



УДК 582.2/3

## ВОДНЫЕ БИОКОСНЫЕ ФИТОСИСТЕМЫ ПРИРОДНОГО И АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ (СТРУКТУРНОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ)

© А. В. Празукин

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной Академии наук Украины,  
Севастополь, Украина

*Поступила 13 января 2003 г.*

В сравнительном плане обсуждается структурная организация водных биокосных (БФ) фитосистем природного (тела растений, кроновые и субкроновые системы, растительные пологи) и антропогенного (растительные пологи на искусственных рифовых конструкциях) происхождения. Показано, что между названными группами систем не существует принципиальных различий: те и другие имеют общие принципы формирования структурно-функциональной организации. Иерархический принцип заполнения пространства (формирование разного уровня “сгущений” биоорганического вещества) реализуется как в природных, так и в антропогенно создаваемых БФ. В природных (телесных и надтелесных) и антропогенных БФ существуют определенные соотношения между геометрическим объемом ( $V_{\Gamma}$ ) системы и количеством сырой массы в его границах ( $W_{\text{сыр}}$ ), описываемые уравнением вида:  $\log W_{\text{сыр}} = \log a + b \log V_{\Gamma}$ . В природных надтелесных и в антропогенных БФ при одних и тех же размерах обитаемого пространства в среднем достигается примерно одинаковая концентрация биоорганического вещества и примерно одинаковое его количества на единицу внешней поверхности. Максимально наблюдаемые величины названных параметров в природных системах, как правило, выше, чем в антропогенных.

**Ключевые слова:** водные биокосные фитосистемы, искусственный риф, фитообрастание, одноклеточные и многоклеточные водоросли, концентрация биоорганического вещества, структурное подобие

General structural similarity in the biogeochemical aquatic phytosystems at different levels of organization (the thallus of multicellular algae, thallus crown space, natural canopies of multicellular algae and canopies of sessile cellular and multicellular algae on the experimental of “artificial reefs”) is discussed. General biogeochemical similarity in considered objects is discussed.

**Key words:** biogeochemical aquatic phytosystems, artificial reefs, phytofouling, cellular and multicellular algae, concentration of bioorganic matter, structural similarity

С биогеохимической точки зрения [1],  
отдельные растения, кроновые и субкроновые

системы, пологи наземных и водных растений  
и искусственные рифовые конструкции, за

росшие водорослями, относятся к одному и тому же классу объектов - биокосным фитосистемам (БФ). В состав структуры БФ входят две равноважные компоненты: биоорганическое ("живое", синтезированное жизнью) и минеральное (косное) вещество. Обе эти составляющие структурируют пространство в границах БФ, закономерно распределяясь в ее объеме образуют упорядоченную совокупность. Соорганизованность составляющих проявляется и в постоянном обмене веществ. В биокосных системах происходят постоянные превращения неорганических веществ в биоорганические и биоорганических - в неорганические.

Различают телесные и надтелесные биокосные фитосистемы. Первые - это организмы (тела) отдельно взятых растений, у которых внешняя поверхность является и внешней границей БФ (рис. 1 а). "Живое вещество" структурировано в форме клеток и тканей, а из минеральных веществ, как правило, преобладает вода. В свою очередь, надтелесные БФ могут быть как природного, так и антропогенного происхождения. Например, к природным относятся кроновые и субкроновые системы, пологи наземных и водных растений, ко вторым - любые БФ, образованные с участием человека и, в частности, искусственные рифовые конструкции, заросшие водорослями.

В отдельности побег, ветвь, крона растения (рис. 1 б, д) и любые групповые пространственные совокупности растений (рис. 1 в, е, ж) своим расположением выделяют собственные надтелесные ближайшие функциональные пространства (БФП) [11] внешние границы которых не являются физическими оболочками и проходят по внешнему контуру,

т. е. окончаниям структурных элементов растений, как это показано пунктирными линиями на рис. 1 и совпадают с геометрическими границами соответствующих надтелесных фитосистем [11, 14]. Таким образом, надтелесная природная БФ это - система, образованная из тела растения (биоорганические и неорганические вещества растения) и косного вещества, размещенного в соответствующем надтелесном БФП [8, 11]. Данное определение справедливо и для антропогенно создаваемых биокосных систем (рис. 2 б - е).

Отличительной особенностью природных систем является то, что при их формировании "живое вещество" самостоятельно выделяет (отмеряет) из общего пространства - собственное пространство, в котором оно размещается и функционирует [8, 11]. Например, с ростом организма, с увеличением его массы объем его тела увеличивается (рис. 1 а), формирование молодых побегов в периферийной части кроны ведет к увеличению объема кронового пространства (рис. 1 б), а объем растительного полога зависит от высоты растений ( $H$ ) и его протяженности ( $l_1, l_2$ ) на поверхности (рис. 1 в).

При создании искусственных БФ человек по определенному плану структурирует пространство, задавая размеры и соотношения заселяемой поверхности и обитаемого пространства, предоставляет организмам уже готовое "жилище", которое вследствие разных причин будет по-разному востребовано (заполнено) "живым веществом" [7, 9, 13, 15, 16].

Фитосистемы природного и антропогенного происхождения чаще рассматриваются по отдельности, чем вместе, и еще реже сопоставляются в единых размерных рядах

[11, 12]. Существует совсем не тривиальный вопрос: сходны или различны биоэкологические принципы структурно-функциональной организации природных и антропогенно создаваемых фитосистем организменного (телесного) и надорганизменного (надтелес-

ного) уровней организаций? Ниже, используя единый параметрический набор, проведено сравнение водных фитосистем антропогенного и природного происхождения. Сделана попытка ответить на поставленный вопрос.

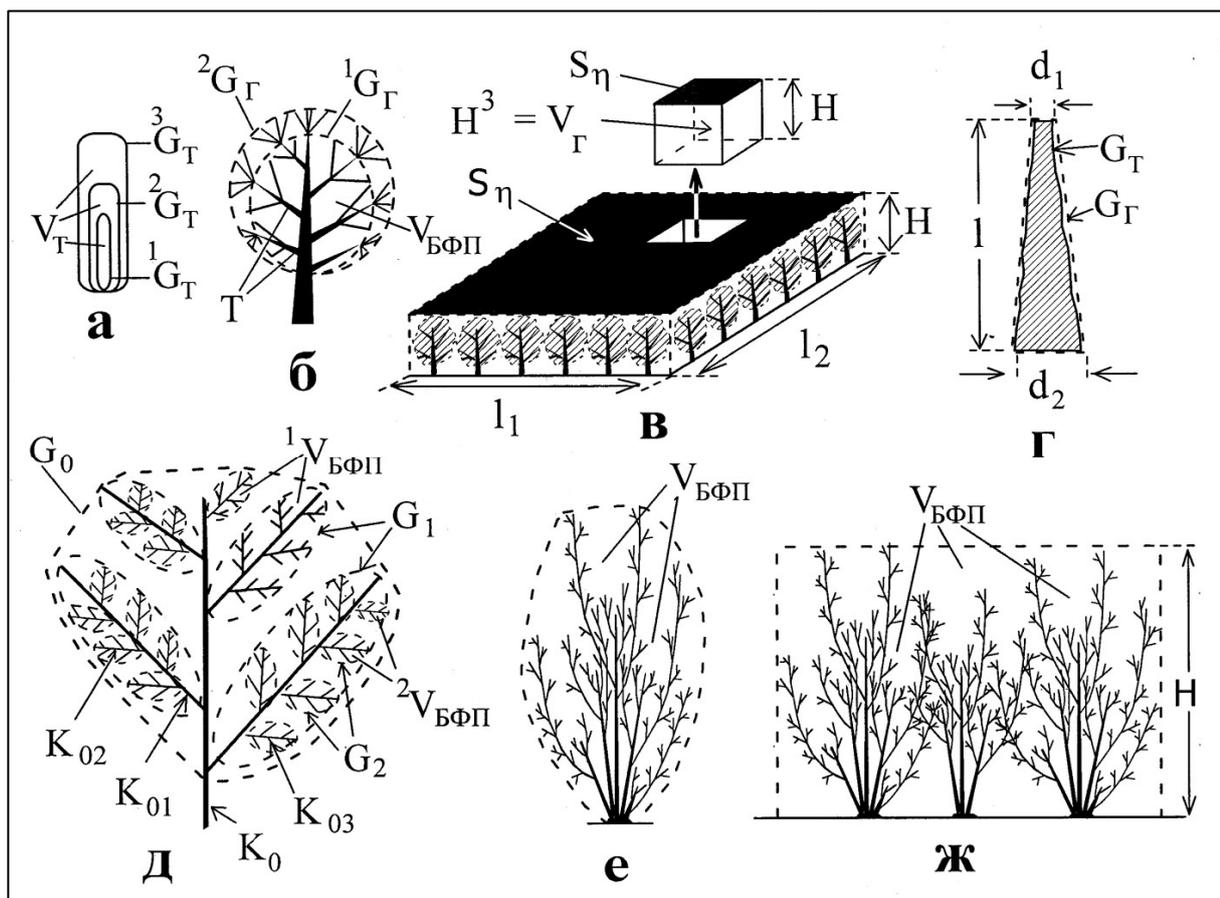


Рис. 1. Схемы биокосных фитосистем природного происхождения.

(а) - компактные тела растений разного размера; (б) - крона наземного растения; (в) - растительный полог и высечка из него со стороны квадрата равная высоте полога; (г) - осевая структура цистозеры косматой (*Cystosera crinita*); (д) - слоевище цистозеры косматой и кроновое и субкруповые пространства слоевища и ветвей первого и второго порядков; (е) - слоевища цистозеры косматой, растущие с общей подошвы, собранные в пучок ("куст"); (ж) - полог популяции цистозеры.

Условные обозначения:  $V_T$  - объем тела растения;  $^1G_T$ ,  $^2G_T$ ,  $^3G_T$  - границы тел растений разного размера;  $T$  - тело растения в границах кронового пространства ( $^2G_T$ );  $^1G_T$  - граница кронового пространства до появления молодых побегов;  $V_{БФП}$  - объем ближайшего функционального пространства (БФП) в границах надтелесной системы заполненный воздухом (у наземных объектов) или водой (у водных); линейные параметры ( $l_1$ ,  $l_2$ ,  $H$ ), площадь верхней границы ( $S_\eta$ ) и геометрический объем ( $V_\Gamma$ ) растительного полога и его высечки; длина ( $l$ ), диаметр ( $d_1$ ,  $d_2$ ), телесная ( $G_T$ ) и геометрическая ( $G_\Gamma$ ) поверхности осевой структуры цистозеры;  $K_0$ ,  $K_{01}$ ,  $K_{02}$ ,  $K_{03}$  - осевые структуры цистозеры нулевого, первого - третьего порядков;  $G_0$ ,  $G_1$ ,  $G_2$  - границы кронового пространства целого растения и субкруповых пространств ветвей первого и второго порядков соответственно;  $^1V_{БФП}$ ,  $^2V_{БФП}$  - объем БФП ветвей первого и второго порядков соответственно.

Fig. 1. Diagrams of different natural biogeochemical phytosystems

**Материал и методы.** На рис. 1 показаны схемы телесных и надтелесных БФ природного происхождения: осевые структуры (г) и кроновые и субкроновые системы цисто-

зиры (д); пологи многоклеточных водорослей (в, ж). Схемы надтелесных БФ, формируемые на искусственных рифовых конструкциях и плантационных системах, показаны на рис. 2.

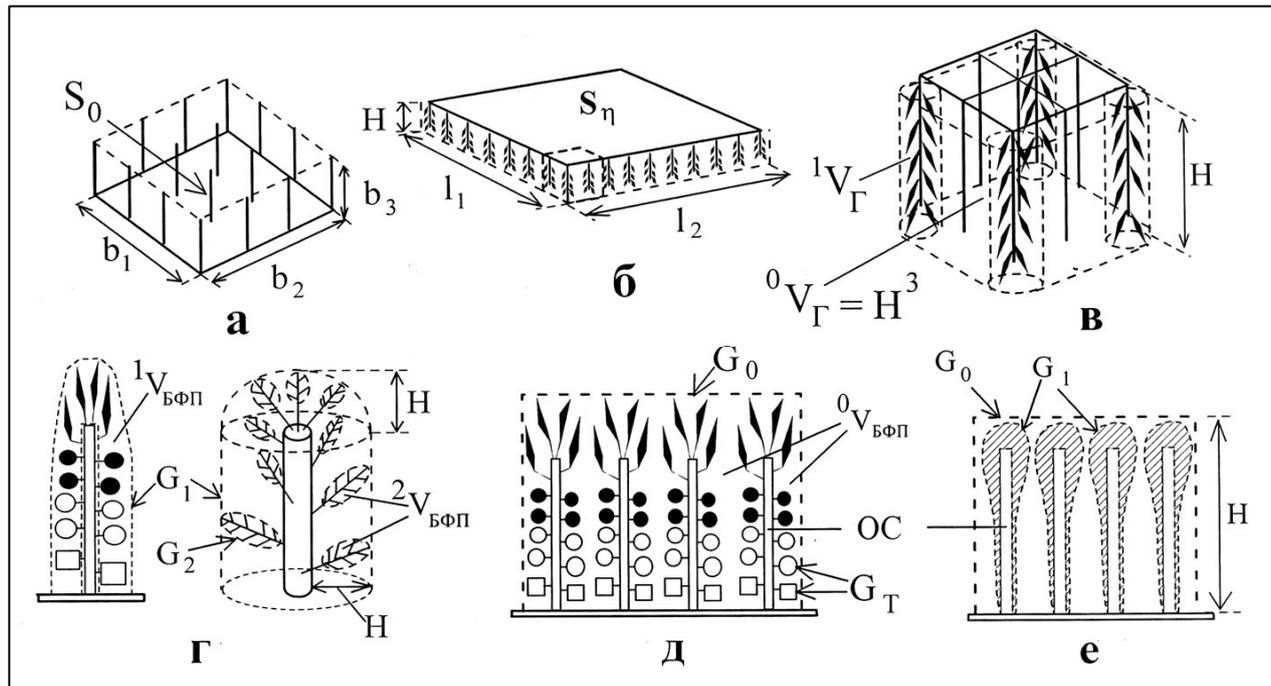


Рис. 2. Схемы искусственных рифовых конструкций (ИРК) и биокосных фитосистем (БФ) антропогенного происхождения.

(а) - ИРК с цилиндрическими опорными структурами вертикально жестко закрепленными на поверхности четырехугольной пластиковой пластины; (б) - плантационная система и ее участок (в) с вертикально спускающимися веревками, обрастающими многоклеточными водорослями; (г) - надтелесная БФ формируемая водорослями на поверхности опорной структуры ИРК. В границах БФ ( $G_1$ ) располагаются растения и общее для них ближайшее функциональное пространство ( ${}^1V_{\text{БФП}}$ ), заполненное водой; (д, е) - соответственно надтелесные БФ, формируемые многоклеточными и диатомовыми водорослями на ИРК. В границах БФ ( $G_0$ ) располагаются растения и общее для них ближайшее функциональное пространство ( ${}^0V_{\text{БФП}}$ ), заполненное водой.

Условные обозначения:  $b_1, b_2$  и  $S_0$  - линейные параметры и поверхность "дна" ИРК;  $b_3$  - длина опорной структуры;  $l_1, l_2, H$  - линейные параметры геометрического пространства растительного полога;  ${}^0V_{\Gamma}$  - объем геометрического пространства участка растительного полога на плантационной системе в котором выделяются подпространства ( ${}^1V_{\Gamma}$ );  $S_1$  - площадь поверхности верхней границы растительного полога;  $H$  - высота растительного полога, формируемого как на отдельно взятой опорной структуре так и в целом на ИРК;  $G_{\Gamma}, G_2, {}^2V_{\text{БФП}}$  - соответственно, граница поверхности тела, граница кронового пространства и объем ближайшего функционального пространства многоклеточной водоросли; ОС - цилиндрическая опорная структура ИРК

Fig. 2. Diagrams of models of artificial reefs and artificial biogeochemical phytosystems

Конструкции (а) и плантационные системы (б) размещались в защищенной от волн прибрежной части Черного моря и заселялись

естественным путем многоклеточными и одноклеточными водорослями. Детали методик проведения экспериментов, сроки и их про-

должительность, параметры конструкций, видовой состав фитообрастания и т. д. подробно описаны в [5, 7, 9, 11, 13].

Надтелесные БФ, независимо от их происхождения, имеют собственный геометрический объем ( $V_{\Gamma}$ , см<sup>3</sup>), определяемый границами, которые на рис. 1 и 2 обозначены пунктиром. В границах этого объема располагается телесная масса ( $W_{\text{сыр}}$ , г) отдельного растения (рис. 1 д) или группы растений (рис. 1 в, е, ж, рис. 2) и их ближайшее функциональное пространство ( $V_{\text{БФП}}$ , см<sup>3</sup>), заполненное водой с растворенными веществами.

Объем и внешнюю поверхность ( $S$ , см<sup>2</sup>) систем рассчитывали по формулам подходящих для их аппроксимации геометрических фигур [8, 11]. Поскольку у объектов пластинчатого типа (растительные пологи, рис. 1 в, 2 б) основное поступление энергии и вещества осуществляется через верхнюю границу  $S_{\eta}$ , а величина их объема больше зависит от их протяженности по поверхности, чем от их высоты ( $l_1, l_2 \gg H$ ), то, как и в [11, 12], для них рассчитывали приведенный объем (куб высоты  $H$ , рис. 1 в, 2 в) - объем высечки из полога. Геометрический объем осевых структур цистозеры, аппроксимируемый фигурой усеченного конуса, мало отличается от их телесного объема ( $V_{\Gamma}$ ) (рис. 1 г), поэтому в данной работе  $V_{\Gamma} = V_{\text{Т}}$ .

Для всех телесных и надтелесных фитосистем рассчитывали концентрацию биоорганического<sup>1</sup> вещества ( $C_{\text{W}}$ , мг/см<sup>3</sup>) в геометрическом объеме (отношение сухой расти-

тельной массы ( $W_{\text{сух}}$ ) к геометрическому объему,  $C_{\text{W}} = W_{\text{сух}} / V_{\Gamma}$ ) и количество биоорганического вещества на единицу внешней (геометрической) поверхности системы ( $W_{\text{сух}}/S_{\eta}$ , г/см<sup>2</sup>, для объектов пластинчатого типа -  $W_{\text{сух}}/S_{\eta}$ ). Методика определения количества сырой и сухой массы растений в геометрическом объеме описана в [7, 8].

**Результаты и обсуждение.** Связь  $W_{\text{сыр}}$  с  $V_{\Gamma}$ , показанная на рис. 3 и 4 соответственно для естественных и искусственных БФ, описывается соотношением

$$\log W_{\text{сыр}} = \log a + b \log V_{\Gamma}. \quad (1)$$

Численные значения коэффициентов **a** и **b** для уравнения (1) приведены в таблице.

Обратим внимание, что телесные и надтелесные фитосистемы природного происхождения обобщаются отдельными регрессиями (рис. 3, линии 1, 2).

Телесное пространство осевых структур цистозеры практически полностью заполнено “живым” веществом, структурированным в форме клеток и тканей ( $\log a = 0.126$ ). Увеличение клеточной массы ведет к прямо пропорциональному изменению объема тела, коэффициент **b** в уравнении (1) приближается к единице (**b** = 1.025).

В надтелесных системах тела растений занимают далеко не все пространство, большая часть объема систем заполнена косным веществом - водой. Во всей совокупности данных, включающих различные типы надтелесных фитосистем (рис. 3, линия 2), не существует точного соответствия между увеличением  $W_{\text{сыр}}$  и  $V_{\Gamma}$  (коэффициент **b** в уравнении (1) меньше единицы, **b** = 0.865).

<sup>1</sup> Понятие “биоорганическое вещество” отождествляется с понятием “сухая масса”; обозначающий его символ  $W_{\text{сух}}$  отражает сумму органических веществ и зольных элементов.

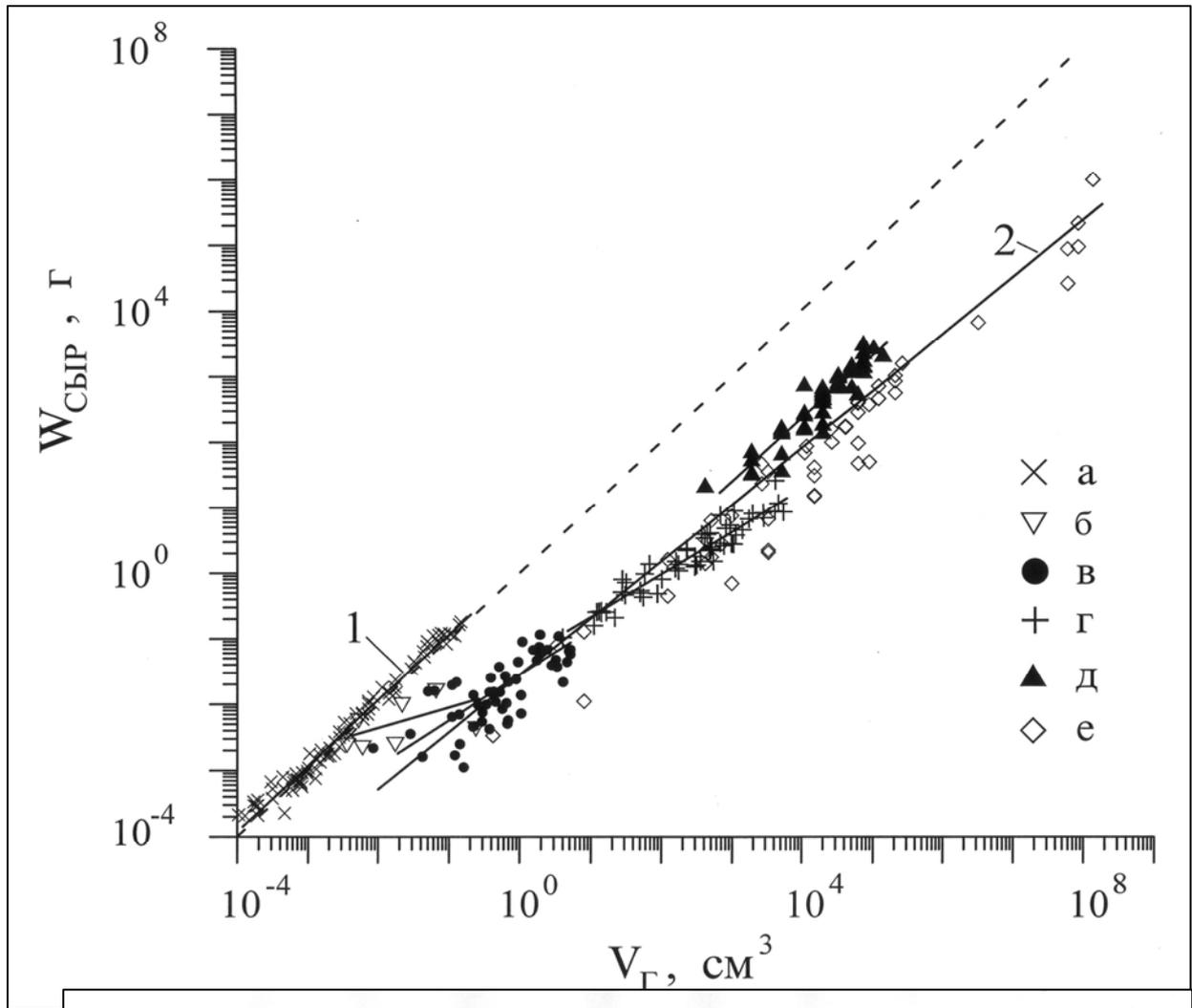
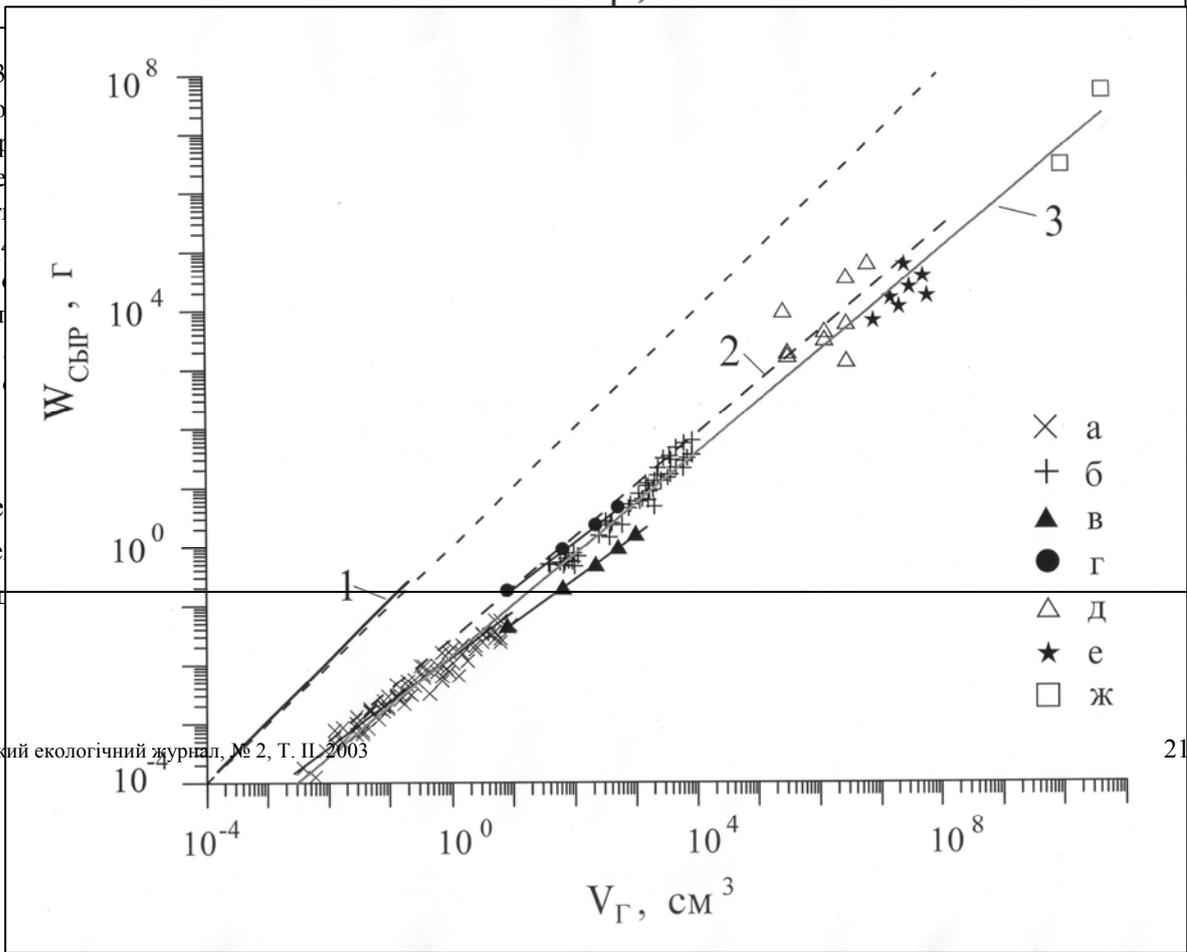


Рис. 3  
мерно  
четвер  
лодые  
полог  
ным [1  
1, 2 -  
под ул  
Fig. 3  
damp



регре  
расте  
обобл

Рис. 4. Соотношение геометрического объема ( $V_{\Gamma}$ ) и количество сырой массы в его границах ( $W_{\text{сыр}}$ ) в размерном ряду биокосных фитосистем антропогенного происхождения: пологи зарослей многоклеточных водорослей (*Ceramium* sp., *Polysiponia* sp., *Callithamnion corymbosum*, *Enteromorpha intestinalis*) на отдельно вертикально стоящих опорных структурах (а); пологи зарослей многоклеточных (б, здесь те же виды водорослей, что и на отдельно стоящих структурах) и одноклеточных (*Licmophora flabellata*, *Navicula ramosissima*, *Nitzschia tenuirostis*, *Melosira moniliformis*, на модулях с плотностью расположения опорных структур 5.4 (в) и 106.8 (г) экз./дм<sup>2</sup>) водорослей на рифовых конструкциях разного размера; пологи зарослей *E. intestinalis* (д - по [13], е - рассчитана по [5]) и *Laminaria saccharina* (ж - по [13]) на плантационных системах.

3 - обобщающая регрессия для надтелесных БФ антропогенного происхождения. Линии 1 (осевые структуры цистозиры) и 2 (надтелесные БФ природного происхождения) перенесены для сравнения с рис. 3.

Fig. 4. Relation between the volume living space ( $V_{\Gamma}$ , cm<sup>3</sup>) and quantity of living mass in this space ( $W_{\text{сыр}}$ , g of damp organic matter) for different artificial biogeochemical phytosystems

Большая часть растительной массы сосредоточена у внешней границы, а это значит, что, чем больше размер ( $V_{\Gamma}$ ) системы, тем больше доля незаполненного пространства.

ный полог оптимизируется к уровням и условиям поступления ФАР и питательных веществ и, что немаловажно, к условиям удаления продуктов метаболизма.

Растения на рифовых конструкциях распространяются также неравномерно [9], подчиняясь общему правилу [10]: раститель-

Таблица. Параметры уравнений вида  $\log y = \log a + b \log x$  ( $R^2$  - квадратический коэффициент корреляции)  
Table. Equations parameters of kind  $\log y = \log a + b \log x$  ( $R^2$  - correlation coefficient)

Вид зависимости	№ уравнения в тексте	№ рисунка	№ регрессии	Размерный диапазон ( $V$ , см <sup>3</sup> ).	Объем выборки, экз.	Коэффициенты и их среднеквадратические отклонения		$R^2$
						$\log a \pm \delta$	$b \pm \delta$	
$W_{\text{сыр}} = f(V_{\Gamma})$	1	3	1	$10^{-4} - 3 \cdot 10^{-1}$	382	$0.126 \pm 0.112$	$1.025 \pm 0.008$	0.98
« - »	1	3	2	$10^{-2} - 2 \cdot 10^8$	219	$-1.555 \pm 0.478$	$0.865 \pm 0.014$	0.94
« - »)	1	4	3	$4 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{10}$	308	$-1.838 \pm 0.225$	$0.857 \pm 0.006$	0.99
$C_w = f(V_{\Gamma})$	2	5a	1	$10^{-4} - 3 \cdot 10^{-1}$	382	$2.503 \pm 0.112$	$0.025 \pm 0.008$	0.02
« - »	2	5a	2	$10^{-1} - 10^8$	212	$0.731 \pm 0.456$	$-0.109 \pm 0.015$	0.21
« - »	2	5a	3	$5 \cdot 10^{-3} - 10$	59	$0.729 \pm 0.352$	$-0.509 \pm 0.058$	0.57
« - »	2	5a	4	$10 - 10^4$	56	$1.036 \pm 0.160$	$-0.341 \pm 0.027$	0.74
« - »)	2	5a	5	$4 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^5$	30	$1.283 \pm 0.121$	$-0.101 \pm 0.038$	0.20
« - »)	2	5a	6	$4 \cdot 10^{-1} - 10^8$	49	$0.276 \pm 0.396$	$-0.087 \pm 0.030$	0.15
« - »	2	5б	8	$3 \cdot 10^{-3} - 10$	225	$0.447 \pm 0.146$	$-0.283 \pm 0.014$	0.64
« - »	2	5б	9	$40 - 10^4$	46	$0.412 \pm 0.145$	$-0.084 \pm 0.029$	0.15
« - »	2	5б	10	$8 - 10^3$	5	$0.921 \pm 0.007$	$-0.214 \pm 0.004$	0.98
« - »	2	5б	11	$8 - 10^3$	5	$0.361 \pm 0.017$	$-0.257 \pm 0.01$	0.98
« - »	2	5б	12	$3 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{10}$	308	$0.537 \pm 0.225$	$-0.143 \pm 0.006$	0.67
$W_{\text{сух}}/S_{\Gamma} = f(V_{\Gamma})$	3	6a	1	$10^{-4} - 3 \cdot 10^{-1}$	382	$1.048 \pm 0.093$	$0.185 \pm 0.007$	0.65
« - »	3	6a	3	$10^{-1} - 10^8$	212	$-0.075 \pm 0.592$	$0.373 \pm 0.019$	0.64

« - »	3	66	4	$3 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{10}$	308	$0.347 \pm 0.241$	$0.184 \pm 0.006$	0.75
-------	---	----	---	-------------------------------------	-----	-------------------	-------------------	------

Численные значения параметров уравнения (1), описывающего связь  $V_{\Gamma}$  и  $W_{\text{сыр}}$  для природных надтелесных (рис. 3, линия 2) и для антропогенно создаваемых (рис. 4, линия 3) надтелесных БФ очень близки (см. таблицу), что указывает на отсутствие принципиальных различий между сравниваемыми системами. Небольшое расхождение в значениях коэффициента “а” говорит о более полном заполнении пространства растениями в природных системах.

По совокупности рассматриваемых данных связь концентрации биоорганического вещества ( $C_w$ ) с  $V_{\Gamma}$  прослеживается во всем ряду БФ природного и антропогенного происхождения (рис. 5) и описывается уравнением:

$$\log C_w = \log a - b \log V_{\Gamma}. \quad (2)$$

Значения коэффициентов приведены в таблице.

Данная зависимость в связи с другими вопросами и при больших диапазонах значений  $V_{\Gamma}$  уже нами рассматривалась [11, 12, 14]. Установлено, что в ряду телесных и надтелесных фитосистем, начиная от осевых структур многоклеточных водорослей и до водоемов с сообществами фитопланктона в них (24 порядка по величине  $V_{\Gamma}$ ), между  $C_w$  и  $V_{\Gamma}$  существует достаточно определенная связь, описываемая уравнением:  $\log C_w = (1.24 \pm 0.03) - (0.29 \pm 0.005) \log V_{\Gamma}$  (коэффициент корреляции

равен -0.94) [14]. Однако, рассматривая относительно небольшие размерные диапазоны  $V_{\Gamma}$

по отдельным группам объектов, не всегда выявляется обсуждаемая связь.

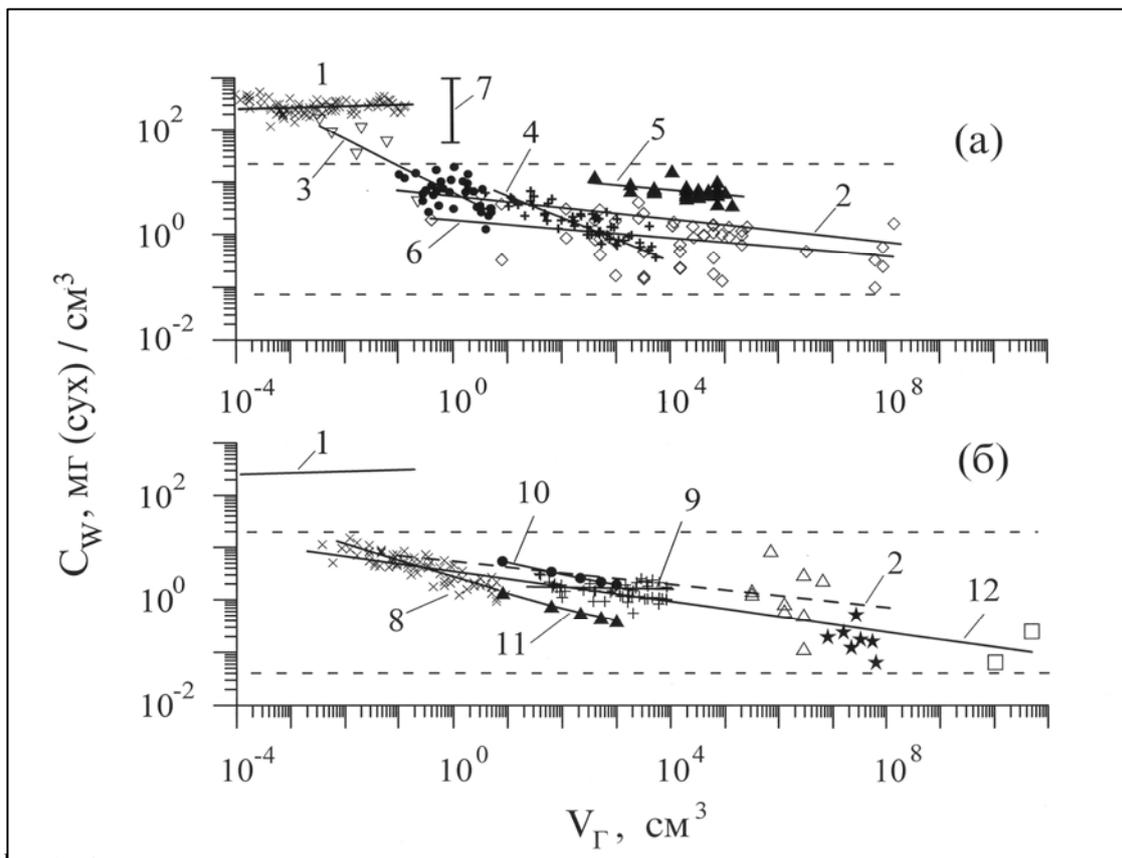


Рис. 5. Соотношение геометрического объема ( $V_{\Gamma}$ ) биокосных фитосистем природного (а) и антропогенного (б) происхождения и концентрации биоорганического вещества ( $C_w$ ) в геометрических объемах в тех же рядах биокосных систем, что на рис. 3 и 4, соответственно. Обозначение значков те же, что и на рис. 3 и 4 соответственно. 1, 2, 12- обобщающие регрессии для телесных (осевые структуры цистозеры) и надтелесных БФ естественного и антропогенного происхождения соответственно. 7 - диапазон варьирования значений  $C_w$  в тканях наземных растений, включая сочные плоды и сухие семена, рассчитано по [3].

Линии 1 (осевые структуры цистозеры) и 2 (надтелесные БФ природного происхождения) на рис. 5 б перенесены для сравнения с рис. 5 а. Объяснение остальных обозначений смотри в тексте

Fig. 5. Relation between the volume living space ( $V_{\Gamma}$ ,  $\text{cm}^3$ ) and concentration of living mass in this space ( $C_w$ , mg of dry organic matter /  $\text{cm}^3$ ) for different natural (а) and artificial (б) biogeochemical phytosystems

Концентрация сухого вещества в тканях цистозеры варьирует в диапазоне от 200 до 500 мг (сух. массы)  $\text{cm}^{-3}$  и не связана с  $V_{\Gamma}$  осевых структур (рис. 5 а, линия 1). Практически тот же диапазон концентраций сухого вещества (100 - 500 мг (сух. массы)  $\text{cm}^{-3}$ ) наблюдается в тканях разных участков пластины ламинарии сахаристой (*Laminaria saccharina* (L.) Lamour (Phaeophyta)) [11]. Для сравнения отметим, что диапазон варьирования  $C_w$  в тканях наземных растений, включая сочные плоды и сухие семена, составляет полтора порядка величин (60 - 930 мг (сух. массы)  $\text{cm}^{-3}$ , рассчитано по [3]). В группе надтелесных объектов природного происхождения (в кроновых и субкроновых пространствах и растительных пологах, рис. 5 а) при различии по  $V_{\Gamma}$  в 9 порядков ( $10^{-1}$  -  $10^8$   $\text{cm}^3$ ) различие по

$C_w$  составляет 2 порядка (0.1 - 20 мг (сух. массы)  $см^{-3}$ ) и в среднем составляет 2 - 3 мг (сух. массы)  $см^{-3}$ , что примерно в 140 раз ниже средних значений концентраций сухого вещества в тканях осевых структур цистозеры и пластин ламинарии. Надтелесные БФ антропогенного происхождения (рис. 5 б), занимают положение примерно в одном и том же диапазоне  $V_T$ , что и природные надтелесные системы (рис. 5 а) и имеют те же пределы изменения  $C_w$ .

Обобщающие регрессии отдельно для надтелесных фитосистем природного (рис. 5 а, линия 2) и антропогенного (рис. 5 б, линия 12) происхождения имеют примерно одинаковые и очень небольшие углы наклона; значения коэффициента  $b$  в (2) соответственно равны: 0.109, 0.143 (см. табл.). Заметим, если бы имело место прямое разбавление, то коэффициент  $b$  в уравнении (2) был бы равен единице. Небольшие угловые коэффициенты указывают на то, что в надтелесных БФ независимо от их происхождения осуществляется регуляция концентрации биоорганического вещества. Работают механизмы, сдерживающие снижение  $C_w$ . Обратим внимание, что концентрация вещества в пологе популяции цистозеры примерно такая же, как и в субкronовых пространствах ее ветвей и не сильно отличается от концентрации в кронных пространствах растений разных видов. Ветви являются субъектами слоевищ, а те, в свою очередь, формируют полог популяции цистозеры. Каждый из названных объектов образует дискретную группу и на шкале  $V_T$  занимает собственный диапазон, а линии регрессии (линии 3 - 6, рис. 5 а), отражающие связь (2) имеют разные углы наклона, закономерно изменяющиеся в ряду: субкronовые пространства ветвей (линия 3),

кronовые пространства слоевищ разных видов макрофитов (линия 4), пологи популяций одного вида (линия 5) и ассоциаций видов (линия 6, см. табл.). Последовательное уменьшение угла наклона указывает на то, что с повышением уровня организации БФ их регулирующие возможности, сдерживающие снижение  $C_w$ , расширяются.

Иерархический принцип организации пространства реализуется и в антропогенно создаваемых надтелесных БФ. Условно первый уровень организации - фитообрастания на отдельной опорной структуре и вода с растворенными в ней веществами, в границах обрастания,  $G_1$  (рис. 2 г, 5 б, линия 8). Следующий более высокий уровень - фитообрастания на всей рифовой конструкции и вода и растворенные в ней вещества, в соответствующих границах БФ,  $G_0$  (рис. 2 д, е, 5 б, линии 9 - 11). В антропогенно создаваемых системах, как и в природных, с увеличением уровня организации их регулирующие возможности расширяются. Например, на рифовых конструкциях в поливидовом макрофитном пологе (рис. 2д), вследствие разобщенности максимумов вертикального распределения биомассы разных видов водорослей [7], достигается относительно равномерное и, что немаловажно, полное заполнение растениями геометрического пространства БФ. Это и объясняет отсутствие явной зависимости (2) (рис. 5б, линия 9; см табл.), в то время как в макрофитных пологах, формируемых на отдельных опорных структурах (рис. 2 г) и в пологах диатомовых водорослей на конструкциях (рис. 2 е), существует выраженная неравномерность в вертикальном (по составляющей  $H$ ) распределении фитомассы [9]. Поэтому с увеличением  $V_T$  доля пространства БФ, заполненная биоорганиче-

ским веществом, сокращается и, как следствие,  $S_W$  снижается (рис. 5 б, линии 8, 10, 11, см. табл.).

На рис. 6 показано соотношение количества биоорганического вещества на единицу

геометрической поверхности системы ( $W_{сух}/S_{Г}$ ) и геометрического объема обитаемых пространств в тех же рядах природных и антропогенных БФ, что и на рис. 5.

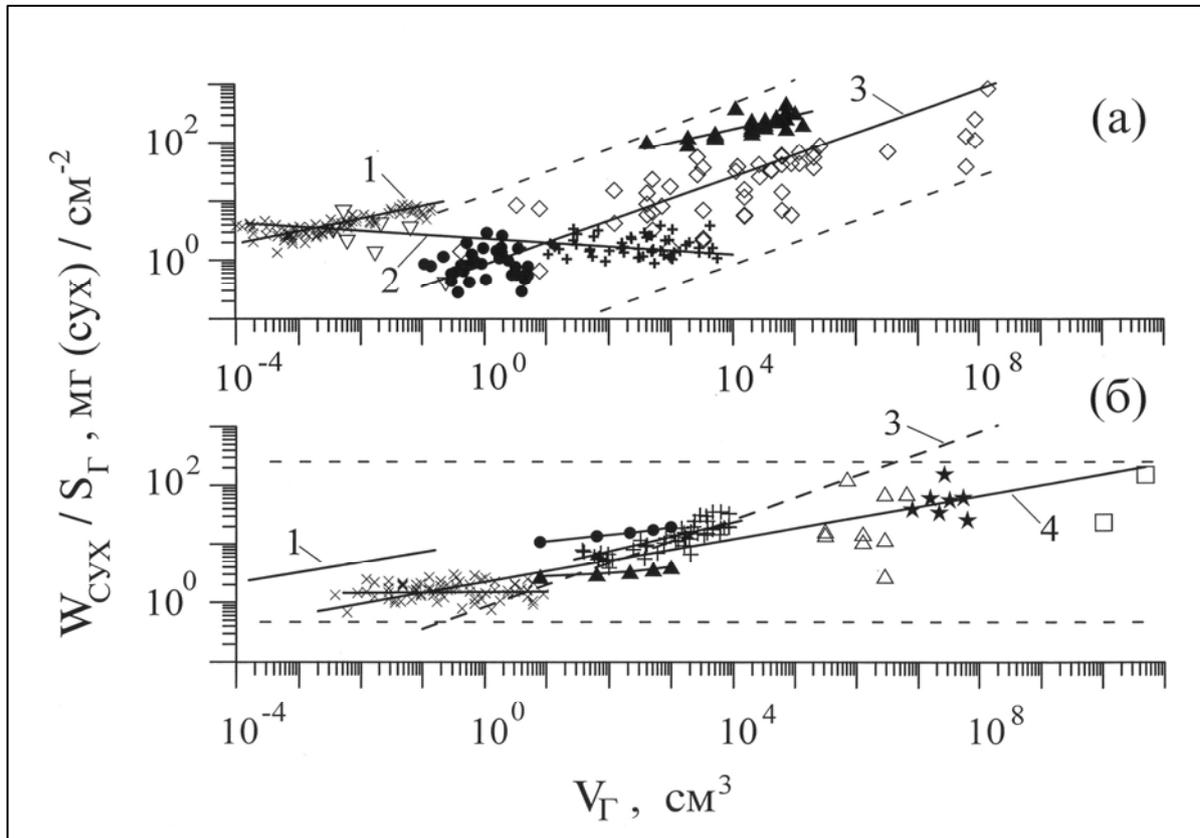


Рис. 6. Соотношение геометрического объема ( $V_{Г}$ ) биосных фитосистем природного (а) и антропогенного (б) происхождения и количества биоорганического вещества на единицу геометрической поверхности системы ( $W_{сух}/S_{Г}$ ) в тех же рядах биосных систем, что на рис. 3 и 4 соответственно. Обозначение значков те же, что и на рис. 3 и 4 соответственно.

1 - 4 - обобщающие регрессии для телесных и надтелесных БФ природного и антропогенного происхождения, объяснение в тексте. Линии 1 (осевые структуры цистозеры) и 3 (надтелесные БФ природного происхождения) на рис. 6 б перенесены для сравнения с рис. 6 а

Fig. 6. Relation between the volume living space ( $V_{Г}$ ,  $cm^3$ ) and quantity of living mass per unit of square this space ( $W_{сух}/S_{Г}$ , mg of dry organic matter /  $cm^2$ ) for different natural (a) and artificial (б) biogeocochemical phytosystems

Обратим внимание на то, что, по всей совокупности представленных данных, в природных и в антропогенно создаваемых БФ при изменении  $V_{Г}$  на 11-15 порядков величин  $W_{сух}/S_{Г}$  изменяется только на 3 - 3.5 порядка, а в ряду: телесные (осевые структуры цистозеры), субкronовые (ветви цистозеры) и кро-

новые (слоевища разных видов водорослей) системы (рис.6 а, линия 2) при различии по  $V_{Г}$  в 8 порядков различие по  $W_{сух}/S_{Г}$  составляет немногим меньше двух порядков. В последнем случае наблюдается определенная стабилизация количества биоорганического вещества на единицу геометрической поверхности

БФ. Аналогичный вывод ранее был сделан по другой группе данных, включающей и крупные водные и наземные системы [12].

Но при всем этом в ряду: субкronовые и кронные пространства, пологи популяций и ассоциаций многоклеточных водорослей (рис. 6 а, линия 3), в ряду антропогенно создаваемых БФ (рис. 6 б, линия 4) и в ряду телесных систем (линия 1) между  $W_{\text{сух}}/S_{\Gamma}$  и  $V_{\Gamma}$  обнаруживается положительная связь, описываемая уравнением:

$$\log W_{\text{сух}}/S_{\Gamma} = \log a + b \log V_{\Gamma} . \quad (3)$$

Отметим, что значение коэффициента **b** в (3) для природно создаваемых надтелесных систем (рис. 6 а, линия 3) выше, чем для телесных (рис. 6 а, линия 1) и антропогенных (рис. 6 б, линия 4) БФ, причем у последних двух значения этого коэффициента практически не отличаются (см. табл.). Увеличение  $W_{\text{сух}}/S_{\Gamma}$  в рассматриваемых рядах во многом связано с увеличением высоты полога, а разброс точек вдоль обобщающих регрессий объясняется различиями в количестве и характере распределения в геометрическом пространстве физической поверхности пригодной к обрастанию, в распределении фотосинтетической радиации по профилю полога и в обеспеченности растений питательными веществами. Судя по ширине трендов, вероятно, что регулирующие возможности растений, а, значит, и число возможных состояний БФ в полной мере реализуются только в природных системах. Это позволяет им, по сравнению с антропогенно создаваемыми системами, в сопоставимых диапазонах  $V_{\Gamma}$ , поддерживать значительно выше максимально возможные уровни  $W_{\text{сух}}/S_{\Gamma}$ , в отдельных случаях - на порядок величин. Последнее говорит о том,

что при конструировании рифовых конструкций необходимо предельным образом учитывать биологические и экологические особенности растений, что не всегда удается сделать, и поэтому антропогенно создаваемые системы проигрывают природным.

Интересно сравнить максимально наблюдаемые величины  $W_{\text{сух}}/S_{\Gamma}$  в телесных и надтелесных системах. У осевых структур цистозир (рис. 6) и у пластин ламинарии [11] названная характеристика достигает 8.8 мг (сухой массы)/см<sup>2</sup>, это более чем на порядок меньше максимального значения - у надтелесных систем природного (500 мг (сухой массы)/см<sup>2</sup>) и антропогенного (250 мг (сухой массы)/см<sup>2</sup>) происхождения. Это говорит о том, что надтелесные системы в большей мере организованы в плане захвата значительно больших пространств, чем это могут сделать телесные системы, и, следовательно, могут сформировать большую фитомассу под единицей геометрической поверхности. Существование в растительной иерархии таких элементов как ветвь, слоевище, популяция, фитоценоз может рассматриваться как способ оптимального размещения, “укладки” телесной поверхности в пространстве растительного полога [6, 11].

**Выводы. 1.** Между биокосными фитосистемами природного и антропогенного происхождения не существует принципиальных различий. Те и другие имеют общие принципы формирования структурно-функциональной организации. **2.** Иерархический принцип заполнения пространства (формирование разного уровня “сгущений” биоорганического вещества) реализуется как в природных, так и в антропогенных БФ. **3.** В природных (телесных и надтелесных) и антропогенных БФ су-

ществуют определенные соотношения между геометрическим объемом ( $V_T$ ) системы и количеством сырой массы в его границах ( $W_{\text{СЫР}}$ ), описываемые уравнением вида:  $\log W_{\text{СЫР}} = \log a + b \log V_T$ . 4. В природных надтелесных и в антропогенных БФ при одних и тех же размерах геометрического про-

странства в среднем достигается примерно одинаковая концентрация биоорганического вещества и примерно одинаковое его количество на единицу геометрической поверхности. Максимально наблюдаемые величины названных параметров в природных системах, как правило, выше, чем в антропогенных.

1. *Вернадский В. И.* Избранные сочинения. - М.: Наука, 1988. - 328 с.
2. *Возжисинская В. Б.* Донные макрофиты Белого моря. - М.: Наука, 1986. - 191 с.
3. *Гродзинский А. М., Гродзинский Д. М.* Краткий справочник по физиологии растений. - Киев: Наук. думка, 1973. - 591 с.
4. *Калугина-Гутник А. А.* Макрофитобентос // Основы биологической продуктивности Черного моря. - К.: Наук. думка, 1979. - С. 123 - 142.
5. *Парчевский В. П., Рабинович М. А.* Скорость роста и урожай зеленой водоросли *Enteromorpha intestinalis* на искусственных субстратах в районе хозяйственных стоков. // Биология моря. - 1991. - № 2. - С. 30 - 36.
6. *Празукин А. В.* Сравнительная оценка фотосинтетической активности биологической и экологической поверхности. // III Всесоюзная конф. по морской биологии (Севастополь, ноябрь 1988 г.). - Киев: Наук. думка, 1988. - Ч. 1. - С. 189.
7. *Празукин А. В.* Экспериментальные водные биокосные фитосистемы (структура, функция). // Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу (Спецвыпуск "Экологии моря"). - Севастополь: Аквавита, 1999. - С. 47 - 69.
8. *Празукин А. В.* Структура кронового пространства слоевища черноморской бурой водоросли цистозире (*Cystoseira crinita* (Desf.) Bory) // Альгология. - 2000. - 10, № 2. - С. 119 - 130.
9. *Празукин А. В., Хайлов К. М.* Пространственная организация полога диатомового обрастания на экспериментальных конструкциях в сравнении с другими фитосистемами // Гидробиол. журн. - 1998. - 34, № 5. - С. 38 - 48.
10. *Тамметс Т. Х., Тооминг Х. Г.* Функциональность архетиктуры фитоценозов // Физиол. раст. - 1985. - 32, вып. 4. - С. 629 - 635.
11. *Хайлов К. М., Празукин А. В., Ковардаков С. А., Рыгалов В. Е.* Функциональная морфология морских многоклеточных водорослей. - К.: Наук. думка, 1992. - 280 с.
12. *Хайлов К. М., Празукин А. В., Минкина Н. И., Павлова Е. В.* Концентрация и функциональная активность живого вещества в сгущениях разного уровня организации // Успехи совр. биол. - 1999. - 119, № 1. - С. 3 - 14.
13. *Хайлов К. М., Празукин А. В., Рабинович М. А., Чепурнов В. А.* Связь биологических параметров фитообрастания с физическими параметрами экспериментальных "рифовых" конструкций в евтрофируемой морской акватории // Водные ресурсы. - 1994. - 21, № 2. - С. 166 - 175.
14. *Хайлов К. М., Рыгалов В. Е., Ковардаков С. А., Празукин А. В.* Связь концентрации фитомассы и объема ближайшего функционального пространства в водных биокосных системах // Водные ресурсы. - 1995б. - 22, № 6. - С. 738 - 745.
15. *Хайлов К. М., Юрченко Ю. Ю., Смолев Д. М., Празукин А. В.* Геометрические условия заполнения гидробионтами пространств и поверхностей искусственных жилищ // Успехи совр. биол. - 1998. - 118, вып. 5. - С. 585 - 596.
16. *Юрченко Ю. Ю.* Биогеохимический подход в изучении обрастания и задачах конструирования искусственных рифов: автореф. дисс... канд. биол. наук. - Севастополь, 2000. - 21