

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФИЦИТА КИСЛОРОДА В АЗОВСКОМ МОРЕ

Канд. хим. наук М. В. ФЕДОСОВ

(ВНИРО)

Степень насыщенности водных слоев газообразным кислородом, обеспечивающая нормальный дыхательный обмен водных организмов, является основной характеристикой газового режима рыбохозяйственного водоема.

Газовый режим водоема тогда бывает благоприятным для жизнедеятельности промысловых рыб, их молоди и кормовых организмов, когда в воде содержится более 3 см^3 кислорода в 1 л. Такое содержание кислорода для Азовского моря в самое жаркое время года составляет около 60% полного насыщения воды кислородом. Когда содержание кислорода в водных слоях начинает снижаться, жизнедеятельность промысловых рыб и кормовых организмов в той или иной степени угнетается. При значительном дефиците кислорода возникают явления замора — гибель водных организмов и промысловых рыб.

ОСОБЕННОСТИ ГАЗОВОГО РЕЖИМА В АЗОВСКОМ МОРЕ

В Азовском море в летний период, а иногда и весной, наблюдалась гибель промысловой рыбы и кормовых донных организмов. Это совпадало с дефицитом кислорода в придонных слоях, содержание которого у дна уменьшалось до десятых и сотых долей миллилитра на 1 л морской воды.

Основной причиной заморных явлений в Азовском море является наступающий резкий дефицит кислорода в придонном слое. На жизнедеятельность обитателей водной толщи и дна наряду с недостатком кислорода губительно отражается появление в воде газообразных продуктов распада органического вещества в анаэробных условиях. В илистых донных отложениях Азовского моря и в придонном слое воды, когда там полностью исчезает кислород, распад органического вещества проходит в анаэробных условиях. Продукты распада белка в этих условиях образуют большое количество сероводорода.

Ухудшение газового режима преимущественно в южной половине средней части Азовского моря происходит ежегодно, но с различной интенсивностью.

Еще Н. М. Книпович указывал, что ухудшение газового состояния в море наступает в теплое время года и в районе, примыкающем к Керченскому проливу. Дефицит кислорода и появление сероводорода в воде прежде всего он наблюдал в южной половине центральной части моря, с отклонениями к востоку и западу.

А. П. Жуков в 1937 г. наблюдал дефицит кислорода и заморные явления весной (апрель) и летом (июль) в центральной части моря, и

особенно в ее южной половине. Однако А. П. Жуков не обнаружил сероводорода в водных слоях.

В. Г. Дацко отмечал, что в 1946 г. наблюдалась массовая гибель бентоса и рыбы. Он высказывал предположение, что не только сероводород, но и другие продукты анаэробного распада органического вещества (амины) и газообразные соединения фосфора, образующиеся при восстановлении фосфатов (фосфин), служат причиной гибели водных организмов. Однако нам не удалось обнаружить ни арсина, ни фосфина из свежесобранных илистых донных отложений непосредственно после наступившего в 1946 г. дефицита кислорода в придонном слое моря.

Анализ образцов ила, только что извлеченных со дна моря, проводили в судовой лаборатории. Продолжительная продувка проб грунта струей молекулярного водорода извлекала громадное количество сероводорода, который улавливался плюмбитным фильтром. В то же время бромортутная реактивная бумага не давала ни малейшей окраски, хотя она является самым чувствительным реагентом на арсин и фосфин.

Учитывая изложенное, следует считать, что дефицит кислорода является основной причиной заморных явлений в Азовском море.

Дефицит кислорода в водоемах возникает в результате того, что скорость потребления кислорода, абсорбированного в водной среде, начинает превышать скорость поступления кислорода в водную толщу.

Кислород поступает в водную толщу в основном из атмосферы и отчасти образуется при фотосинтетической деятельности водных растительных организмов, в морских условиях преимущественно фитопланктона. Кислород воздуха, поступающий в верхние слои воды, в результате перемешивания водной толщи аэрирует придонные слои. С другой стороны, он постоянно потребляется в водоеме в процессе дыхания живых организмов и при окислении органических остатков водных обитателей, а также и восстановленных минеральных соединений (H_2S и др.). Скорость потребления кислорода, содержащегося в морской воде, пропорциональна концентрации органического вещества и других соединений восстановленного характера, находящихся в морской воде и в донных отложениях водоема, и зависит от величины восстановительного потенциала этих соединений.

ПРИЧИНЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ РАССЛОЕНИЕ ВОДЫ И ДЕФИЦИТ КИСЛОРОДА В АЗОВСКОМ МОРЕ

В Азовском море поддержание насыщенности водной толщи кислородом осуществляется в процессе ветрового перемешивания водных слоев и отчасти в результате перемещения верхних слоев воды в придонные горизонты возникающими в море течениями.

Б. А. Шлямин указывает, на основании своих исследований, что у мыса Казантип происходит опускание верхних слоев воды вниз вследствие наблюдающихся здесь течений.

В тех случаях, когда в Азовском море аэрация водной толщи, особенно нижних слоев воды, прекращается, а интенсивность потребления кислорода достигает своего максимума, наступает резкий дефицит кислорода в первую очередь в придонных слоях.

Расслоение водной толщи по вертикали обусловлено возникновением двух или нескольких слоев воды различной плотности, перемешивание которых тем затруднительней, чем больше различие в плотности этих водных слоев. Вследствие этого нижние слои воды изолируются верхними слоями от влияния атмосферы, и аэрация их резко снижается.

Расслоение водной толщи по вертикали (а это именно и вызывает прекращение аэрации нижних слоев) в Азовском море вызывается несколькими причинами.

1) различным термическим режимом верхних и нижних слоев в периоды наибольшего дневного прогрева верхних слоев. Разность температуры верхних и нижних слоев обуславливает их различную плотность;

2) различной величиной солености верхних и нижних слоев в результате проникновения через пролив в Азовское море более соленых черноморских вод или иногда менее соленых вод из Таганрогского залива, опресненных донской водой;

3) ослаблением перемешивания водных слоев в штилевую погоду и в местах возникающего стыка и завихрений встретившихся различных водных масс.

Температурный градиент, т. е. разница температуры верхнего и нижнего слоя воды по вертикали, своей наибольшей величины в условиях штилевой погоды достигает в центральной части моря в летние месяцы.

Максимальный летний прогрев в Азовском море отмечен в июле. В августе некоторое время температура воды держится более или менее постоянной, затем начинается охлаждение водных слоев. Особенно сильно возрастает температурный градиент по вертикали в местах создавшегося солевого расслоения водной толщи вследствие замедленного теплового обмена между двумя образовавшимися слоями воды.

Н. М. Книпович в 20-х годах отметил, что в районе мыса Казантип в течение всего теплого времени года температура верхнего слоя отличалась от температуры нижнего слоя в основном на $0,5-1^{\circ}$, но в отдельных случаях эта разница достигала величины $4-4,5^{\circ}$.

Разница температуры верхнего и нижнего слоев морской воды в районе мыса Казантип (по Н. М. Книповичу) в процентах от всех наблюдений:

0—0,5°	70
0—1,0°	21,5
> 1° (до 4,2—4,5°)	8,5

А. П. Жуков в 1937 г. наблюдал в Азовском море более высокие градиенты температур (табл. 1).

Таблица 1

Разница температур воды (в °) в Азовском море в 1937 г.
(По А. П. Жукову)

Показатели \ Месяц	Май	Июнь	Июль	Август	Декабрь
Температура верхнего слоя . . .	18—20	22—24	26—27	24—25	3—5
Температура придонного слоя . .	13—15	16—18	20—22	18—20	3—5
Наибольшая разница температур морской воды	5	6	5—5	5,5	0

В табл. 2 приведены температуры верхнего и нижнего слоев морской воды по наблюдениям В. М. Надежина в 1940 г.

Таблица 2

Градиент температуры (в °) в 1940 г.

Месяц	Температура поверхностного слоя	Температура нижнего слоя	Разница температур
Апрель	5,5	3,70	1,8
Сентябрь	22,8	20,8	2,0

В. Г. Дацко указывает, что «летом температура воды повышается до $20-25^{\circ}\text{C}$, причем днем, в тихую солнечную погоду, она обычно на $2-4^{\circ}$ выше, чем в придонных слоях».

Такое явление наблюдалось им «при одинаковой солености (морской воды), а иногда и более высокой у дна».

Наши работы в июле 1950 г. (А. Л. Минкина и М. В. Федосов) показывают, что разница температур по слоям достигала наибольшей величины при разнице в солености воды этих слоев 0,8—0,9‰. В этом случае в нижнем слое воды наступал дефицит кислорода (табл. 3).

Таблица 3
Содержание кислорода при разнице температуры солености по слоям

Район моря	Разница температуры по слоям в°	Разница солености по слоям в ‰	Содержание кислорода в придонном слое в %
Центральный	1,7	0,83	2,25
Южный	3,0	0,87	0,99

В зависимости от температуры воды, меняющейся по сезонам года, в каждом месяце весенне-летнего периода, один и тот же градиент температуры обуславливает различный градиент плотности воды. Наибольший градиент плотности возникает обычно в июле, точнее в конце июля — начале августа, в период наивысшей средней температуры прогрева морской воды (табл. 4).

Таблица 4
Градиент плотности (в ‰), вызываемый градиентом температуры в Азовском море

Год \ Месяц	Май	Июнь	Июль	Август
1937	100	136	164	134
1924	100	63	89	74

Так было в 1937 г., когда разница температуры между слоями воды достигла 5—6°; в остальные годы наблюдался температурный градиент не более 2—3°.

Разница в солености верхнего и нижнего слоя воды возникает за счет поступления в южную половину центральной части Азовского моря более соленых вод из Черного моря.

Как отмечает Н. М. Книпович, «приток в Азовское море воды из Керченского пролива происходит очень неправильно (неравномерно — М. Ф.). Иногда широкая часть входа в Керченский пролив наполнена от поверхности до дна Азовской водою, в других случаях притока воды из пролива вливается масса воды, причем глубокие слои имеют черноморскую соленость (соленость верхних слоев Черного моря), а в верхних соленость сильно повышена», «. . . но в некоторых случаях можно проследить на большом протяжении сильно соленую воду пролива, опустившуюся на дно».

В 1925 г. вода соленостью около 15‰ (Cl=8‰) простиралась от пролива на 24 мили к северо-западу, а соленостью около 13‰ (Cl=7‰) на 32 мили в том же направлении. Входящие в Азовское море через пролив соленые воды отклоняются и к западу, и к востоку, достигая иногда траверса Темрюкского маяка.

В 1937 г. А. П. Жуков наблюдал в Азовском море разность солености верхних и нижних слоев воды (табл. 5).

Таблица 5

Разность солености (в ‰) верхних и нижних слоев морской воды
в Азовском море в 1937 г.

(составлено по данным А. П. Жукова)

Горизонт \ Район	Центральная часть		Азовского моря		Таганрогский залив
	апрель		июль		
	северный	южный	северный	южный	
Поверхностный . . .	11,86—11,96	12,00—12,26	11,83—11,86	11,88—12,12	11,93—12,36
Придонный	13,56—13,88	15,20—15,94	12,52—12,90	14,92—16,13	15,68—15,80
Разница в солености двух горизонтов	1,70—1,92	3,20—3,68	0,69—1,04	3,04—4,01	3,75 3,44

При определенных ветровых условиях более тяжелая черноморская вода входила в Азовское море через пролив, немного разбавлялась азовскими водами и распространялась по дну, как более тяжелая. Нижний слой воды почти не аэрировался, что препятствовало проникновению кислорода к донным отложениям Азовского моря.

Образованию расслоения водной толщи даже при незначительном вертикальном градиенте температуры или солености способствуют гидродинамические условия в центральном и предпроливном пространстве.

Прежде всего, центральная часть моря лежит как бы внутри круга, который образован перемещающимися по периферии более опресненными водами. Центральная часть моря является зоной относительно медленно циркулирующих вод. В обширном предпроливном пространстве при поступлении через сравнительно узкий пролив черноморских вод, встречных азовскому течению, в силу существующей гидродинамической закономерности поток черноморских вод, подпертый азовскими водами, распадается веером во все стороны и резко теряет поступательную скорость. В тихую погоду перемещения воды прекращаются, создаются условия застоя, сильно затрудняющие аэрацию нижних слоев воды.

Таблица 6

Относительная разница плотности воды (в ‰), вызванная градиентом солености в 1924 г.

(Вычислено по материалам Н. М. Книповича)

Район моря	Разница плотности двух горизонтов
Южная часть, предпроливный район (западная зона—центральная зона—восточная зона)	99—163—113
Центральная часть	61
Восточная часть	49
Северный район (запад—восток)	5—69
Таганрогский залив (вход в залив—западная часть—восточная часть)	117—80—6

Вычисленная нами по температурным данным В. Г. Дацко разница плотности воды в летний период колеблется от 46 до 95%.

В июле разница в плотности воды, вызванная градиентом температур, достигает своего максимума. Однако разница в плотности воды в этом случае меньше примерно в 1,5—2,0 раза, чем разность, вызванная градиентом солености (табл. 7).

Таблица 7

Относительная разница плотности воды (в %) двух слоев, вызванная градиентом солености и градиентом температур в 1937 г.
(Вычислено по материалам А. П. Жукова)

Районы центральной части моря	Апрель	Июль	
	обусловлено градиентом солености	обусловлено градиентом солености	обусловлено градиентом температур
Северный	129—145	52—79	169
Южный	244—280	288—305	
Район Темрюкского залива	267—293	262—286	

Относительная разница плотности воды, вызванная градиентом температур, в другие месяцы выражается следующими величинами (в %):

Май	Июнь	Июль	Август	Декабрь
103	140	169	138	0

Однако наибольший градиент плотности, расслаивающий водную толщу на два слоя, возникает, когда между слоями воды образовался значительный градиент солености и весьма большой градиент температур. В 1937 г. наблюдалось расслоение воды, вызванное градиентом плотности между верхними и нижними слоями, достигавшим суммарно 474%. Градиент солености обусловил 305% градиента плотности и градиент температур 169%.

Такая слоистость очень устойчива. Чем больше градиент плотности двух слоев воды, тем большую силу должно иметь постоянное или ветровое течение, чтобы нарушить слоистость водной толщи.

Все три явления, обуславливающие расслоение и застой воды в море, как по своей повторяемости, так и по вызываемой ими степени ухудшения газового режима водной толщи имеют различное значение.

Градиент температур ежегодно достигает летом своего максимума и в это время его величина может вызвать значительное расслоение водной толщи Азовского моря. Это явление зависит от климатических условий и имеет многолетнюю стабильность.

Разность плотности воды верхних и нижних слоев вызывает ежегодно в центральной части Азовского моря ухудшение газового режима водной толщи. Обычно при температурной стратификации водных слоев в море газовый режим не достигает состояния полного исчезновения кислорода в придонном слое воды. Если и наступает состояние полного потребления кислорода из придонного слоя воды, то только на очень короткий промежуток времени. Устойчивость различных слоев воды невелика лишь в случае температурной стратификации в Азовском море, и требуется незначительная сила для возобновления перемешивания водной толщи. Под влиянием даже слабого ветра наступает частичная атмосферная аэрация придонных слоев воды.

Однако вследствие ежегодно повторяющихся условий застоя, вызываемого температурным градиентом, в самом придонном слое воды центральной части моря возникает, хотя и кратковременный, дефицит кислорода. Жертвой такого кислородного угнетения прежде всего становится бентос, поэтому центральная зона моря относительно бедна бентическим населением. Зстой воды в центральной части моря, и особенно в предпроливном пространстве, определяется интенсивностью ветровой деятельности и климатическими условиями в районе Азовского моря. При малой ветровой деятельности застойные явления могут продолжаться длительное время.

Более резкое ухудшение кислородного режима придонного слоя воды, вызываемое разностью в солености верхних и нижних слоев, возникает в Азовском море далеко не каждый год. Необходимо соответствующее сочетание метеорологических и гидрологических условий, чтобы более соленые воды Черного моря проникли в Азовское море, не претерпев большого разбавления азовской водой, и заполнили центральную и предпроливную часть моря. При определенном сочетании этих условий аэрация придонного слоя, отделенного от верхнего слоя большой разницей в плотности, в Азовском море почти полностью прекращается. Содержавшийся в придонном слое воды кислород быстро потребляется на окисление органических веществ и дыхание организмов.

В придонном слое начинают происходить анаэробные процессы. Продукты анаэробного распада — сероводород, а возможно и другие ядовитые газы насыщают нижние слои воды, постепенно проникая вверх. Это приводит к массовой гибели не только бентоса, но и плавающих водных организмов, в том числе и рыб. Если образование двух слоев воды с разной соленостью происходит летом, то значительный градиент температур двух слоев в этот период года весьма увеличивает резкость расслоения водной толщи. В этом случае устойчивость водных слоев очень велика и необходим уже двух-трехбалльный ветер, а иногда и большей силы для перемешивания водной толщи Азовского моря до дна.

Таковы причины ухудшения кислородного режима Азовского моря и возникновения в нем заморных явлений, как следствия образования дефицита кислорода в нижних слоях воды.

Определив величину градиента плотности по вертикали, характеризующую определенную устойчивость образовавшейся слоистости водной толщи, можно судить о силе ветра, которая может аэрировать придонные слои путем их перемешивания со слоями воды, лежащими выше.

СЛУЧАИ РАССЛОЕНИЯ ВОДНОЙ ТОЛЩИ В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ

Речные воды Дона, участвующие в формировании вод залива и Азовского моря, обуславливают возникновение в отдельных местах северной части моря, а иногда и в Таганрогском заливе образование двух слоев воды: верхнего, более опресненного и теплого, и нижнего, более соленого и менее прогретого (табл. 8).

В северной части Азовского моря в районе Белосарайской косы в сентябре 1923 г. было следующее расслоение солености (в ‰):

верхний слой	7,89
нижний слой	10,95
разница солености двух слоев	3,06
разница плотности в %	238

Таблица 8

Расслоение водной толщи в Таганрогском заливе

Районы залива	Время наблюдения	Разница плотности в %		
		вызванная температурой	вызванная соленостью	общая или суммарная
Северный	июль 1924 г.*	38	114	152
Северо-западный	август 1927 г.*	12	104	116
Западный	1950 г.**			
	апрель	10	49	59
	май	18	<5	~20
	июнь	24—44	16—69	40—113
	июль	63—48	170—209	233—257
	август	Почти полная гомотермия и гомогалинность		

* По материалам Н. М. Книповича.

** По материалам гидрохимической бригады ВНИРО.

Из табл. 8 видно, что речные воды оказали распресняющее влияние на поверхностный слой морской воды, в результате чего возникли два водяных слоя. Однако случаи более резкого расслоения водной толщи в горле и западной части Таганрогского залива весьма редки. По наблюдениям Н. М. Книповича, у северного побережья в районе бухты в придонном слое наблюдался в 1924 и 1925 гг. полный дефицит кислорода и вода этого слоя имела запах сероводорода (табл. 9).

Таблица 9

Расслоение воды и ухудшение газового режима придонного слоя (глубина 8 м) у северного побережья в районе бухты

Время наблюдения	Сероводорода	Содержание кислорода в придонном слое	Разница плотности двух слоев в %		
			вызванная градиентом температур	вызванная градиентом солености	суммарная
1924 г. 25/V	Запах	1,11	94	258	352
7/VII	—	2,66	39	29	68
25/VIII	Запах	0,0	57	90	147
1925 г. 27/VI	—	0,33	79	115	194

В самом заливе в летнее время резкого ухудшения газового режима придонного слоя воды не наблюдается.

Расслоение воды является основной предпосылкой, обуславливающей образование дефицита кислорода в нижних слоях водной толщи Азовского моря. Однако дефицит кислорода может наступить только в том случае, когда скорость потребления его в процессах окисления больше скорости поступления его в данный слой воды в результате атмосферной аэрации и перемешивания водной толщи течениями и ветрами.

ИНТЕНСИВНОСТЬ БИОХИМИЧЕСКОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ КИСЛОРОДА В АЗОВСКОМ МОРЕ

При расслоении воды в Азовском море резко уменьшается или даже совсем прекращается аэрация нижних слоев моря. Срок и интенсивность наступления дефицита кислорода в придонных слоях воды с момента образования расслоения водной толщи определяет скорость биохимического потребления кислорода.

При установившемся расслоении воды непосредственной причиной образования кислородной депрессии является скорость потребления содержащегося в воде кислорода, превышающая в этих условиях скорость аэрации водных слоев (табл. 10).

Таблица 10

Скорость биохимического потребления кислорода в воде Азовского моря

Район	Месяц	Горизонт			Примечание
		поверхностный	средний	нижний	
Центральная часть северной половины моря	Май	0,60	—	1,27	БПК ₄ по материалам А. П. Жукова За 1937 г. То же
	Июнь	0,60	—	1,28	
	Июль	0,65	—	?	
	Август	0,62	—	1,03	
	Декабрь	0,24	—	0,25	
Центральная часть южной половины моря	Май	0,60	—	1,32	"
	Июнь	0,50	—	1,36	
	Июль	—	—	—	
	Август	0,46	—	0,75	
	Декабрь	0,27	—	0,31	

Районы	Месяц	Горизонт			Примечание
		поверх- ностный	средний	нижний	
Темрюкский залив	Июль	0,64	—	0,60	За 1937 г.
Центральная часть моря	Июль	—	—	> 2,25* > 1,30**	БПК _{2 1/2} БПК ₃ по наблюдениям В. Г. Дацко в 1939 г.
Центральная часть южной половины моря	Июль	1,66	—	0,56	БПК по наблюдениям А. Л. Минкиной и М. В. Федосова в 1950 г.
Юго-восточный	Июль	—	0,58	0,04	
Северный	Июль	0,62	0,10	0,86	

*После сильного штормового взмучивания донных отложений.

** При умеренном волнении.

В 1950 и 1951 гг. в отдельных случаях наблюдалась скорость биохимического потребления кислорода в воде Азовского моря следующей интенсивности: БПК₄ от 0,95—1,15 (море); 2,29 (залив); БПК₄ 3,32 и 1,76 в месте скопления фитопланктона; БПК₅ от 0,86 до 166.

Однако такая скорость потребления кислорода не может за недельный период штилевой погоды вызвать полный его дефицит в морской воде.

В июле и августе в Азовском море при температуре воды около 25—26° содержание кислорода в водной толще в незаморное время колеблется от 4,5 до 6,5 мл/л. В среднем биохимическое потребление кислорода в водной толще Азовского моря не превышает 1,5—2 мл на 1 литр воды за четверо суток. При наибольших отмеченных скоростях потребления кислорода в водной толще за недельный срок расходуется не более 2,5 мл/л кислорода, что при первоначальном содержании его 4,5 мл/л приведет к снижению его концентрации в морской воде до 2 мл/л, т. е. до 40% полного насыщения при 25° и солености 10,5‰.

Эта величина содержания кислорода не является еще летальной для многих водных организмов.

Правда, в 1951 г. были отмечены отдельные случаи, когда скорость потребления кислорода в придонном слое воды достигала 5,79 мл/л за четверо суток. Это происходит при расходовании кислорода на окисление твердых частиц органического вещества донных отложений непосредственно у дна или во время их взмучивания ветром и при последующем затишьи. Тогда скорость потребления кислорода в водоеме резко увеличивается (табл. 11).

Именно в придонном слое морской воды и наступает прежде всего дефицит кислорода. В отдельных случаях в придонном слое интенсивность потребления кислорода в условиях разобшения нижнего слоя воды от хорошо аэрированного верхнего слоя может вызвать полный дефицит кислорода за одни-два суток.

В этих случаях кислород расходуется на окисление органического вещества взмученных донных отложений. По нашим наблюдениям в 1950 г. установлено, что количество взвешенного вещества в нижнем слое воды в центральной части водоема в среднем равнялось 25 мг/л воды, отклонения от этой средней величины были очень велики, в пределах от 5—6 до 57—85 мг/л. Последние случаи сравнительно редки.

Скорость биохимического потребления кислорода грунтами Азовского моря

Место и время наблюдения	БПК в мл/л	Примечание
1939 г., июль (по В. Г. Дацко)	>2,3 за 2 1/2 суток	Придонный слой со взмученными донными отложениями
1950 г., Центральная часть моря	>5,2 за 2 суток	Морская вода с 250 мг донных отложений
Западная часть моря	>5,2 за 2 суток	—
Северный район моря	5 за 2 суток	—
1951 г., море	5,79 за 4 суток	Придонный слой

Концентрация взвеси в морской воде во время шторма увеличивается. Нами определена концентрация взвеси, доходившая при штормовой погоде (6—7 баллов) в придонном слое до 28 мг/л. В поверхностном слое в умеренную погоду в центральной части моря концентрация взвеси в морской воде в среднем была равна 5 мг/л.

В штормовую погоду эта величина увеличивалась на более мелководных участках водоема в среднем до 26 мг/л.

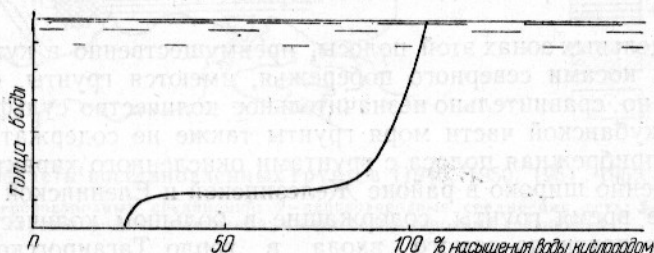


Рис. 1. Кривая распределения кислорода в толще воды в Азовском море в летний период.

Вследствие расхода кислорода на окисление взмученных донных отложений в придонном слое потребление кислорода резко превышает скорость поступления его в этот слой воды.

Поэтому у дна и возникает дефицит кислорода, что хорошо видно при рассмотрении кривой примерного распределения кислорода в море в летнее время года (рис. 1).

В поверхностном слое морской воды в случае, если даже и произойдет массовое отмирание фитопланктона, скопившегося в большие массы, скорость биохимического потребления кислорода не будет превышать интенсивности аэрации этого слоя из атмосферы. Напротив, в том случае, когда в воду добавляли илистый грунт морского дна в количестве, близком к количеству наблюдавшейся в море взвеси, потребление кислорода в этой воде резко возрастало.

В этих случаях за 4 часа потреблялось от 0,2 до 0,8 мл кислорода, т. е. интенсивность потребления кислорода по сравнению с морской водой возрастала в 8—10 раз.

Таким образом, основным и самым большим потребителем кислорода в Азовском море является морской ил, обогащаемый в весенне-лет-

ний период относительно свежим органическим веществом — остатками отмирающего планктона.

Концентрация органического вещества в донных осадках Азовского моря примерно в 10 тыс. раз больше, чем его соответствующее содержание в морской воде. Этим и объясняется такое интенсивное потребление кислорода в самом придонном слое воды.

ДЕФИЦИТ КИСЛОРОДА И ЗОНА СЕРОВОДОРОДНЫХ ГРУНТОВ

Явление частичного и полного дефицита кислорода распространяется на весьма обширную площадь центральной части моря. Угнетенный кислородный режим придонного слоя в летнее время охватывает почти всю площадь придонной воды центральной части моря с глубинами более 10 м.

В Азовском море зона с глубинами более 10 м (от 10 до 13) занимает не менее 50% акватории самого моря. При этом в южных частях этой зоны и в некоторых других местах дефицит кислорода ежегодно наблюдается в большей мере, чем в других местах. Такой режим кислорода в нижних слоях моря обуславливается затрудненной вертикальной циркуляцией водных масс в летний период года.

Вследствие этого донные отложения в центральной части моря вплоть до южных берегов носят восстановленный характер и содержат продукты восстановительного процесса. Эти грунты изобилуют прежде всего продуктами восстановления сульфатов — сульфидами.

Грунты западной части моря, начиная примерно от середины Арабатской стрелки и дальше к северу, и довольно широкой прибрежной полосы вдоль северо-западных и северных берегов моря не содержат сульфидов.

Но в отдельных зонах этой полосы, преимущественно в кутах заливов, образуемых косами северного побережья, имеются грунты, содержащие некоторое, но сравнительно незначительное количество сульфидов. В восточной прикубанской части моря грунты также не содержат сульфидов. Восточная прибрежная полоса с грунтами окисленного характера простирается особенно широко в районе Железинской и Еленинской банок.

В то же время грунты, содержащие в большом количестве сульфиды, доходят почти до самого входа в горло Таганрогского залива. Вглубь залива, в основном по его середине, тянется полоса грунтов, содержащих сульфиды в меньшем количестве. Однако в середине средней и восточной зон залива количество сульфидов в грунте опять возрастает (рис. 2). Распределение грунтов, содержащих сульфиды в большом количестве, в самом море почти полностью совпадает с глубинами 10 и более метров. В то же время такое распределение сульфидсодержащих грунтов в море относится к подповерхностному 3—10-сантиметровому слою. Самый верхний, в несколько миллиметров, слой грунта в некоторых местах окислен и не содержит сульфидов. В поверхностном тончайшем слое грунта в основном сульфидов относительно меньше, чем в подстилающем подповерхностном слое грунта.

В южных районах моря, особенно в юго-восточной части центрального района, и в восточной зоне Таганрогского залива встречаются места с грунтами, содержащими большое количество сульфидов даже в самой поверхностной пленке донных отложений (см. схему). Грунты в этих местах содержат значительное количество свободного сероводорода. В других местах южной части моря встречаются грунты с меньшим содержанием свободного сероводорода.

Восстановленный характер грунтов, с одной стороны, обуславливается сравнительно большим осаждением органического вещества, большим количеством на дне отмирающих морских организмов в центральной части моря с меньшими скоростями течений. С другой стороны,

именно в центральной, более глубокой части Азовского моря создаются гидрологические условия, вызывающие летнее расслоение водной толщи и частичное ее отделение от влияния воздуха атмосферы. Именно здесь, в наиболее глубокой центральной части моря, окисление большого количества органического вещества, осаждающегося на дно, затруднено, и распад органического вещества происходит в анаэробных условиях. В результате в донных отложениях образуются минеральные соединения восстановленного характера. Эти процессы приводят к еще большему дефициту кислорода в придонных слоях водной толщи в период наибольшего расслоения ее в летний, теплый период года.

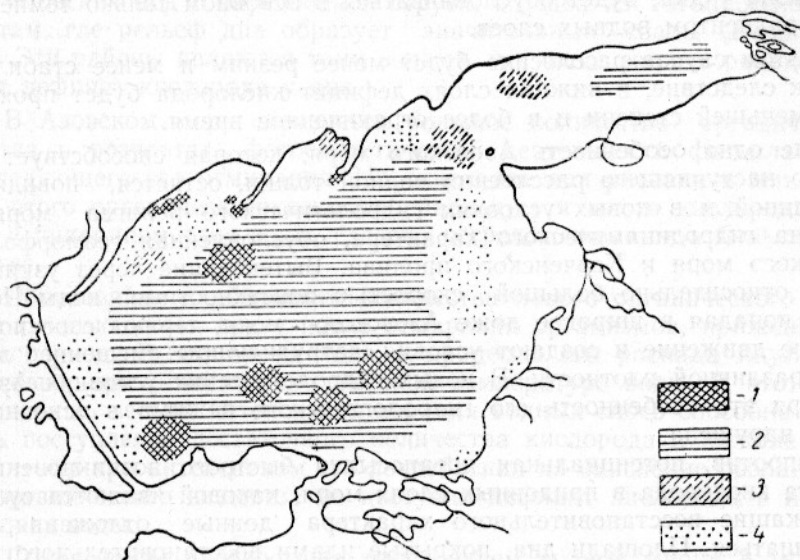


Рис. 2. Область восстановленных грунтов (1946, 1950, 1951, 1952 гг.):

1—много сероводородных соединений; 2—сероводородные соединения есть; 3—мало сероводородных соединений; 4—нет сероводородных соединений.

Для восстановленных донных отложений Азовского моря характерна низкая активная реакция грунтовых растворов. Это является результатом накопления в донных отложениях свободной угольной и особенно сероводородной кислот.

Величина активной реакции грунтового раствора донных отложений Азовского моря в сульфидной зоне 7,0—6,9.

В северо-западном углу моря активная реакция в грунтовых растворах выше и составляет в среднем 7,1—7,3.

В центральной, сульфидной зоне донных отложений моря могут обитать лишь некоторые формы зообентоса, поэтому ее площадь характеризуется сравнительно низкой кормностью для донных рыб.

ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА АЗОВСКОГО МОРЯ

При рассмотрении возможных изменений в кислородном режиме Азовского моря в связи с изменениями гидрологического и гидробиологического режимов моря над влиянием зарегулирования речного стока следует иметь в виду, что дефицит кислорода в море обусловливается расслоением водной толщи и интенсивностью потребления в ней кислорода.

Расслоение водной толщи зависит от двух причин. Одна из них остается относительно постоянной. Вторая причина расслоения водной толщи — градиент солености — в условиях общего повышения солености моря является величиной переменной. Градиент солености совершенно исчезнет при уравнивании соленостей Азовского и Черного морей (поверхностный слой). Соленость воды в Азовском море увеличится и будет отличаться от солености поступающих через пролив черноморских вод лишь незначительно. Различие в солености этих двух морей до 3‰ является пределом, обуславливающим резкий, губительный для водных организмов, дефицит кислорода в придонных слоях Азовского моря.

Вследствие этого расслоение воды, вызывающее явления дефицита кислорода у дна, будет обуславливаться в основном только температурным градиентом водных слоев.

В этом случае расслоение будет менее резким и менее стабильным. И, как следствие, в нижних слоях дефицит кислорода будет проявляться в меньшей степени и в более ограниченное время.

Еще одна особенность Азовского моря, которая способствует удержанию наступившего расслоения водной толщи, остается, повидимому, постоянной и в новых условиях гидрологического режима моря. Эта причина гидродинамического характера, обусловленная геоморфологией Азовского моря и Керченского пролива. Вытекающие через узкий пролив с относительно большой скоростью поверхностные воды Черного моря, попадая в широкое ложе Азовского моря, теряют свое поступательное движение и создают условия, затрудняющие смешение водных масс различной плотности. В новых гидрологических условиях Азовского моря эта особенность его гидрологического режима в основном не будет нарушена.

Напротив, потенциальная предпосылка быстрого возникновения дефицита кислорода в придонных слоях моря, каковой являются сульфидсодержащие восстановительного характера донные отложения, будет уменьшаться. Площади дна, покрытые илами восстановительного характера, будут уменьшаться, пространства в море, покрытые сульфидсодержащими илами, будут окисляться, меняя свой восстановительный потенциал на окислительный.

Однако в пределах прогнозируемого изменения гидрологического режима восстановительный характер грунтов уменьшится незначительно, а в горле Таганрогского залива может даже увеличиться вследствие образующегося значительного градиента солености в месте смешения речных вод Дона с осолонившимися водами моря.

Что касается основного потребителя кислорода в придонном слое моря, то с уменьшением планктической продуктивности в море будет уменьшаться и интенсивность потребления кислорода в морской воде.

Судя по степени насыщения морской воды кислородом в вегетативный период в 20-х и 50-х годах, можно отметить, что планктическая продуктивность моря уменьшилась. Это подтверждается и прямыми измерениями величины биомассы фитопланктона в Азовском море. Однако восстановительный характер грунтов на $\frac{2}{3}$ донного ложа моря и большая величина интенсивности потребления кислорода в воде, обогащенной морским илом, позволяют считать, что скорость потребления кислорода, обуславливающая быстрое наступление дефицита его в придонных слоях моря, будет оставаться высокой и в новых условиях режима моря.

Только значительное уменьшение планктической продуктивности в море в несколько раз и исчезновение предпосылок в море для относительно большого расслоения его водной толщи резко уменьшит скорость потребления кислорода. Это, в свою очередь, устранил причину образования дефицита кислорода в придонных слоях моря.

ВЫВОДЫ

1. Конечной причиной возникновения дефицита кислорода в твое Азовского моря является расслоение водных слоев, вызываемое, в свою очередь, двумя основными причинами:

а) различным прогревом верхнего и нижнего слоя воды в наиболее теплый, летний период года и

б) различной степенью минерализации этих слоев воды — различной их соленостью.

2. Расслоение по солености возникает в районах проникновения в Азовское море более соленой черноморской воды и частично в районе стыка азовских вод с опресненной струей, идущей из Таганрогского залива там, где рельеф дна образует значительные свалы (Бердянская коса). Эти районы являются теми зонами, где чаще всего и раньше возникает дефицит кислорода у дна.

3. В Азовском море образуется большое количество органического вещества в результате фотосинтетической деятельности фитопланктона и последующего его отмирания. На окисление при распаде и минерализации этого органического вещества расходуется много кислорода, особенно в придонном слое воды, где оно сосредотачивается в большом количестве.

4. Образование наибольшего количества нового органического вещества, разлагающегося сразу после отмирания организмов, приходится на летний период. В это время года и процессы его распада идут более интенсивно, при относительно высокой температуре воды. В этот период года лишь весьма интенсивная аэрация водных слоев способна обеспечить поступление достаточного количества кислорода в нижние слои воды, чтобы при интенсивном его потреблении на окисление разлагающегося органического вещества не наступил дефицит кислорода в придонных слоях воды.

5. Создаваемое плотностным расслоением водной толщи в море затруднение в аэрации нижних слоев воды сразу же приводит к образованию дефицита кислорода у дна.

6. Скорость потребления кислорода органическим веществом донных отложений начинает превышать скорость поступления кислорода в нижние слои моря при затрудненной аэрации их вследствие расслоения водной толщи. В результате содержание кислорода в этих слоях воды уменьшается и в случае полного его исчезновения здесь у дна возникает анаэробный режим. В этих условиях содержание восстановленных соединений, образующихся, в первую очередь, в илистых отложениях на дне, увеличивается и может вызвать проникновение их в придонный слой воды. Вследствие ежегодно повторяющегося частичного дефицита кислорода в Азовском море илистые донные отложения изобилуют сульфидными соединениями. Они, в свою очередь, увеличивают скорость потребления кислорода в придонном слое в последующие годы и тем самым способствуют возникновению дефицита кислорода у дна.

7. В те годы, когда дефицит кислорода в морской воде большой и интенсивно протекают анаэробные процессы, заморные явления приобретают весьма интенсивный характер, гибнут массами не только донные водные организмы, но и рыба в сравнительно большом количестве (1937 и 1946 гг.).

8. Если дефицит кислорода лишь частичный, что бывает в Азовском море ежегодно, то гибнут только некоторые донные организмы. Зимой в Азовском море не наблюдается резкого ухудшения газового режима, т. к. термического расслоения водной толщи нет, нового органического вещества почти не образуется и процесс распада органического вещества при температуре воды, в зимний период близкой к нулю, идет крайне

медленно. Летом же действуют обе причины расслоения водной толщи—термическая и солевая. При совпадении их совместного влияния градиент плотности между верхними и нижними слоями воды достигает наибольшей величины. Даже двух- и трехбалльный ветер не сразу может нарушить создавшееся в этом случае разделение водных слоев. Когда прекращается или затрудняется вентиляция нижнего слоя моря, тогда и возникает неблагоприятный газовый режим у дна.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

Дацко В. Г., О причинах замора рыб в Азовском море, Труды АзчерНИРО, вып. 15, Крымиздат, 1951.

Книпович Н. М., Гидрологические исследования в Азовском море, Труды Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции, вып. 5, Крымиздат, 1932.