

УДК 551.464.6 (261)

**СОДЕРЖАНИЕ ФОСФАТОВ В ВЕРХНИХ СЛОЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ  
И ЮЖНОЙ АТЛАНТИКИ****М. В. Федосов**

С 1925 по 1968 г. в центральной и южной частях Атлантического океана был собран многими исследователями обширный гидрохимический материал по содержанию в водах фосфатов. Систематизация и вычисление средневзвешенных величин были выполнены в лаборатории ВНИРО под руководством и при участии автора<sup>1</sup>.

На основании результатов анализа около 30 000 проб воды, взятых с семи горизонтов 4500 океанологических станций, находившихся в пределах от 30° с. ш. до 70° ю. ш. (исключая Мексиканский залив), были вычислены средневзвешенные величины содержания фосфатов в слоях до 200 м. Все первичные данные были предварительно систематизированы по пятиградусным квадратам картографической сетки.

Полученные данные представляют собой в известной мере стабильные среднегодовые величины содержания фосфатов в определенном столбе воды под единицей площади океана. В дальнейшем эти величины обозначаются нами термином *фосфатная насыщенность*.

Основная размерность величин фосфатной насыщенности *мг-атом Р* под *м<sup>2</sup>* в слое *Z* выражает средневзвешенное количество фосфатов под единицей площади для конкретного слоя морской воды.

Вычисленные и систематизированные данные отклоняются от средних величин в области южнее 40° ю. ш. в пределах  $\pm 28\%$ , а севернее этой границы — в пределах  $\pm 20-80\%$ .

Фосфатная насыщенность, как и всякое другое содержание биогенных веществ, составляющих биомассу морских растительных организмов, подлежит особенно тщательному исследованию в слое продуктивного фотосинтеза и слое, непосредственно подстилающем его. Как известно, только в слое продуктивного фотосинтеза на материальной основе ассимилируемых морскими аутотрофными фитоорганизмами минеральных биогенных веществ происходит новообразование первичного (растительного) органического вещества. Только в этом слое фотосинтез происходит с интенсивностью, обеспечивающей ежесуточный прирост вновь образующегося растительного органического вещества. Только в этом слое происходит в известной степени безвозвратное для толщи морских вод потребление (изъятие) биогенных минеральных веществ.

<sup>1</sup> В этой части работы принимали участие также сотрудники ВНИРО В. В. Волковинский и М. А. Буркальцева, которым автор выражает свою благодарность.

При исследовании химической основы биопродуктивности морских вод фосфатная насыщенность — одна из основных количественных характеристик.

Наиболее интересно исследование химической основы биопродуктивности верхнего слоя океана, в пределах водного слоя продуктивного фотосинтеза и активного слоя, непосредственно его подстилающего. Этот слой морских вод, непосредственно подстилающий слой продуктивного фотосинтеза, образует своеобразное, весьма динамичное «жидкое дно», участвующее в обмене веществом. В этом отношении, как, впрочем, и во многих других, шельфовая, прибрежная, мелководная область отличается от открытых глубоководных районов океана. В шельфовой области «жидкое дно» фактически заменяется морским дном.

В процессе исследования необходимо сначала определить, что представляет в количественном отношении биогенная химическая основа слоя продуктивного фотосинтеза, обеспечивающая материальную базу для фотосинтетического новообразования органического вещества из минеральных компонентов морских вод.

Исследование условий и установление закономерностей формирования химической основы биопродуктивности в слое продуктивного фотосинтеза (кроме изучения биогенной насыщенности этого слоя) включает прежде всего выяснение вопроса, откуда и в какой форме поступают в этот слой биогенные вещества. Именно фотосинтетическое превращение минеральных биогенных веществ в биомассу фитоорганизмов (в органически связанные формы этих элементов) обуславливает масштабы новообразования полноценного первичного органического вещества и одновременно определяет размеры и интенсивность (скорость) расходования минеральных форм биогенных веществ, т. е. уменьшения биогенной насыщенности вод в процессе новообразования растительного органического вещества.

Количественная оценка и характеристика содержания фосфатов в слоях верхней, 200-метровой, толщи вод (в основном — Южной Атлантики), т. е. определение ее послойной биогенной насыщенности, позволяют произвести дальнейший анализ химической основы биопродуктивности этих вод и условий ее формирования.

Общее количество фосфатов во всей 200-метровой толще вод южной части Атлантического океана и отдельно по слоям вычислялось по многочисленным данным станций наблюдения, полученным всеми исследователями, успешно применявшими гидрохимические методы.

Среднегодовые осредненные величины фосфатной насыщенности по различным слоям позволяют выявить ряд количественных характеристик и особенностей содержания фосфатов — компонента химической основы биопродуктивности исследованных вод.

Вычисленная по квадратам фосфатная насыщенность показала существенное различие полученных величин: по широтным зонам, по отдельным районам, по восточной и западной частям океана, по квадратам, прилегающим к берегам Африки и Южной Америки, и по квадратам открытого океана.

Общее среднегодовое количество фосфатов в верхнем 200-метровом слое открытых вод центральной и южной частей Атлантического океана может быть определено величиной порядка  $300 \cdot 10^6$  т фосфора фосфатов, а в прибрежных, часто неполных пятиградусных квадратах<sup>1</sup> — порядка  $25 \cdot 10^6$  т. Эти величины соответствуют средним данным, которые

<sup>1</sup> Прибрежные квадраты частично ограничены берегом суши, поэтому мы называем их пятиградусными условно.

для основной массы находятся в пределах  $\pm 30\%$  разброса. Однако для низких широт в поверхностных слоях зоны фотосинтеза внутригодовые средние величины колеблются по квадратам иногда в значительно больших пределах. В то же время наблюдается определенная стабильная фосфатная насыщенность вод по широтным зонам и отдельным районам исследованной части Атлантического океана. В открытых районах южной и центральной частей Атлантического океана площадью немногим более  $36 \cdot 10^6 \text{ км}^2$  (от  $30^\circ$  с. ш. до  $35^\circ$  ю. ш.) фосфатная насыщенность 200-метрового слоя равна  $130 \cdot 10^6 \text{ т}$  фосфатного фосфора, т. е. в среднем фосфатная насыщенность равна  $3,6 \text{ т Р}$  под  $\text{км}^2$  в слое 200 м.

В восточных прибрежных квадратах, площадь которых составляет около  $3,6 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ , содержится  $21,6 \cdot 10^6 \text{ т}$  фосфатного фосфора, т. е.  $6,0 \text{ т Р}$  под  $\text{км}^2$  в слое 200 м. В западных прибрежных квадратах (до  $35^\circ$  ю. ш.) на площади около  $3,4 \cdot 10^6 \text{ км}^2$  содержится в 2,5 раза меньше фосфатного фосфора, немногим более  $8 \cdot 10^6 \text{ т}$ , т. е.  $2,4 \text{ т Р}$  под  $\text{км}^2$  в слое 200 м.

В западных прибрежных квадратах, лежащих южнее  $35^\circ$  ю. ш., содержание фосфатов резко возрастает и достигает в среднем  $6,6 \text{ т Р}$  под  $\text{км}^2$  в слое 200 м.

Восточные прибрежные пятиградусные квадраты и их части имеют в 2 раза и более увеличенную фосфатную насыщенность, чем открытая часть океана в тех же широтных зонах, а западные прибрежные — не более чем в 2 раза. Более детальная количественная характеристика дана в табл. 1.

При рассмотрении распределения фосфатной насыщенности по вертикали в 25- и 50-метровых (по глубине) слоях пятиградусных квадратов центральной и южной частей Атлантического океана обнаруживается, что основная структура фосфатной насыщенности от нижнего 150—200-метрового до верхнего 0—25-метрового слоя по отдельным районам и широтным зонам примерно одинакова. Обращают на себя внимание наибольшие величины фосфатной насыщенности в трех широтных пятиградусных зонах; одна из них, тропическая, находится в Центральной Атлантике, между  $10$  и  $15^\circ$  с. ш., две другие расположены рядом между  $50$  и  $60^\circ$  ю. ш., образуя антарктическую широтную зону с наибольшим суммарным содержанием фосфатов.

Более детально распределение экстремумов суммарного количества фосфатов в 200-метровом слое для открытой части Атлантического океана (от  $30^\circ$  т. ш. до  $70^\circ$  ю. ш.) можно в основном представить следующей схемой (сумма фосфатов в 200-метровом слое,  $n \cdot 10^6 \text{ т}$ ):

Субтропический минимум (северное полушарие)	30— $15^\circ$ с. ш.	12,1
Приэкваториально-тропический максимум	$15^\circ$ с. ш.— $20^\circ$ ю. ш. на востоке	74,0
	$15^\circ$ с. ш.— $10^\circ$ ю. ш. на западе	
То же, наибольшая величина	15— $10^\circ$ с. ш.	24,8
	20—35— $40^\circ$ ю. ш. на востоке	28,5
Центральный минимум	10—35— $40^\circ$ ю. ш. на западе	
	35— $70^\circ$ ю. ш.	187,3
Южный максимум	50— $55^\circ$ ю. ш.	37,9
То же, наибольшая величина		

Эти данные характеризуют фосфатную насыщенность всего 200-метрового слоя по обобщенным зонам пятиградусных квадратов. Отношение фосфатной насыщенности верхнего 0—50-метрового слоя (основной части слоя продуктивного фотосинтеза) к фосфатной насыщенности равнообъемного подстилающего слоя (150—200 м) равно (в %):

$10^\circ$ с. ш.— $0^\circ$ . . . . .	17,5	$35$ — $40^\circ$ ю. ш. . . . .	57,5
$0$ — $10^\circ$ ю. ш. . . . .	21,8	$65$ — $70^\circ$ ю. ш. . . . .	79,0

В высоких широтах Южной Атлантики к югу от 35° ю. ш. верхний 0—50-метровый слой продуктивного фотосинтеза в 3—4 раза больше обеспечен фосфатами, чем этот слой в приэкваториальной области (10° с. ш. — 10° ю. ш.). При сравнении абсолютных величин фосфатной насыщенности 0—50-метрового слоя этих зон получается еще большее отношение:  $\frac{94,2}{11,5} = 8,2$  (табл. 2).

Интенсивность и направленность течений в центральной и южной частях Атлантики не нарушают горизонтального разделения фосфатной насыщенности отдельных районов и широтных зон.

Для фосфатной насыщенности и суммарного количества фосфатов в водах между берегами Южной Америки и Африки (30° с. ш. — 40° ю. ш.) характерен разброс величин, приведенных в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Химико-океанографические характеристики зон экстремумов содержания фосфатов в 200-метровом слое

Зона, степень насыщенности	Объем слоя, млн. км <sup>3</sup>	Фосфатная насыщенность, мг-атомР/м <sup>2</sup> (в среднем)	Суммарное содержание в слое Р-РО <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , млн. т
30—15° с. ш., минимум . . . . .	1,81	43	12,1
15—10° с. ш., максимум . . . . .	0,42	258	16,8
10° с. ш.—20° ю. ш., максимум . . . . .	2,93	125	57,0
20—35° ю. ш., минимум . . . . .	1,80	53,4	14,9
35—40° ю. ш., максимум . . . . .	0,68	128,8	13,7
Южнее 40° ю. ш., максимум . . . . .	4,00	200—400	187,0

Как видно, суммарное содержание фосфатов в зонах максимумов превышает содержание фосфатов в зонах прилегающих минимумов в 5—6 раз, в приантарктических водах — в 13,5 раза, в то время как соответствующие объемы 0—200-метровых слоев различаются лишь в 2—3 раза.

Суммарное количество фосфатов, сосредоточенных в обширной приэкваториально-тропической зоне максимума (15° с. ш. — 20° ю. ш.; объем 200-метрового слоя воды  $3,3 \cdot 10^6$  км<sup>3</sup>), превышает количество фосфатов в прилегающей зоне минимума к северу (объем воды  $1,8 \cdot 10^6$  км<sup>3</sup>) в 6 раз, к югу — в 5 раз.

По сравнению с таким большим, насыщенным фосфатами объемом воды максимума прилегающие зоны минимума содержат в среднем только 16% фосфатов на севере и 20% на юге. В основном все эти различия зависят от своеобразной гидродинамической изоляции зон минимума фосфатной насыщенности от зон их максимума. Еще более резко различаются по количеству фосфатов воды южной зоны минимума и воды непосредственно примыкающих к ней субантарктической и антарктической областей — зон максимума фосфатной насыщенности.

Все сказанное касалось в основном горизонтальных составляющих в известной мере стабильной структуры фосфатной насыщенности открытых областей океана. Постоянное разобщение смежных вод с различной фосфатной насыщенностью хорошо прослеживается при крупномасштабном обобщении материала. Остальные вычисленные гидрохимические данные фосфатной насыщенности в пятиградусных квадратах, прилегающих на востоке к берегам Африки, а на западе — к берегам Южной Америки, характеризуют изменение величин фосфатной насыщенности на шельфе и в предустьевых зонах рек (табл. 2). В при-

Таблица 2

Фосфатная насыщенность вод Атлантического океана в области от 30° с. ш. до 70° ю. ш.

Зона	Реки, смежный океан	Западные периферийные воды		Воды открытого океана		Восточные периферийные воды		реки, смежный океан
		в % от фосфатной насыщенности вод океана в слое		мг-атом Р под м <sup>2</sup> в слое		в % от фосфатной насыщенности вод океана в слое		
		0—50 м	150—200 м	0—50 м	150—200 м	0—50 м	150—200 м	
30—25° с. ш.		—	—	5	8,8	104	200	
25—20° с. ш.		—	—	3,5	17,8	—	—	
20—15° с. ш.		—	—	2	37	1248	200	р. Сенегал
15—10° с. ш.		—	—	25,2	81,3	157	98	р. Гамбия
10—5° с. ш.		82	73	11,7	63,8	173	110	
5° с. ш. — 0°	р. Амазонка	196	57	11,3	67,7	144	102	р. Нигер
0°—5° ю. ш.		191	88	17,3	70,7	220	92	
5—10° ю. ш.		—	73	14,2	76	400	94	р. Конго
10—15° ю. ш.		120	44	9,4	54,3	—	—	
15—20° ю. ш.		50	40	12,8	50,7	—	—	
20—25° ю. ш.		174	(114)	10,2	22,4	457	334	
25—30° ю. ш.	Лиманы-лагуны	1362	141	3	19,4	1030	288	р. Оранжевая
30—35° ю. ш.	р. Парана	310	172	7	21,5	470	198	
35—40° ю. ш.		192	180	25	44,2	56	84	Индийский океан
40—45° ю. ш.		130	108	42,9	59,1	95	98	То же
45—50° ю. ш.		94	111	60,6	78,8	134	127	»
50—55° ю. ш.		66	79	83	99,2	127	129	»
55—60° ю. ш.	Тихий океан	88	80	90	111,7	120	108	»
60—65° ю. ш.	То же	115	101	88	113,8	103	110	»
65—70° ю. ш.	»	95	98	94,2	119,7	102	110	»

брежных и особенно в предустьевых пятиградусных квадратах и в их неполных частях в пределах материковых зон фосфатная насыщенность часто выше, чем в водах открытого океана (табл. 2).

Изменение величин фосфатной насыщенности морских вод в квадратах, непосредственно примыкающих к берегам континентов, наблюдается на расстоянии до 300—500 км от суши.

Все эти характеристики отображают структуру фосфатной насыщенности в открытых и прибрежных океанских водах.

Вертикальное распределение фосфатной насыщенности открытых вод центральной и южной частей Атлантического океана имеет характерную для всех широтных и гидродинамически различных зон вертикальную структуру. В верхних слоях фосфатная насыщенность меньше, чем в нижележащих. Однако относительное различие между величинами фосфатной насыщенности верхних и нижних слоев неодинаково для различных широтных зон.

Примем, что при полном перемешивании всех слоев поверхностной (200-метровой) толщи океана каждый 50-метровый слой содержит 25% общего количества фосфатов толщи и назовем эту величину *нормой* фосфатной насыщенности слоя для данного квадрата. При сравнении нормы с величинами, вычисленными по фактическим первичным данным, получают следующие показатели (в среднем за ряд лет).

В 0—50-метровом слое продуктивного фотосинтеза фосфатная насыщенность составляет лишь часть нормы: в зоне 10° с.ш.—20° ю.ш.—примерно 30% от нормы (8,3%), что соответствует уменьшению фосфатной насыщенности слоя продуктивного фотосинтеза на 27 мг-атом Р под м<sup>2</sup> в этом слое; в зоне 20—45° ю.ш.—40% от нормы (10%), т.е. уменьшение на 5,3—11,3 мг-атом Р под м<sup>2</sup> в слое; южнее 45 до 70° ю.ш.—12% от нормы (3%), т.е. уменьшение на 7,7 мг-атом Р/м<sup>2</sup> в слое (при фосфатной насыщенности 200-метрового слоя 240 мг-атом Р/м<sup>2</sup>) и 13,5 мг-атом Р/м<sup>2</sup> в слое (при фосфатной насыщенности 200-метрового слоя 400 мг-атом Р/м<sup>2</sup>). Уменьшение фосфатной насыщенности в верхнем 50-метровом слое продуктивного фотосинтеза происходит под влиянием биохимических, химических и физических процессов. Возникает вертикальная составляющая структуры фосфатной насыщенности.

В зоне 30° с.ш.—20° ю.ш. чем больше фосфатная насыщенность подстилающего слоя, тем больше ее абсолютная величина в верхнем 0—50-метровом слое продуктивного фотосинтеза и тем значительнее абсолютное уменьшение фосфатной насыщенности в этом слое по сравнению с насыщенностью нижнего подстилающего слоя (150—200 м) и по отношению к норме для 50-метрового слоя. Относительное уменьшение для всех широтных зон в пределах 30° с.ш. и 20° ю.ш. одного порядка — от 62 до 81% (табл. 3).

Таблица 3

Характеристика фосфатной насыщенности по широтным зонам

Зона	Фосфатная насыщенность (мг-атом Р под м <sup>2</sup> ) в слое			Уменьшение фосфатной насыщенности в слое 0—50 м			
				против нормы		против фосфатной насыщенности слоя 150—200 м	
	0—50 м	150—200 м	0—200 м	мг-атом Р под м <sup>2</sup> слоя	%	мг-атом Р под м <sup>2</sup> слоя	%
	1	2	3	4 (25% III—I)	4 (от 25% III)	5 (II—I)	5 (от II)
30—15° с. ш.	4	21	49	—8	—67	—17	—81
15—10° с. ш.	25	81	259	—40	—62	—56	—69
10° с. ш.—20° ю. ш.	13	64	159	—27	—67	—51	—80
20—40° ю. ш.	7	21	53	—6	—51	—14	—67
40—50° ю. ш.	43	61	203	—8	—16	—18	—30
50—70° ю. ш.	89	111	410	—13	—13	—22	—20

Начиная от 20° ю.ш. к югу, абсолютная величина уменьшения фосфатной насыщенности верхнего 50-метрового слоя продуктивного фотосинтеза резко снижается. По содержанию фосфатов в разных слоях воды зоны 20—40° ю.ш. и 30—15° с.ш. близко совпадают. Однако в южной зоне относительное уменьшение фосфатной насыщенности верхнего 50-метрового слоя (50—67%) меньше, чем в северной зоне (67—81%). От 20° ю.ш. к югу резко снижается абсолютная величина уменьшения фосфатной насыщенности верхнего слоя продуктивного фотосинтеза (табл. 3, графы 4 и 5). Южнее 50° ю.ш. фосфатная насыщенность верхнего слоя опять увеличивается примерно в 1,5 раза против ее значения в более северной зоне (40—50° ю.ш.).

Характеристики наблюдаемого своеобразного «дефицита» фосфатной насыщенности слоя продуктивного фотосинтеза имеют количест-

венно совпадающую, но качественно иную зональную структуру. Так, например, в зоне от 15° с. ш. до 20° ю. ш. «дефицит» фосфатной насыщенности верхнего слоя наибольший. За ней идет зона от 50° ю. ш. к Антарктиде. Но уже в зоне от 40° ю. ш. к югу абсолютный и относительный «дефицит» фосфатной насыщенности в 2—4 раз меньше, чем для других зон; 10—15-градусные изотермы разделяют в зоне около 40° ю. ш. воды верхнего 200-метрового слоя на более теплые, расположенные к северу, и на более холодные, расположенные к югу. Такое же широтное разделение можно обнаружить и по изогалинам: к югу от 40° ю. ш. начинается зона опреснения поверхностных вод, к северу от 40° ю. ш. расположены более соленые воды (35% S). Это опреснение непосредственно у зоны раздела достигает 1,5% (34,5% S), что объясняется, судя по данным гидрохимических исследований, особенностями ледово-антарктического климата.

### Заключение

Поквадратное обобщение большого первичного материала по биогенным элементам, выраженное в виде количественных показателей биогенной насыщенности слоя фотосинтеза и подстилающей его гидродинамически наиболее активной (по сравнению с нижележащими слоями) водной толщи (50—200 м), позволяет выявить океанографические квазистабильные районы (квадраты), содержащие различное количество фосфатов.

Проведен первый этап изучения распределения фосфатной насыщенности. Получены количественные показатели для исследования возможных путей пополнения биогенной химической базы в слое фотосинтетической ассимиляции химических элементов в процессе воспроизводства первичного органического вещества.

Первый этап изучения фосфатной насыщенности вод центральных и южных районов Атлантического океана показал, что в зоне пассатных и экваториального течений формируется и поддерживается определенный квазистабильный максимум фосфатной насыщенности слоя фотосинтеза. Остальные типы циркуляции исследованных океанских вод не нарушают известную обособленность зоны экваториально-тропического максимума фосфатной насыщенности вод от прилегающих к нему с севера и юга районов относительных минимумов ее.

Циркумполярное приантарктическое течение обособляет зону квазистабильного антарктического и субантарктического максимума от прилегающих к ней с севера зон относительного минимума фосфатной насыщенности умеренно-тропических вод.

Если принять с учетом особенностей климатических зон, что величине фосфатной насыщенности поверхностной толщи вод соответствует величина воспроизводства биомассы фитопланктона, то это может служить ориентиром при выборе продуктивных районов (квадратов) исследованных областей Атлантического океана.

Величины фосфатной насыщенности вод в районах максимума и минимума ее различаются до 8—12 раз.

У берегов Африки и Южной Америки фосфатная насыщенность вод выше, чем в открытых прилегающих водах океана; на востоке — в 4 раза и более, на западе — до 2 раз. Наибольшее возрастание фосфатной насыщенности отмечается в квадратах, прилегающих к предустьевым пространствам больших рек. Структура фосфатной насыщенности вод, исследованная в крупномасштабном аспекте, в значительной мере стабильна.

Относительная интенсивность ассимиляции фосфатов к северу от 20—30° ю. ш. больше, к югу от этих широт — меньше. Абсолютные величины этой интенсивности пропорциональны величинам фосфатной насыщенности вод.

Все сказанное дает количественные химико-океанографические показатели для ориентации в распределении биоресурсов и количественную оценку химической основы потенциальных размеров биопродуктивности воды.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- В. Н. Степанов. Структурные зоны Мирового океана. Океанология, Т. VII, Вып. 3. Изд-во «Наука», 1967.
- М. В. Федосов. Условия формирования первичных кормовых ресурсов океана. Труды ВНИРО, Т. LVII, 1965.
- Гидрохимические данные экспедиций в Атлантическом океане с 1925 по 1968 г. Каталоги МЦД-Б и ЦОД.

#### SUMMARY

The mean weighted phosphate content in the photosynthetic zone and the waters underlying it, up to the depth of 200 m, has been calculated using the 5° squares for the area of the Atlantic, south of latitude 30° S.

In the area of trade drifts and in the near — equator and near — arctic waters, zones are recognized of maximum mean weighted phosphate content, which is 8—12 times as high as in the adjacent zones of phosphate minimum (the difference in the salinity of these zones constituting only 1—3%).

In the coastal waters of Africa and South America the mean weighted phosphate content is higher than in the open ocean.

Due to the fact that the mean weighted phosphate content in the surface water layers is associated with the reproductive intensity of the phytoplankton standing crop, it is possible, taking into account the climatic zonation, to locate and evaluate the productive areas of the oceans and seas.