

## ГЕОХИМИЯ

## GEOCHEMISTRY

УДК 551.464.38

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

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ВЗВЕШЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА  
В ЧЕРНОМ МОРЕ***(Представлено академиком АН Украины В. И. Беляевым)*

Органическое вещество в Черном море служит источником энергии для многих биохимических и физико-химических процессов, регулирующих равновесие между аэробной и анаэробной обстановками. Вместе с тем вертикальное распределение органического вещества, особенно в анаэробных водах, практически не изучено.

МГИ АН Украины совместно с ИнБЮМ АН Украины проводили регулярные исследования распределения взвешенного органического вещества (ВОВ) в Черном море на протяжении последних пяти лет. Особое внимание уделялось зоне взаимодействия аэробных и анаэробных вод, где отбор проб по вертикали проводился с дискретностью 10 м. Пробы воды фильтровались под вакуумом через стекловолокнистые фильтры GF/F. Определение углерода и азота проводили на CHN-анализаторе (Чехо-Словакия).

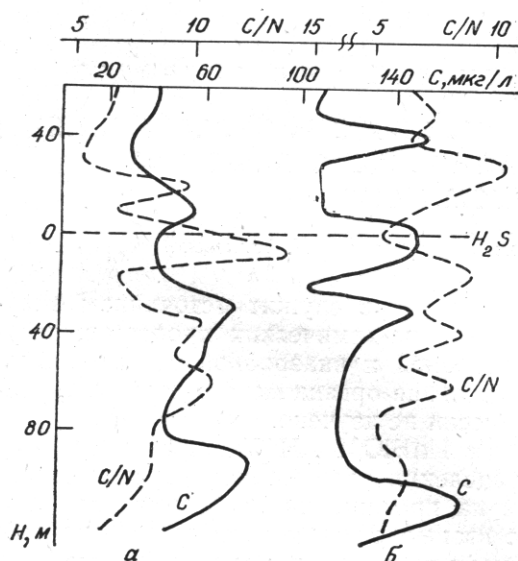
Наиболее высокая концентрация взвешенного органического углерода (ВОУ) характерна для поверхностного слоя, толщиной 30—40 м в центральных районах глубоководной части моря и 60—80 м — на периферии и склонах (табл. 1). В марте — апреле и октябре она достигает значений 150—250 мкг/л в связи с интенсивным развитием первичной продукции. Минимальные концентрации наблюдались в конце ноября — декабря (80—110 мкг/л). В остальные месяцы концентрация ВОУ в поверхностном слое находится примерно на одном уровне — 100—140 мкг/л. Почти во все сезоны, кроме зимы и ранней весны, в поверхностном слое отмечались один-два максимума ВОВ, связанные с наличием сезонного скачка плотности или с активным развитием фитопланктона. В среднем доля живого планктона в суммарном ВОУ поверхностного слоя составляет около 20 %. Изменение отношения

**Таблица 1. Среднее содержание ВОУ (мкг/л) в поверхностном слое  
глубоководной части Черного моря**

| Горизонт, м | Концентрация ВОУ |      |     |      |         |
|-------------|------------------|------|-----|------|---------|
|             | январь           | март | май | июнь | декабрь |
| 0           | 140              | 200  | 116 | 124  | 112     |
| 20          | 128              | 195  | 105 | 138  | 98      |
| 30          | —                | —    | 117 | 109  | 65      |
| 40          | 98               | 180  | —   | —    | —       |
| 50          | 45               | 86   | 103 | 29   | 36      |
| 70          | 39               | 54   | 85  | 28   | 30      |
| 100         | 32               | 57   | 68  | 23   | 34      |

C:N во все сезоны находится в пределах 6—10, C:P — 250—400 (в атомном выражении).

Под поверхностным слоем концентрация ВОВ резко уменьшается и до глубин 100—150 м находится в пределах 30—80 мкг/л в зависимости от сезона и района измерений. Однако именно здесь, на фоне общего уменьшения концентрации ВОВ, обнаружены узкие слои вод со значительно повышенным его содержанием (рис. 1, 2). Концентрация ВОУ в максимумах достигает 80—100 мкг/л летом и осенью, при



фоне 50 мкг/л, и 150—200 мкг/л — весной, при фоне 80 мкг/л. Один из максимумов ВОВ нередко наблюдается на 25—40 м выше границы  $H_2S$ -зоны, в нижней части оксиклина. Как правило, он совпадает с максимумом биогенных элементов и, видимо, связан с присутствием на этих горизонтах плотных скоплений зоопланктона.

Максимумы ВОВ находят-ся непосредственно над или на

Рис. 1. Осредненные профили распределения ВОУ и отношения C:N относительно границы  $H_2S$ -зоны для: а — ноября 1989 г., б — апреля—мая 1988 г.

границе  $H_2S$ -зоны (первый) и ниже ее на 20—40 м (второй). Иногда на профиле наблюдается объединение этих двух максимумов в один. Ниже границы  $H_2S$ -зоны, примерно на 100 м, также всегда существует максимум ВОВ. В центральных районах моря он может быть на глубинах 180—220 м, а в периферийных — на 250—300 м. Одним из источников формирования этих максимумов, очевидно, является детрит, оседающий из слоя плотного скопления зоопланктона и поверхностных вод. Оседающий детрит концентрируется в узких слоях вод с пониженным градиентом плотности (плотностная ниша). Длительные наблюдения показали, что со временем происходит некоторое перемещение максимумов ВОВ по вертикали ( $\pm 30$  м) параллельно с изменением структуры распределения градиента плотности. Причем на положение максимумов влияют даже очень малые вариации градиента плотности, наблюдаемые ниже границы  $H_2S$ -зоны (см. рис. 2).

Очевидно, что наличие плотностной ниши является лишь необходимым, но не достаточным условием для формирования максимумов ВОВ на данном горизонте. На концентрирование ВОВ в отдельных узких слоях вблизи границы  $H_2S$ -зоны существенное влияние оказывают специфические физико-химические и биохимические процессы. Так, именно в зоне взаимодействия аэробных и анаэробных вод наблюдаются интенсивные бактериальная деятельность и процесс хемосинтеза [1, 2]. При этом отмечается явная схожесть расположения по вертикали максимумов ВОВ, биомассы бактерий [1, 3] и скорости хемосинтеза [1, 2]. Расчеты показывают, что в большинстве случаев образование максимумов ВОУ не может происходить непосредственно за счет углерода живых бактерий. Однако бактериальный детрит, очевидно, постоянно и существенно пополняет запасы ВОВ в слоях его максимумов. Это подтверждается распределением C:N в зоне взаимодействия (см. рис. 1). При уменьшении органического вещества во взвеси под оксиклином, отношение C:N в нем повышается, что свидетельствует о его присутствии здесь в значительно минерализованном виде. Непосредст-

венно на или над границей  $H_2S$ -зоны в максимуме ВОВ отношение  $C:N$  опять становится примерно таким же, как в поверхностном слое, что возможно при поступлении во взвесь свежего органического вещества. Активная минерализация и деструкция этого органического вещества происходит в верхней части анаэробной зоны, где  $C:N$  снова резко увеличивается. Распределение  $C:N$  относительно других максимумов ВОВ под границей  $H_2S$ -зоны примерно аналогично описанному. Возможно, и в их формировании заметную роль играют бактерии и хемосинтез.

Образованию и удержанию максимумов ВОВ на определенных горизонтах зоны взаимодействия аэробных и анаэробных вод способст-

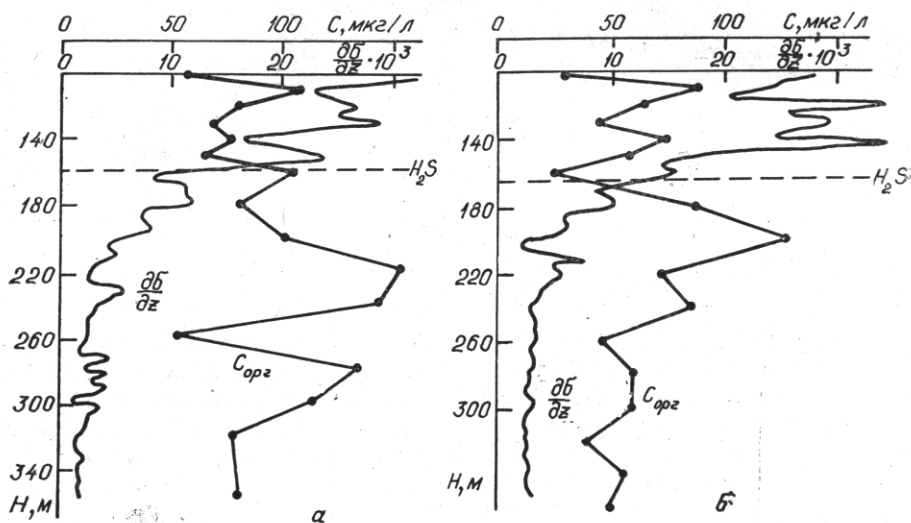


Рис. 2. Распределение ВОВ и градиента плотности на станции 6431 ( $41^{\circ}10'$  с. ш.  $31^{\circ}15'$  в. д.) 20 июня 1990 г.: а — ночью (01.00—04.30 час), б — днем (11.00—15.00 час.).

вуют также процессы образования гидроксидов железа и марганца у границы  $H_2S$ -зоны и нерастворимых сульфидов — ниже границы примерно на 100 м. Глубина залегания максимумов ВОВ, как правило, совпадает со слоем повышенных содержаний железа и марганца во взвеси [4]. Экспериментально нами также показано, что свежесформированные коллоидные гидроксиды железа и марганца способны активно сорбировать органическое вещество из раствора и ассоциировать с ВОВ, уже отмеченном на этом горизонте.

Концентрация ВОВ в глубоких водах анаэробной зоны до дна сохраняется на уровне фоновой для зоны взаимодействия (табл. 2). На отдельных горизонтах всех станций наблюдались максимумы ВОВ, иногда со значительным возрастанием его концентрации (в 2—3 раза) по сравнению с выше и ниже расположенными водами. На горизонтах максимумов ВОВ отмечалось снижение  $C:P$  и увеличение фосфора во взвеси, что, видимо, обусловлено выведением фосфатов из раствора в твердую фазу. Установлено также существенное уменьшение  $SO_4:Cl$  в слоях максимумов ВОВ. Вероятно, именно эти максимумы обеспечивают локальные очаги сульфатредукции в глубоких водах Черного моря.

Закономерного изменения отношения  $C:N$  в максимумах нами не обнаружено, но в целом в глубоких водах Черного моря наблюдалось некоторое его уменьшение по сравнению со слоем 0—300 м (табл. 2). Это не согласуется с результатами, полученными для океанских вод [5], где  $C:N$  во взвеси возрастает с глубиной в связи с большей подвижностью азота по сравнению с углеродом в процессе разложения и минерализации ВОВ. Уменьшение  $C:N$  с глубиной в Черном море может быть обусловлено либо особым составом анаэробных микроорганизмов, либо активной микробиологической деятельностью, обеспечи-

Таблица 2. Содержание ВОВ в анаэробной зоне Черного моря

| Номер станции | Район                     | Месяц, год     | Горизонт, м | C, мкг/л | N, мкг/л | C: N, ат |
|---------------|---------------------------|----------------|-------------|----------|----------|----------|
| 6115          | Центр восточной халистазы | Ноябрь 1989 г. | 200         | 107,1    | 15,3     | 8,2      |
|               |                           |                | 250         | 69,2     | 10,2     | 7,8      |
|               |                           |                | 350         | 49,4     | 5,1      | 11,4     |
|               |                           |                | 400         | 103,1    | 10,2     | 11,7     |
|               |                           |                | 500         | 51,2     | 11,1     | 5,4      |
|               |                           |                | 800         | 58,3     | 10,7     | 6,4      |
|               |                           |                | 1000        | 98,1     | 18,2     | 6,2      |
|               |                           |                | 1200        | 48,1     | 9,8      | 5,7      |
|               |                           |                | 1500        | 62,2     | 13,1     | 5,6      |
|               |                           |                | 1940        | 66,3     | 16,0     | 4,8      |
| 3397          | Склон около Крыма         | Май 1988 г.    | 250         | 95,1     | 16,8     | 6,6      |
|               |                           |                | 300         | 80,2     | 16,8     | 5,6      |
|               |                           |                | 350         | 121,4    | 22,6     | 6,3      |
|               |                           |                | 400         | 71,4     | 10,6     | 7,9      |
|               |                           |                | 500         | 75,7     | 11,9     | 7,4      |
|               |                           |                | 800         | 116,2    | 31,1     | 4,4      |
|               |                           |                | 1000        | 73,5     | 20,2     | 4,2      |
|               |                           |                | 1200        | 71,4     | 23,8     | 3,5      |
|               |                           |                | 1240        | 123,3    | 33,3     | 4,3      |

вающей постоянную подпитку взвеси свежим органическим веществом. Значительное влияние бактерий на состав ВОВ глубоких вод Черного моря подтверждается данными о возрастании их биомассы и концентрации от промежуточных вод до дна [6], а также наличием хемосинтеза, как минимум, до глубины 400 м [2]. Перечисленные сведения противостоят распространенному мнению о затухании бактериальной деятельности в глубоких водах Черного моря [1].

*Z. P. Burlakova, L. V. Eremeeva, A. A. Bezborodov*

#### REGULARITIES OF VERTICAL DISTRIBUTION OF SUSPENDED ORGANIC MATTER IN THE BLACK SEA

##### Summary

The regularities of vertical distribution of suspended organic matter (SOM) in the Black Sea are shown on the basis of data obtained for many years. The seasonal variability of SOM concentration is observed in the surface layer. The characteristic peaks of SOM caused by the density structure, biochemical and physico-chemical processes are found in the zone of the aerobic and anaerobic water interaction. The causes of vertical changes in C: N ratio are discussed.

1. Сорокин Ю. И. Черное море.— М.: Наука, 1982.— 216 с.
2. Безбородов А. А., Бурлакова З. П., Гулин М. Б. и др. Биохимические процессы в зоне взаимодействия аэробных и анаэробных вод в Черном море // Комплексные океанографические исследования Черного моря.— Севастополь, 1990.— С. 148—163.
3. Сажин А. Ф., Копылов А. И. Бактериопланктон кислородной зоны Черного моря // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря.— М.: Наука, 1989.— С. 122—138.
4. Безбородов А. А. Тонкая геохимическая структура зоны взаимодействия аэробных и анаэробных вод в Черном море // Комплексные океанографические исследования Черного моря.— Севастополь, 1989.— С. 131—152.
5. Романкевич Е. А. Состав органического вещества // Химия океана.— М.: Наука, 1979.— Т. 1.— С. 266—177.
6. Сажин А. Ф. Бактериопланктон открытых районов Черного моря весной 1984 г. // Современное состояние экосистемы Черного моря.— М.: Наука, 1987.— С. 118—126.

Мор. гидрофиз. ин-т АН Украины, Севастополь  
Ин-т биологии южн. морей АН Украины, Севастополь

Поступило 28.11.91