

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ "СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ
РЕКРЕАЦИОННЫХ СИСТЕМ"

№ 5804-В84

УДК.551.464.001.573

В.И.Беляев, Е.Е.Совга, В.А.Чепкасова

ОЦЕНКА ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СЕРОВОДОРОДНОЙ
ЗОНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО МОДЕЛИ ЕЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Гидрохимическая структура сероводородной зоны Черного моря формируется под влиянием взаимосвязанных гидрохимических, микробиологических и гидрофизических процессов. Оценка ее по натурным данным в настоящее время связана с определенными трудностями в результате плохой обеспеченности микробиологическими данными, по которым в условиях Черного моря можно судить об убыли и приросте сероводорода в море. Выполненные до настоящего времени оценки первичной продукции в бассейне, которые являются основой для расчета интенсивности сульфатредукции, не совсем корректны, поскольку в оценке процессов, связанных с убылью сероводорода в результате его окисления, не учитывался микробиологический механизм. В результате в расчетах убыли и прироста сероводорода в море проявился определенный дисбаланс, что вызвало поиски новых, кроме микробиологических, источников сероводорода в Черном море.

Целью моделирования экосистемы сероводородной зоны, кроме прогнозной оценки ее состояния, является получение расчетных оценок баланса сероводорода в море. В настоящей работе рассмотрены первые результаты моделирования, связанные с оценкой гидрохимической структуры зоны при постоянных гидродинамических параметрах, с учетом протекающих в море микробиологических процессов (сульфатредукции, бактериального окисления сероводорода).

Экологическая система сероводородной зоны Черного моря представлена, в основном, анаэробными и микроаэрофильными

ми бактериями. Основными компонентами данной экосистемы являются сероводород и окисляющий его кислород, промежуточные и конечные продукты процесса окисления сероводорода, а также углерод органических соединений, сульфатредуцирующие и тионовые бактерии.

Модель экосистемы зоны представлена в работе /1/. В основу модели положены процессы, протекающие в сероводородной зоне, и их взаимосвязи, наиболее полно описанные в монографии Б.А.Скопинцева /2/. Одной из важнейших задач при реализации модели является выбор констант и различных коэффициентов перевода, отражающих взаимосвязи компонент экосистемы. При чем только две константы и один коэффициент перевода связаны непосредственно с химическими процессами. Это константы скорости окисления сероводорода K_s и скорости потребления кислорода K_o в реакции окисления. Эти константы взяты из работы /2/ и пересчитаны нами /3/ в соответствии с размерностями, принятыми в расчетах. Коэффициент перевода кислорода в эквивалентное количество тиосульфатов рассчитан по стехиометрическому соотношению реакции окисления тиосульфатов.

Основные сложности в работе с моделью были связаны с выбором констант и коэффициентов перевода микробиологического блока модели, который представлен 19 константами и коэффициентами. Трудность выбора и расчета этих констант и коэффициентов связана также с тем, что для Черного моря натурные данные по микробиологическим процессам очень скудны и ограничены практически работами Ю.И.Сорокина /5/.

Остановимся кратко на тех допущениях и основных источниках, которыми мы пользовались при выборе и расчете констант и коэффициентов микробиологического блока модели. Данные по удельной скорости роста тионовых бактерий, их рационам и смертности были взяты из работы /4/, и затем пересчитаны, исходя из численности тионовых бактерий для условий Черного моря /5/. Данные по скорости образования сероводорода при сульфатредукции взяты из /6/ и пересчитаны нами, исходя из условий Черного моря и численности сульфатредуцирующих бактерий, приведенных в работах /2,5/. При расчете смертности сульфатредуцирующих бактерий, усвояемости ими органического вещества использовали данные, представленные в работах /2,6/. Все используемые в расче-

Таблица констант и коэффициентов перевода

Таблица I

№ : Обознач.		: Величина:Размерность:		Название
1	M_{I6}	$4,19 \cdot 10^{-5}$	мгТВ/л.сек	Удельные скорости образования биомассы тионовых бактерий за счет потребления O_2 , H_2S и S_2O_3 соответственно
2	M_{26}	$3,57 \cdot 10^{-5}$	- " "	
3	M_{36}	$2,39 \cdot 10^{-5}$	- " -	
4	R_{I6M}	$6,29 \cdot 10^{-5}$	- " -	Максимальные рационы потребления тионовыми бактериями O_2 , H_2S и S_2O_3 соответственно
5	R_{26M}	$5,36 \cdot 10^{-5}$	- " -	
6	R_{36M}	$3,56 \cdot 10^{-5}$	- " -	
7	R_{I6}	0,27	мг O_2 /л	Концентрации O_2 , H_2S и S_2O_3 соответственно при половинных рационах
8	R_{26}	0,1	мг H_2S /л	
9	R_{36}	0,16	мг S_2O_3 /л	
10	δ_{I6}	54	мг O_2 /мгТВ	Коэффициенты перевода биомассы ТВ в экв. количество O_2 и S_2O_3 соответственно
11	δ_{36}	32	мг S_2O_3 /мгТВ	
12	M_{45}	$1,96 \cdot 10^{-5}$	мгSB/л.сек	Уд. скорость образования биомассы SB за счет $C_{орг}$
13	R_{45M}	$2,94 \cdot 10^{-5}$	- " -	Максимальный рацион потребления S-бактериями $C_{орг}$
14	R_{45}	1,5	мг $C_{орг}$ /л	Концентрация $C_{орг}$ при половинном рационе
15	δ_{25}	50	мг H_2S /мгSB	Коэффициент перевода биомассы S-бактерий в эквивалентное количество H_2S
16	α_{45}	0,14	-	Коэффициент усвоения $C_{орг}$
17	δ_3	0,7	мг S_2O_3 /мг O_2	Коэффициент перевода O_2 в экв. количество S_2O_3
18	E_5	$7,95 \cdot 10^{-5}$	мгSB/л.сек	Коэффициенты смертности сульфатредуцирующих и тионовых бактерий соответств.
19	E_6	$9,73 \cdot 10^{-5}$	мгТВ/л.сек	
20	K_0	$2,59 \cdot 10^{-5}$	мг O_2 /л.сек	Константы скорости потребления O_2 и окисления H_2S соответственно в реакции окисления
21	K_S	$4,07 \cdot 10^{-6}$	мг H_2S /л.сек	
22	M_I	$1,62 \cdot 10^{-4}$	мг O_2 /л.сек	Скорость образования O_2

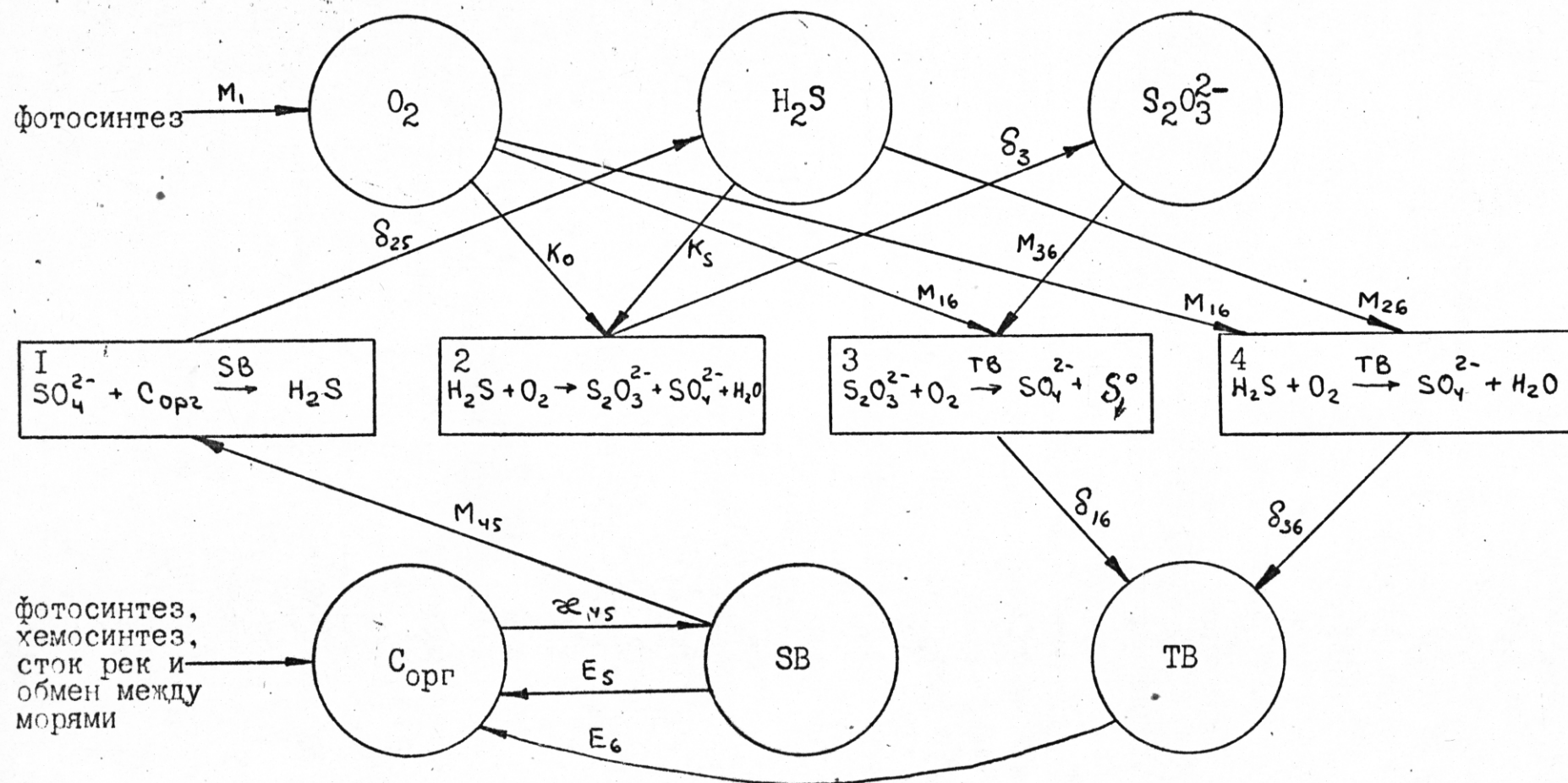


Рис. I. Схема взаимосвязей компонент экосистемы сероводородной зоны

тах по модели константы и коэффициенты сведены в таблице I.

Протекающие в сероводородной зоне химические и микробиологические процессы, их взаимосвязи с учетом поступающих в систему веществ из кислородной зоны представлены в виде схемы (рис. I). Как видно из схемы, в основу модели положены процессы образования сероводорода в результате деятельности сульфат-редуцирующих бактерий, которые осуществляют деструкцию органического вещества с использованием кислорода сульфатов, восстанавливая последние до сероводорода (блок I). Окисление сероводорода происходит как химическим путем (блок 2), так и микробиологическим (блоки 3,4). Химическое окисление сероводорода происходит с образованием тиосульфатов и сульфатов, затем тиосульфаты окисляются до сульфатов тионовыми бактериями (блок 3). При отсутствии в системе тиосульфатов тионовые бактерии могут осуществлять окисление сероводорода до сульфатов (блок 4).

В общем виде модель представлена следующей системой уравнений:

$$L_t C_i = F_{1i} - F_{2i} \quad (I)$$

где L_t - оператор переноса течениями и турбулентностью, определенный соотношением:

$$L_t = \frac{\partial}{\partial t} + V_1 \frac{\partial}{\partial x} + V_2 \frac{\partial}{\partial y} + V_3 \frac{\partial}{\partial z} - A \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(A_2 \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Скорости течений V_1, V_2, V_3 и коэффициенты турбулентной диффузии A и A_2 считаются внешними факторами. C_i - концентрации компонент экосистемы: кислорода ($i=1$), сероводорода ($i=2$), тиосульфатов ($i=3$), органического углерода ($i=4$), сульфат-редуцирующих ($i=5$) и тионовых ($i=6$) бактерий. F_{1i} и F_{2i} - суммарные источники, характеризующие возникновение и исчезновение i -ой компоненты.

Согласно существующим представлениям об основных гидрохимических и микробиологических процессах, происходящих в сероводородной зоне, система уравнений (I) принимает вид:

$$\begin{aligned}
 L_t C_1 &= [M, C_1] - [K_0 C, C_2 + \delta_{16} M_6 C_6] \\
 L_t C_2 &= [\delta_{25} M_{45} C_5] - [K_5 C, C_2] \\
 L_t C_3 &= [\delta_{36} K_0 C, C_2] - [\delta_{36} M_{36} C_6] \\
 L_t C_4 &= [E_5 C_5 + E_6 C_6] - [M_{45} C_5] \\
 L_t C_5 &= [\alpha_{45} M_{45} C_5] - [E_5 C_5] \\
 L_t C_6 &= [M_6 C_6] - [E_6 C_6]
 \end{aligned} \tag{3}$$

где $M_6 = \min (M_{16}, M_{26}, M_{36})$, и функции M_{ij} описываются выражением:

$$M_{ij} = \frac{R_{ijm} \cdot C_i}{R_{ij} + C_i}, \tag{4}$$

где R_{ijm} - максимальный рацион потребления i -ой компоненты j -ой компонентой; R_{ij} - концентрация i -ой компоненты при половинном рационе j -ой компоненты.

Граничные условия для C_i , $i = \overline{1, 6}$ задаются на поверхности и дне моря в виде потоков:

$$\begin{aligned}
 -A_z \frac{\partial C_i}{\partial z} &= q_{i0} \quad \text{при} \quad z = 0 \\
 -A_z \frac{\partial C_i}{\partial z} &= q_{iH} \quad \text{при} \quad z = H
 \end{aligned} \tag{5}$$

либо в виде граничных концентраций:

$$\begin{aligned}
 C_i &= C_{i0} \quad \text{при} \quad z = 0 \\
 C_i &= C_{iH} \quad \text{при} \quad z = H
 \end{aligned} \tag{6}$$

В качестве начальных условий выбираются средние величины концентраций компонент, характерные для определенного района моря и определенного сезона.

Для получения вертикального распределения компонент экосистемы уравнения (I) решались численно относительно одной пространственной переменной z и сводились к разностной задаче, которая была реализована методом прогонки.

В результате проведенных численных экспериментов с

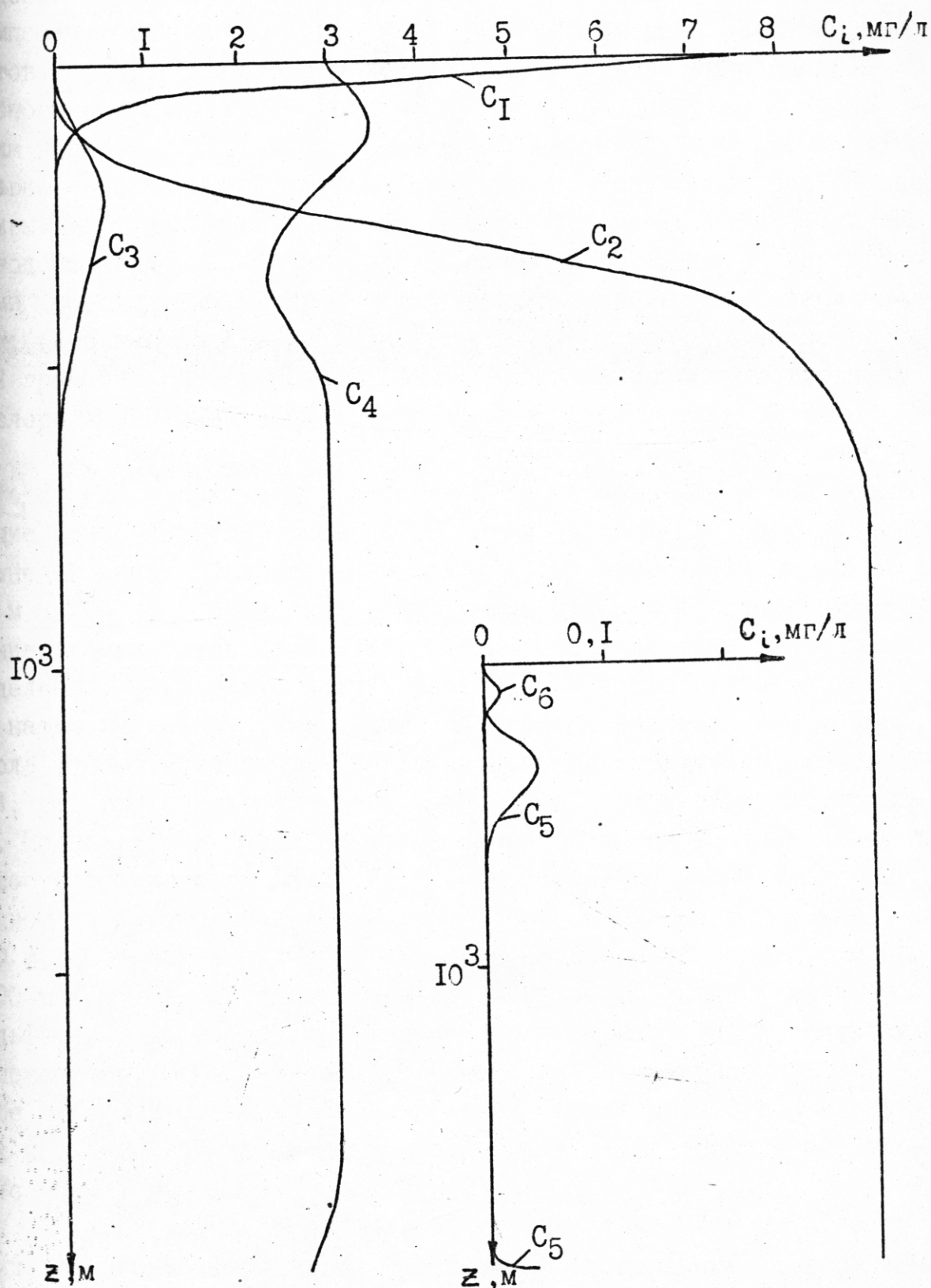


Рис. 2. Вертикальное распределение компонент экосистемы

моделью экосистемы были получены вертикальные профили шести компонент экосистемы (кислорода C_1 , сероводорода C_2 , тиосульфатов C_3 , органического углерода C_4 , сульфатредуцирующих C_5 и тионовых C_6 бактерий), которые представлены на рис. 2. Рассмотрим конкретно каждый из приведенных вертикальных профилей в сравнении с данными натурных наблюдений. Полученные расчетные кривые вертикального распределения кислорода (кривая C_1) и сероводорода (кривая C_2) в море фактически совпадают с усредненными многолетними натурными данными по основным характеристикам: глубинам залегания нижней границы кислородной зоны, верхней границы сероводородной зоны и ширине зоны сосуществования кислорода и сероводорода.

Расчетная кривая вертикального распределения тиосульфатов характеризуется максимумом на глубине 200 м с концентрацией тиосульфатов, равной 0,50 мг/л (кривая C_3). Верхняя и нижняя границы обнаружения тиосульфатов соответственно равны 50 м и 700 м. В сравнении с натурными данными такое распределение тиосульфатов соответствует I-му типу вертикального распределения, представленному в работе /7/, с тем отличием, что по натурным данным тиосульфаты обнаружены значительно глубже (более 100 м). Указанный тип распределения характерен для станций, расположенных в центрах западной и восточной халистаз моря. По периферии бассейна и для западной и для восточной частей в соответствии с данными /7/ тиосульфаты обнаружены либо в придонном слое (западная часть моря), либо, начиная с глубины 500 м, содержание их непрерывно растет ко дну с максимумом на 1400 м /7/. Это может служить доказательством появления тиосульфатов в море, как промежуточного продукта сульфатредукции. К сожалению, в модели пока не учтено появление тиосульфатов в море в результате микробиологических процессов. Но в последующих численных экспериментах этот механизм образования тиосульфатов будет учтен.

Расчетный вертикальный профиль концентрации органических соединений (кривая C_4) рассмотрим одновременно с вертикальными профилями концентраций сульфатредуцирующих (кривая C_5) и тионовых (кривая C_6) бактерий, поскольку перечисленные виды бактерий непосредственно участвуют как в убыли, так и в приросте органического вещества морской воды. Тионовые бактерии,

являясь типичными хемосинтетиками, строят свои тела из неорганических составляющих углерода (CO_2 и другие компоненты карбонатной системы моря) и в результате своей жизнедеятельности способствуют приросту $\text{C}_{\text{орг}}$. Это подтвердили и расчетные кривые вертикального распределения органического углерода и тионовых бактерий. Максимумы на этих кривых (C_4 и C_5) совпадают по глубине. К сожалению, в настоящее время мы не располагаем натурными данными по вертикальному распределению тионовых бактерий, но глубины, где появляются по расчету тионовые бактерии, отвечают глубинам их существования в Черном море /5/.

Сульфатредуцирующие бактерии, в отличие от тионовых, являются потребителями органического вещества и разлагают его с образованием сероводорода, обеспечивая, таким образом, убыль органического углерода в результате своей жизнедеятельности. На расчетной кривой процесс убыли органики отмечается на глубинах 300–400 м и в придонном слое (кривая C_4). В соответствие с этими глубинами наблюдается возрастание численности сульфатредуцирующих бактерий (кривая C_5).

Таким образом, проведенные нами численные эксперименты с моделью экосистемы сероводородной зоны Черного моря, несмотря на ряд принятых нами допущений и предположений при расчете констант и коэффициентов микробиологического блока, показали удовлетворительную адекватность модели натурным наблюдениям, а, следовательно, и процессам, протекающим в сероводородной зоне. Полученные результаты свидетельствуют о возможности расширения экспериментов с моделью путем введения переменных параметров гидродинамического блока, что позволит впоследствии получить пространственное распределение ее компонент и дать прогнозные оценки по состоянию экосистемы сероводородной зоны Черного моря.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Беляев В.И. Модель экосистемы сероводородной зоны Черного моря. - В сб.: "Современные проблемы океанологии Черного моря", ч. II, Севастополь, МТИ АН УССР, 1986 г., с.
Деп. в ВИНТИ 15.09.86 г., № .
2. Скопинцев Б.А. Формирование современного химического состава вод Черного моря. - Л.: Гидрометеиздат, 1975. - 336 с.
3. Беляев В.И., Совга Е.Е., Чепкасова В.А. О влиянии физических и химических факторов на состояние верхней границы сероводородной зоны Черного моря. - В сб.: "Вопросы океанологии Черного моря", Севастополь, МТИ АН УССР, 1985 г. - с. 15 - 29. Деп. в ВИНТИ 16.01.85 г., № 460-85
4. Соколова Г.А., Каравайко Г.И. Физиология и геохимическая деятельность тионовых бактерий. М.: Наука, 1964. - 333 с.
5. Сорокин Ю.И. Черное море. - М.: Наука, 1982. - 217 с.
6. Горленко В.М., Дубинина Г.А., Кузнецов С.И. Экология водных микроорганизмов. - М.: Наука, 1977. - 283 с.
7. Совга Е.Е., Соловьева Л.В. Тиосульфаты в водах Черного моря. ДАН СССР, 1987 (в печати).