базой //Автоматизация научных исследований морей и океанов. Севастополь. МГИ АН УССР, 1980. С. 91-92.
21. Маньковский В.И., Земляная Л.А. Связь глубины видимости белого диска с показателем ослабления света для вод Черного моря //Комплексные океанологические исследования Черного моря. Севастополь. МГИ НАНУ. 1989. С. 82-85.
22. Маньковский В.И., Соловьев М.В., Владимиров В.Л. Эволюция гидрооптических характеристик Черного моря в 1922-1992 гг //Комплексные океанологические исследования Черного моря. Севастополь. МГИ НАНУ. 1995. С. 172-189.
23. Маньковский В.И. Морской импульсный нефелометр //Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР. Киев. "Наукова Думка", 1981. С. 87-89.
24. Маньковский В.И. Спектральная изменчивость коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света морской водой //Океанология. 1984. Т. 24., вып. 1. С. 63-69.
25. Морозова-Водяницкая Н.В., Белогорская Е.В. О значении кокколитофорид и особенно понтосферы в планктоне Черного моря //Труды Севастопольской биологической станции, 1957, т. IX, с.14-22.
26. Николаев В.П., Сасин В.Д. Особенности оптической структуры вод Черного моря в феврале - марте 1991 г //Геленджик. ЮО ИО РАН. 1992. Деп. ВИНТИ, N 1306-B92. 35 с.
27. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана //М: Наука, 1983. С. 114-229.
28. Переладов М.В. Некоторые наблюдения за изменением биоценозов Судакского залива //Тез. 3-й Всесоюз. конф. по морской биологии (Севастополь), Киев, 1988. Ч. 1. С. 237-238.
29. Практическая экология морских регионов. Черное море //Киев, "Наукова Думка", 1990, гл. 8. С. 192-200.
30. Практическая экология морских регионов. Черное море //Киев, "Наукова Думка", 1990, гл. 7. С. 183-187.
31. Раймонт Дж. Планктон и продуктивность океана. Фитопланктон М. "Легкая и пищевая промышленность". 1983. Т. 1. 568 с.
32. Рябинин А.И., Кравец В.Н., Губанов В.И. и др. Гидрохимические условия. Черное море //Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. М. Гидрометеоиздат. 1990. Т. 4. Вып. 2. 557 с.
33. Фашук Д.Я., Шапоренко С.И. Загрязнение прибрежных вод Черного моря: источники, современный уровень, межгодовая изменчивость //Водные ресурсы. М. Наука. 1995. Т. 22. N 3. С. 237-281.
34. Шифрин К.С., Салганик И.Н. Таблицы по светорассеянию. Рассеяние света моделями морской воды //Гидрометеоздат. Л. 1973. Т. 5. 218 с.
35. Шушкнина Э.А., Мусаева Э.И. Структура планктонного сообщества эпипелагиали Черного моря и ее изменение в связи с вселением нового вида гребневика //Океанология. 1990. Т. 30. Вып. 2. С. 324-328.

36. Шушкнина Э.А., Виноградов М.Е. Многолетние изменения биомассы планктона в открытых районах Черного моря //Океанология. 1991б. -31.6. С. 973-980.
37. Balch W.M., Holligan P.M., Acklson S.G., Voss K.I. Biological and optical properties of mesoscale coccolithophore blooms in the Gulf of Maine //Limnol. and Oceanogr., 1991, 36 (4). P. 629-643.
38. Gordon H.R., Brown O.B. Diffuse reflectance of the ocean: some effects of vertical structure //Appl. Opt., 1975, V.14, N12. P. 2892-2895.
39. Lee M.E., Martynov O.V. The Hydrooptical instruments for undersatellite investigation //Proc. of the Third Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments. Seattle, 1995.
40. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color //Limnol. and Oceanogr., 1977, V. 22, N 4. P. 709-722.
41. Multu E., Bingel F., Gucu A.C., Melnikov V.V., Nierman U., Ostrovskaya N.A. and Zaika V.E. Distribution of the new invader Mnemiopsis sp. and the resident Aurelia aurata and Pleurobrachia pileus populations in the Black Sea in the years 1991-1993 //ICES J. mar. Sci. 51: 407-421, 1994.
42. Petrova-Karadjova V.I. Solar control upon the phytoplankton in the Black Sea //Rapports et proce's - verbaux des reunions commission internationale pour l'exploration scientifique de la mer Mediterranee. 1992. V. 33. P.265.
43. Nyquist G. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances //Thes. Dep. Anal. Mar. Chem. Gotheburg, 1997. P. 200.
44. Schofield O., Bidigare R.R., Prezelin B.B. Spectral photosynthesis, quantum yield and blue-green light enhancement of productivity rates in the diatom chaetoceros gracile and the prymnesiophyte Emiliania huxleyi //Marine ecology progress series. 1990. V. 64. P. 175-186.
45. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm) //Appl. Opt. 1981. V.20. N 2. P. 177-186.

V.I. Mankovsky, V.L. Vladimirov, E.I. Afonin, A.V. Mishonov,
M.V. Solov'ev, B.E. Anninskiy, L.V. Georgieva, O.A. Yunev

Long-term variability of the Black Sea water transparency and factors
determined its strong decrease in the late 1980s early 1990s.

ABSTRACT

The 72-years long data series (1923-1995) of the Black Sea water transparency had been analyzed using the results of the Secchi disk depth measurements (Z_d). Some other hydrooptical (vertical profiles and spectral distribution of the attenuation coefficient, water color, radiance index) and biochemical variables (chlorophyll "a", pheophytin, primary production, particulate and dissolved matter, biomass of microzooplankton, jelly-fishes biomass; biomass, quantity and types of phytoplankton) were included in the analysis.

Transparency in the deep central part of the sea (mean annual values) during this period changed more than three times, from 21.3 to 6.2 meters. The most pronounced variability of Z_d had been found from 1986 till 1995, when the values of Z_d decreased from 16m in 1986 to 6.2m in 1992, and increased again to 17.7m in 1995.

The principal mechanisms responsible for these changes were determined using modeling, statistical processing, and analysis of the data stored in the multivariable biooptical database.

There are three main reasons responsible for the strong water transparency decrease: the 11-year cycle of solar activity, significant eutrophication occurs both in the near-shore and deep areas of the Black Sea, and the influence of the biological invader *Mnemiopsis* on the ecosystem.

The enhanced bloom of *Coccolitophores* was observed in the Black Sea during the drastic transparency decrease from 1986 to 1992. Their content in the Black Sea was more than 1.5 - 2 orders of magnitude larger than in previous years and reached 2-3 billions per cubic meter. A significant increase of this type of plankton has changed the structure of the plankton community. Now nanoplankton, which contributes immensely to the light scattering, accounts for 90% of the phytoplankton content.

Phytoplankton structure was strongly impacted by the biological invader *Mnemiopsis*, which appeared in the Black Sea in the early 1980s, and whose biomass amounted to one billion tons in 1989. As a result, the amount of herbivorous microzooplankton, which is a part of the *Mnemiopsis* food, has decreased by several times, whereas the phytoplankton content conversely, increased. The great amount of dissolved organic matter released by *Mnemiopsis* also facilitated the increase of some types of phytoplankton and bacteria.

Periodical oscillations in the long-term variability of the Black Sea water transparency have been found to occur, which correlate with the 11-year cycle of solar activity. The time lag between extremums of the transparency and solar activity is two-three years.

Model calculations of the spectral attenuation coefficient, Secchi disk depth and spectral radiance index were performed. They have confirmed that the current phytoplankton composition and concentration can explain the observed changes of water transparency.

Подписано к печати 04.09.1996

Тираж 100 Заказ 56

Отпечатано СО "ЭКОСИ-Гидрофизика"

335000, Севастополь, Ленина, 28