

| | | |
|---------------|---|------|
| Том LXIV | Труды Всесоюзного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) | 1968 |
| Том XXVIII | Труды Азово-Черноморского научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии (АзчерНИРО) | |

УДК 551.464.6(267)

О ВЕРТИКАЛЬНОМ И ГОРИЗОНТАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ КИСЛОРОДА У ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ИНДОСТАНА В ПЕРИОД СЕВЕРОВОСТОЧНОГО МУССОНА

В. А. Химица
АзчерНИРО

В декабре — январе 1963/64 г. научно-поисковая экспедиция АзчерНИРО на экспедиционном судне «Владимир Воробьев» исследовала воды западного побережья Индостана. Океанологическими наблюдениями была охвачена 200-мильная прибрежная зона от залива Кач до Кочина. Всего здесь было выполнено 27 океанологических станций на 5 разрезах, нормальных к береговой черте (рис. 1). Наблюдения проводились по стандартным горизонтам до глубины 1500 м. Кроме данных этой экспедиции, в работе использованы материалы наблюдений АзчерНИРО у побережья Бомбея в 1961 г. и данные рейсов «Витязя» в Индийский океан.

В статье рассматриваются материалы наблюдений по растворенному в воде кислороду. Кислород определялся по общепринятой методике Винклера, степень насыщения воды кислородом

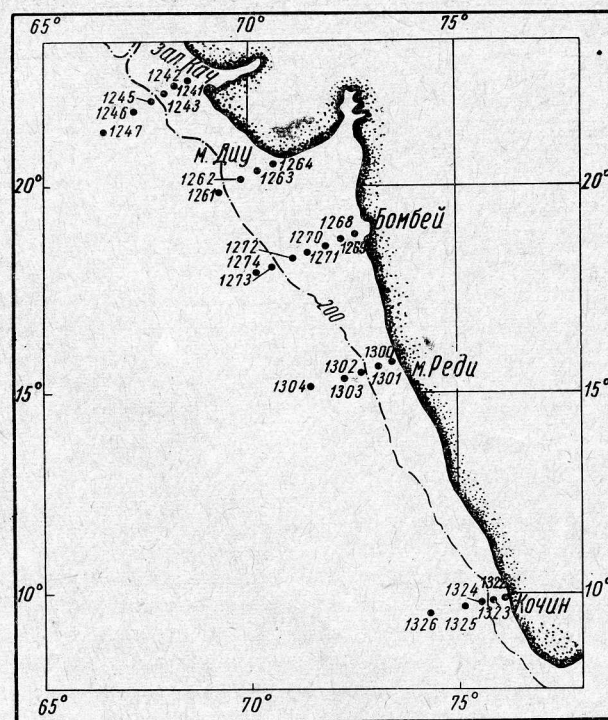


Рис. 1. Схема океанологических станций.

вычислялась при помощи таблиц ВНИРО, рассчитанных по Трусдейлу.

Надшельфовые воды у западного побережья Индостана имеют в перспективе большое значение для развития рыбного промысла. В связи с этим необходимо подробное изучение условий среды обитания рыб, тем более, что сезонная изменчивость циркуляции вод значительно меняет гидрологическую ситуацию у побережья. В этой работе предпринимается попытка рассмотреть изменения вертикального и горизонтального распределения кислорода зимой у западного побережья Индии, а также условия формирования слоя кислородного минимума в Аравийском море.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КИСЛОРОДА

Растворенный в воде кислород является важным гидрологическим и экологическим фактором. Содержание его в верхних слоях воды зависит от ряда физических и биохимических процессов (обмена с атмосферой, обмена с нижележащими слоями, продуцирования при фотосинтезе, потребления при биохимических реакциях и дыхании морских организмов). В зависимости от преобладания тех или иных процессов характер распределения кислорода очень изменяется во времени и пространстве.

Горизонтальное и вертикальное распределение кислорода в значительной степени зависит от системы течений. Поэтому прежде чем приступить к описанию распределения кислорода, коротко остановимся на циркуляционных особенностях вод исследуемого района.

Циркуляция вод в период зимнего муссона в Аравийском море, и в частности у побережья Западного Индостана, достаточно подробно описана в литературе (Морской атлас, карта 32; А. М. Муромцев, 1959; Н. М. Овчинников, 1961; Б. А. Скопинцев, 1948; М. С. Эдельман, 1962; Свердруп, 1946). Однако сведения о течениях у берегов Индии отрывочны и подчас противоречивы. Тем не менее большинство авторов считают, что в этот период года генеральный перенос вод в прибрежной 150—200-мильной зоне у западного побережья Индостана происходит с северо-запада на юго-восток. Это подтверждается также картами распределения океанологических элементов, построенными по материалам наших наблюдений. При анализе карт распределения солености, кислорода и кремнекислоты было выявлено ряд деталей в общей картине циркуляции вод.

Из залива Камбей наблюдался вынос распресненных вод, обусловленный ветровой деятельностью. Эти воды, выходя из залива, встречают основную струю течения и поворачивают влево, образуя циклоническое завихрение на шельфе в районе Бомбея. Небольшая струя опресненных вод из залива Камбей прослеживалась у берега полуострова Катхиавар.

Вместе с тем поток вод из залива Камбей способствовал отклонению части основной струи течения вправо, что привело к образованию антициклонического круговорота, центральная область которого была расположена за пределами шельфа в 100—150 милях к юго-западу от полуострова Катхиавар. В узкой прибрежной полосе моря, от южной периферии циклонического вихря до Кочина, наблюдалось перемещение вод с юго-востока на северо-запад, отличавшихся пониженной соленостью.

Общее представление о вертикальном распределении кислорода в восточной части Аравийского моря дает табл. 1, составленная по материалам 31 рейса «Витязя». Из анализа таблицы следует, что по

характеру вертикального распределения концентраций кислорода всю толщу моря можно подразделить на три зоны: 1) верхнюю 100-метровую зону с высокой концентрацией кислорода, 2) слой дефицита кислорода (100—1000—1500 м), 3) зону глубинной и донной воды со значительным содержанием кислорода. Далее рассматриваются изменения содержания кислорода только в верхнем 100-метровом слое и в зоне кислородного минимума.

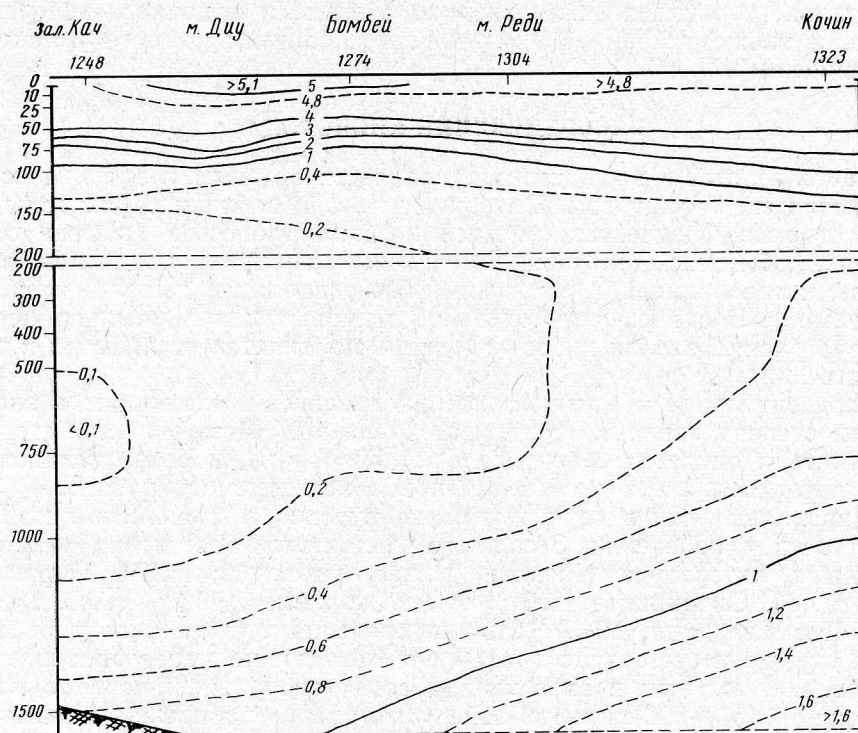


Рис. 2. Схематический продольный разрез распределения кислорода (мл/л) у побережья Западной Индии (декабрь 1963 г., январь 1964 г.).

Как видно из рис. 2, слой воды, хорошо насыщенный кислородом, был равен 50—60 м. Концентрация кислорода в этом слое колебалась в пределах 4—4,8 мл/л и лишь в области антициклонического завихрения содержание кислорода в верхнем 20-метровом слое было повышено до 5,2 мл/л. Достаточно ясно выражен «слой скачка» кислорода, который при продвижении к югу постепенно размывался и у Кочина был выражен слабо. Слой кислородного минимума имел наибольшую мощность и наименьшие концентрации кислорода (до 0,1 мл/л) в северной части разреза. По мере продвижения к югу в результате турбулентного обмена со слоями, более богатыми кислородом, содержание его в слое дефицита постепенно повышается (до 0,38 мл/л у Кочина), а толщина слоя уменьшается.

Наряду с этими общими закономерностями распределения кислорода локальные районы моря имели свою специфику, связанную с различиями гидрологических условий и скоростями поступления кислорода в процессе фотосинтеза и потребления его при биохимических реакциях.

Как видно из рис. 3, пересыщение воды кислородом на 1—6% наблюдалось на разрезе от залива Кач в слое 25—35 м. В районе мате-

рикового склона слой пересыщенной кислородом воды на этом разрезе был небольшим (0—8 м), что связано с подъемом вод в зоне расхождения течений. Ниже вод, хорошо аэрированных кислородом, находится «слой скачка» кислорода, который на разрезе залива Кач — море был выражен четко. Верхняя граница слоя минимума кислорода (изооксигена в 1 мл/л) располагалась на глубине около 90 м, а концентрация кислорода в нем, начиная от глубины 130 м и до 1200 м, отличалась однообразием и была равна 0,10—0,15 мл/л. Ниже глубины 1200 м содержание кислорода в воде медленно возрастало, достигая на горизонте 1500 м 0,86 мл/л.

Таблица 1

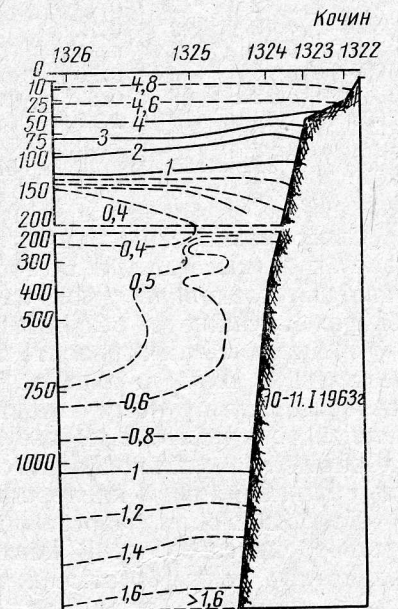
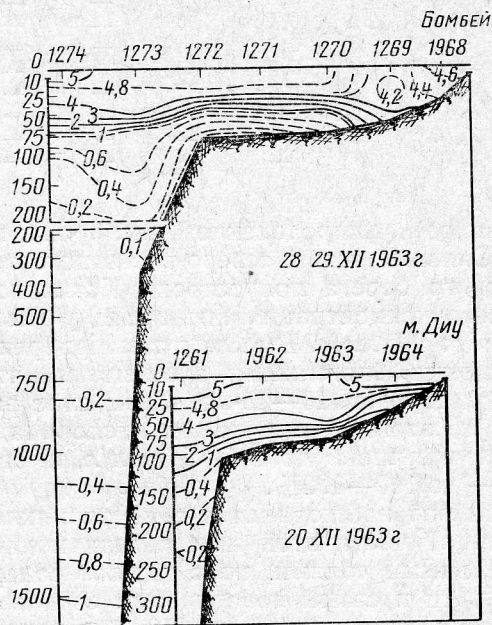
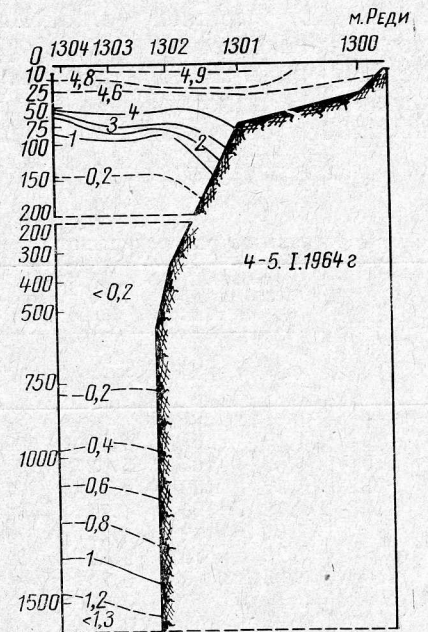
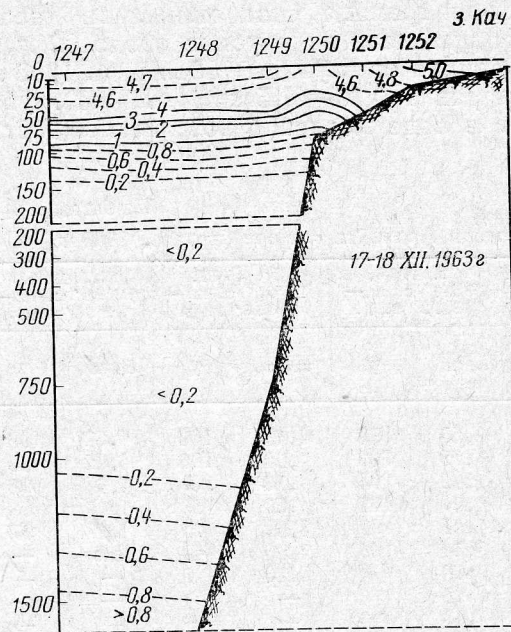
Вертикальное распределение кислорода в Аравийском море (апрель, 1960 г.)

| Горизонт, м | Ст. 4720, 17°35' с. ш.— 64°09' в. д. | | Ст. 4719, 18°01' с. ш.— 66°11' в. д. | | Ст. 4718, 18°01' с. ш.— 68°12' в. д. | | Ст. 4717, 18°22' с. ш.— 70°13' в. д. | | Ст. 4715, 18°08' с. ш.— 71°56' в. д. | |
|----------------|--|-----|--|-----|--|-----|--|-----|--|----|
| | мл/л | % | мл/л | % | мл/л | % | мл/л | % | мл/л | % |
| 0 | 4,73 | 101 | 4,60 | 99 | 4,53 | 98 | 4,65 | 100 | 4,62 | 90 |
| 10 | 4,85 | 103 | 5,02 | 107 | 4,75 | 103 | 4,92 | 106 | 4,62 | 98 |
| 25 | 5,11 | 108 | 4,73 | 101 | 4,82 | 104 | 4,70 | 101 | 4,64 | 98 |
| 50 | 5,12 | 106 | 4,74 | 104 | 4,94 | 107 | 4,50 | 96 | 4,17 | 88 |
| 75 | 4,05 | 82 | 3,78 | 78 | 4,61 | 97 | 3,62 | 79 | 3,17 | 67 |
| 100 | 3,75 | 75 | 2,56 | 52 | 3,34 | 69 | 2,36 | 48 | Дно | — |
| 150 | 0,35 | 7 | 0,19 | 4 | 0,18 | 4 | 0,50 | 9 | — | — |
| 200 | 0,12 | 3 | 0,15 | 3 | 0,16 | 3 | — | — | — | — |
| 250 | 0,20 | 4 | 0,17 | 3 | 0,15 | 3 | — | — | — | — |
| 300 | 0,12 | 2 | 0,13 | 2 | 0,13 | 2 | — | — | — | — |
| 400 | 0,12 | 2 | 0,13 | 2 | 0,13 | 2 | 0,11 | 2 | — | — |
| 500 | 0,13 | 2 | 0,12 | 2 | 0,13 | 2 | 0,14 | 2 | — | — |
| 750 | 0,15 | 3 | 0,11 | 2 | 0,12 | 2 | 0,11 | 2 | — | — |
| 1000 | 0,20 | 3 | 0,20 | 3 | 0,13 | 2 | 0,24 | 3 | — | — |
| 1500 | 0,93 | 13 | 0,82 | 12 | 0,45 | 6 | 1,05 | 15 | — | — |
| 2000 | 2,14 | 28 | 1,91 | 26 | 1,67 | 22 | Дно | — | — | — |
| 2500 | 2,50 | 33 | 2,59 | 34 | 2,70 | 35 | — | — | — | — |
| 3000 | 2,81 | 36 | 2,84 | 37 | 2,76 | 37 | — | — | — | — |

Своеобразным было вертикальное распределение кислорода на разрезах от мыса Диу и Бомбея. Сильные ветры северо-восточного направления создавали у юго-западного берега полуострова Катхиавар сгонную ситуацию, в результате чего концентрация кислорода у мыса Диу понижалась на горизонте 25 м до 2,4 мл/л. Вместе с тем прибрежные воды в этом районе обогащались биогенными элементами, что способствовало бурному развитию в верхнем 10—15-метровом слое растительного планктона. В результате этого концентрация кислорода в прибрежной 30-мильной зоне была повышена до 5,5—5,6 мл/л, а степень насыщения воды кислородом — до 110—120%.

На Бомбейском разрезе подъем вод наблюдался в области циклонического круговорота. В центральной части этой циркуляции подповерхностные воды, богатые питательными солями, но с низким содержанием кислорода, поднимались почти к самой поверхности, создавая благоприятные условия для развития фитопланктона. Поэтому здесь пересыщение воды кислородом было также значительным. Примерно в 30 милях от Бомбея проходила прибрежная ветвь циклонической циркуляции с пониженным содержанием кислорода.

На мористых частях обоих разрезов воды опускались в результате антициклонической циркуляции. В центральную область этого



а

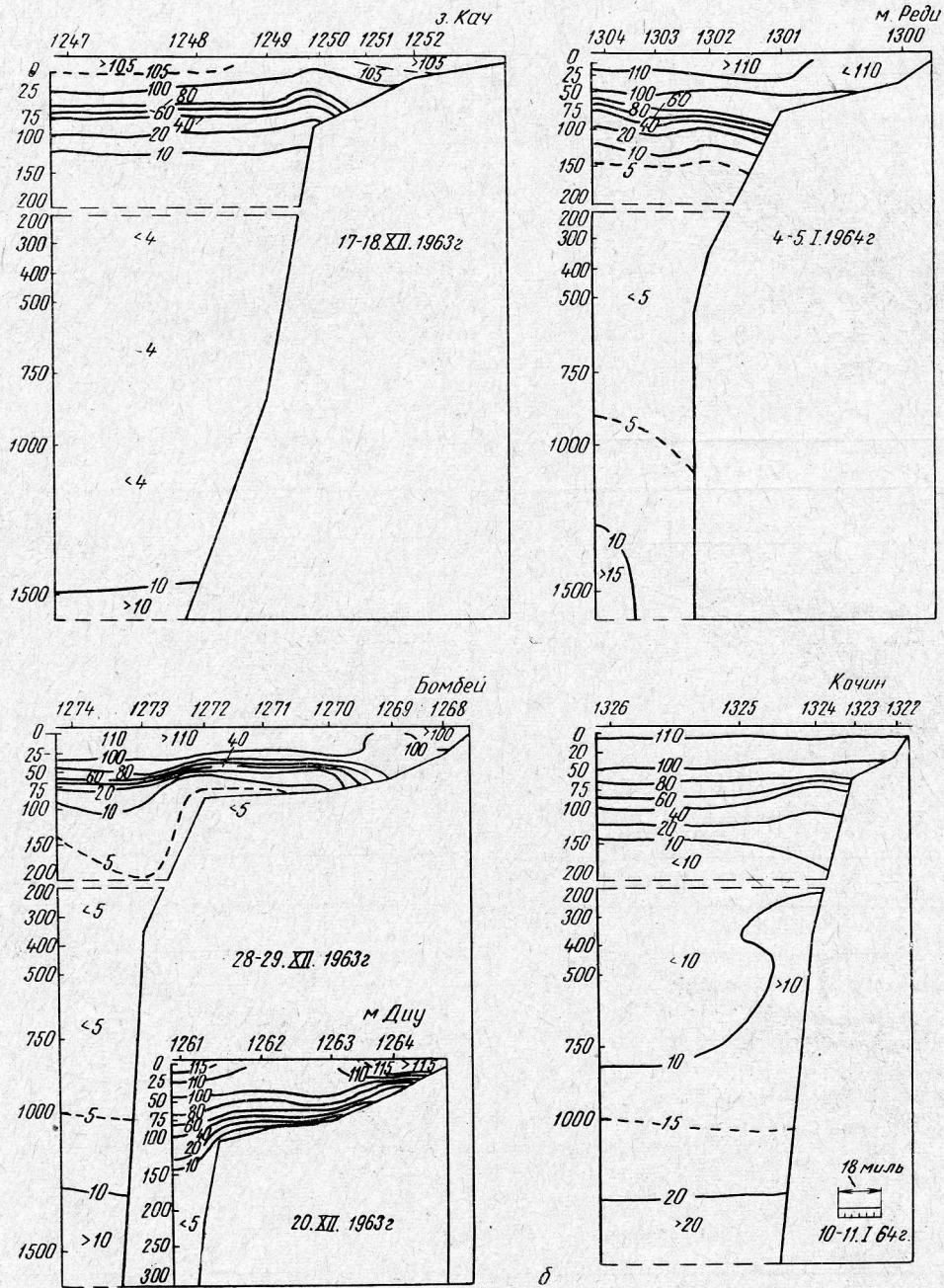
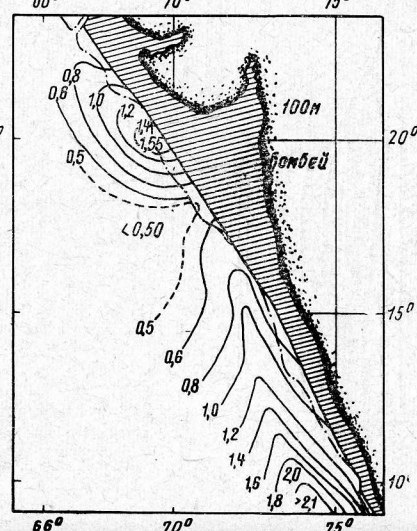
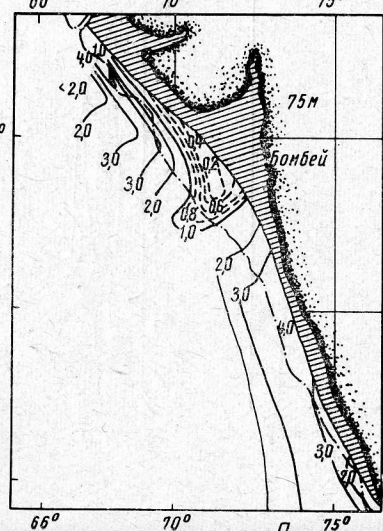
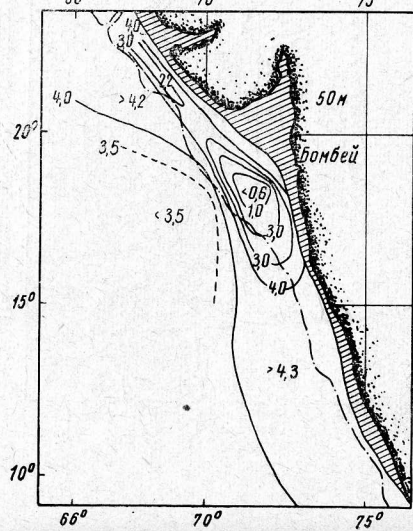
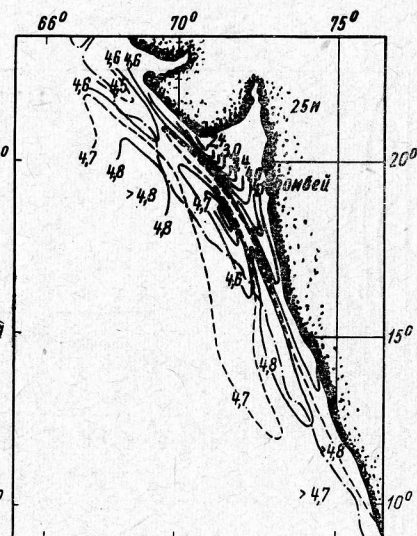
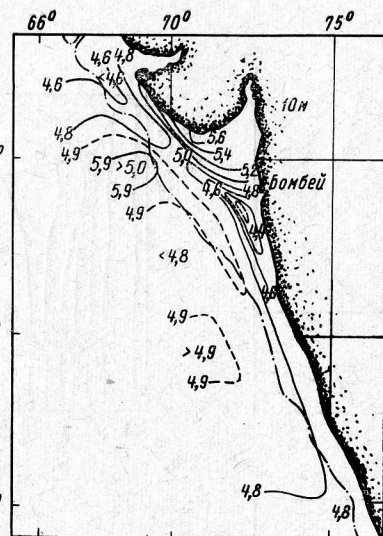
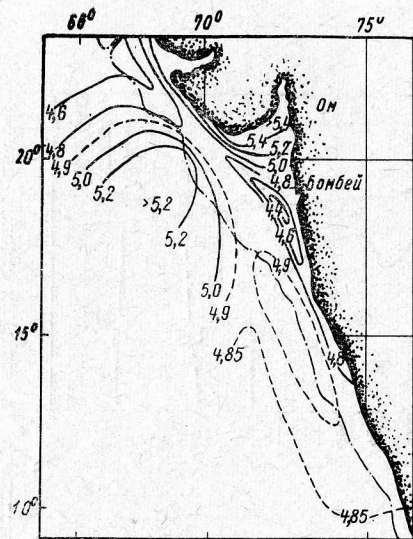


Рис. 3. Вертикальное распределение кислорода (а, мл/л) и степени насыщения воды кислородом (б, %) на разрезах у побережья Западного Индостана.



круговорота сносилось значительное количество растительного планктона, в процессе жизнедеятельности которого выделялся кислород и поглощались биогенные элементы. Поэтому слой воды, пересыщенной кислородом, составлял здесь 30—40 м, а процент насыщения был равен 105—120%.

В результате действия сгона у побережья полуострова Катхиавара и подъема вод в циклонической циркуляции значительная часть шельфа от Порбандара до Бомбея была занята водами из слоя кислородного минимума. Концентрация кислорода в придонных слоях воды была очень небольшой (0,1—0,4 мл/л), в результате здесь наблюдались заморные явления. Верхняя граница слоя дефицита кислорода постепенно поднималась по направлению к берегу от 75—80 до 40—50 м. Толщина слоя кислородного минимума на разрезе от Бомбея была велика (75—1500 м) и отличалась монотонностью величин по вертикали (0,15—0,2 мл/л). В области материкового склона воды немного опускались вследствие сходимости здесь течений циклонического завихрения и основной струи. Подобное явление на границе шельфа наблюдалось в декабре 1961 г., однако концентрация кислорода в верхних слоях моря была немного ниже (4,5—4,6 мл/л), чем в 1963 г.

На более южных разрезах (разрез от мыса Реди и от Кочина) динамическая ситуация не так сложна. Хорошая обеспеченность питательными солями поверхностных вод способствовала развитию значительного количества фитопланктона. Слой воды, пересыщенный кислородом, становится здесь мощнее, а концентрация его отличается такими же высокими величинами, как и на севере. Менее выражен «слой скачка» кислорода, который у Кочина практически исчезает. Над материковым склоном слой хорошо аэрированной воды имел значительную толщину, что связано с повышением интенсивности турбулентного обмена с поверхностными слоями в области свала глубин.

На разрезах от мыса Реди и Кочина толщина слоя кислородного минимума уменьшалась, а концентрация кислорода увеличивалась. На первом разрезе содержание кислорода в слое дефицита возрастало незначительно, а на втором — более существенно. Верхняя граница слоя минимума кислорода располагалась на разрезе от мыса Реди на глубинах 90—110 м, а у Кочина — на 120—140 м. Постепенно поднималась кверху и нижняя граница этого слоя, которая на разрезе от Кочина обнаруживалась на горизонте 1000 м.

Рассмотрим теперь горизонтальное распределение кислорода в верхнем 100-метровом слое воды (рис. 4). Как видно из рисунков, верхний 25-метровый слой моря был пересыщен кислородом в среднем на 10%. Однако в местах выхода подповерхностных вод концентрация кислорода даже в этом слое значительно понижалась (мыс Диу, горизонт 25 м). Высокие концентрации кислорода по сравнению с окружающими частями моря наблюдались в центральной части антициклонической циркуляции как в поверхностных слоях, так и на горизонте 100 м. В области циклонического завихрения уже на горизонте 50 м наблюдался выход вод из слоя кислородного минимума в верхнюю зону моря.

Более показательны в этом отношении карты, характеризующие распределение кислорода на горизонтах 75 и 100 м. Как следует из анализа этих карт, воды из слоя дефицита кислорода выходили на шельф в районе Бомбейского разреза и распространялись далее на север и северо-запад. При продвижении к югу вследствие повышения интенсивности турбулентного обмена с верхними слоями концентрация кислорода на нижних горизонтах постепенно увеличивалась. В резуль-

тате, воды с низким содержанием кислорода наблюдались не на всей акватории шельфа исследуемого района моря, а только к северу от 15° с. ш.

ФОРМИРОВАНИЕ КИСЛОРОДНОГО МИНИМУМА В АРАВИЙСКОМ МОРЕ

Слой дефицита кислорода наблюдается не только в Аравийском море, а также во многих районах Тихого и Атлантического океанов. Для объяснения возникновения этого слоя на подповерхностных и промежуточных глубинах было выдвинуто много предположений и гипотез. Все их можно свести к двум теориям.

«Динамическая» теория, впервые высказанная Вюстом (G. Wust, 1963), исходит из того, что неблагоприятный баланс кислорода может возникнуть в слое минимальной подвижности вод, т. е. на границе двух водных масс. При этом предполагается, что биохимическое потребление кислорода примерно одинаково по всей толщине подповерхностных вод.

Другая точка зрения состоит в том, что в слое кислородного минимума наблюдаются максимальные величины биохимического потребления кислорода, вследствие чего здесь наблюдаются низкие концентрации кислорода.

Достаточно объективный анализ общих закономерностей возникновения слоя кислородного минимума в океане производится Д. А. Сметаниным (1959). Подвергая критическому разбору «динамическую» теорию происхождения слоя кислородного минимума, он справедливо отмечает, что нет никакой необходимости связывать образование слоя кислородного минимума с какими-либо универсальными гидрологическими или биохимическими условиями. Д. А. Сметанин соглашается с Сейвеллом (H. R. Seiwel, 1937), который говорит, что «кислородный минимум может появиться и сохраниться на средних глубинах при наличии непрерывного уменьшения как скорости горизонтального течения, так и степени потребления кислорода. Нет необходимости для предположения о минимальной скорости горизонтального течения или максимального потребления кислорода, совпадающих с глубиной минимальной кислородной концентрации». Вместе с этим Сейвелл отметил, что распределение кислорода по вертикали есть результат истории развития водной массы и что эффекты бесконечно малых процессов могут быть значительно увеличены их многократным повторением.

В заключение своего разбора причин, влияющих на возникновение слоя кислородного минимума, Д. А. Сметанин (1959) приходит к выводу, что «промежуточный минимум в распределении кислорода возникает на тех глубинах, где биохимическое потребление кислорода более или менее длительное время превышает поступление его при турбулентной диффузии и адвекции относительно богатых кислородом вод. Толщина слоя минимума, глубина его залегания и значения минимальных концентраций в каждом случае определяются конкретными гидрологическими и биохимическими условиями».

В. Г. Нейман (1961) связывает образование слоя кислородного минимума в Аравийском море с районами формирования глубинных вод. К таким районам он относит Аденский и Персидский заливы. Он пишет: «...повышенная температура и значительная соленость поверхностных вод, опускающихся здесь вследствие своей повышенной плотности на глубину, и есть основная причина пониженного содержания кислорода в глубинных водах Аравийского моря». Кроме того, В. Г. Нейман указывает, что на образование слоя дефицита кислорода влияют подъемы глубинных вод, обедненных кислородом и богатых

биогенными элементами: зимой — у побережья Индостана, летом — у берегов Аравии. Эти воды стимулируют развитие фитопланктона, но благодаря наличию «скачка плотности» они не поднимаются к поверхности и вследствие затрат кислорода на окисление органического вещества в них почти полностью теряются небольшие запасы кислорода.

Высказывая первое предположение, В. Г. Нейман исходил, по-видимому, из того, что растворимость кислорода с повышением температуры и солености уменьшается. Это правильно, но не следует забывать о поступлении кислорода в верхние слои моря в результате процесса фотосинтеза, интенсивность которого в Аденском и, вероятно, в Персидском заливах достаточно велика. Например, степень насыщения воды кислородом в зоне фотосинтеза Аденского залива равна 110—115% при абсолютном содержании кислорода в 4,7—4,9 *мл/л*, т. е. несколько выше, чем в большинстве районов северной части Индийского океана. Поэтому в данном случае плотностное перемешивание приводило бы к обогащению подповерхностной воды кислородом и этого не происходит только потому, что в Аденском заливе конвективное перемешивание распространяется на незначительную глубину, а биохимическое потребление кислорода велико. В Персидском же заливе благодаря интенсивному развитию термогалинной конвекции и небольшим глубинам водные массы хорошо насыщены кислородом до дна. Второе предположение о влиянии подъема вод, богатых биогеенными элементами, на образование слоя дефицита кислорода более существенно, так как в конечном счете это приводит к расходу кислорода на окисление органического вещества в подповерхностных и промежуточных слоях.

По мнению А. М. Муромцева (1959, 1962), образование слоя кислородного минимума в Аравийском море зависит от стока красноморских вод, имеющих якобы низкое содержание кислорода.

Согласно Томпсону (E. F. Thompson, 1939a), концентрация кислорода в глубинных слоях Красного моря равна примерно 2 *мл/л*. Более поздние экспедиции подтвердили эти наблюдения. Так, в частности, экспедиция АзчерНИРО в 1963 г. на экспедиционном судне «Константин Болдырев» в глубинных водах Красного моря наблюдала концентрацию кислорода около 2,5 *мл/л*.

Максимальный сток красноморских вод (В. В. Серый*) приходится на май, а минимальный — наблюдается в сентябре. Концентрация кислорода в мае составляет в ядре красноморских вод величину около 2,6 *мл/л*. Слой минимума кислорода в Баб-эль-Мандебском проливе выражен слабо (минимальная концентрация кислорода в нем равна 2,4 *мл/л*), а в Аденском заливе верхняя граница его опускается до 150—170 м. В сентябре, когда влияние стока красноморских вод значительно ослабевает, содержание кислорода в ядре этих вод понижается до 1,3 *мл/л*. В Баб-эль-Мандебском проливе хорошо выражен слой дефицита кислорода (минимальная концентрация кислорода в нем равна 0,4 *мл/л*), а верхняя граница его в Аденском заливе поднимается до глубин 75—80 м.

Все эти факты говорят о том, что красноморские воды повышают концентрацию кислорода в Аденском заливе, а не уменьшают ее. Вероятнее всего одной из причин возникновения слоя минимума кислорода в Красном море является проникновение в подповерхностные слои аденской воды с низким содержанием кислорода, а не наоборот. Томпсон (E. F. Thompson, 1939a, b) пишет: «... воды Аденского залива про-

* Статья опубликована в данном сборнике.

слеживаются на продольных разрезах, в виде языка с низкой соленостью, температурой и содержанием кислорода. В Красном море содержание кислорода в них повышается за счет перемешивания с окружающими водами». Подобного взгляда придерживается и А. К. Нейман (A. K. Neiman, D. A. McGill, 1961), который высказывает мысль, что водообмен между Красным морем и Аденским заливом, а в конечном счете и Индийским океаном, аналогичен водообмену между Средиземным морем и Атлантическим океаном.

В. Н. Иваненков, В. Р. Винтовкин, К. З. Шацков (1964) считают, что образование минимальных концентраций кислорода в северной и северо-восточных частях Аравийского моря зависит от наличия «слоя скачка» плотности, двух зон дивергенции на юге моря и сероводорода на промежуточных глубинах, на окисление которого расходуется кислород.

Первая и вторая причины вполне справедливы, а третья вызывает возражения. Возникновение на определенной глубине сероводородного заражения является следствием недостатка кислорода, а не причиной его уменьшения за счет окисления сероводорода.

Согласно В. Н. Иваненкову и А. Г. Розанову (1961), сероводородное заражение охватывает северную часть Аравийского моря, границы которого примерно совпадают с самыми низкими концентрациями кислорода в слое минимума. Максимальное содержание сероводорода наблюдается на глубинах 150—600 м и колеблется в пределах 0,03—0,10 мл/л, причем на этих же горизонтах в небольших количествах наблюдается кислород (0,10—0,20 мл/л). Оба эти газа могут одновременно находиться в воде только в минимальных количествах. В зоне наличия сероводорода создаются специфические восстановительные условия (В. В. Мокиевская, 1961), результатом которых является вторичный максимум нитритов (А. Г. Розанов и В. С. Быкова, 1964) и сероводород. Недостаток кислорода в этой области моря — вот следствие появления здесь сероводорода, а не наоборот.

Затраты кислорода на окисление H_2S могут наблюдаться в том случае, если отмечаются поступления свободного сероводорода или сернистых выделений. На дне Персидского залива, например, отмечаются выходы нефтеносных пород и подземных вод, содержащих среди прочих компонентов растворенные серу и гипс (К. О. Емери, 1956). В связи с этим высказывается мнение (Д. А. Сабинин, 1964), что воды Персидского залива являются одним из источников сероводородного заражения в Аравийском море. Это предположение маловероятно, так как воды Персидского залива достаточно хорошо аэрируются в результате вертикального конвективного перемешивания. На разрезе мыса Расаль-Хадд — полуостров Катар, выполненном АзчерНИРО на экспедиционном судне «Владимир Воробьев» в сентябре 1962 г. и декабре 1963 г., в воде из Персидского залива концентрация кислорода была на 0,2 мл/л выше, чем в окружающих водах. Поэтому более вероятно, что персидские воды (подобно красноморской воде) повышают концентрацию кислорода вод Оманского залива, а не понижают ее. Возможно, что вместе с другими факторами воды Аравийского моря являются источником сероводородного заражения вод Оманского залива.

Из обзора литературы по кислородному минимуму Аравийского моря следует, что более всего влияют на образование слоя дефицита кислорода следующие особенности гидрологического режима: наличие «слоя скачка» плотности, наличие двух зон дивергенции у южных границ моря, подъемы вод, богатых питательными солями, у берегов Аравии и Индостана. Но, опираясь только на эти факторы, все же нельзя

сказать определенно, почему возник столь мощный слой минимума кислорода в Аравийском море. Для объяснения этого необходимы какие-то другие факторы, которые дополняют, а может быть играют главную роль в ряде причин, влияющих на образование слоя кислородного минимума в этом водоеме.

Прежде всего следует обратить внимание на то, что Аравийское море с севера ограничивается материком. Если воды Атлантического

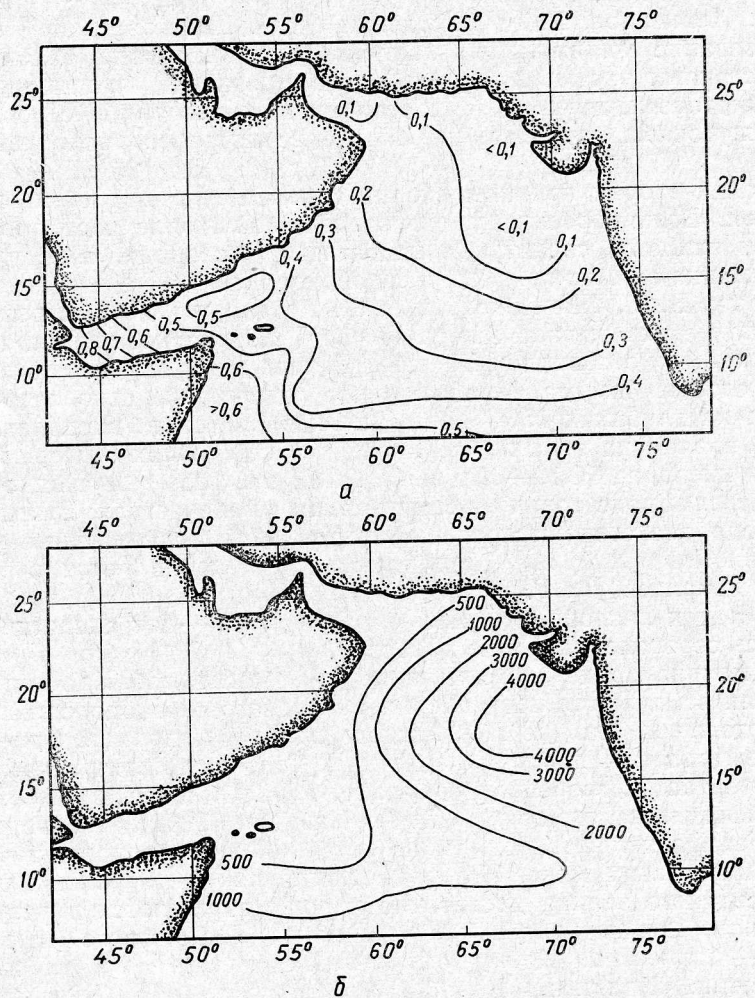


Рис. 5. Распределение кислорода (а, мл/л) в слое минимума и фитопланктона в слое 0—100 м (б, клетки/м³).

океана широким фронтом взаимодействуют на севере с холодными, обогащенными кислородом водными массами Арктического бассейна, то ничего подобного мы не наблюдаем в Индийском океане. Наоборот, воды Аравийского моря отличаются повышенной соленостью и высокой температурой.

Как уже отмечалось ранее, Аравийское море с юга ограничивается двумя зонами дивергенции. Кроме этого, котловину водоема отделяет от остальных частей океана Аравийско-Индийский хребет, который служит серьезным препятствием для проникновения в Аравий-

ское море антарктических вод. Таким образом, Аравийское море — замкнутый бассейн.

Циркуляция вод Аравийского моря определяется муссонами. В зависимости от сезона года здесь наблюдаются или антициклоническая, или циклоническая циркуляции. Поступление вод из других районов океана минимально вследствие замкнутости изолиний Геоострофического течения. Лишь в период летнего муссона в Аравийское море заходит мощная струя Сомалийского течения.

Хотя красноморские воды отличаются повышенным содержанием кислорода, однако влияние их на кислородный режим Аравийского моря не настолько существенно, как, например, вод Средиземного моря на режим кислорода Атлантического океана. В процессе движения этих вод через Аденский залив значительные количества кислорода тратятся на окисление органического вещества, продуцируемого в верхних слоях залива. Поэтому выходящие из залива красноморские воды по содержанию кислорода незначительно отличаются от водных масс Аравийского моря. Это же относится и к водам Персидского залива.

Аравийское море по сравнению с другими частями океана отличается повышенной продуктивностью (В. В. Зернова и Ю. А. Иванов, 1964; Ю. Г. Кабанова, 1961, 1964), особенно северо-восточная часть, которая близка к продуктивности дальневосточных морей. На повышение продуктивности в этом районе моря, кроме прочих факторов, сильно влияет биогенный сток Инда. Среди других процессов, затрудняющих проникновение кислорода в подповерхностные

Таблица 2
Среднее содержание кислорода и границы положения слоя кислородного минимума по станциям в Аравийском море и Аденском заливе в период зимнего муссона

| | Аденский залив | | | Оманское побережье | | | Северное побережье | | | Индостанское побережье | | | Южная часть моря | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|----------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|--------|-------|------------------------|--------|-------|------------------|--------|-------|------|--------|-------|------|--------|-------|------|--------|-------|------|--------|--------|-------|------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Ст. | г. ш. | в. д. | Ст. | г. ш. | в. д. | Ст. | г. ш. | в. д. | Ст. | г. ш. | в. д. | Ст. | г. ш. | в. д. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 250 | 11°54' | с. ш. | — | 45°57' | в. д. | — | 11°25, | 14°37' | с. ш. | — | 52°30' | в. д. | — | 13°17' | с. ш. | — | 48°52' | в. д. | — | 13°02' | с. ш. | — | 65°53' | в. д. | — | 13°24, | 13°58' | с. ш. | — | 52°45' | в. д. | — | | | | | | | |
| 1000 | 0,85 | 0,66 | 0,42 | 0,25 | 0,23 | 0,19 | 0,20 | 0,10 | 0,21 | 0,35 | 0,43 | 0,33 | 0,61 | 0,85 | 0,66 | 0,42 | 0,25 | 0,23 | 0,19 | 0,20 | 0,10 | 0,21 | 0,35 | 0,43 | 0,33 | 0,61 | 0,85 | 0,66 | 0,42 | 0,25 | 0,23 | 0,19 | 0,20 | 0,10 | 0,21 | 0,35 | 0,43 | 0,33 | 0,61 |

Верхняя и нижняя границы слоя минимума O₂, м

Среднее содержание O₂ в слое минимума, мл/л

слои моря, следует отметить также наличие ярко выраженной плотностной стратификации. В Аравийском море в слое 0—200 м наблюдается до двух-трех максимумов плотности, которые в значительной степени препятствуют развитию вертикального перемешивания. Только в центральных частях антициклонических циркуляций и в зоне действия течений со значительными скоростями кислород может проникать сверху на значительную глубину.

Обратимся теперь к конкретным материалам наблюдений. Общее представление о распределении минимальных концентраций кислорода в слое дефицита дает рис. 5, а. Карта составлена по материалам экспедиции АзчерНИРО и экспедиционного судна «Витязь». Ввиду почти полного однообразия распределения величин минимальных концентраций кислорода на значительной части моря в слое дефицита было трудно точно найти глубины минимального содержания кислорода. Поэтому карта отражает распределение среднего содержания кислорода в слое 500—700 м.

Как видно из рис. 5, а, содержание кислорода постепенно понижается при продвижении на северо-восток. Ничтожно малые концентрации кислорода наблюдаются в слое дефицита в северной и северо-восточной частях Аравийского моря. Табл. 2 дает представление о среднем содержании кислорода в слое минимума в различных частях моря, а также границы слоя. Как следует из таблицы, максимальные величины содержания кислорода наблюдались в Аденском заливе в районе Баб-эль-Мандебского пролива, что связано с адвекцией красноморских вод, обогащенных кислородом. По мере продвижения к выходу из Аденского залива концентрация кислорода в слое дефицита постепенно понижалась, а толщина его увеличивалась. Это явилось следствием затрат кислорода на окисление органического вещества, продуцируемого в верхних слоях моря, а также турбулентного обмена с обедненными кислородом промежуточными аденскими водами (табл. 3).

Таблица 3
Биохимическое потребление кислорода в Аденском заливе за месяц при температуре *in situ*

| Горизон- ты, м | Ст. 989, 12°43' с. ш.— 48°40' в. д. | | Ст. 1182, 13°58' с. ш.— 52°45' в. д. | |
|-------------------|---|---------------------|---|---------------------|
| | БПК _{мес} О ₂ , мл/л | T _ш , °C | БПК _{мес} О ₂ , мл/л | T _ш , °C |
| 0 | 1,00 | 30,5 | 1,40 | 29,0 |
| 100 | 1,80 | 20,0 | 2,20 | 22,0 |
| 200 | 1,33 | 15,5 | 0,95 | 16,3 |
| 500 | 0,35 | 13,5 | 0,41 | 12,4 |
| 750 | 0,30 | 12,8 | 0,32 | 12,0 |

Из таблицы следует, что биохимическое потребление кислорода в Аденском заливе было значительным не только в верхних слоях, но и также непосредственно в слое минимума. Поэтому в воде красноморского происхождения при движении ее через Аденский залив сильно уменьшалось содержание кислорода.

Проследим теперь, как изменяется концентрация кислорода в слое дефицита при дальнейшем продвижении вдоль берегов Аравийского моря. Отметим, что система течений на глубине 500 м характеризовалась в период зимнего муссона антициклонической циркуляцией

(И. М. Овчинников, 1961). Как видно из табл. 2, концентрация кислорода в слое минимума в процессе движения вод на северо-восток понижается, а толщина слоя возрастает. Как уже говорилось ранее, минимальные концентрации кислорода наблюдаются в северном и северо-восточном районах моря (рис. 5, а); это подтверждается также данными табл. 2.

Почему же именно в этих районах моря наиболее развит слой дефицита кислорода? Во-первых, в процессе движения вод в них происходят потери кислорода, связанные с окислением органического вещества. Воды как бы «стареют» при передвижении вдоль побережья. Во-вторых, кислород в этом районе расходуется на окисление органического вещества вод Инда и других рек. По оценке Н. М. Страхова (Е. И. Гордеев, 1964), твердый сток Инда составляет около 400 млн. т в год. Исходя из того что 20% твердого стока приходится на органические вещества (Б. А. Скопинцев, 1946), следует признать, что поступление этих веществ с речными водами в данную часть моря очень велико.

Конечно, не все органическое вещество, выносимое Индом и другими реками, окисляется в течение года. Значительная часть его переходит в донные осадки. Например, на шельфе в районе залива Кач полужидкий грунт (по записи эхолота) имел толщину около 30 м. Однако полностью органическое вещество донных осадков не уходит из кругооборота веществ в море, поскольку большая часть его волнением опять вовлекается в этот кругооборот. Поэтому донные осадки в северо-восточной части моря являются дополнительным резервом органических веществ, особенно в сезон летнего юго-западного муссона.

Много органического вещества поставляется растительным планктоном и зоопланктоном, интенсивно развивающимся в местах подъема вод, богатых биогенными элементами, и в районах контакта речных вод с морскими. На рис. 5, б, заимствованном у Ю. Г. Кабановой (1964), мы видим, что фитопланктон интенсивно развивается именно в таких местах. Таким образом, материала для окисления в северо-восточной части моря достаточно.

Из литературы нам неизвестно о прямом определении биохимического потребления кислорода в Аравийском море. Обычно, говоря об этом, ссылаются на Томпсона (Е. Ф. Thompson, 1939а), по которому величина потребления кислорода в Красном море на глубинах 350—600 м равна 2 мл/л в год. Однако следует учитывать, что Томпсон не определял биохимическое потребление кислорода в Красном море, а заимствовал величину годового БПК из наблюдений в Атлантическом океане. Поэтому приводимую им величину годового БПК следует считать приближенной.

Мы определяли величину суточного и месячного потребления кислорода на станциях в центральной части Аденского залива и на выходе из него при температуре *in situ*. Кроме того, у побережья Индостана определяли величины суточного БПК в зоне фотосинтеза при температуре лаборатории (табл. 4).

Таблица 4
Биохимическое потребление кислорода за сутки и окисляемость воды на разрезах у западного побережья Индостана (среднее по 25-метровому слою)

| Разрезы | Суточный БПК, мл/л | Окисляемость, мл O ₂ /л |
|------------------------|--------------------|------------------------------------|
| От залива Кач | 0,3 | 0,64 |
| От Бомбея | 0,2 | 0,52 |
| От мыса Реди | 0,1 | 0,94 |

По первичной продуктивности Аденский залив близок к северо-восточной части Аравийского моря (Ю. С. Кабанова, 1964). Поэтому можно предположить, что и величины биохимического потребления кислорода будут в этих районах сходными. По грубому подсчету величина годового БПК в Аденском заливе может быть равной 4 *мл/л*. Примем эту величину и для северо-восточной части моря.

Расход кислорода в 4 *мл/л* в год на горизонтах 500—700 *м* очень велик. Отсюда ясно, отчего в северо-восточной части моря слой кислородного минимума имеет большую толщину и отличается очень небольшим содержанием кислорода. Для сравнения приведем величину годового БПК, равную в слое 100—200 *м* — 1 *мл/л*, которая была определена Б. А. Скопинцевым (1965) для районов тропической части Атлантики у африканского побережья.

Высокие величины биохимического потребления кислорода и наличие «слоя скачка» плотности способствуют тому, что в северо-восточной части моря формируются воды с очень малым содержанием кислорода. Этот район Аравийского моря является своеобразным «поставщиком» вод с минимальными концентрациями кислорода. По мере продвижения этих вод к югу концентрация кислорода в слое минимума возрастает за счет уменьшения величины биохимического потребления кислорода, а также в результате турбулентного обмена с водными массами, более богатыми кислородом (см. рис. 5, *а* и табл. 2).

Концентрация кислорода в слое минимума у южных границ моря увеличивается в результате бокового турбулентного обмена с водами Муссонного и Сомалийского течений и перемешивания с красноморскими водами. В южной части моря наблюдается некоторое размывание слоя дефицита сверху и снизу. Однако поступление кислорода на юге водоема не компенсирует его расхода на севере. Поэтому при каждом последующем цикле воды в слое дефицита кислорода все более и более теряли кислород до тех пор, пока не достигли наблюдаемых в море величин. Следует отметить, что потери кислорода на подповерхностных и промежуточных глубинах происходили, вероятно, через значительный промежуток времени и поэтому моменту возникновения слоя дефицита кислорода предшествовал период его длительного развития.

В сезон юго-западного муссона в Аравийском море наблюдается антициклоническая система течений (Морской атлас. Т. II, карта 32), которая отличается значительными скоростями у побережья Аравии. Летом характерно также сильное ветровое волнение. Все эти факторы способствуют проникновению кислорода в глубь моря. Вместе с этим у берегов Омана наблюдаются сгонные процессы, способствующие обогащению верхних слоев моря питательными солями. На лето приходится основная часть стока Инда. Поэтому и летом северная и северо-восточная части моря отличаются повышенным содержанием органического вещества, а механизм потерь кислорода на промежуточных глубинах остается таким же, как и зимой. Следовательно, описанный процесс образования слоя кислородного минимума действует круглый год.

Таким образом, слой минимума кислорода в Аравийском море формируется в условиях ограниченного кислородного обмена с другими частями океана, незначительного поступления его сверху и относительно больших затрат кислорода на окисление органического вещества, особенно в северо-восточной части водоема.

Выводы

1. По характеру вертикального распределения кислорода вся толща моря подразделяется на три зоны: зона хорошо насыщенная кислородом и благоприятная для жизни рыб, слой дефицита кислорода и зона глубоководных и донных вод со значительным содержанием кислорода.

2. Верхние слои воды толщиной 25—50 м были перенасыщены кислородом на 10—15%, что свидетельствует об интенсивно протекавших там процессах фотосинтеза.

3. В северной части района хорошо выражен «слой скачка» кислорода, располагавшийся на глубинах 60—75 м. В южном направлении наблюдается размывание этого слоя, который у Кочина практически исчезает.

4. Слой кислородного минимума в Аравийском море возникает в условиях ограниченного поступления кислорода сверху и из других частей океана в процессе интенсивных затрат его на окисление органического вещества, особенно в северо-восточной части, а также в результате длительного «старения» водных масс в подповерхностных и промежуточных слоях при их движении в условиях замкнутости изолиний геострофического течения.

5. Наибольшая мощность слоя кислородного минимума (75—1500 м) наблюдается в северной части исследуемого района. В южных частях моря толщина этого слоя значительно сокращается.

6. Воды из слоя кислородного минимума отрицательно влияют на условия жизни рыб и морских организмов, так как почти полное отсутствие в них кислорода способствует возникновению заморов в придонных слоях шельфовых вод.

7. На характер распределения кислорода в верхнем 100-метровом слое значительное влияние оказывают циклонические и антициклонические циркуляции, а также сгонно-нагонные течения.

8. Сгонные процессы, оказывающие большое влияние на обогащение верхних слоев моря питательными солями и на выходы вод из слоя кислородного минимума на шельф, наблюдались не на всей акватории исследуемой части моря, а только в локальных районах к северу от 15° с. ш. Наиболее интенсивные сгонные процессы, стимулировавшие развитие фитопланктона, наблюдались у южного побережья полуострова Катхиавар.

ЛИТЕРАТУРА

Богоров В. Г., Виноградов М. Е. Некоторые черты распределения биомассы планктона в поверхностных водах Индийского океана зимой 1959/60 г. «Океанологические исследования», № 4. Изд-во АН СССР, М., 1961.

Гордеев Е. И. Количественное распределение взвеси в поверхностных водах северной части Индийского океана. Труды ИОАН. Т. 64, М. Изд-во «Наука», 1964.

Зернова В. В., Иванов Ю. А. О распределении сетного фитопланктона в зависимости от гидрологических условий северной части Индийского океана. Труды ИОАН. Т. 64, М. Изд-во «Наука», 1964.

Иваненков В. Н., Винтовкин Р. В., Шацков К. З. Распределение кислорода в водах северной части Индийского океана. Труды ИОАН. Т. 64, М. Изд-во «Наука», 1964.

Иваненков В. Н., Розанов А. Г. Сероводородное заражение промежуточных слоев Аравийского моря. «Океанология», № 3, М., 1961.

Кабанова Ю. Г. Первичная продуктивность и содержание биогенных элементов в водах Индийского океана. «Океанологические исследования», № 4. Изд-во АН СССР, М., 1961.

Кабанова Ю. Г. Первичная продуктивность и содержание биогенных элемен-

тов в воде Индийского океана в октябре—апреле 1960—1961 гг. Труды ИОАН. Т. 64, М. Изд-во «Наука», 1964.

Мокиевская В. В. Некоторые гидрохимические черты северной части Индийского океана. «Океанологические исследования», № 4, изд. АН СССР, М., 1961.

Морской атлас. Т. II, карта 32.

Муромцев А. М. Основные черты гидрологии Индийского океана. Л., Гидрометиздат, 1959.

Муромцев А. М. К гидрологии Суэцкого канала, Красного моря и Аденского залива. «Метеорология и гидрология», № 2, М., 1962.

Нейман В. Г. О причинах образования кислородного минимума в подповерхностных водах Аравийского моря. «Океанологические исследования», № 4. Изд. АН СССР, М., 1961.

Овчинников И. М. Циркуляция вод северной части Индийского океана в период зимнего муссона. «Океанологические исследования», № 4. Изд. АН СССР, М., 1961.

Сабинин Д. А. Слои повышенной солености в северной части Индийского океана. Труды ИОАН. Т. 64, изд. АН СССР, М., 1964.

Розанов А. Г., Быкова В. С. Распределение нитратов и нитритов в воде северной части Индийского океана. Труды Ин-та океанологии. Т. 64, М., Изд-во «Наука», 1964.

Скопинцев Б. А. Коагуляция терригенных взвешенных частиц речного стока. Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая, № 4. Т. X, 1946.

Скопинцев Б. А. Органическое вещество в морской воде. Труды ГОИН. Вып. 10 (22), 1948.

Скопинцев Б. А. Исследование слоя кислородного минимума в северной части Атлантического океана осенью 1959 г. «Океанологические исследования», № 13, М. Изд-во «Наука», 1965.

Сметанин Д. А. О причинах возникновения слоя кислородного минимума и закономерностях его расположения в океане. Труды Ин-та океанологии. Т. 33, изд. АН СССР, М., 1959.

Фомичев А. В. Исследование течений северной части Индийского океана. Труды ИОАН. Т. 64, М., Изд-во «Наука», 1964.

Эдельман М. С. Некоторые особенности гидрологии вод, омывающих Индостан. Труды ВНИРО. Т. 57. М. Изд-во «Пищевая промышленность», 1965.

Emeri K. O. Sediments and water of Persian Gulf. «Bull. Amer. Assoc. Geologist», No 10, 1956.

Neiman A. K., McGill D. A. Circulation of Red Sea in early summer. Deep—Sea Res. 8, No 3—4, 1961.

Seiwel H. R. Minimum oxygen concentration in the western basin of the North Atlantic. Papers in Phys. «Oceanogr. and Meteorol». V. 3, N 3, 1937.

Sverdrup H. U. and others. The oceans, 1946.

Thompson E. F. The general hydrography of the Red Sea. John Murray Exped. 1933—1934, Sci. Rep. V. 2, 1939a.

Thompson E. F. The exchange of water between the Red Sea and the Gulf of Aden over the «Sill». John Murray Exped. 1933—1934, Sci. Rep. V. 2, 1939b.

Wüst G. Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans. Die Stratosphäre. Wiss. Ergebn. Deutsch. Atlant. Exped. auf dem Forschungsschiff «Meteor» 1925—1927, Bd. 6, 1935.