

УДК 551.464.797.9(267)

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХЛОРОФИЛЛА А В ИНДИЙСКОМ ОКЕАНЕ

Н. В. Мордасова

При исследовании биологической продуктивности Мирового океана большое значение имеют процессы образования органического вещества из минерального. Основным «аппаратом» процесса фотохимического синтеза является хлорофилл А, величину содержания которого можно использовать для оценки первичной продукции (Manning, Iuday, 1941; Ryther, 1956; Ryther, Ventsch, 1957, 1958) и для расчета биомассы фитопланктона (Винберг, 1960).

Цель данной работы — исследовать содержание хлорофилла А на поверхности и в водной толще Индийского океана для выявления некоторых закономерностей его распределения в пространстве и во времени на основе материалов различных экспедиций, имеющих в Мировом центре океанографических данных (МЦД).

Некоторые работы по исследованию содержания хлорофилла в Индийском океане были выполнены Креем в свете изучения первичной продукции Индийского океана, им были построены карты распределения хлорофилла в слое 0—50 м (Krey, 1973). Кроме того, японский ученый Сайяо проводил экспериментальные работы по изучению слоя максимального содержания хлорофилла в Индийском океане (Saijo, 1973); у берегов юго-западного Индостана проделана работа по сезонным изменениям содержания пигментов фитопланктона и связанных с ними океанографических параметров (Chan, 1973).

В Индийском океане очень много работали австралийские ученые, проводившие свои исследования на судах «Wagtego», «Magga Dan», «Diamantina», «Gascoyne» в 1958—1967 гг., а также американские — на судне «Anton Vign» в 1963—1964 гг. Американские ученые определяли хлорофилл спектрофотометрическим методом (Richards Thompson, 1952), австралийские — спектрофотометрическим с некоторыми модификациями (Humphrey, 1960).

Имеющиеся в МЦД данные были осреднены по десятиградусным квадратам Марсдена (рис. 1). Данные по содержанию хлорофилла А на поверхности Индийского океана по сезонам, полугодиям и среднегодовые приведены в табл. 1, из которой видно, что исследований в этом океане проведено немного; распределение наблюдений по всей акватории океана неравномерно. Всего имелись данные по 66 квадратам Марсдена, в общей сложности около 900 станций. Наиболее хорошо изучены районы у берегов Австралии, у побережья Юго-Восточной Африки, около Больших Зондских островов, у берегов Индокитайского п-ова и п-ова Индостан. Очень слабо изучены районы южнее 30° ю. ш.

Среднее содержание хлорофилла А на поверхности Индийского океана  
(по квадратам Марседена), мкг/л

Квадрат Марседена	Январь—март	Апрель—июнь	Июль—сентябрь	Октябрь—декабрь	Октябрь—март	Апрель—сентябрь	Средне-годовые	Изученность (количество данных)
026	—	0,43	0,11	—	—	0,27	0,27	11
027	0,06	0,41	0,09	—	0,06	0,25	0,19	24
028	—	0,08	0,05	—	—	0,07	0,07	6
029	—	0,05	—	—	—	0,05	0,05	10
030	—	0,06	0,05	—	—	0,06	0,06	6
031	0,09	—	0,14	0,11	0,10	0,14	0,11	9
063	0,21	0,20	—	—	0,21	0,20	0,21	34
064	—	0,09	—	—	—	0,09	0,09	26
065	—	0,06	—	—	—	0,06	0,06	3
066	0,25	0,10	0,13	0,12	0,17	0,12	0,15	15
067	0,31	—	—	0,20	0,27	—	0,27	14
099	—	1,85	—	—	—	1,85	1,85	4
100	—	0,39	—	—	—	0,39	0,39	2
102	—	—	—	0,85	0,85	—	0,85	14
103	—	—	—	0,37	0,37	—	0,37	1
321	—	0	0,05	—	—	0,03	0,03	2
322	0,08	—	0,12	—	0,08	0,12	0,10	8
323	0,10	0,29	0,10	—	0,10	0,16	0,14	24
324	0,03	0,16	0,24	0,11	0,06	0,21	0,15	27
325	0,11	0,14	0,19	0,07	0,10	0,17	0,13	60
326	—	0,16	0,12	—	—	0,16	0,16	17
327	—	0,05	0,01	—	—	0,03	0,03	6
328	—	0,07	0,06	—	—	0,06	0,06	13
329	—	0,06	0,06	—	—	0,06	0,06	9
330	0,04	—	0,07	—	0,04	0,07	0,06	8
331	—	—	—	0,13	0,13	—	0,13	6
358	—	0,30	0,15	—	—	0,20	0,20	13
359	0,14	0,33	0,10	—	0,14	0,16	0,15	51
360	0,05	0,10	0,12	0,06	0,06	0,11	0,09	71
361	0,08	0,12	0,15	0,07	0,08	0,13	0,11	50
360—361	0,07	0,12	0,15	0,08	0,08	0,13	0,10	55
362	—	0,13	0,11	0,07	0,07	0,12	0,11	31
364	—	0,07	0,10	—	—	0,08	0,08	12
365	—	0,11	—	—	—	0,11	0,11	8
366	0,10	—	0,12	—	0,10	0,12	0,11	9
367	—	—	—	0,11	0,11	—	0,11	10
368	—	—	—	0,30	0,30	—	0,30	3
396	0,10	0,22	0,19	0,07	0,08	0,20	0,15	51
397	0,07	0,13	0,17	0,06	0,07	0,15	0,12	59
398	—	0,09	0,06	0,06	0,06	0,08	0,07	18
399	—	0,05	0,01	—	—	0,03	0,03	4
400	—	0,05	0,02	—	—	0,04	0,04	6
401	—	0,05	0,04	—	—	0,05	0,05	13
402	0,03	—	0,02	—	0,03	0,02	0,03	4
403	—	—	0,17	—	—	0,17	0,17	6
404	—	—	0,57	0,35	0,35	0,57	0,51	28
430	0,09	—	—	—	0,09	—	0,09	10
431	0,12	—	—	—	0,12	—	0,12	9
432	0,09	0,10	0,18	0,10	0,09	0,15	0,12	46
433	0,06	0,15	0,20	0,14	0,06	0,18	0,14	28
434	0,07	—	0,07	0,04	0,05	0,07	0,06	8
436	0,06	—	0,06	—	—	0,06	0,06	5
437	—	0,08	0,18	—	—	0,15	0,15	6
438	0,02	—	0,12	—	0,02	0,12	0,17	5
439	—	—	0,19	—	—	0,19	0,19	5
440	—	—	0,22	—	—	0,22	0,22	8
466	0,16	—	—	—	0,16	—	0,16	5
467	0,13	—	—	—	0,13	—	0,13	4
468	0,29	—	0,17	0,21	0,25	0,17	0,24	10

Квадрат Марсдена	Январь—март	Апрель—июнь	Июль—сентябрь	Октябрь—декабрь	Октябрь—март	Апрель—сентябрь	Среднегодовые	Изученность (количество данных)
469	0,15	—	0,18	0,24	0,19	0,18	0,19	8
472	—	0,12	—	—	—	0,12	0,12	1
473	—	—	0,10	—	—	0,10	0,10	1
537	0,22	—	—	—	0,22	—	0,22	2
538	0,18	—	—	—	0,18	—	0,18	3
539	0,44	—	—	—	0,44	—	0,44	1
540	0,19	—	—	—	0,19	—	0,19	1

Из табл. I видно, что общее количество имеющихся данных немногочисленно, по отдельным сезонам они вообще отсутствуют, поэтому были построены среднегодовые карты распределения хлорофилла А на поверхности Индийского океана и по отдельным слоям (до глубины 100 м). Для более точного построения сетка с квадратами Марсдена была разбита на пятиградусные квадраты; всего имелись

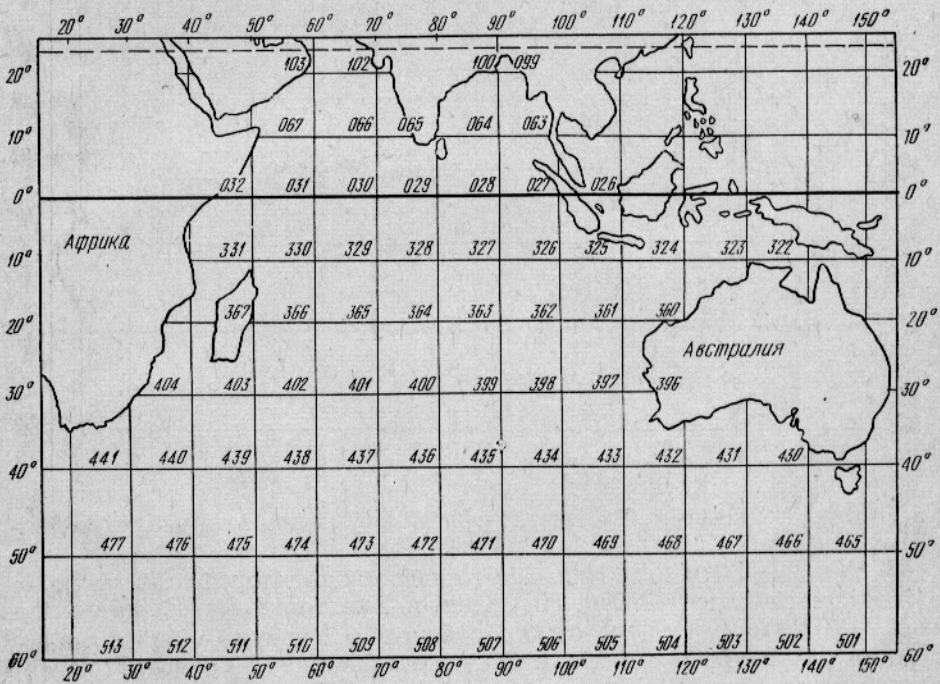


Рис. 1. Карта Индийского океана с десятиградусными квадратами Марсдена.

данные по 176 пятиградусным квадратам. По всей акватории океана содержание хлорофилла на поверхности менее 0,10 мкг/л, за исключением прибрежных районов у Юго-Восточной Африки, где его концентрация более 0,40 мкг/л (максимально 2,5 мкг/л); в районе Аравийского моря — более 0,30 мкг/л (максимально 5,74 мкг/л); в районе Больших Зондских островов — более 0,20 мкг/л; в прибрежной зоне к северо-востоку от Андаманских островов — более 0,4 мкг/л (максимально 1,93 мкг/л) (рис. 2).



Распределение хлорофилла по отдельным слоям: 0—25 м; 25—50; 50—75 и 75—100 м показано на рис. 3 (а, б, в, г). В слое 0—25 м наибольшее содержание хлорофилла А в прибрежных зонах: в районе юго-восточного побережья Африки — более 6,0 мг/м<sup>2</sup> (максимальный 49,8 мг/м<sup>2</sup>); у берегов Северо-Западной Австралии — более 4,0 мг/м<sup>2</sup> (максимально 10,75 мг/м<sup>2</sup>); у побережья Сомали — более 4,0 мг/м<sup>2</sup> (максимально 10,75 мг/м<sup>2</sup>); на большей части Аравийского моря — более 3 мг/м<sup>2</sup> (максимально 18,25 мг/м<sup>2</sup>); у южной части п-ова Индостан — более 3 мг/м<sup>2</sup> (максимально 9 мг/м<sup>2</sup>). В открытой части океана содержание хлорофилла изменяется в пределах от 1 до 2 мг/м<sup>2</sup>, в отдельных зонах составляя менее 1 мг/м<sup>2</sup> (от 20—30° ю. ш. до 58—80° в. д.).

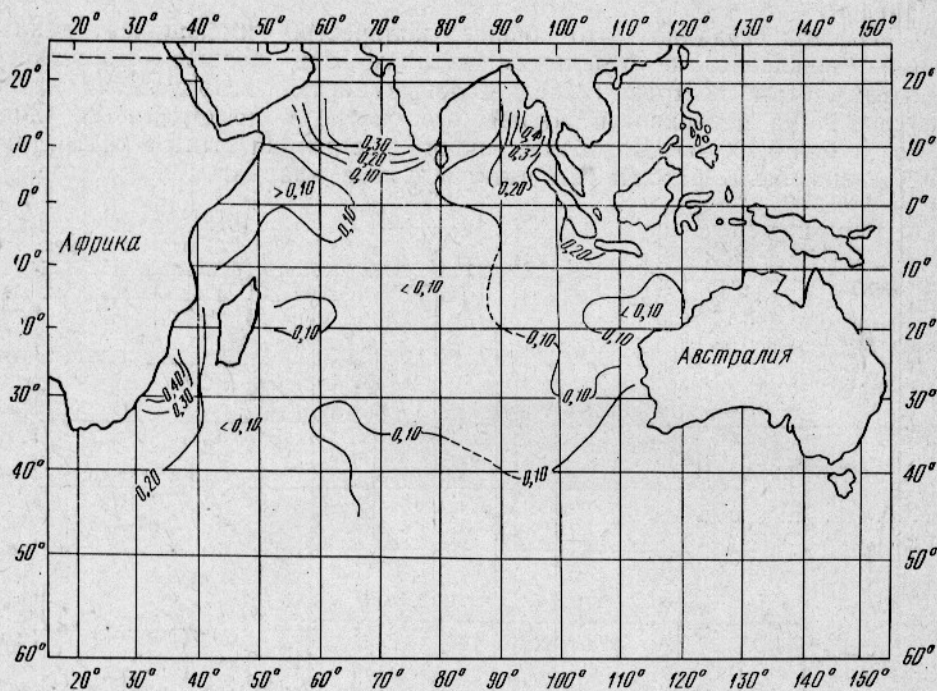


Рис. 2. Среднегодовое распределение хлорофилла А на поверхности, мкг/л.

В слое 25—50 м (см. рис. 3, б) содержание хлорофилла несколько больше, чем в слое 0—25 м. На основной акватории океана оно составляет 2—3 мг/м<sup>2</sup>; у юго-восточного побережья Африки — более 8 мг/м<sup>2</sup>; в районе Аравийского моря и Аденского залива — более 7 мг/м<sup>2</sup>; у южной части п-ва Индостан — более 4 мг/м<sup>2</sup>. В районе Больших Зондских островов зона с содержанием хлорофилла более 4 мг/м<sup>2</sup> значительно расширилась.

В слое 50—75 м (рис. 3, в) распределение хлорофилла следующее. Южнее 20° ю. ш. количество хлорофилла несколько снижается по сравнению с вышележащим слоем 25—50 м — менее 2 мг/м<sup>2</sup>. В прибрежных зонах у Больших Зондских островов наблюдается значительное увеличение — хлорофилла более 7 мг/м<sup>2</sup>, так же как и у южной части п-ова Индостан — более 5 мг/м<sup>2</sup>. У берегов Юго-Восточной Африки значительных изменений не произошло, в то время как в районе Аравийского моря и Аденского залива его содержание снижается — до

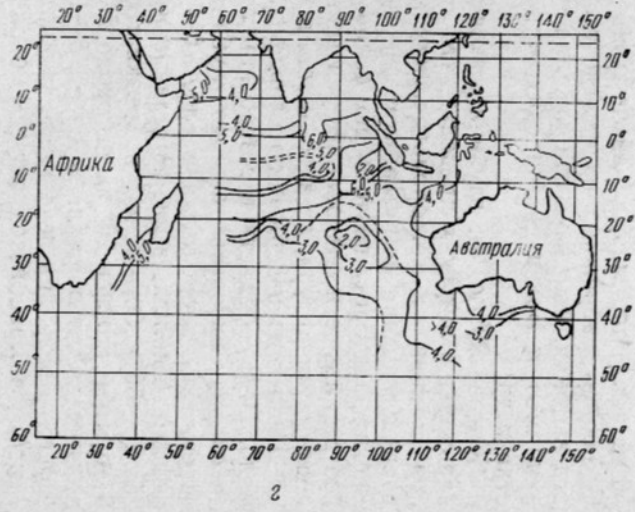
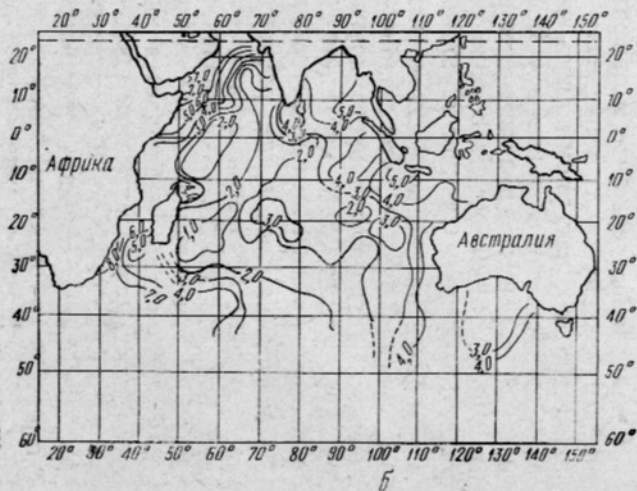
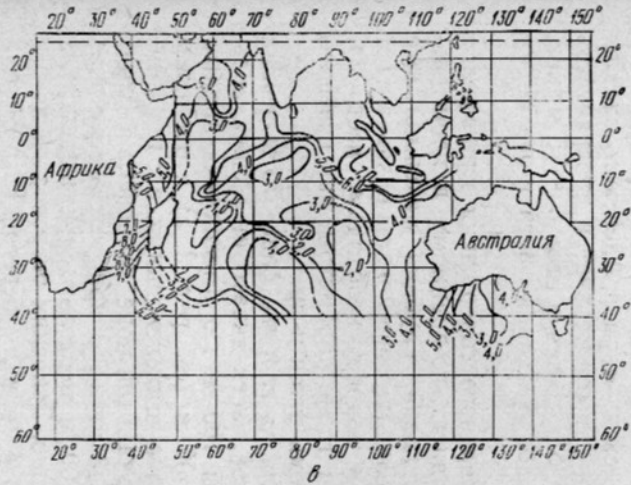
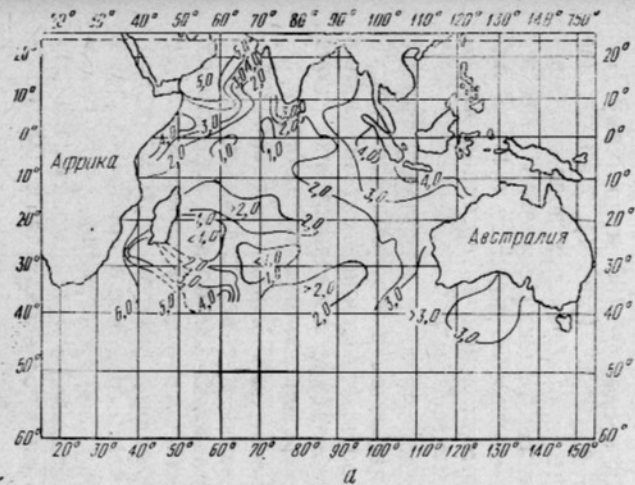


Рис. 3. Среднегодовое содержание хлорофилла А (в мг/м<sup>2</sup>) в Индийском океане в различных слоях (в м):  
 а — 0—25; б — 25—50; в — 50—75; г — 75—100.

5 мг/м<sup>2</sup>. В зоне тропиков для слоя 50—75 м характерно увеличение количества хлорофилла на большей части акватории до 4—5 мг/м<sup>2</sup> и более, по-видимому, потому, что максимум фитопланктона, а следовательно, и хлорофилла находится на глубине 60—80 м, что связано с подавляющим действием солнечной радиации в этих зонах.

В прибрежных районах в пределах шельфовой зоны вблизи устьев больших рек прозрачность морской воды гораздо ниже по сравнению с зонами открытого океана, поэтому максимум фитопланктона расположен гораздо ближе к поверхности чем в приэкваториальных зонах. Вследствие этого содержание хлорофилла в слое 50—75 м может быть несколько меньше по сравнению с вышележащим слоем 25—50 м, как, например, в районе Аравийского моря и Аденского залива. Однако в прибрежных зонах, где сток рек отсутствует и прозрачность вод высокая, максимум хлорофилла наблюдается в слое 50—75 м, как, например, у Больших Зондских островов, у южной части п-ова Индостан и др.

Южнее 20° ю. ш. глубина максимального содержания хлорофилла варьирует в широких пределах, что зависит, по-видимому, в значительной степени от метеорологических условий. Глубина максимального распространения фитопланктона — величина переменная и зависит от многих факторов, поэтому по данному вопросу необходимо вести более детальные исследования, учитывая такие параметры, как освещенность, температура, а также сезон, время суток и др.

Данных по содержанию хлорофилла на глубине более 75 м весьма мало. Целые области в северо-западной части акватории океана нельзя охарактеризовать даже до глубины 100 м. По имеющимся данным содержание хлорофилла в слое 75—100 м (см. рис. 3, з) в открытом океане несколько выше по сравнению с вышележащими слоями (0—25; 25—50 и 50—75 м); в приэкваториальной зоне хлорофилла около 5—6 мг/м<sup>2</sup>, южнее 20° ю. ш. около 2—3 мг/м<sup>2</sup>. В прибрежных районах количество хлорофилла в слое 75—100 м несколько уменьшается: у берегов Австралии до 4 мг/м<sup>2</sup>, у Больших Зондских островов — до 6—7 мг/м<sup>2</sup>, в Аравийском море — около 4 мг/м<sup>2</sup>, у берегов Юго-Восточной Африки — 4—5 мг/м<sup>2</sup>.

Суммарное содержание хлорофилла в слое 0—100 м по всему Индийскому океану было в пределах 8—40 мг/м<sup>2</sup> (рис. 4). Наибольшее количество его, как упоминалось выше, в прибрежных зонах у берегов Юго-Восточной Африки и у Больших Зондских островов — более 20 мг/м<sup>2</sup>; в районе Аравийского моря — более 30 мг/м<sup>2</sup>; у берегов Австралии — 14—16 мг/м<sup>2</sup>. В зоне экваториальной дивергенции хлорофилла 14—20 мг/м<sup>2</sup>, южнее 20° ю. ш. менее 10 мг/м<sup>2</sup>.

Наиболее низкие по содержанию хлорофилла и малопродуктивные зоны южнее 30° ю. ш., что связано с наличием в этой области субтропического антициклонального круговорота, где происходит опускание вод, в результате чего наблюдается обеднение поверхностных слоев биогенными элементами и фотосинтез фитопланктона замедляется.

Как упоминалось выше, распределение хлорофилла в океане связано главным образом с системой течений и с вертикальным движением вод. На рис. 2—4 показано, что наиболее богаты планктоном районы в северо-западной части Аравийского моря у побережья Сомали и других, где наблюдается интенсивный подъем глубинных вод. Кроме того, можно выделить продуктивные районы в прибрежных зонах Юго-Восточной Африки, Северо-Западной Австралии, п-ова Индостан, а также у Больших Зондских островов, высокая продуктивность которых была отмечена также другими исследователями (Богоров, Расс, 1961; Кобленц-Мишке и др., 1968).



Изменение содержания хлорофилла в слоях 0—25 м, 25—50, 50—75, 75—100 и 0—100 м по мере продвижения с севера на юг по 60—70° в. д. показано в табл. 2. В прибрежных зонах на широте 20—25° с. ш. (см. табл. 2) наибольшее количество хлорофилла в слоях 0—25 м, причем приблизительно равное между собой. Далее к югу, до экватора резкой разницы между количеством хлорофилла не наблюдается. Южнее экватора вплоть до 30° ю. ш. максимум хлорофилла в слое 75—100 м.

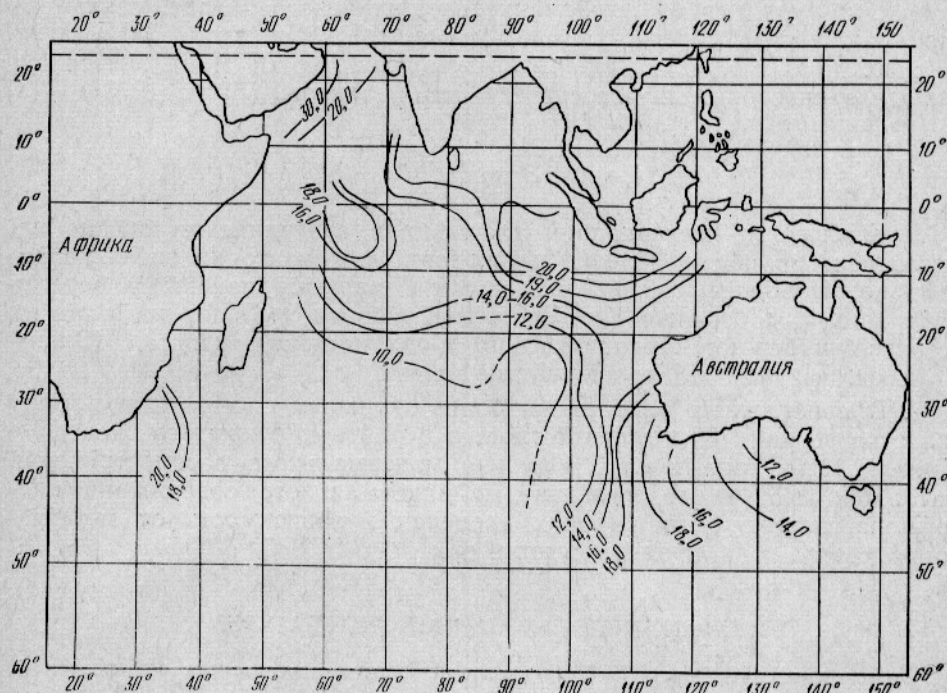


Рис. 4. Содержание хлорофилла А в слое 0—100 м, мг/м<sup>2</sup>.

Если посмотреть как меняется суммарное содержание хлорофилла (см. табл. 2) в слое 0—100 м в меридиональном направлении, то можно выделить высокопродуктивные зоны на севере акватории, хлорофилла более 20 мг/м<sup>2</sup>, затем вплоть до экватора его содержание понижается до 10—11 мг/м<sup>2</sup>, после чего до 10° ю. ш. вновь повышается до 24—28 мг/м<sup>2</sup>. Южнее 10° ю. ш. оно вновь падает до 8—12 мг/м<sup>2</sup>.

Таблица 2

Изменение содержания хлорофилла (в мг/м<sup>2</sup>) в меридиональном направлении по отдельным слоям (по 60—70° в. д.)

Координаты	0—25 м	25—50 м	50—75 м	75—100 м	0—100 м
25—20° с. ш.	8,0	7,7	4,4	1,2	21,4
20—10° с. ш.	3,7	4,0	4,8	3,6	11,2
10° с. ш. — 0°	1,8	2,8	3,6	3,1	10,0
0—10° ю. ш.	1,3	2,6	5,4	14,0	29,0
10—20° ю. ш.	2,2	2,4	3,1	5,2	15,0
20—30° ю. ш.	1,4	1,5	2,1	3,6	8,3
30—40° ю. ш.	2,9	2,7	3,1	—	—
40—50° ю. ш.	3,2	3,4	3,6	—	—

Данные показывают, что максимум хлорофилла в Индийском океане, как правило, располагается глубже 50 м, за исключением прибрежных районов, где он находится в верхнем 50-метровом слое. К югу от экватора, где прозрачность вод высокая, этот максимум лежит на глубинах от 75 до 100 м. К сожалению, ни один из авторов не учитывал в пробе наличие продуктов распада хлорофилла, в результате чего трудно судить активно ли это растущий фитопланктон или мертвые клетки. Экспериментальные исследования, проведенные японскими учеными на фитопланктоне Индийского океана, взятом из слоя максимума хлорофилла в некоторых его зонах вдоль 78° в. д. от 5° с. ш. до 25° ю. ш., показали, что на глубине 100 м находится активный и способный к фотосинтезу фитопланктон. (Saija, 1973).

### Выводы

1. Количество исследований хлорофилла в Индийском океане немногочисленно, распределение наблюдений по акватории очень неравномерно. Наиболее хорошо изученными являются районы у берегов Австралии, у побережья Юго-Восточной Африки, у Больших Зондских островов, у берегов Индокитайского п-ова и п-ова Индостан. Южнее 30° ю. ш. имеются только единичные данные.

2. В прибрежных районах наиболее активным слоем фотосинтеза является верхний 50-метровый слой, а в районах открытого океана — верхний 100-метровый слой. Глубина максимального распространения фитопланктона, а следовательно, и максимального содержания хлорофилла, варьирует в широких пределах в зависимости от метеоусловий, сезона года, времени суток и др.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Богоров В. Г., Расс Т. С. О продуктивности и перспективах рыболовства в водах Индийского океана. — «Океанология», 1961, т. I, вып. 1, с. 107—109.
- Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов. Минск, Изд-во АН БССР, 1960, с. 260—262.
- Кобленц-Мишке О. И., Волковинский В. В., Кабанова Ю. Г. Распределение и величина первичной продукции вод Мирового океана. М., ВНИРО, 1968, вып. 5, с. 3—9.
- Chan N. M. Seasonal Variation of Phytoplankton Pigments and some of the Associated Oceanographic Parameters in the Laccadive Sea off Cochin, The Biology of the Indian Ocean. Ecological Studies, 1973, vol. 3, p. 175—186.
- Humphrey J. F. The concentration of plankton pigments in Australian water. CSIRO. Aust. Div. Fich. Oceanogr. Tech. Pap. 1960, № 9.
- Krey J. Primary Production in the Indian Ocean. The Biology of the Indian Ocean. Ecological Studies, 1973, vol. 3, p. 115—126.
- Manning W. M., Juday R. E. The chlorophyll content and productivity of some lakes in Northeastern Wisconsin. Trans-Wisconsin Acad. Sci. Arts and Letters, 1941, 33.
- Richards F. A., Thompson T. Y. The estimation and characterization of plankton population by pigment analyses. II. A spectrophotometric method for the estimations of plankton pigments. J. Mar. Res. 11, 1952. p. 156—172.
- Ryther J. H. Photosynthesis in the ocean as function of light intensity. Limnol. and Oceanogr., 1, 1956.
- Ryther J. H., Yentsch C. S. The estimation of phytoplankton production in the ocean from chlorophyll and light data. Limnol. and Oceanogr., 2, 1957.
- Ryther J. H., Yentsch C. S. Primary production of continental shelf waters of New York. Limnol. and Oceanogr., 3, 1958.
- Saijo Y. The Formation of the chlorophyll maximum in the Indian Ocean. The Biology of the Indian Ocean. Ecological Studies, 1973, vol. 3, p. 171—174.



## *Distribution of chlorophyll „a“ in the Indian Ocean*

*N. V. Mordasova*

### SUMMARY

Charts showing distribution of chlorophyll „a“ in the surface layer and in mid-water of the Indian Ocean are compiled on the basis of summarizing primary data obtained by foreign expeditions. Regularities of its distribution are described. The mean annual content of chlorophyll is over 0.5 mkg/l in the surface layer off the Southeast Africa, 0.3 mkg/l in the Arabian Sea and Gulf of Aden, 0.2 mkg/l off Great Zond Islands and less than 0.1 mkg/l in the rest areas of the Indian Ocean. The maximum content of chlorophyll in the coastal areas is in the upper 50-m layer, whereas it is observed in the 50–100 m layer in the open sea. Most productive zones of the Indian Ocean are determined on the basis of data on the distribution of chlorophyll.