

УДК 551.463.8/550.47(261)

А. А. БЕЗБОРОДОВ, З. П. БУРЛАКОВА, Л. В. ЕРЕМЕЕВА

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И СОСТАВ ВЗВЕСИ В ВОДАХ
СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТРОПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ**

Приводятся результаты многолетних исследований распределения и состава взвешенного вещества в водах у северо-западного берега Африки. Показано влияние крупномасштабной циркуляции, апвеллинга, речного стока и эоловых выпадений на закономерности распределения и формирования биохимического состава взвеси. Определено содержание во взвеси органического углерода, азота, хлорофилла, фитопланктона и микроэлементов-металлов. Установлена сезонная изменчивость в соотношении названных компонентов во взвеси.

Знание закономерностей сезонной изменчивости распределения и состава общей взвеси и ее органической части в различных районах океана необходимо для решения многих проблем экологии, а также построения теории седиментогенеза с учетом биохимических процессов.

Настоящая работа содержит результаты многолетних (1978—1985 гг.) исследований распределения и состава взвеси в водах тропической части Атлантического океана между 8 и 11° с. ш. и 14 и 19° з. д. Пробы воды отбирали винилпластовыми батометрами (автоматическая кассета) или полиэтиленовым ведром (с поверхности) и фильтровали под вакуумом на мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 и 0,85 мкм соответственно для сбора общей взвеси и хлорофилла и стекловолоконистые фильтры GF/C — для взвешенного органического вещества. Концентрацию общей взвеси определяли весовым методом [4], суммарное содержание хлорофиллов и феофитина — флуориметрическим методом [5], органического углерода и азота во взвешенном веществе — на CHN-анализаторе производства Чехословакии. Определение микроэлементов-металлов во взвеси проводили после предварительной обработки (разложение и экстракция диэтилдитиокарбоматом натрия и 8-оксихинолином) на спектрофотометре «Сатурн».

Исследованиями были охвачены область шельфа мористее изобаты 20 м, континентальный склон и глубоководная часть океана. Ширина шельфа в среднем составляет 150—200 км, а его внешний край на глубине 100—110 м простирается практически параллельно береговой линии (рис. 1). Для материкового склона свойственны в целом малые углы наклона (1—4°) слабое расчленение и вогнутая форма профиля. Ширина склона не превышает 200 км, а высота составляет 2500—3000 м.

По результатам гидролого-гидрохимических исследований в данном районе выделено три периода, характеризующихся различной интенсивностью динамики воды и речного стока [1]. Во влажный период (июль — октябрь) северо-восточный пассат ослаблен и весь район занят водами Межпассатного противотечения (МПТ). В это время выпадает максимальное количество осадков (до 1300 мм) и наблюдается самый большой речной сток. В сухой период (январь — май) северо-восточный пассат наиболее развит, Межпассатное течение ослабевает, в пределы исследуемого района проникают воды Канарского течения (КТ) и наблюдается интенсивный прибрежный апвеллинг. Осадков в это время не выпадает вообще и речной сток минимален. Сильным ветром с континента выносится большое количество пыли. Переходный период (ноябрь — декабрь) характеризуется постепенным усилением северо-восточного пассата и эолового выноса, отсутствием атмосферных осадков и ослаблением речного стока.

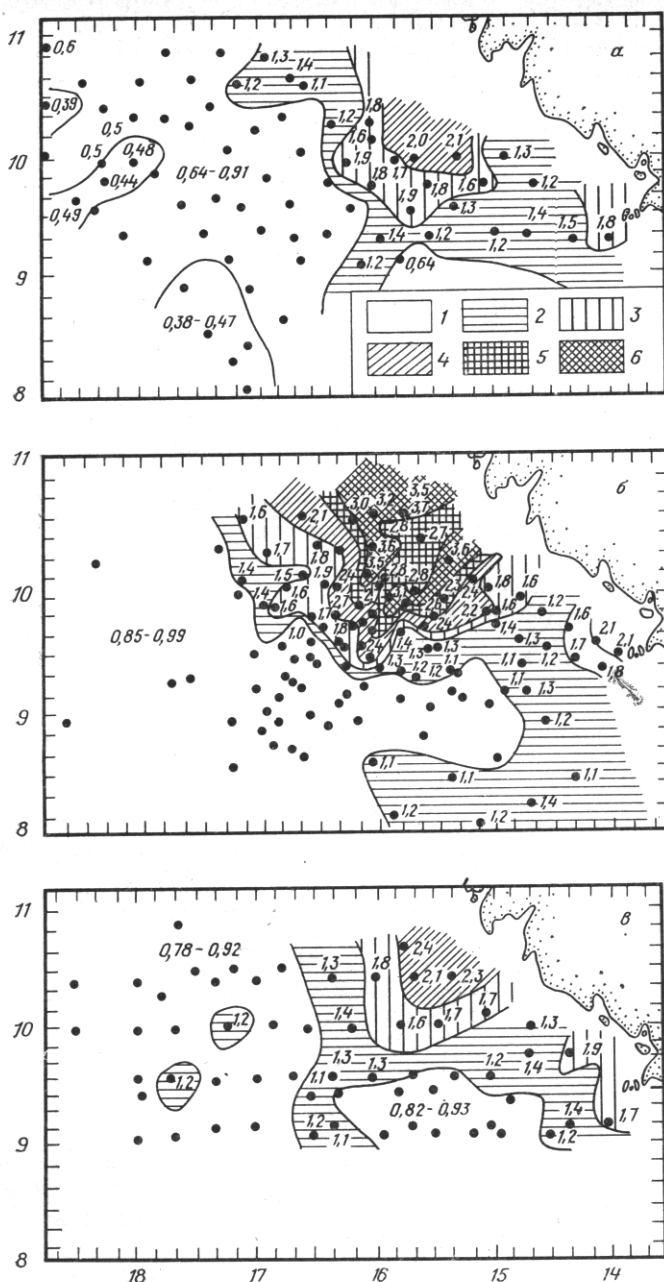


Рис. 1. Распределение взвеси на поверхности, мг/л
 а — в августе — октябре, б — в марте — мае, в — ноябре — декабре.
 1 — <1; 2 — 1—1,5; 3 — 1,5—2,0; 4 — 2,0—2,5; 5 — 2,5—3,0; 6 — >3,0

Общий характер распределения взвеси и ее абсолютные концентрации для отдельного периода в различные годы практически одинаковы. Это находится в соответствии со слабой межгодовой изменчивостью гидролого-гидрохимических и метеорологических обстановок для каждого периода и позволяет объединить полученные в разные годы данные на картах распределения взвеси в поверхностном слое (рис. 1).

Во все три выделенных периода максимальные концентрации взвеси наблюдаются на северо-востоке и юго-востоке района исследования. При удалении в мористую часть концентрация быстро убывает и за пределами континентального склона становится практически постоянной. В целом концентрация взвеси на поверхности возрастает от влажного периода к сухому.

Средние характеристики взвешенного органического вещества в поверхностных водах

Период	Район	C _{орг}		Хлорофилл, мг/м ³	C _{орг} хлорофилл	Биомасса фитопланктона		С живого фитопланктона *** C _{орг} , %
		мг/м ³	во взвеси, %			мг/м ³ **	в сухой взвеси, %**	
Влажный (июль-октябрь)	Шельф	164	14,2	0,25	610	56	0,38	0,82
	Глубоководная часть	74	11,1	0,05	1480	6,7	0,04	0,22
Переходный (ноябрь-декабрь)	Шельф	138	11,5	0,31	445	114	0,76	2,10
	Глубоководная часть	67	8,4	0,06	1120	12	0,12	0,43
Сухой (январь-май)	Шельф (зона действия КТ)	295	16,4	1,18	238	1950	8,2	15,90
	Шельф (вне зоны КТ)	152	11,7	0,38	400	346	2,1	5,5
	Глубоководная часть	81	9,0	0,12	675	21	0,18	0,62

* По данным, любезно предоставленным Л. В. Кузьменко.

** Сухая биомасса фитопланктона принималась равной 8% от сырой.

*** Содержание углерода в фитопланктоне принималось равным 30%.

Из минеральных компонентов в составе взвеси преобладают тонкодисперсные — каолинит, монтмориллонит, иллит, гидроокислы железа. Содержание карбоната кальция составляет от 5 до 20%, аморфного SiO₂ — от 2 до 7%. Количество органического вещества не превышает 40% (в среднем 26%) от массы взвеси. Это в основном растительный (береговой) детрит и отмерший планктон. Фитопланктон взвеси на шельфе практически полностью (90—95%) представлен диатомовыми. За пределами склона появляются перидинеи и количество диатомовых снижается до 60—70%. Для всех периодов характерны наиболее высокие концентрации органических компонентов взвеси на севере и востоке района исследования.

Максимальная биопродуктивность наблюдается в зоне действия КТ и апвеллинга при их интенсивном развитии в сухой период (март — май). Здесь часто визуально заметно цветение диатомовых водорослей, биомасса которых в поверхностных водах достигает 5 г/м³. В результате значительно увеличивается концентрация взвешенного органического углерода (ВОУ) и хлорофилла в водах всего района исследования, и особенно в водах КТ и апвеллинга (табл. 1). В сухой период отмечены также минимальные отношения концентраций ВОУ и хлорофилла, что свидетельствует об увеличении доли органического вещества фитопланктона в общем ВОВ. Возрастанию концентрации ВОВ в это время в поверхностных водах способствует также действие чисто физического фактора — подъема к поверхности слоя сезонного пикноклина, где, как известно, обычно накапливается органический детрит.

Существенное возрастание концентрации ВОУ в сухой период очень слабо отражается на его процентном содержании в общей взвеси. Следовательно, одновременно возрастает концентрация минеральной взвеси на поверхности, видимо, в основном за счет эоловых осадений. В результате многомесячных сборов атмосферной пыли в этом районе установлено, что ее поток на поверхность прибрежных вод составляет в январе — мае в среднем 54 мг/м² в сутки (нерастворимая в воде составляющая). Это значение в 10—15 раз превышает средние данные по все-

му океану [3]. Содержание органического вещества в атмосферной пыли не превышает 5%, а минеральный состав соответствует таковому для водной взвеси.

Таким образом, возрастание концентрации общей взвеси в водах исследуемого района в сухой период (рис. 1) обусловлено как значительным повышением биологической продуктивности вод района (биогенная составляющая взвеси), так и активным поступлением атмосферной пыли на поверхность океана. Роль названных факторов в формировании структуры распределения и состава взвеси в данном районе превышает значение речного стока.

Огромное количество взвеси, поступающее с речным стоком во влажный период, в значительной степени задерживается и осаждается на мелководье (глубины шельфа < 20 м) и в эстуариях благодаря характерной динамике вод в пределах приливной барьерной зоны [1, 2]. Биологическая продуктивность вод шельфа в это время мала, а поступления эоловой пыли из атмосферы практически не происходит. Эти причины обуславливают снижение концентрации общей взвеси и ВОВ во влажный период в водах исследуемого района. Кроме того, меньшая плотность поверхностных вод шельфа во влажный период способствует снижению концентрации взвеси на поверхности и ее накоплению в слое скачка. Максимальные отношения $ВОУ$ к хлорофиллу, наблюдаемые во влажный период, являются следствием преобладания берегового растительного детрита в составе ВОВ. В переходный период поступление взвеси с речным стоком еще более сокращается, но биологическая продуктивность вод шельфа и поступление эоловой пыли несколько возрастают по сравнению с этими показателями во влажный период. В результате в это время концентрация общей взвеси и ее органических составляющих остаются примерно на уровне влажного периода.

Несмотря на высокие концентрации взвеси в водах шельфа, ее осадения здесь практически не происходит из-за высокой динамической активности вод и тонкодисперсности частиц. Рассмотренный район шельфа (глубины 20–120 м), следовательно, является зоной транзита осадочного материала.

Распределение взвеси по вертикали в области шельфа и континентального склона, как правило, характеризуется одним максимумом, расположенным в слое пикноклина. Лишь в местах наиболее резкого изменения глубины появляется второй максимум у дна. Вертикальная структура ВОВ в общем подчиняется такой же закономерности (рис. 2). Во все периоды в слое скачка плотности наблюдается максимум $ВОУ$, органического азота и хлорофилла. Летом и осенью динамическая обстановка в районе довольно спокойная, а подъем вод, происходящий над свалом глубин, слабый и не достигает поверхности. Концентрация $ВОУ$ в это время в слое пикноклина на шельфе изменяется в пределах 120–180 мг/м³, над свалом глубин — 100–130 мг/м³ и в глубоководной части района — 70–90 мг/м³. Резких изменений концентрации $ВОУ$ по глубине и горизонтали в водной толще не наблюдается (рис. 2). Присутствие на шельфе КТ активизирует динамическую обстановку. В холодных продуктивных водах этого течения наблюдаются повышенные концентрации органического вещества на всех глубинах. Возникающий мощный апвеллинг по склону обостряет пикноклин, что приводит к накоплению в подповерхностных водах шельфа большого количества $ВОУ$ (до 450 мг/м³). Глубокие апвеллинговые воды, выходя на шельфе на поверхность, разрывают слой пикноклина и создают локальные участки подповерхностных вод с пониженным содержанием органического вещества. В результате распределение $ВОУ$ в зоне шельфа и континентального склона характеризуется значительными градиентами как по вертикали, так и по горизонтали (рис. 2).

Минимальные отношения $ВОУ$ к хлорофиллу (70–220) во все периоды наблюдаются в слое пикноклина (рис. 2). Осенью они составляют менее 100, что близко к отношению, типичному для природных популяций фитопланктона [7, 8]. В сухой период отношение $ВОУ$ к хлорофил-

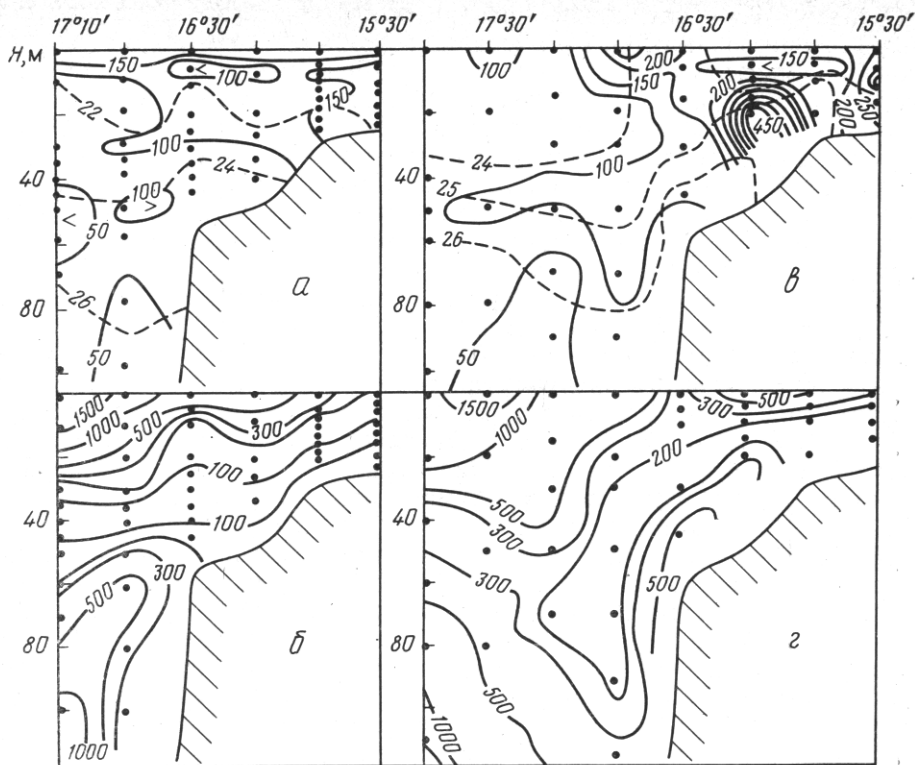


Рис. 2. Распределение БОУ (а, в) и БОУ/Хл (б, г) по 10° с. ш.
Пунктирная линия — условная плотность воды; а, б — ноябрь, в, г — январь

лу в слое пикноклина несколько повышается (150–220), что, видимо, связано с интенсивным подъемом глубинных вод, обедненных планктоном. Преимущественное накопление планктоногенной взвеси относительно минерального и органического берегового детрита на естественном плотностном барьере, возможно, обусловлено разницей в собственной плотности этих составляющих.

На разрезах между 10 и 11° с. ш. несколько мористее свала глубин хорошо заметно опускание поверхностных вод вместе с органической взвесью в более глубокие слои. Этот процесс наиболее интенсивен в сухой период. Поскольку глубины здесь небольшие — 200–400 м, а поверхностные воды отличаются высокой биологической продуктивностью, то вследствие их интенсивного опускания на дно должно поступать большое количество свежего слабоминерализованного органического вещества. Следовательно, в этом районе (между 10 и 11° с. ш. и 16°40′–17° з. д.) в донных отложениях можно ожидать наличия активно идущих диагенетических процессов и диагенетических образований, например фосфоритов.

Распределение взвешенного органического азота на разрезах в целом повторяет распределение БОУ. Концентрация азота в верхнем перемешанном слое на юге района варьирует от 8,0 до 18,0 мг/м³, а на севере от 10,0 до 30 мг/м³ и совпадает с величинами, полученными для поверхностных вод зон прибрежных апвеллингов у Сенегала и Гамбии [10] и прибрежных районов у мыса Кап-Блан [11]. Максимальные концентрации взвешенного органического азота на шельфе и склоне характерны для пикноклина (20–50 мг/м³). Ниже концентрация взвешенного азота уменьшается до 4–8 мг/м³. Атомарное отношение С : N варьирует на исследованной акватории в слое 0–150 м в пределах 3,3–31,0, а интегральные отношения под слоем фотосинтеза изменяются от 7,8 до 9,5. Это совпадает с данными по С : N, полученными для фотического слоя различных зон Мирового океана Честером и Стонером [6] и для при-

Вертикальное распределение взвеси и ее органических и минеральных компонентов в водах глубоководной части района на станции с координатами 9°35' с. ш., 17°50' з. д. (ноябрь 1984 г.)

Параметр	Горизонт, м							
	0	30	75	100	200	500	800	1100
T, °C	28,7	26,4	16,8	15,4	13,6	9,3	6,1	4,8
O ₂ мл/л	4,67	4,25	2,25	1,87	2,13	1,24	2,38	3,59
Взвесь, мг/м ³	485	510	690	440	330	290	280	250
C _{орг} , мг/м ³	58	41	98	37	56	32	21	14
C _{орг} , % во взвеси	11,9	8,0	14,2	8,4	16,9	11,0	7,5	5,6
N _{орг} , мг/м ³	11,4	9,6	36,5	9,2	18,0	4,8	3,8	2,2
N _{орг} , % во взвеси	2,3	1,8	5,3	2,1	5,4	1,6	1,4	0,9
Fe _{взв} , мкг/л	0,93	0,71	1,36	0,61	0,72	0,28	0,45	0,38
Fe, % во взвеси	0,192	0,139	0,197	0,139	0,218	0,097	0,161	0,152
Mn _{взв} , мкг/л	0,031	0,025	0,048	0,036	0,029	0,011	0,025	0,021
10 ⁻⁴ Mn, % во взвеси	62	49	69	82	88	38	89	84
Cu _{взв} , мкг/л	0,16	0,11	0,26	0,15	0,13	0,13	0,11	0,10
10 ⁻⁴ Cu, % во взвеси	330	216	377	340	394	448	393	400
Zn _{взв} , мкг/л	0,13	0,18	0,39	0,21	0,19	0,18	0,14	0,15
10 ⁻⁴ Zn, % во взвеси	268	353	565	478	576	621	501	600
Ni _{взв} , мкг/л	0,08	0,06	0,13	0,11	0,07	0,04	0,06	0,06
10 ⁻⁴ Ni, % во взвеси	164	117	188	250	214	138	214	240
Pb _{взв} , мкг/л	0,07	0,08	0,13	0,11	0,08	0,04	0,05	0,06
10 ⁻⁴ Pb, % во взвеси	144	157	188	250	242	138	179	240

брежных вод северо-западного Африканского апвеллинга [11]. В верхнем квазиоднородном слое отношение C:N изменяется от 6,3 до 15,5. В слое термоклина оно в основном меньше — от 6,0 до 8,4. Наиболее низкие отношения характерны для проб взвеси, отобранных в ночное время, и, по-видимому, связаны с миграциями зоопланктона. Не исключено, что причиной низких отношений в апвеллинговых зонах может быть скопление большого количества азотсодержащего детрита [9].

Характерные особенности вертикального распределения ВОВ в водах глубоководной части района показаны в табл. 2 на примере одной из станций. В отличие от вод шельфа здесь повсеместно наблюдается существование двух максимумов ВОВ. Верхний — в слое пикноклина (≈ 75 м) и нижний — в слое промежуточного максимума кислорода, расположенного между двумя его минимумами (200–250). Процентное содержание ВОВ в общей взвеси на этих глубинах также максимально. Глубже 250 м концентрация ВОВ и его доля в общей взвеси уменьшаются практически экспоненциально.

Образование нижнего максимума ВОВ, в отличие от верхнего, происходит в отсутствии естественного плотностного барьера и не сопровождается увеличением концентрации общей взвеси. Видимо, его происхождение тесно связано с особенностями формирования в этом районе 2-минимумной структуры кислорода [1] и обусловлено совокупностью динамических и биохимических факторов.

Распределение по вертикали взвешенных микрокомпонентов — металлов коррелирует с ВОВ. В слоях с максимальным содержанием ВОВ наблюдается увеличение концентрации металлов и их доли в составе взвеси. Распределение железа и марганца отличается от других металлов наличием явно выраженного минимума концентрации взвешенной формы и процентного содержания во взвеси в слое основного минимума кислорода. Возможно, это объясняется повышением растворимости соединений железа и марганца при уменьшении окислительно-восстановительного потенциала среды. В целом наблюдается уменьшение кон-

центрации взвешенных металлов с глубиной, что соответствует снижению концентрации общей взвеси и ВОВ. Однако процентное содержание металлов во взвеси с глубиной даже несколько повышается. Это, видимо, обусловлено нахождением большей части металлов в наиболее устойчивой к разложению составляющей взвеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безбородов А. А., Булгаков Н. П., Еремеев В. Н. и др. Гидрохимия Гвинейского сектора Атлантики. Препринт 35-85. Киев: ИГН АН УССР, 1985. 49 с.
2. Безбородов А. А., Емельянов В. А. Приливная зона шельфа как геохимический барьер//Докл. АН УССР. Сер. Б. 1985. № 9. С. 3—6.
3. Безбородов А. А., Еремеев В. Н. Физико-химические аспекты взаимодействия океана и атмосферы. Киев: Наук. думка, 1984. 192 с.
4. Витюк Д. М. Взвешенное вещество и его биогенные компоненты. Киев: Наук. думка, 1983. 209 с.
5. Бурлакова З. П., Юнев О. А. Распределение хлорофилла в центральной части Карибского моря//Океанографические исследования Карибского моря и прилегающих районов. Киев: Наук. думка, 1980. С. 102—109.
6. Chester R., Stoner J. H. The distribution of particulate organic carbon and nitrogen in some surface waters of the World Ocean//Marine Chem. 1974. V. 2. N 4. P. 263—275.
7. Clark D. K., Baker E. T., Strong A. E. Upwelled spectral radiance distribution in relation to particulate matter in sea water//Bound air-layer Meteorol. 1980. V. 18. N 3. P. 287—298.
8. Eppley R. W., Harrison W. G., Chisholm S. W., Stewart E. Particulate organic matter in surface water of South California and its relationship to phytoplankton//J. Mar. Res. 1977. V. 35. N 4. P. 671—696.
9. Knauer G. A., Martin J. H., Bruland K. N. Fluxes of particulate carbon, nitrogen and phosphorus in the upper water column of the northeast Pacific//Deep Sea Res. 1979. V. 26. N 1A. P. 97—108.
10. Pocklington R., MacKinnon M. D. Organic matter in upwelling off Senegal and the Gambia//Rapp. P.—V. Cons. int. Explor. Mer., 1982. V. 180. P. 254—265.
11. Slawyk G. V., Collos Y., Minas M., Grall J. R. On the relationship between carbon-to-nitrogen composition ratios of the particulate matter and growthrate of marine phytoplankton from the Northwest African upwelling area//J. exp. mar. Biol. Ecol. 1978. V. 33. P. 119—131.

Морской гидрофизический институт
АН УССР, Севастополь

Институт биологии южных морей
им. А. О. Ковалевского АН УССР, Севастополь

Поступила в редакцию
10.VIII.1987

После доработки
24.II.1988

A. A. BEZBORODOV, Z. P. BURLAKOVA, L. V. EREMEEVA

DISTRIBUTION AND COMPOSITION OF SUSPENDED MATTER IN WATERS OF THE NORTH-EASTERN TROPICAL ATLANTIC

The paper presents results of research of many years on the distribution and composition of suspended matter in waters off the north-western coast of Africa. It is shown how the large-scale circulation, upwelling, river run-off and fall of soils affect the regularities of distribution and formation of biochemical composition of suspended matter. Determined is the content of suspended organic carbon, nitrogen, phytoplankton, total chlorophyll and metal trace elements. It is established that ratios of the above components of suspended matter vary seasonally.