

УДК 551.463.5

© М. Е. Ли, А. А. Латушкин, О. В. Мартынов
 Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
 oleg.martynov.49@mail.ru

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОЗРАЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ

Статья поступила в редакцию 01.12.2017, после доработки 03.07.2018.

Проведен анализ изменений прозрачности поверхностных вод Черного моря по данным определений глубины видимости белого диска. Используются как литературные данные, так и результаты собственных экспедиционных определений на научно-исследовательских судах и стационарной океанографической платформе. Показано, что после катастрофического снижения прозрачности вод поверхностного слоя, отмечавшегося в начале 1990-х гг., произошло постепенное повышение ее значений до величин, наблюдавшихся в 1960—1980 гг. Снижение прозрачности объясняется перестройкой структуры планктонного сообщества вод Черного моря под воздействием поступления с речным стоком больших количеств биогенных веществ антропогенного происхождения и появлением вселенца — гребневика *Mnemiopsis*. Улучшению ситуации способствовало снижение хозяйственной активности прибрежных стран в связи кризисными явлениями в их экономике, а также появлением второго вселенца — гребневика *Beroe ovata*, который уменьшил воздействие гребневика *Mnemiopsis* на планктонное сообщество. Отмечается, что полного восстановления экосистемы моря не произошло, и следствием этого являются рецидивы аномального развития фитопланктона. Однако продолжительность восстановления экосистемы после рецидивов в настоящее время составляет 3—4 месяца, в отличие от периода в несколько лет в начале 1990-х гг.

Ключевые слова: Черное море, белый диск, прозрачность, гребневик, фитопланктон.

M. E. Lee, A. A. Latushkin, O. V. Martynov
 Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

LONG-TERM TRANSPARENCY VARIABILITY OF THE BLACK SEA SURFACE WATERS

Received 01.12.2017, in final form 03.07.2018.

Changes in the transparency of the surface waters of the Black Sea are analyzed on the basis of long-term Secchi depth definitions. The analysis used literature data and the results of definitions during expeditions on research vessels and a stationary oceanographic platform. It is noted that after a catastrophic recession of the surface waters transparency in the early 1990s, a gradual increase in its values occurred, and the situation was returned to the one earlier observed in the 1960—1980. The decrease in transparency was due to the reorganization of the plankton community structure of the Black Sea waters owing to the arrival of large amounts of anthropogenic origin nutrients with the river runoff, as well as the appearance of the invader — ctenophore *Mnemiopsis*. The subsequent improvement of the situation was due to the crisis phenomena in the economic activity of the coastal countries, and the emergence of the second invasive ctenophore *Beroe ovata*, which reduced the impact of the ctenophore *Mnemiopsis* on the plankton community. It is shown that a complete restoration of the ecosystem of the sea did not occur, and as a consequence of this, relapses of

Ссылка для цитирования: Ли М. Е., Латушкин А. А., Мартынов О. В. Долговременная изменчивость прозрачности поверхностных вод Черного моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 40—46.

For citation: Lee M. E., Latushkin A. A., Martynov O. V. Long-term transparency variability of the Black Sea surface waters. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 3, 40—46.

doi: 10.7868/S207366731803005X

abnormal phytoplankton bloom sometimes take place. However, the duration of the ecosystem restoration after relapse is now 3—4 months, unlike the several years in the early 1990s.

Key words: Black Sea, Secchi depth, transparency, ctenophore, phytoplankton.

Чёрное море является внутренним морем бассейна Атлантического океана. Оно омывает берега шести стран — Украины на севере и России на северо-востоке, Грузии на востоке, Турции на юге, Болгарии и Румынии на западе. Интенсивное освоение шельфа, быстрый рост приморских городов, курортных объектов и массовая коттеджная застройка побережья приводят к значительному усилению антропогенных воздействий на экосистему этого региона [1]. К тому же, ряд государств Европы сбрасывают в Черное море через Дунай, Прут и Днепр широкий спектр промышленных, сельскохозяйственных и бытовых загрязняющих веществ, в том числе биогенов, органики, нефтепродуктов. Известно также, что многие страны, имеющие выход к Черному морю, производят морские захоронения различных материалов и веществ, в частности, грунта, вынутого при дноуглубительных работах, бурового шлама, отходов промышленности, строительного мусора, твердых отходов, взрывчатых и химических веществ, радиоактивных отходов [2].

Поскольку для стран региона Черное море имеет огромное стратегическое значение, то прогноз и контроль биоресурсов моря, а также постоянное наблюдение за экологическим состоянием его вод является актуальной задачей.

Методы и материалы. Одним из наиболее широко применяемых методов мониторинга качества вод, а также биопродуктивности водоёмов являются измерения прозрачности воды. Прозрачность зависит от содержания в воде минеральной и органической взвеси, растворенных органических соединений. Таким образом, этот оптический параметр содержит информацию о содержании в воде веществ, являющихся показателями экологического состояния водоема. Кроме того, прозрачность воды является одним из важнейших факторов, определяющих подводную освещённость, изучение которой необходимо для выяснения световых условий фотосинтеза [3].

Простейшим способом оценки прозрачности является определение глубины видимости стандартного белого диска [4]. В гидрооптике глубина видимости белого диска Z_6 называется относительной прозрачностью воды. В данной работе будет использовано сокращенное название — прозрачность воды.

Изучение изменчивости прозрачности черноморских вод по измерениям глубины видимости белого диска (Z_6), началось в 1922 г. [5, 6]. До середины 1980-х гг. оптическое состояние вод Черного моря характеризовалось как квазистабильное, а в конце 1980-х — начале 1990-х гг. прозрачность, особенно в глубоководной части моря, заметно уменьшилась [7].

Для оценки дальнейшей тенденции изменения прозрачности поверхностных вод Черного моря в данной работе были использованы:

— результаты определений прозрачности воды, полученные в глубоководной части моря в ходе экспедиций 81-го, 86-го, 87-го, 94-го и 95-го рейсов НИС «Профессор Водяницкий» за последние три года;

— измерения прозрачности воды, полученные во время пяти экспедиций НИС «Бирюза» в морской части района исследований, примыкающего к Гераклеюскому полуострову;

— результаты определений прозрачности в прибрежном районе Крыма с океанографической платформы, находящейся на расстоянии 600 м от берега (координаты 44°23' с.ш. 33°59' в.д.), которые привлекаются для анализа как среднегодовые величины Z_6 для глубоководной части моря, что доказано многолетними исследованиями [7].

В сентябре 2016 г. в ходе гидрооптических исследований на платформе, впервые за много лет, были зафиксированы рекордные глубины видимости диска 20÷22 м в верхнем перемешанном слое. Объективность полученных данных подтверждается измерениями показателя ослабления излучения на длине волны 460 нм, поскольку наблюдавшиеся экстремальные глубины видимости удовлетворяют уравнению $Z_6 = \frac{7 \div 7.7}{\varepsilon(460)}$, приведенному в литературе [5]. Причем, было выявлено, что изменения глубины видимости диска происходят синхронно с глубиной залегания слоя повышенной мутности (рис. 1).

Таким образом, видимость по вертикали в верхнем перемешанном слое зависела не только от оптических

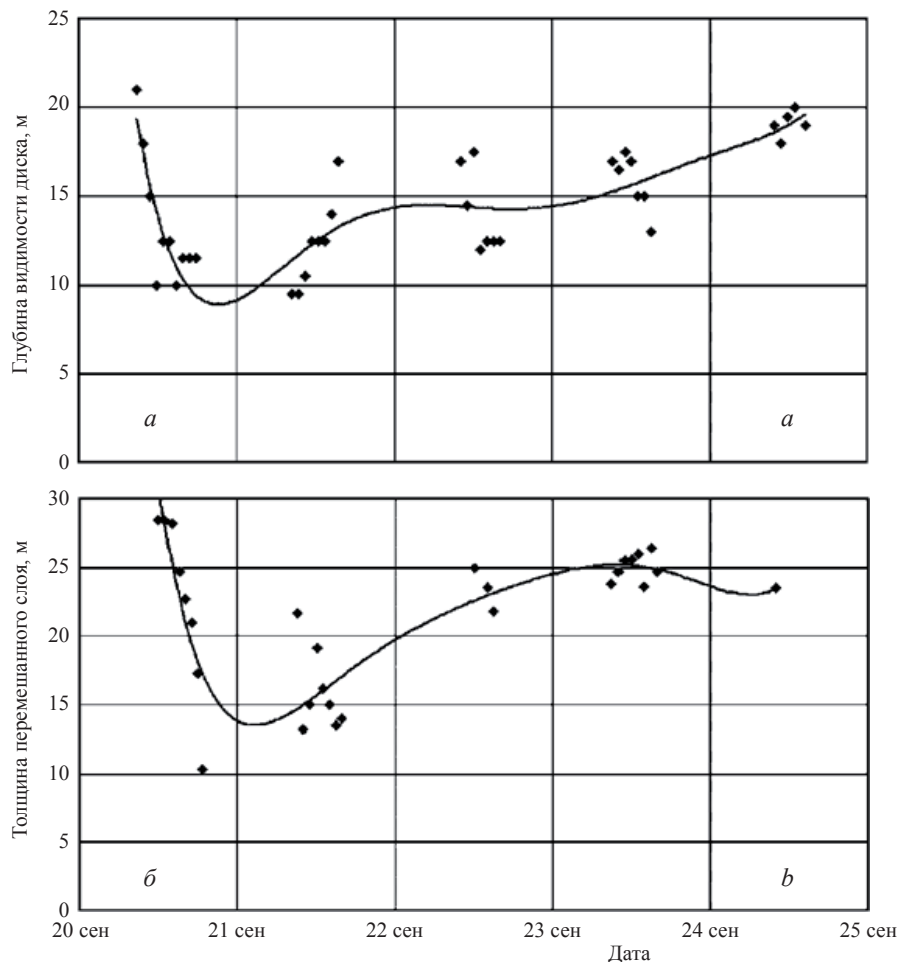


Рис. 1. Результаты одновременных определений значений глубины видимости белого диска осенью 2016 г. (а) и толщины верхнего перемешанного слоя (б).

Fig. 1. Results of simultaneous measurements of the Secchi depth in autumn 2016 (a) and thickness of the upper mixed layer (b).

свойств светорассеивающего слоя, но и от глубины его расположения. Это важно учитывать при проведении наблюдений.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим многолетний ход прозрачности поверхностных вод Черного моря на основе данных о глубине видимости белого диска для периода 1923—2008 гг., приведенных в [8]. Результаты, полученные в последние годы (2010—2017), даны в таблице, в которой указаны периоды проведения наблюдений, средние, максимальные и минимальные значения глубины видимости белого диска, а также среднеквадратичные отклонения (СКО) выборок. По приведенным в таблице данным видно, что в летние месяцы в 2012 г. и 2017 г. наблюдались anomalно низкие значения прозрачности.

Рис. 2 иллюстрирует изменения прозрачности воды в море с 1923 по 2017 гг. Утолщенной линией на оси абсцисс выделены периоды anomalно низкой прозрачности. На рисунке видно, что в начале 1920-х гг. наблюдалась высокая прозрачность поверхностных слоев. Затем она несколько уменьшилась и в среднем оставалась довольно стабильной вплоть до 1986 г., потом стала снижаться и достигнув минимума в 1990—1992 гг., в 1995 г. резко возросла, а затем снова снизилась. В дальнейшем, вплоть до 2016 г. наблюдался ее постепенный рост.

При определении прозрачности воды визуальнo — 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 [9—11]. Согласно [12], в данной спектральной области более 90 % вклада в дисперсию показателя дает органическая взвесь (фитопланктон, детрит).

Результаты измерений глубины видимости белого диска

Results of the Secchi depth measurements

Период наблюдений	Средние Z_6 , м	Z_6 мин., м	Z_6 макс., м	СКО(Z_6), м
2010	15.2	12	19	1.67
07.2012	7.5	5	12	1.54
2015	15.1	10	19	1.75
2016	19	8	25	4.12
04—05.2017	14.6	10,5	18	1.9
24.05—27.05.2017	6	5	6.5	0.31
06—07.2017	6.5	3.5	17	3.73
09.2017	12.8	10	16	1.57

Рост численности фитопланктона в глубоководных районах моря, начавшийся с середины 1980-х гг., вызван поступлением биогенных веществ антропогенного происхождения с речным стоком [5]. По данным [13] содержание нитритов, нитратов и фосфатов в стоке рек в северо-западную часть моря к началу 1980-х гг. увеличилось по сравнению с 1958—1959 гг. в 5—6 раз.

Увеличение первичной продукции и концентрации хлорофилла в центральных районах моря в тот же период связывают с влиянием на структуру планктонного сообщества гребневика *Mnemiopsis* (Мнемиопсис), который был завезен в Черное море с балластными водами судов [14]. Отсутствие конкуренции привело к стремительному росту его численности. Быстро размножившись в огромных количествах, *Mnemiopsis* истреблял растительный зоопланктон. В результате возросла численность нанопланктона, в частности кокколитофорид. Кокколитофориды сильно рассеивают свет, значительно снижая прозрачность воды. Вода приобретает при этом характерный белесый цвет, что и наблюдалось в Черном море в начале 1990-х гг., когда средняя величина глубины видимости диска составила 7.4 м [7].

С 1996 г. прозрачность воды в море начала увеличиваться, что объясняется появлением в Черном море второго вселенца — гребневика *Beroe ovata* (Берое) [15]. Рост популяции Берое, питающегося другими видами гребневиков, привел к снижению численности Мнемиопсиса к 2005 г. в 6 раз по сравнению с 1988 г. [15]. Хотя большая часть популяции планктонных организмов восстановилась почти до уровня их биомассы, предшествовавшего экспансии Мнемиопсиса, изменения в экосистемах моря

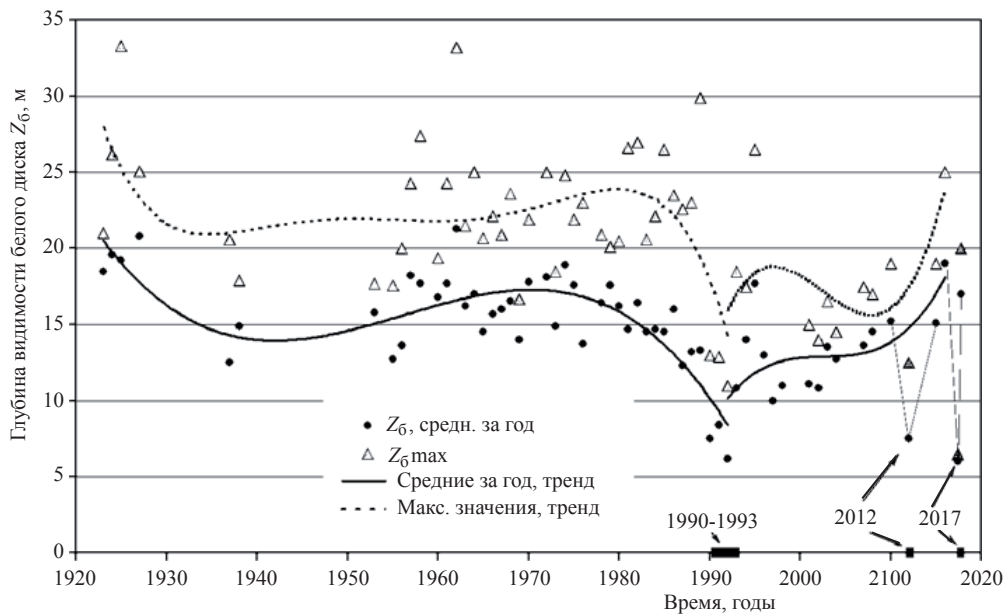


Рис. 2. Многолетний ход прозрачности воды в глубоководной области моря.

Fig. 2. Long-term changes in water transparency in the deep region of the Black Sea.

оказались во многом необратимыми. Состав популяций зоопланктона остается зависящим от сезонной и многолетней динамики популяций гребневиков-вселенцев [15]. Подтверждением этого положения являются факты интенсивного цветения воды, вызванные массовым развитием нанопланктонного вида кокколитофорид наблюдавшиеся в Чёрном море в 2012 и 2017 гг.

В 2012 г. цветение возникло в глубоководной восточной части моря в середине мая и в течение недели распространилось на всю акваторию. Максимум интенсивности цветения приходился на июнь. Одной из возможных причин интенсификации развития кокколитофорид являлась глубокая зимняя конвекция. Зима 2012 г. характеризовалась низкими температурами и интенсивным ветровым перемешиванием — глубина верхнего перемешанного слоя достигала в феврале 100—150 м, а температура в глубоководной части моря — 6.3 °С, что могло вызвать поступление большого количества биогенов в верхние слои моря [16, 17]. После холодной зимы верхний квазиоднородный слой (ВКС) более тонкий. Увеличение освещенности при сужении ВКС может усиливать ингибирование роста других видов водорослей, увеличивая преимущество *E. huxleyi* в скорости роста [17]. Восходящая яркость в июне 2012 г. оказалось настолько сильной, что программы обработки спутниковых данных распознавали район цветения как облачность. Ослабление цветения отмечено в конце июля, а его отдельные зоны в западной и восточной частях моря все еще наблюдались в начале августа [16].

В этот период глубина видимости белого диска в среднем составляла 7.5 м. Измеренные значения изменялись в пределах от 5 до 12.5 м. Отмечено значительное изменение и других оптических параметров по сравнению с характерными для исследуемого сезона — так, например, значения спектрального коэффициента яркости (СКЯ) достигали 3.2—6.6 % в максимуме при характерных 1—1.5 % [18, 19].

Средние спектры коэффициента яркости, измеренные летом на стационарной океанографической платформе в 2010 и 2014 гг. и приведенные на рис. 3, имеют постоянную форму с максимумом в области 480—500 нм и его значениями от 1 до 2 %.

Во время цветения кокколитофорид [16] в июле 2012 г. значения коэффициента яркости в максимуме были ~ 4.5 %, в отдельных случаях достигая 6.6 %, но форма спектров почти не изменялась [19]. Наблюдалась существенная корреляция между максимальными величинами коэффициента яркости и глубиной видимости белого диска, коэффициент корреляции составил 0.77.

Очередная вспышка цветения фитопланктона произошла в летние месяцы 2017 г. На снимках из космоса, полученных 29.05.2017 г. с помощью спектрографа *MODIS* со спутника *Aqua* и представленных *NASA*, Черное море изменило цвет, на его поверхности появились причудливые бирюзово-жемчужные разводы [20]. Как отмечают специалисты *NASA*, обычно Черное море выглядит из космоса темно-синим [20].

Анализ измерений спектрального распределения коэффициента яркости морской воды с 23 по 31.05.2017 г. на океанографической платформе показал, что форма спектров с выраженным максимумом на 490 нм характерна для вод Черного моря. Величины максимумов в 3—4 раза превышают типичные сезонные значения и составляют 3.6—5.8 %, что можно объяснить влиянием цветения кокколитофорид. Бирюзовый цвет моря подтверждает это предположение. Влияние цветения проявляется в образовании большого количества мелкой (2—25 мкм) минеральной взвеси, приводящей к возрастанию рассеяния назад по всему спектру, что, в свою очередь, ведет к росту значений коэффициента яркости.

Рис. 4 иллюстрирует результаты количественного анализа изменчивости спектрального коэффициента яркости.

Результаты измерений прозрачности в апреле—октябре, полученные в ходе 94-го и 95-го рейсов НИС «Профессор Водяницкий» и экспедиций на океанографической платформе, приведены на рис. 5. Видно, что аномально низкие значения видимости белого диска наблюдались в конце мая — июне, а в начале октября прозрачность воды приблизилась к исходным значениям, отмечавшимся в конце апреля.

На основании полученных данных об изменении прозрачности вод Черного моря можно сделать вывод о том, что экосистема моря восстанавливается после негативного первоначального воздействия вселенца — гребневика *Mnemiopsis*. Увеличение прозрачности до значений, наблюдавшихся в период с 1960 по 1980 гг., можно объяснить как появлением второго вселенца — гребневика *Beroe ovata*, который уменьшил воздействие гребневика *Mnemiopsis* на планктонное сообщество, так и возможным

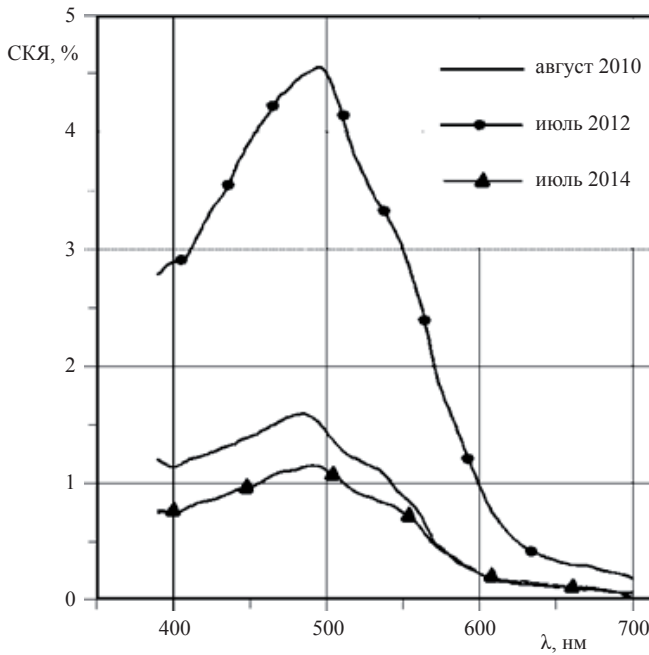


Рис. 3. Средние спектры коэффициента яркости.

Fig. 3. The averaged water reflectance spectra.

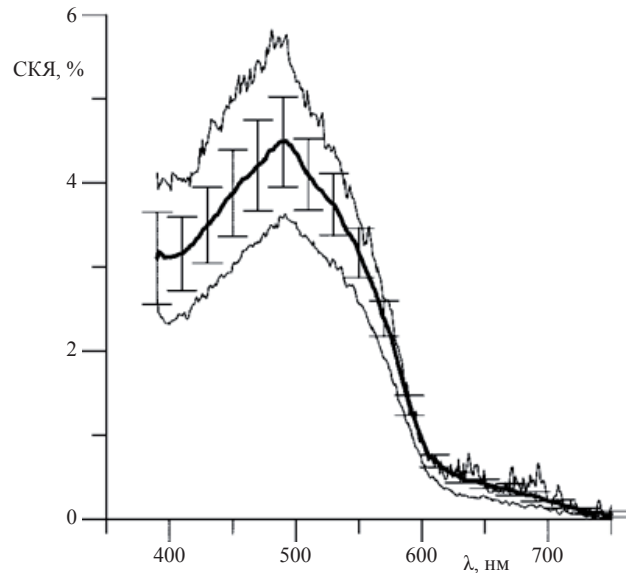


Рис. 4. Средний спектр коэффициента яркости по результатам измерений в конце мая 2017 г. (жирная линия), минимальный и максимальный измеренные спектры (тонкая линия).

Fig. 4. The average water reflectance spectrum measured at the end of May 2017 (bold line), minimum and maximum spectra (thin line).

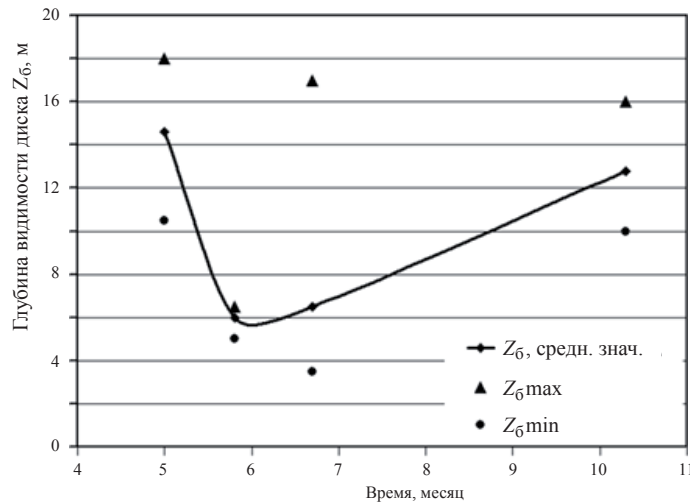


Рис. 5. Глубины видимости белого диска наблюдавшиеся в апреле—октябре 2017 г.

Fig. 5. Secchi depth measured in April—October 2017.

снижением хозяйственной активности прибрежных стран в связи кризисными явлениями в их экономике.

Полного восстановления экосистем моря не произошло, и следствием этого являются рецидивы аномального развития фитопланктона. Однако продолжительность восстановления экосистемы после рецидивов в настоящее время составляет 3—4 месяца, в отличие от нескольких лет в начале 1990-х гг.

Полученные результаты подтверждают, что определения глубины видимости белого диска позволяют проводить оценку качества вод глубоководной части Черного моря.

Работа проведена в МГИ РАН при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям

развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы» RFMEFI57714X0110; «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (№ 0827-2014-0011), а также при поддержке программы Президиума РАН № 1.2.50 «Развитие методов и средств оперативной океанологии для исследований изменчивости полей Черного моря».

Литература

1. Бондур В. Г., Воробьев В. Е., Гребенюк Ю. В., Сабинин К. Д., Серебряный А. Н. Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // Исследование Земли из Космоса. 2012. № 4. С. 3—11.
2. Экологические проблемы Черного моря [Электронный ресурс]. URL: <http://biofile.ru/geo/51.html> (дата обращения: 24.06.2018).
3. Пырина И. Л. Определение первичной продукции фитопланктона по максимальному фотосинтезу, суммарной солнечной радиации и прозрачности воды // Гидробиологический журнал. 1979. Т. 15, № 6. С. 109—113.
4. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 725 с.
5. Маньковский В. И., Владимиров В. Л., Афонин Е. А. и др. Многолетняя изменчивость прозрачности в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х—начале 90-х гг. / Препринт. Севастополь, 1996. 32 с.
6. Кукушкин А. С., Прохоренко Ю. А., Хорошун С. А. Многолетняя изменчивость прозрачности вод в шельфовых и глубоководных районах Черного моря в XX столетии // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 243—248.
7. Маньковский В. И. Многолетняя изменчивость состояния экосистемы Черного моря по оптическим данным // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря / Под ред. В. Н. Еремеева, С. К. Коновалова. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. С. 223—241.
8. Маньковский В. И., Маньковская Е. В., Соловьев М. В. Гидрооптические характеристики Черного моря / Справочник. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. 90 с.
9. 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. М.: ИО АН СССР, 1986. С. 198—221.
10. Левин И. М., Николаев В. П. Об оценке вертикального ослабления квантовой облученности в области фотосинтетически активной радиации в Черном море // Океанология. 1992. Т. 32, № 2. С. 240—245.
11. Николаев В. П., Сасин В. Д. Особенности оптической структуры вод Черного моря в феврале—марте 1991 г. // Деп. ВИНТИ. N 1306-B92. Геленджик: ЮО ИО РАН, 1992. 35 с.
12. Оптика океана: В 2 т. / Отв. ред. А. С. Монин. М.: Наука, 1983. Том 1: Физическая оптика океана. С. 114—229.
13. Фащук Д. Я., Шапоренко С. И. Загрязнение прибрежных вод Черного моря: источники, современный уровень, межгодовая изменчивость // Водные ресурсы. 1995. Т. 22, № 3. С. 237—281.
14. Ведерников В. И., Демидов А. Б. Первичная продукция и хлорофилл в глубоководных районах Черного моря // Океанология. 1993. Т. 33, № 2. С. 229—235.
15. Аннинский Б. Е., Тимофеев Ф. Распределение зоопланктона в западном секторе Черного моря в октябре 2005 г. // Морской экологический журнал. 2009. Т. 8, № 1. С. 17—31.
16. Ясакова О. Н., Станичный С. В. Аномальное цветение *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) в 2012 году в Черном море // Морской экологический журнал. 2012. Т. XI, № 4. С. 64.
17. Чурилова Т. Я., Суслин В. В. О причинах доминирования *Emiliania huxleyi* в фитопланктоне глубоководной части Черного моря в начале лета // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 26. С. 195—203.
18. Корчёмкина Е. Н., Ли М. Е. Аномальные оптические характеристики вод Черного моря в июле 2012 года и их связь с концентрацией минеральной взвеси в воде // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 2. С. 67—72.
19. Ли М. Е., Шибанов Е. Б., Корчёмкина Е. Н., Мартынов О. В. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 17—33.
20. Turquoise swirls in the Black Sea [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nasa.gov/image-feature/turquoise-swirls-in-the-black-sea> (дата обращения: 15.10.2017).