

ГИПОКСИЯ И ЕЕ НЕКОТОРЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ В АЗОВСКОМ МОРЕ

© 2013 г. З. В. Александрова, Т. Е. Баскакова

*Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства,
Ростов-на-Дону, 344002
E-mail: riasfp@aanet.ru*

Поступила в редакцию 14.10.2014 г.

В работе в многолетнем аспекте рассмотрены тенденции летних изменений зон гипоксии в море. На основе статистического анализа данных (1960–2012 гг.) по развитию гипоксии в придонном слое выделены наиболее значимые факторы, ее определяющие. В работе показано, что в Азовском море, как эвтрофном водоеме, имеющим достаточно высокий запас органического вещества, непосредственной причиной формирования придонного дефицита кислорода является значительное потребление его на окисление органических веществ, преимущественно донных отложений, а запускает этот механизм общая вертикальная устойчивость водных масс.

Ключевые слова: насыщение кислородом, дефицит кислорода в придонном слое, биохимическое потребление кислорода поверхностным слоем донных отложений, органический углерод, гибель гидробионтов, окислительно-восстановительные процессы.

ВВЕДЕНИЕ

Азовское море по своим морфометрическим и гидрофизическим характеристикам отличается целым рядом особенностей, определяющих высокую изменчивость химических основ биопродуктивности. К их числу в основном относятся:

- минимальное по сравнению с другими морскими объектами отношение объема воды к площади дна (8,5:1), высокое соотношение поступающих речных вод к объему моря (1:8). Для сравнения: в Каспийском море аналогичные отношения равны соответственно 213:1 и 1:330, а для Балтийского – 52:1 и 1:34 (Strom, 1933);

- слабый водообмен с Черным морем;

- синоптические условия в регионе, особенно термический и ветровой режимы.

Указанные обстоятельства, с одной стороны, определяют интенсивный двусторонний обмен между абиотическими и биотическими структурными элементами экосистемы (водой, фитопланктоном, донными организмами, донными отложениями), с другой – отклик экосистемы на природные и антропогенные воздействия на морскую среду.

Содержание растворенного кислорода относится к числу приоритетных биогеохимических показателей, определяющих условия существования промысловых рыб и кормовых организмов. Рассматривая содержание кислорода в воде как экологический фактор, мы исходили из известных в литературе критериев по кислородному показателю, установленных для среды обитания гидробионтов.

Федосов (1955) в качестве нижней границы оптимального содержания кислорода для фауны Азовского моря предложил 3 мл/л. Эта концентрация применительно к температуре воды в летний период и к наиболее распространенным значениям солености составляет $\leq 60\%$ от равновесной концентрации.

В современной гидрохимической литературе любая концентрация менее равновесной трактуется как дефицит кислорода или гипоксия (Зенин, Белоусова, 1988). Однако с эколого-физиологической точки зрения снижение содержания кислорода до определенного предела не влечет за собой изменений функциональных и поведенческих реакций водных организмов. Таким пределом кислородного режима в Азовском море явилось значение 60% насыщения, а концентрация $\leq 60\%$ в летний период рассматривалась для жизнедеятельности гидробионтов как гипоксия.

Наряду с широким понятием «гипоксия» исследовалось также снижение содержания кислорода, последствия которого вызывали резкое изменение физиологических процессов у рыб и донных организмов, вплоть до их гибели. При этом в качестве критических (40%) и пороговых (20%) значений для ихтиофауны Азовского моря были использованы критерии, установленные в экспериментальных работах Кляшторина (1980).

Цель работы – исследование механизма развития придонной гипоксии в летний период, нередко сопровождающейся массовой гибелью донной фауны и причиняющей значительный ущерб рыбному хозяйству.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

При определении исследованных химических показателей состава воды и донных отложений использовали методы, принятые и утвержденные в Аналитическом центре, аккредитованном Госкомитетом РФ по стандартизации и метрологии (аттестат аккредитации аналитической лаборатории (центра) № РОССТУ.0001.510217 от 20 октября 2010 г.), с использованием методов, изложенных в руководствах (Сорокин, 1969; Орадовский, 1977; Семенов, 1977; Лурье, 1987; Сапожников, 1991).

Оценку скорости первичного продуцирования органического вещества проводили двумя модификациями «кислородного метода» (Бруевич, 1936; Дацко, 1959; Винберг, 1960).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание кислорода и его пространственно-временные изменения как результирующие процессов продуцирования его при фотосинтезе и биodeградации массы органических веществ в водной толще и на дне регулируются, особенно в летнее время, температурой и соленостью.

Согласно основополагающим исследованиям Книповича (1932), Дацко (1955, 1959), Федосова (1955), Цуриковой и Шульгиной (1964), впоследствии развитых (Макарова, 1970; Александрова, Ромова, 1977; Александрова, 1980, 2012; Александрова и др., 1999, 2007; Александрова, Баскакова, 2010), специфической особенностью Азовского моря является периодическое формирование летом острого дефицита кислорода в придонных слоях.

Создающееся при штилевой погоде плотностное расслоение водной толщи моря (термическое или солевое) обуславливает превышение расхода кислорода в придонных слоях над его поступлением, т.е. термическая или солевая стратифика-

ция вызывает стратификацию по кислороду. При этом содержащийся в придонном слое кислород усиленно потребляется на окисление органического вещества воды и донных отложений, что нередко приводит к полному его исчезновению. Вследствие этого получают развитие «заморные» или близкие к ним явления, сопровождающиеся гибелью донной фауны моря.

На фоне резкого снижения концентрации кислорода у дна в поверхностном горизонте благодаря активной жизнедеятельности фитопланктона часто наблюдается весьма высокая степень насыщения воды кислородом ($>180\%$). Столь высокое содержание кислорода свидетельствует об интенсивности процессов продуцирования органического вещества, главным и единственным продуцентом которого является фитопланктон. Действительно, Азовское море представляет собой эвтрофный водоем, в котором накапливается значительная масса органического вещества в воде и донных отложениях, что является главной причиной возникновения дефицита кислорода в придонном слое.

В последние 20 лет в Азовском море наметилась устойчивая тенденция роста показателей продуцирования первичного органического вещества. Это находит отражение и в динамике содержания органического углерода в воде, а динамика содержания хлорофилла «а» подтверждает, что в структуре взвешенного вещества в Азовском море, как и ранее, значительную долю составляет органическое вещество фитогенной природы (рис. 1).

Как видно из данных, приведенных в табл. 1, в многолетней композиции очевидна тенденция роста содержания органического вещества в донных отложениях. Рост органических компонентов в донных отложениях наметился в конце

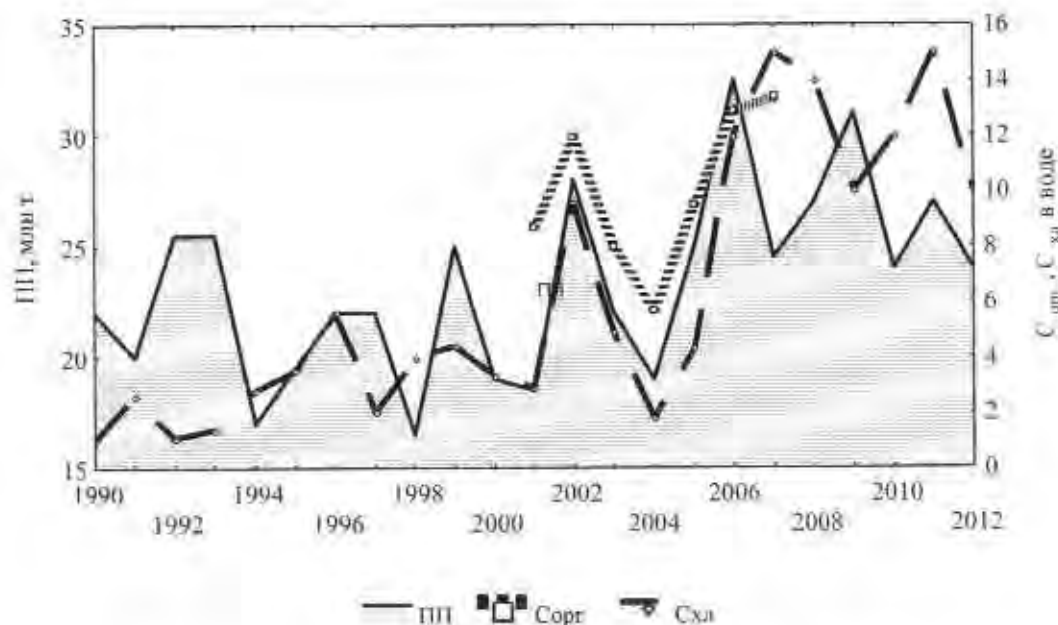


Рис. 1. Динамика первичной продукции органического вещества (ПП), содержания хлорофилла «а» и органического углерода (C_{org} , C_{chl}) в морской воде.

Fig. 1. Dynamics of primary production of organic matter (ПП), chlorophyll «a» and organic carbon (C_{org} , C_{chl}) in the sea water.

Табл. 1. Среднегодовое содержание $C_{орг}$ в осадках Азовского моря, % к абсолютному сухому весу
Table 1. Average annual $C_{орг}$ in the Azov Sea sediments, % to absolute dry weight

Годы	Таганрогский залив	Собственно море	Источник
1951-1953	1,28	1,63	Горшкова, 1955
1962-1964	1,57	2,32	Прокопченко, 1964
1969-1970	1,54	2,24	Александрова, 1975
1971-1976	1,25	1,65	Александрова, 1980
1977-1980	1,26	1,75	Тот же
1988-1996	1,35	1,80	Толоконникова, Студеникина, 1998
1997-2000	1,58	2,13	Александрова, 2012
2001-2005	1,53	2,06	Тот же
2006- 2012	1,77	2,40	»

90-х г. прошлого столетия и продолжается до настоящего времени. Наибольшее обогащение донных отложений органическим веществом отмечено в последние годы, когда количество углерода в донных осадках и моря, и залива возросло по сравнению с предшествующими годами более чем на 30 и 20% соответственно.

Как видно из данных табл. 2, темп обогащения донных отложений органическим веществом и его биохимически подвижными формами (каротиноидами и хлорофиллом) отмечается на фоне роста интенсивности продуцирования первичного органического вещества. При первичной продукции, равной 14,5 млн т $C_{орг}$ (1980–1987 гг.), аккумуляция $C_{орг}$ была относительно невысока и в среднем составляла 1,7%, каротиноидов – 185 мг/г. По мере увеличения скорости продукционных процессов содержание $C_{орг}$, каротиноидов и хлорофилла увеличилось на 40, 70 и 50% соответственно. В 2011 г., например, в течение всего вегетационного периода в донных отложениях собственно моря на ряде станций отмечались наиболее высокие величины хлорофилла (100 мг/м³) и каротиноидов (600–900 мг/м³), превышающие средние их характеристики в 2–3 раза. Это связано с интенсивным развитием фитопланктона, что подтверждают данные по содержанию хлорофилла «а» в воде, концентрация которого в летне-осенний период на

Табл. 2. Динамика показателей органического вещества ($C_{орг}$) в донных отложениях при различной интенсивности продукционных процессов в воде

Table 2. Dynamics of organic matter ($C_{орг}$) in bottom sediments with different intensity of production processes in the water

Период, гг.	Первичная продукция, $C_{орг}$, млн т	$C_{орг}$, %	Каротиноиды	Хлорофилл
			мг/г	
1980-1987	14	1,70	185	37
1988-2010	25	2,04	200	29
2007-2010	30	2,45	312	54
2011	30	2,40	320	69
2012	24	2,28	270	55

значительной акватории моря увеличилась от 15 до 30 мг/м³. Однонаправленная тенденция динамики этих показателей показывает, что органическое вещество в донных осадках Азовского моря имеет фитогенную природу и темп его накопления в донных отложениях определяется направленностью и интенсивностью внутриводоемных процессов.

Анализ распределения органического вещества по площади дна подтверждает известную зависимость его концентрации от степени дисперсности осадков. Это выражается в следующем: минимальное содержание $C_{орг.з}$ каротиноидов, хлорофилла тяготеет к донным отложениям с преобладанием в них грубодисперсных фракций (>30%). Максимальные значения $C_{орг.}$ (3–4%), хлорофилла (50–100 мг/г), каротиноидов (350–900 мг/г) приурочены к донным отложениям, представленным тонкодисперсными фракциями – глинистыми и мелкоалевритовыми илами (>50%).

Исследуя динамику общего количества органического вещества $C_{орг.}$ и его биохимически подвижную составляющую (каротиноиды, биохимическое потребление кислорода (БПК₁)) в донных отложениях, можно заключить, что с увеличением содержания $C_{орг.}$ и каротиноидов синхронно возрастает интенсивность биохимического потребления кислорода осадками. Так, при росте $C_{орг.}$ >3,5% и каротиноидов >300 мг/г синхронно возрастает интенсивность биохимического потребления кислорода донными отложениями (БПК₁ >50 мг/кг·сут.). Напротив, зафиксированным сравнительно низким значениям $C_{орг.}$ ~ 1,5%, а каротиноидов >150 мг/г соответствует снижение скорости БПК₁ до 30–40 мг/кг·сут.

По нашим экспериментальным данным, ежесуточная скорость биохимического потребления кислорода на окисление органического вещества поверхностного слоя донных отложений (БПК₁) в летний период в море в среднем составляет 10 мг/кг·сут., изменяясь в зависимости от содержания органического вещества в донных осадках от 3 до 100 мг/кг·сут.

Таким образом, непосредственной причиной снижения содержания кислорода у дна является использование его на биохимическое окисление органического вещества донных отложений. Очевидно, что величина БПК₁ донных отложений как скоростная характеристика определяет время, в течение которого происходит уменьшение содержания кислорода в придонном горизонте. На основании материалов по скорости биохимического потребления кислорода поверхностным слоем донных отложений в различных районах моря было проведено районирование акватории Азовского моря по времени потенциально возможного снижения насыщения содержания кислорода в придонных горизонтах до экологически опасных значений (менее 60%). При этом по времени наступления гипоксии в условиях стратификации выделены пять районов. Как следует из рис. 2, наиболее быстро, т.е. менее чем за 0,5 сут., дефицит кислорода в условиях стагнации вод возникает в центральном и Прикубанском районах, а также в предустьевом участке Таганрогского залива; эти зоны отнесены к I категории.

Действительно, в многолетнем ряду наблюдений за распространением анаэробных ситуаций у дна наиболее высокая повторяемость (более 50% случаев) отмечалась в юго-восточном районе моря. При этом изоксигена 60%-ного насыщения кислородом придонного слоя в отдельные годы ограничивала акваторию рассматриваемого участка от 2,4 до 7,9 тыс. км² или 30–99% (рис. 3). В ус-



Рис. 2. Районирование площади моря по степени наступления 60%-ного дефицита кислорода в придонном слое в 1968-1977 гг. Зоны: 1 – категория I, время наступления дефицита кислорода $t < 0,5$ сут.; 2 – категория II, $0,5 < t < 0,75$ сут.; 3 – категория III, $0,75 < t < 1,0$ сут.; 4 – категория IV, $1,0 < t < 1,5$ сут.; 5 – категория V, $t > 1,5$ сут.

Fig. 2. Sea zoning when the oxygen deficiency reaches 60% in the near-bottom layer of the Azov Sea (1968-1977).

ловиях продолжительного стратифицирующего эффекта насыщение кислородом придонного слоя снижалось до пороговых для рыб значений ($< 20\%$). Наиболее типичным в этом отношении был 2004 г., характеризующийся экстремально высокой вертикальной устойчивостью (> 10 тыс. усл. ед.) и снижением насыщения кислородом придонного слоя ($< 20\%$) на площади 2 тыс. км². Изоксигена с насыщением $\leq 60\%$ распространялась на всю акваторию юго-восточного района, который, как известно, является важным звеном в воспроизводстве промысловых рыб Азовского моря.

В табл. 3 представлены данные по частоте встречаемости дефицита кислорода с насыщением в придонном слое от 0 до 20% и менее 60% летом 1955–2012 гг. в собственно море и Темрюкско-Ахтарском районе. Из нее следует, что более 50%

Табл. 3. Частота встречаемости дефицита кислорода с различным насыщением придонного слоя в летний период 1955-2012 гг., %

Table. 3. Frequency of occurrence of oxygen deficiency with different rates of saturation in the near-bottom layer over 1955-2012, %

Насыщение кислородом	Июль		Август	
	Собственно море	Темрюкско-Ахтарский район	Собственно море	Темрюкско-Ахтарский район
0-60%-ное	76	56	60	30
0-20%-ное	49	34	30	23

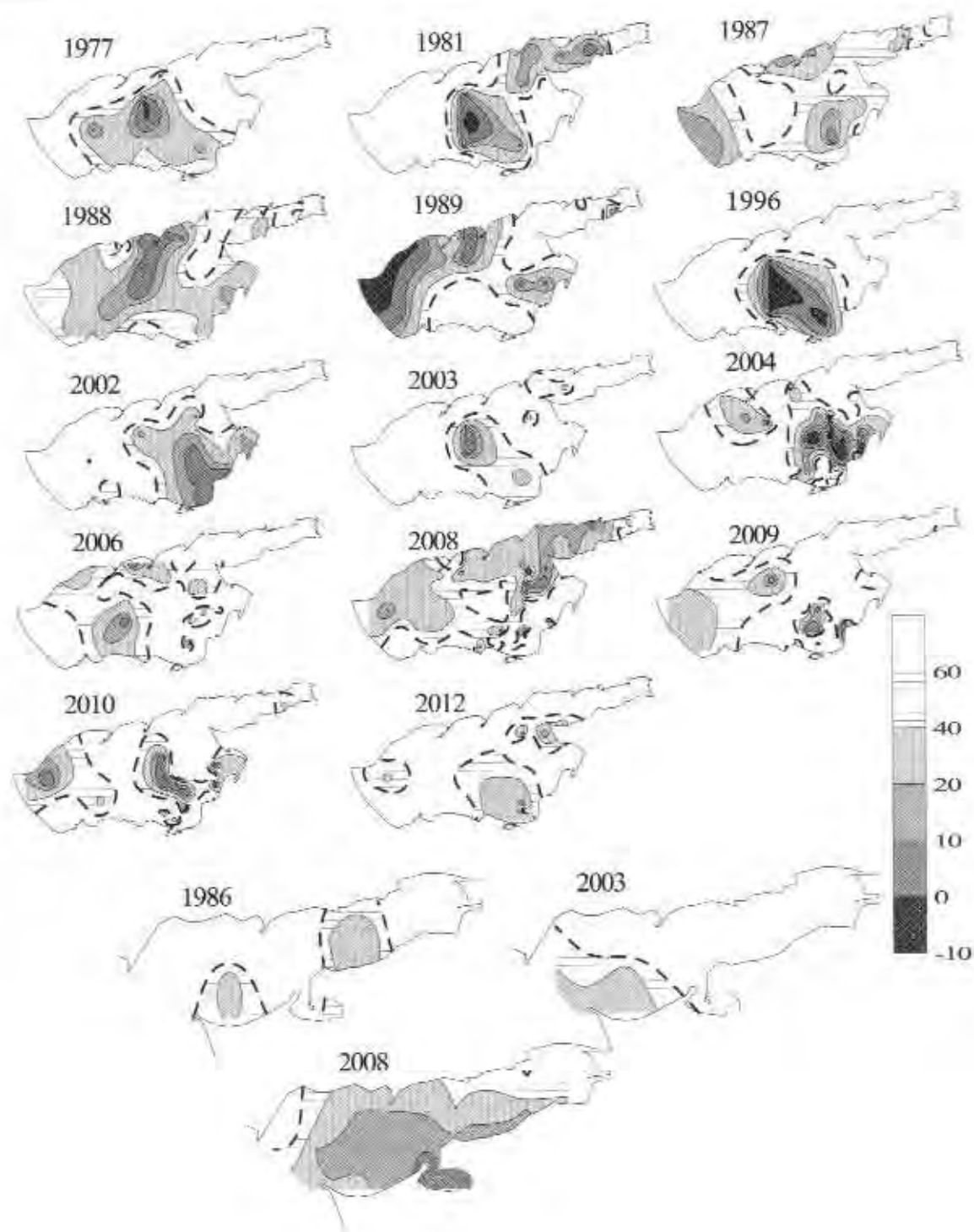


Рис. 3. Многолетняя динамика площадей с насыщением кислородом (0-60%) придонного горизонта Азовского моря в летний период, тыс. км².

Fig. 3. Long-term oxygenation (0-60%) dynamics of the near-bottom layer in summer, ths km².

случаев формирования гипоксии у дна в летний период приходится на Темрюкско-Ахтарский район.

Состояние донной фауны, как правило, усугублялось не только дефицитом кислорода, но и появлением в воде продуктов анаэробного распада органического вещества – свободного сероводорода, содержание которого в районе полного отсутствия кислорода достигало аномально высоких концентраций. Например, по наблюдениям, выполненным летом 2004 г. в юго-восточном районе, на ряде станций содержание сероводорода у дна составляло 1–1,6 мг/л, а в июле 2013 г. его концентрация превышала 6 мг/л (рис. 4).

Негативные последствия сложившейся ситуации на границе раздела «вода-дно» подтверждаются также образованием значительных количеств кислоторастворимых сульфидов в донных отложениях. Так, в июле 2013 г. в зоне острого дефицита кислорода ($< 10\%$ насыщения) концентрация аномально высоких концентраций этих веществ достигала 800 мкг/г сырого осадка (рис. 4).

Отмеченная тенденция столь часто возникающего снижения кислорода у дна в летний период в юго-восточном участке моря обусловлена географическими особенностями этого района: расположением его в зоне смешения пресных вод и осолопленных вод моря, а также периодическим притоком черноморских вод.

В результате влияния указанных факторов стимулируется эффект плотностного расслоения водных масс, что препятствует поступлению кислорода в придонные слои из более богатых им верхних слоев, с одной стороны, с другой – стратификация имеет своим следствием усиление седиментации взвешенного органического вещества, что в значительной мере определяет высокое содержание органического вещества в донных отложениях исследуемого участка.

Действительно, как следует из табл. 4, исключительно высокие величины вертикальной устойчивости вод ($E_{\text{общ.}} = 11$ и 17 тыс. усл. ед.) и органического углерода ($C_{\text{орг.}} = 1,9$ и $2,6\%$), относящиеся к разным периодам (1970–1989 и 1990–2012 гг.), характерны для юго-восточного района, который находится под непосредственным влиянием адвекции черноморских вод. Для сравнения укажем, что



Рис. 4. Содержание сероводорода (мг/л) в придном слое (а) и сульфидной серы (мкг/г) в донных отложениях (б) на юго-востоке Азовского моря, июль 2013 г.

Fig. 4. The content of hydrogen sulphide in the near-bottom layer (а) and of sulphide sulfur in the bottom sediments (б) of the south-eastern Azov Sea, July of 2013.

в указанные выше периоды вне зоны адвекции значения устойчивости невелики (1,4 и 2,2 тыс. усл. ед.) и содержание $C_{орг}$ не превышало 1,6 и 1,9% соответственно.

Исходя из сопоставления данных по интенсивности биохимического потребления кислорода (БПК₁) поверхностным слоем донных отложений, можно заключить, что максимальные величины в зоне адвекции достигали 80 мг О/кг; вне ее – 66 мг О/кг. Столь высокая интенсивность потребления кислорода осадками способна привести к снижению его содержания в придонных слоях. Действительно, содержание кислорода в юго-восточном участке снижалось до средних значений порядка 23% в 1970–1989 гг. и 7% – в 1990–2012 гг., в то время как за его пределами (вне зоны адвекции) насыщение кислородом придонного горизонта оказалось существенно выше – соответственно 67 и 65%, где скорость БПК₁ донных отложений была на 20 и 40% ниже, чем в юго-восточном районе (табл. 4).

Одной из особенностей формирования кислородного режима Азовского моря в современный период явилось проникновение зон дефицита кислорода на акваторию Таганрогского залива (рис. 3). В многолетней динамике масштабы и вероятность развития гипоксии в Таганрогском заливе ниже, чем в море. Это связано с тем, что в заливе более выражены горизонтальный перенос водных масс и интенсивность их фотосинтетической аэрации.

Как видно из данных, приведенных на рис. 3, площадь с насыщением кислородом придонного горизонта до 60% в Таганрогском заливе изменялась в значительных пределах. Так, летом 2003 и 2005 гг. она составляла 1,7–1,9 тыс. км², или более 30% акватории Таганрогского залива, а в 2008 г. формировалась практически на всей его акватории. В 2004 и 2006 гг. зона дефицита кислорода у дна не зарегистрирована. Однако, как следует из данных рис. 3, даже в самом неблагоприятном 2008 г. насыщение кислородом придонных горизонтов в этом районе оставалось выше 60%. Это связано прежде всего с высокой гидродинамической активностью, характерной для предустьевых участков.

Оценивая вклад основных факторов ($C_{орг}$, каротиноиды, БПК₁, $E_{общ.}$), обуславливающих формирование в летний период в придонном слое анаэробных или близких к ним ситуаций, в качестве наиболее значимых аргументов как для моря, так и для Таганрогского залива выбраны: общее количество органического вещества в поверхностном слое донных отложений и температурная стратификация.

Анализ материалов по расслоению водных масс по температуре, содержанию кислорода у дна и $C_{орг}$ в донных отложениях показал, что на ряде станций собственно моря при резко выраженной температурной стратификации ($\Delta t = 3^\circ\text{C}$)

Табл. 4. Влияние затoka черноморских вод на изменение содержания кислорода в воде, а также факторов, его определяющих

Table 4. Input effect of the Black Sea waters on the oxygen content and factors that determine it

Период, гг.	В зоне адвекции (юго-восточный район)				Вне зоны адвекции			
	$E_{общ.}$, тыс. усл. ед.	БПК ₁ , мг О/кг	$C_{орг}$, %	O ₂ , % (дно)	$E_{общ.}$, тыс. усл. ед.	БПК ₁ , мг О/кг	$C_{орг}$, %	O ₂ , % (дно)
1970-1989	11	70	1,9	23	1,4	50	1,6	67
1990-2012	17	82	2,6	7	2,2	66	1,9	65

содержание кислорода у дна характеризовалось сравнительно небольшим снижением порядка 74–98% с минимальным содержанием $C_{орг}$ в донных отложениях, сформированных грубодисперсным материалом (рис. 5).

Напротив, стапции, где в донных отложениях преобладала пелитовая фракция, аккумулировавшая $C_{орг}$ ($> 2,5\%$), даже при незначительной плотностной стратификации, преимущественно по температуре ($\Delta t = 0,8–1,2^\circ\text{C}$), насыщение кислородом придонного слоя снижалось до критических для рыб значений ($< 10–20\%$).

Выполненные эмпирические оценки, описывающие взаимосвязи между формированием придонного дефицита кислорода в летний период и рядом наиболее значимых факторов ($E_{общ}$, БПК₁, $C_{орг}$) позволили заключить, что главной причиной возникновения дефицита кислорода является высокое содержание органического вещества, обуславливающее активизацию процессов его окисления, а ведущим фактором, запускающим этот механизм – общая вертикальная устойчивость водных масс.

Таким образом, растворенный в воде кислород является одним из основных параметров функционирования экосистемы Азовского моря. В связи с этим очень важно дать количественную оценку закономерностям многолетней динами-

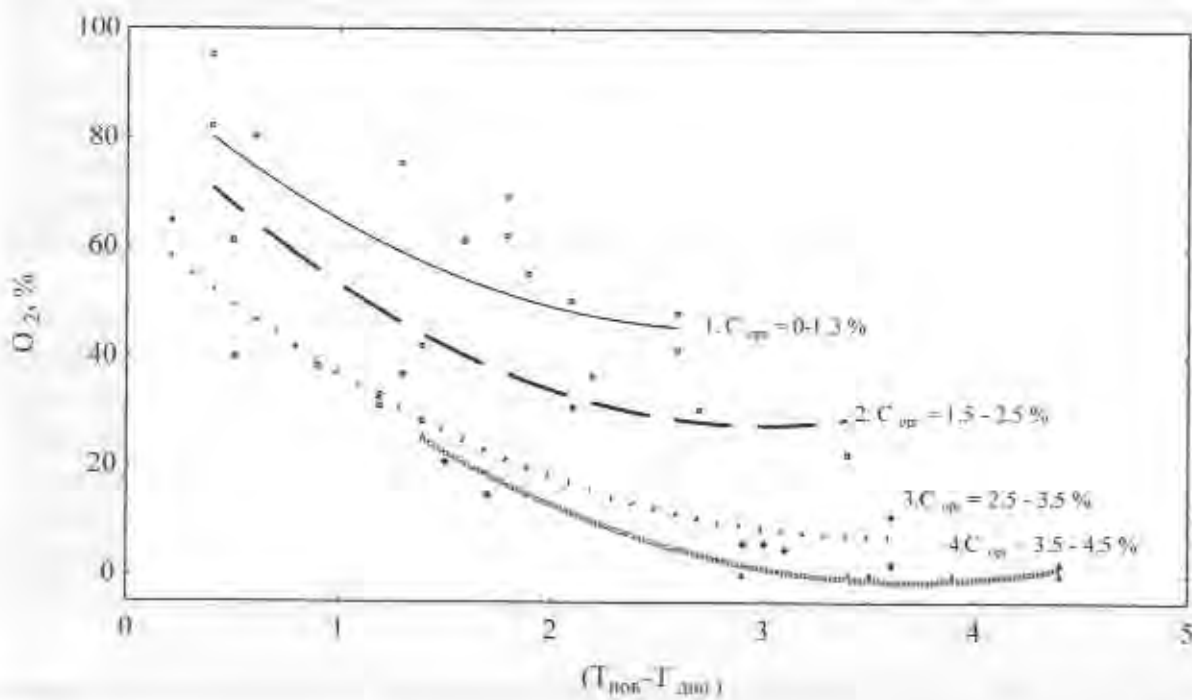


Рис. 5. Зависимость насыщения кислородом у дна от температурной стратификации ($T_{пов} - T_{дно}$) в воде и содержания органического вещества ($C_{орг}$) в донных отложениях:

1. $O_2 = 74 - 14,7 \Delta t + 7,2 C_{орг}$ $R=0,63$, $F=2,6$;
2. $O_2 = 41 - 14,3 \Delta t + 15,5 C_{орг}$ $R=0,69$, $F=2,7$;
3. $O_2 = 29 - 11,7 \Delta t + 5,8 C_{орг}$ $R=0,81$, $F=12,4$;
4. $O_2 = 70 - 11,8 \Delta t - 8,0 C_{орг}$ $R=0,86$, $F=8,6$.

Fig. 5. Dependence of near-bottom oxygenation on the water temperature stratification ($T_{пов} - T_{дно}$) and the content of organic matter ($C_{орг}$) in bottom sediments.

ки кислородного режима. Необходимость таких оценок очевидна, если учесть, что экосистема Азовского моря функционирует в условиях климатических изменений и интенсивного антропогенного воздействия. Впервые такие оценки были выполнены в 1979 г. (Бронфман и др., 1979) с использованием фоновых материалов АзНИИРХ за период 1952–1977 гг.

В нашей работе для количественной оценки закономерностей формирования кислородного режима в современный период использованы фоновые материалы за 1960–2012 гг. В качестве прогнозируемого показателя, который характеризовал бы и динамику содержания кислорода, и позволял бы судить об экологических последствиях его снижения, может быть принята площадь гипоксии, рассчитанная по фактическим данным. Представляет интерес рассмотреть особенности формирования кислородного режима в многолетнем аспекте.

Анализ материалов по многолетним наблюдениям за содержанием кислорода в Азовском море, выполненным АзНИИРХ в течение 1960–2012 гг., показал, что различия в масштабах снижения содержания кислорода до $\leq 60\%$ в придонных водах определялись рядом факторов, в их числе: изменения температурного фона, обуславливающие скорость окислительных процессов в море; колебания ветровой активности над акваторией моря, определяющие интенсивность вертикального водообмена; вариабельность водности рек, связанная как с климатическими изменениями, так и антропогенными преобразованиями речного стока; изменения величины первичной продукции и уровней содержания органического вещества в воде и донных отложениях.

К числу наиболее значимых факторов, определяющих развитие площади дефицита кислорода у дна, относятся интенсивность вертикального водообмена и скорость первичного продуцирования органического вещества (рис. 6).

При этом замедление вертикального водообмена является необходимым условием «запуска» механизма гипоксии, который имеет периодический характер действия; первичная продукция как показатель органического вещества является постоянно действующим фактором. В 1960-е г. изоксигена $\leq 60\%$ охватывала в среднем ~ 11 тыс. км², устойчивость вод достигала 6–7 тыс. усл. ед., содержание кислорода на указанной площади оценивалось в среднем 37%. При этом в отдельные годы (1963–1966) гипоксия распространялась на 50–70 % площади моря, а пороговые концентрации ($\leq 20\%$) занимали от 2,2 до 5,7 тыс. км².

В этот период в условиях повышенной водности рек (в среднем 36 при вариациях 29–53 км³) продуцирование органического вещества (16 млн т $C_{орг.}/г.$) соответствовало среднему значению, установленному (Давко, 1959) для естественного режима рек (17 млн т $C_{орг.}/г.$) в пересчете на современные единицы измерения первичной продукции.

Сокращение притока речных вод в Азовском море, отмечаемое с 1969 по 1978 гг., было обусловлено антропогенными и природными факторами. В условиях снижения стока в формировании режима моря возросла роль черноморской составляющей, прежде всего за счет мощной адвекции черноморских вод, что привело к резкому повышению солености азовоморских вод. В эти годы снизилась интенсивность продуцирования первичного органического вещества. Величина первичной продукции составила в среднем 10 млн т $C_{орг.}/г.$ С 1972 г. отмечалось усиление ветровой деятельности, максимум которой приходился на 1975–1976 гг.

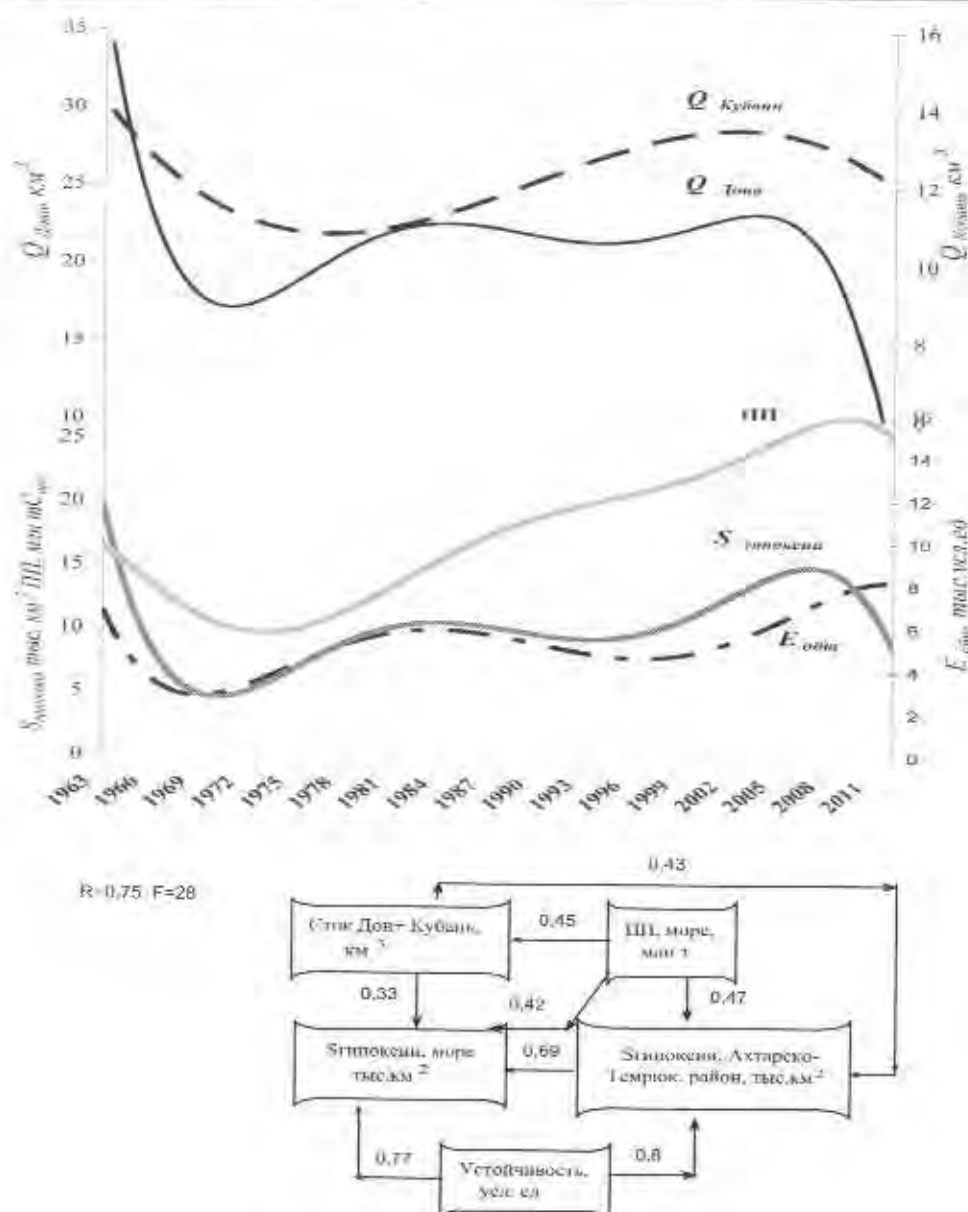


Рис. 6. Факторы, формирующие гипоксию в Азовском море.
Fig. 6. Factors causing hypoxia in the Azov Sea.

В результате масштабы гипоксии в этот период уменьшились в море в среднем до 6 тыс. км²; например, в 1974 г. гипоксия занимала площадь в 3 тыс. км², а в отдельные годы (1970, 1976) дефицита кислорода в придонных горизонтах летом зафиксировано не было.

Аналогичная ситуация наблюдалась и в зонах первой категории опасности по кислородному показателю. Например, в Темрюкско-Ахтарском районе площадь гипоксии в среднем уменьшилась до 2 тыс. км², в 1973 г. в июле составляла всего 1,3 тыс. км², а в августе отсутствовала. Вместе с тем в 1977–1978 гг. незначительное повышение стока Дона (до 22–25 км³) на фоне солености, возросшей в пред-

шествующее десятилетие (13,8‰), привело к обострению плотностной стратификации, что способствовало расширению зон гипоксии в собственно море до 13–15 тыс. км², из которых на долю Темрюкско-Ахтарского района в 1977 г. приходилось 5,5 тыс. км².

В последующие 1979–1987 гг. отмечалось повышение водности и снижение солености моря (в среднем до 11,6‰). В климатическом отношении рассматриваемый период характеризовался продолжающейся глобальной тенденцией к потеплению и ослаблению ветровой активности. Несмотря на улучшение условий среды, интенсивность первичного продуцирования возросла незначительно. Материалы по характеристике фитопланктона показывают, что в эти годы отмечено снижение флористического разнообразия сообщества. Несмотря на более высокую встречаемость продуктивных и высокопродуктивных значений биомассы фитопланктона, ее средний уровень оставался низким (Студеникина и др., 1999), а первичная продукция органического вещества составила около 14,5 млн т $C_{орг.}/г$. В качестве одной из причин такого невысокого темпа роста показателей первичного продуцирования рассматривается значительное повышение уровня химического загрязнения моря. Так, в 1985–1990 гг., содержание в воде тяжелых металлов приоритетного ряда превышало рыбохозяйственные предельно допустимые концентрации (ПДК) в 9–12 раз, хлорорганических пестицидов – в 6–8 раз, нефтепродуктов – в 4 раза (Семенов и др., 1991; Макаров, Семенов, 1996). Рост химического загрязнения связан с интенсивным развитием промышленности в Азовском бассейне во второй половине 1980-х гг.

В среднем зона дефицита кислорода составляла в этот период в море около 9 тыс. км², а в Темрюкско-Ахтарском районе – 1,2 тыс. км². Однако в годы, когда объем стока и содержание загрязняющих веществ достигали максимальных для рассматриваемого периода значений повышенного речного стока (1979–1981 гг.) и высокого техногенного загрязнения, площадь гипоксии возрастала. Такая ситуация отмечена в 1987 г., когда гипоксия сформировалась на 27 тыс. км² (80% площади дна), из которых более 7 тыс. км² зафиксировано в Темрюкско-Ахтарском районе.

На фоне высокого уровня антропогенного загрязнения произошли существенные изменения в биологической структуре экосистемы Азовского моря, вызванные появлением и массовым развитием гребневика *Mnemiopsis leidyi* (Воловик и др., 1991, 1996; Воловик С., Воловик Г., 2000). Величина первичной продукции в постгребневиковый период (1988–2012 гг.) изменялась от 18 до 31 млн т $C_{орг.}/г$ сухого органического вещества (рис. 1). Увеличение скорости синтеза органического вещества можно рассматривать как отклик экосистемы на действие мощного биологического фактора – вселенца гребневика. С увеличением первичной продукции содержание органического вещества в воде и донных отложениях Азовского моря возросло, что при всех прочих равных условиях создало дополнительные предпосылки развития гипоксии.

Рассматривая в целом постгребневиковый период по особенностям формирования содержания кислорода у дна, можно выделить несколько подпериодов, отличающихся площадью распространения и глубиной развития гипоксии.

Первый (1988–1996 гг.) характеризовался относительно стабильным материковым стоком, преимущественно в диапазоне 33–38 км³ при средней водности 34,5 км³, близкой к предшествующему периоду. В эти годы наметилась тенден-

ция возрастания относительного значения Кубани в суммарном стоке в среднем до 36%, а в 1989 и 1992 гг. – до 50%.

Замедление циркуляционных процессов в условиях высокой интенсивности продуцирования первичного органического вещества (20–31 млн т C_{org} /г.) определило усиление неблагоприятных ситуаций по содержанию кислорода. Экологически неблагоприятная зона (насыщение $\leq 60\%$) в придонном горизонте охватывала ~15–30 тыс. км² с высокой повторяемостью (1988–1990) при вертикальной устойчивости > 7 тыс. усл. ед. Дефицит кислорода в 1988–1990 гг. распространялся на 50–90% площади моря, а пороговые значения (0–20%) зафиксированы на акватории, равной 9–17 тыс. км².

Важно отметить, что углубление гипоксии в конце 1980-х–начале 1990-х гг. явилось одной из причин участвовавших ситуаций массовой гибели рыб, неоднократно зарегистрированных официальными природоохранными органами Азов-рыбвода и Кубаньрыбвода. Так, в августе 1989 г. в Молочном лимане произошла гибель молоди шилентаса, обусловленная резким снижением содержания кислорода. Причиной возникновения такого экологического кризиса явилось одновременное воздействие двух факторов – антропогенного (сброс производственных сточных вод Бердянского рыбокомбината, содержащих большое количество легкоокисляемых соединений) и естественного, связанного с активным потреблением кислорода на окисление планктонного вещества. Преобладание расхода кислорода на процессы окисления привнесенного и новообразованного органического вещества над его поступлением при фотосинтетической и атмосферной аэрации привело к быстрому снижению кислорода до летальных для молоди шилентаса значений.

В 1990 и 1991 гг. на протяжении 3 месяцев (июль–сентябрь) отмечались выбросы погибших рыб – осетровых, камбалы, тарани, бычка в районах Арабатской стрелки, Казантипского, Темрюкского заливов и Ачугевской косы. В эти годы отмечался значительный отход бентоса в летний период.

В 1997–2001 гг. материковый сток существенно не изменился (31,5–38,1 км³), однако ослабление вертикальной устойчивости (от 1,3 до 5,3 тыс. усл. ед.) привело к некоторому сокращению масштабов гипоксии. По усредненным за 5 лет оценкам на площади 7,3 тыс. км² отмечалось содержание кислорода 38%.

Следующее пятилетие характеризовалось повышением водности Дона и Кубани в среднем до 39,6 км³. При этом три года подряд (2004–2006) материковый сток колебался в пределах 40,7–43,3 км³. Площадь гипоксии расширилась в два раза (в среднем до 15,4 тыс. км²), и содержание кислорода снизилось до 27% насыщения. Зоны с аномально низким содержанием кислорода ($< 20\%$) отмечались ежегодно на площади 1–4,8 тыс. км². Устойчивость водных масс в этот период возросла до 5,5–7,3 тыс. усл. ед. (Куропаткин, 2010).

В 2007–2012 гг. в результате значительного сокращения речного стока (в среднем до 28 км³) и сопутствующего увеличения плотностной стратификации вследствие проникновения соленых вод через Керченский пролив площадь гипоксии оказалась весьма высокой (в среднем за пятилетие – 18 тыс. км²).

Таким образом, рассматривая тенденции изменения содержания кислорода в море летом в многолетнем аспекте, следует обратить внимание на то, что если в 1960–1987 гг. насыщение кислородом $< 60\%$ охватывало в среднем 8 тыс. км², то в последующие годы (1988–2008) площадь с дефицитом кислорода у дна возросла в

среднем до 14 тыс. км², что составляет 40% от площади моря. При этом с высокой повторяемостью (1988–1990, 1993, 1994, 2002, 2006, 2008–2011 гг.) при установившейся стратификации вод ($E_{обш}$ от 6,5 до 11,5 тыс. усл. ед.) депрессия кислорода распространялась на 50–90% площади моря.

Завершая анализ результатов многолетних наблюдений за кислородным режимом Азовского моря, следует признать, что высокая изменчивость содержания кислорода в придонном горизонте как во времени, так и в пространстве не всегда адекватно отражает состояние донной фауны. Это несоответствие обусловлено тем, что сроки проведения экспедиции зачастую приходится на начало либо конец возникновения гипоксии. В этой связи была разработана методика восстановления площади гипоксии $\leq 60\%$, включающая ее связь с определяющими факторами (вертикальная устойчивость, БПК₁ и состояние донной фауны).

В результате множественного регрессионного анализа с учетом гибели бентоса на последнем этапе было получено уравнение, позволяющее установить максимальные границы развития площади гипоксии:

$$S_{0-60\%} = 19.67 - 0.039 \times B_{\text{бентоса (IV-VII)}} - 0.14 \times O_2 \text{ (рис. 7),}$$

где $S_{0-60\%}$ – площадь гипоксии, тыс. км²; $B_{\text{бентоса (IV-VII)}}$ – отход бентоса от апреля к июлю, мг/м³; O_2 – содержание кислорода в зоне гипоксии в придонном слое, %.

В большинстве случаев непосредственно зафиксированная в период наблюдений и рассчитанная площади гипоксии дали хорошее совпадение.

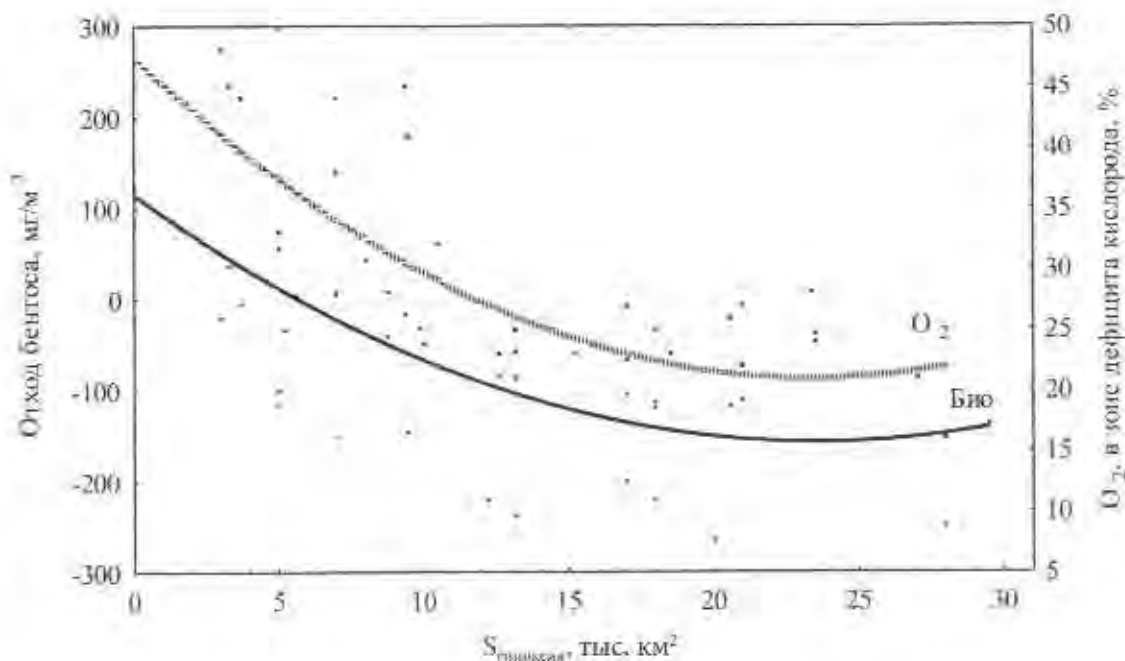


Рис. 7. Изменения площадей гипоксии и биомассы бентоса.

Fig. 7. Changes in hypoxic zones and benthos biomass.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ многолетних материалов по динамике содержания кислорода в Азовском море показал, что характерной особенностью кислородного режима является резкое, нередко до сублетальных концентраций, снижение содержания кислорода в придонном горизонте в летний период.

Выполненные эмпирические оценки, описывающие взаимосвязи между формированием придонного дефицита кислорода и рядом наиболее значимых факторов ($E_{\text{общ.}}$, БПК₁, $C_{\text{орг}}$) позволили заключить, что главной причиной возникновения дефицита кислорода является высокое содержание органического вещества, обуславливающее активизацию процессов его окисления, а ведущим фактором, запускающим этот механизм, – общая вертикальная устойчивость водных масс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрова З.В. Органическое вещество в донных осадках Азовского моря // Изв. Сев.-Кавказ. науч. центра высш. шк. Сер. естествознания. 1975. №1. С. 77–81.

Александрова З.В. Влияние донных отложений на режим кислорода и содержания биогенных веществ в Азовском море: Автореф. дис. ... канд. географ. наук. Ростов-на-Дону: Гидрохимич. ин-т, 1980. 24 с.

Александрова З.В. Многолетняя изменчивость кислородного режима и содержания биогенных веществ в Азовском море // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Ростов-на-Дону: АзПИИРХ, 2012. С. 18–35.

Александрова З.В., Бронфман А.М. Обмен биогенными элементами в системе «вода-грунт» и его роль в формировании химических основ продуктивности Азовского моря // Океанология. 1975. Т. 15. Вып. 1. С. 75–81.

Александрова З.В., Рамова М.Г. Роль грунтов в формировании придонного дефицита кислорода в Азовском море // Вопросы биогеографии Азовского моря и его бассейна. Л.: Изд-во географ. общ-ва СССР, 1977. С. 80–83.

Александрова З.В., Баскакова Т.Е. Основные закономерности формирования кислородного и биогенного режимов юго-восточного участка на акватории Азовского моря в районах проектируемого разведочного бурения ООО НК «Приазовнефть» // Защита окружающ. среды в нефтегаз. комплексе. 2010. №9. С. 30–37.

Александрова З.В., Рамова М.Г., Баскакова Т.Е. Ретроспективная оценка развития гипоксии в придонном горизонте Азовского моря // Тез. докл. XI Всерос. конф. по промысл. океанологии. М.: Из-во ВНИРО, 1999. 42 с.

Александрова З.В., Рамова М.Г., Баскакова Т.Е. и др. Особенности динамики основных гидрохимических показателей отдельных акваторий Азовского моря в 2004–2006 гг. // Защита окружающ. среды в нефтегаз. комплексе. 2007. №10. С. 18–24.

Бронфман А.М., Александрова З.В. Последствия химического загрязнения контактной зоны «вода-донные осадки» моря // Человек и биосфера. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 148–157.

Бронфман А. М., Воловик С. П., Козлитина С. В. и др. Статистическая структура океанологических и биологических параметров экосистемы Азовского моря. Ростов-на-Дону: Из-во Ростов. ун-та, 1979. 157 с.

Бруевич С. В. Определение продукции и органического вещества в море // Сб. работ, посвящ. 50-летию науч. деят. акад. Вернадского. М.: Изд-во АН СССР, 1936. С. 281–300.

Вишберг Г. Г. Первичная продукция водосмов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.

Воловик Г. С., Воловик С. П. Гребневик *Mnemiopsis leidyi* в нативном ареале (краткий обзор) // Гребневик *Mnemiopsis leidyi* (A. agassiz) в Азовском и Черном морях: биология и последствия вселения. Ростов-на-Дону: БКИ, 2000. 500 с.

Воловик С. П., Луц Г. И., Мирзоян З. А. и др. Вселение гребневики мнемииопсиса в Азовское море: предварительная оценка последствий // Рыб. хоз-во. 1991, № 1. С. 47–50

Воловик С. П., Мирзоян З. А., Студеникина Е. И., Набока Т. В. Влияние гребневики *Mnemiopsis leidyi* на планктонную фауну Азовского моря // Основные проблемы рыбного хозяйства и охрана рыбохозяйственных водоемов Азовского бассейна. Ростов-на-Дону: Из-во АзНИИРХ, 1996. С. 162–164.

Горшкова Т. И. Органическое вещество осадков Азовского моря и Таганрогского залива // Тр. ВНИРО, 1955. Т. 31. Вып. 1. С. 123–145.

Дацко В. Г. О причинах заморов рыб в Азовском море // Тр. АзЧерНИРО. 1951. Вып. 15. С. 23–31.

Дацко В. Г. Органическое вещество в водах южных морей СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 267 с.

Жукова С. В., Александрова З. В., Баскакова Т. Е. Особенности гидролого-гидрохимического режима Темрюкско-Ахтарского района в июле-августе 2004 г. // Наука Кубани. 2005. №1. С. 14–29.

Зенин А. А., Белоусова Н. В. Гидрохимический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 240 с.

Киптович Н. М. Гидрологические исследования в Азовском море // Тр. Аз.-Черномор. науч.-промысл. экспедиции. 1932. Вып. 5. С. 95–107.

Кляшторин Л. Б. О зависимости уровня активного обмена у рыб от температуры // Физиология морских рыб. М.: Наука, 1980. С. 41–47.

Лурье Ю. Ю. Унифицированные методы исследования качества вод. Методы химического анализа вод. М.: СЭВ, 1987. 1230 с.

Макаров Э. В., Семенов А. Д. Экологические аспекты проблемы развития рыбного хозяйства в Азовском бассейне // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азовского моря. Ростов-на-Дону: Изд-во АзНИИРХ, 1996. С. 6–20.

Макарова Г. Д. Кислородный режим Азовского моря и условия его формирования в период зарегулированного стока р. Дон // Химические ресурсы морей и океанов. М.: Изд-во ВНИРО, 1970. С. 109–115.

Орадовский С. Г. Руководство по методам химического анализа морских вод. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 207 с.

Прокопенко Е. И. Характеристика химического состава грунтов Азовского

моря и Таганрогского залива // Аннотации работ, выполненных АзНИИРХ в 1962 г. Ростов-на-Дону: Из-во АзНИИРХ, 1964. С. 12–13.

Сапожников В. В. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 1986. 202 с.

Семенов А. Д. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 542 с.

Семенов А. Д., Александрова З. В., Кишкинова Т. С., Ромова М. Г. Уровень загрязнения экосистемы Азовского моря по современным оценкам // Тез. докл. II Всесоюз. конф. по рыбохоз. токсикологии. Т. 2. СПб., 1991. С. 155–157.

Сорокин Ю. И. О методике определения сероводорода и сульфидов в донных отложениях // Бюл. Ин-та биологии водохранилищ, 1969. №6. С. 50–52.

Студеникина Е. И., Алдакимова А. Я., Губина Г. С. Фитопланктон Азовского моря в условиях антропогенного воздействия. Ростов-на-Дону: Эверест, 1999. 175 с.

Толоконникова Л. И., Студеникина Е. И. Содержание органического вещества в донных отложениях Азовского моря // Сб. науч. тр. АзНИИРХа. Ростов-на-Дону: АзНИИРХ, 1998. С. 100–103.

Федосов М. В. Причины возникновения дефицита кислорода в Азовском море // Тр. ВНИРО. 1955. Т. 31. Вып. 1. С. 45–47.

Цурикова А. П., Шульгина Е. Ф. Гидрохимия Азовского моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1964. 258 с.

Strom K. M. Nutrition of algae. Experiments upon : the feasibility of the Schreiber method in fresh waters; the relative importance of iron and manganese in nutritive medium; the nutritive substance given off by lake bottom muds // Arch. Hydrobiol. 1933. V. 25. P. 54–60

HYPOXIA AND ITS ECOLOGICAL CONSEQUENCES IN THE SEA OF AZOV

© 2013 г. Z. V. Aleksandrova, T. E. Baskakova

Azov Fisheries Research Institute, Rostov-on-Don, 344002

Based on long-term data (1960–2012) we have considered changes in the boundaries of hypoxic zones in the Azov Sea in summer. The most important factors determining hypoxia development in the near-bottom sediments have been revealed. It is shown that the primary reason of near-bottom oxygen deficiency in an eutrophic water body with sufficient amounts of organic matter, such as the Azov Sea, is the considerable consumption of oxygen to oxidize the organic matter, primarily, of bottom sediments, and the trigger mechanism is the vertical stability of water masses.

Keywords: oxygenation, oxygen deficiency in the near-bottom layer, biochemical oxygen consumption in the surface layer of bottom sediments, organic carbon, hydrobionts death, redox processes.