

УДК 582.26(265.5):57.087.1

**Б.И. Сёмкин<sup>1</sup>, Н.Г. Клочкова<sup>2</sup>, И.С. Гусарова<sup>3</sup>, М.В. Горшков<sup>4</sup> \***

<sup>1</sup> Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7;

<sup>2</sup> Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН,  
683000, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Партизанская, 6;

<sup>3</sup> Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,  
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4;

<sup>4</sup> Тихоокеанский государственный экономический университет,  
690091, г. Владивосток, Океанский проспект, 19

### **ДИСКРЕТНОСТЬ И КONTИНУАЛЬНОСТЬ ФЛОР ВОДОРосЛЕЙ-МАКРОФИТОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ РОССИИ. III. ТАКСОНОМИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ**

Проведен сравнительный анализ флор 40 участков дальневосточных морей России по таксономическим спектрам (DS-спектрам) водорослей-макрофитов с использованием новых индексов разнообразия, концентрации и мер сходства. С помощью индексов разнообразия установлено, что DS-спектры имеют близкую выравненность по количеству видов зеленых, бурых и красных водорослей. Приведена методика для оценки экологического состояния макрофитобентоса при антропогенной деструкции на примере Авачинской губы и ее частей. Показано, что континуальные переходы между участками фитоценозов высокого ранга могут быть обусловлены влиянием антропогенных факторов на прибрежно-морские экосистемы. Исследована применимость индексов разнообразия и мер сходства при экологической оценке состояния среды.

**Ключевые слова:** конкретная флора, дискретность, континуальность, водоросли-макрофиты, дальневосточные моря России, таксономические спектры, меры сходства, индексы разнообразия.

**Semkin B.I., Klochkova N.G., Gusarova I.S., Gorshkov M.V.** Discreteness and continuity of macrophyte algae floras in the Far Eastern Seas. III. Taxonomic spectra // *Izv. TINRO*. — 2010. — Vol. 163. — P. 217–227.

Floras of 40 sites in the Far Eastern seas of Russia are compared by taxonomic spectra of macrophyte algae with new indices of species diversity and concentration and measures of similarity. Similar uniformity of the spectra by number of species in the groups of green, brown and red algae is found. New method of ecological conditions estimation in areas of anthropogenic impact is presented on example of macrophytobenthos in the Avachinskaya Bay. The anthropogenic impact can influence on continual transitions between sections of high-ranked phytochoria in coastal marine

---

\* Сёмкин Борис Иванович, доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, e-mail: semkin@tig.dvo.ru; Клочкова Нина Григорьевна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, e-mail: ninacl@mail.ru; Гусарова Изабелла Семеновна, старший научный сотрудник, e-mail: tinro@tinro.ru; Горшков Михаил Владимирович, старший преподаватель, e-mail: gorshkov\_mv@mail.ru.

ecosystems. Possibility of the indices of diversity and measures of similarity application for ecological estimations of environments is discussed.

**Key words:** concrete flora, discreteness, continuity, macrophyte alga, Far Eastern seas of Russia, taxonomic spectrum, measure of similarity, index of diversity.

## Введение

Как известно, флору составляет совокупность (множество) видов растений, относящихся к разным систематическим группам — родам, семействам, порядкам и т.д.

В списках видов флор наблюдаются определенные соотношения между этими группами. Свойственные каждой флоре распределения видов между систематическими категориями высшего ранга называют **систематической структурой** флоры (Толмачев, 1974; Ключкова, Березовская, 2001). В качестве показателей систематической структуры рассматривают различные **таксономические спектры** — распределения таксонов низшего ранга по таксонам высшего ранга. Например, распределение видов флоры по семействам или видов по родам и т.д. (Толмачев, 1974; Шмидт, 1980; Сёмкин и др., 1997; Сёмкин, 2009).

Поскольку абсолютная численность видов разных флор весьма различна и отражает разный уровень их богатства, а косвенно — протяженность пространства, занимаемого каждой флорой, представляется более целесообразным оперировать не абсолютными значениями, а показателями соотношений между отдельными группами, выраженными в процентах (или долях) от общей численности соответствующих флор (Толмачев, 1974).

В данной статье мы рассмотрим распределение (в долях) видов водорослей-макрофитов трех отделов — Chlogophyta, Phaeophyta и Rhodophyta, — т.е. относительные таксономические спектры типа “отдел—вид”. Кратко будем обозначать их как DS-спектры (D — divisio (отдел), S — species (вид)). DS-спектры характеризуют систематическую структуру крупных хронологических единиц рангов флористической области и выше. В связи с этим для флор водорослей-макрофитов дальневосточного побережья морей России DS-спектры должны быть близки друг другу, а отклонения, возможно, могут быть вызваны антропогенными воздействиями, которые нарушают дискретность крупных хронологических единиц.

## Материалы и методы

Приведем обозначения 40 исследуемых районов: 1 — Мечигменская губа — мыс Чаплина, 2 — Анадырский залив, 3 — мыс Наварина — мыс Олюторский, 4 — Олюторский залив, 5 — заливы Корфа и Карагинский, 6 — Озерновский и Камчатский заливы, 7 — Кроноцкий залив, 8 — Авачинский залив до мыса Безымянного на юге, 9 — мыс Безымянный — мыс Лопатка, 10 — Командорские острова, 11 — мыс Лопатка — мыс Утхолокский, 12 — бухта Квачина — мыс Баджедомова, 13 — мыс Баджедомова — мыс Тайганос, 14 — мыс Тайганос — мыс Толстый, 15 — мыс Толстый — п-ов Лисянского до мыса Энкен, 16 — мыс Энкен — мыс Александра, 17 — Шантарские острова, 18 — мыс Александра — мыс Лазарева, 19 — о. Парамушир с прилежащими островами, 20 — о. Симушир с прилежащими островами, 21 — о. Уруп с прилежащими островами, 22 — о. Итуруп с прилежащими островами, 23 — о-ва Малой Курильской гряды, 24 — о. Шикотан, 25 — о. Кунашир, 26 — северо-восточный берег о. Сахалин и Амурский лиман, 27 — зал. Терпения, 28 — зал. Анива, 29 — о. Монерон, 30 — мыс Крильон — пос. Перепутье, 31 — г. Горнозаводск — пос. Антоново, 32 — мыс Слепиковского — мыс Штернберга, 33 — мыс Ламанон — мыс Китоуси, 34 — мыс Фуругельма — мыс Тык, 35 — мыс Южный — мыс Садингга, 36 — бухта Мучке — мыс Путятина, 37 — бухта Иннокентия — мыс Белкина, 38 — бухта Терней — бухта Валентина, 39 — бухта Валентина — мыс Поворотный, 40 — зал. Петра Великого (Сёмкин и др., 2010а).

Для определения DS-спектров взяты диагональные элементы матриц пересечения видовых списков водорослей отделов Chlorophyta, Phaeophyta и Rhodophyta (Сёмкин и др., 2010б).

Сходство спектров флор двух районов будем определять с помощью меры процентного сходства (Сёмкин и др., 2009):

$$J(p, q) = \sum_{i=1}^n \min(p_i, q_i),$$

где  $p$  и  $q$  — нормированные дескриптивные наборы ( $p = (p_1, \dots, p_n)$ ;  $q = (q_1, \dots, q_n)$ ;

$\sum_{i=1}^n p_i = 1$ ;  $\sum_{i=1}^n q_i = 1$ ;  $0 \leq J(p, q) \leq 1$ ). Мера процентного сходства двух нормированных дескриптивных наборов широко использовалась в экологии и биогеографии (Шорыгин, 1939; Василевич, 1969; Константинов, 1969; Уиттекер, 1980; Юрцев, Сёмкин, 1980; Сёмкин, 1987а; Сёмкин и др., 2010в). Подробнее с обширной библиографией по данному вопросу можно ознакомиться в литературных источниках (Чернов, 1971; Goodall, 1973; Песенко, 1982).

Соответствующая данной мере сходства мера различия (расстояние) связана с мерой, известной в науке под названием расстояния Хэмминга:

$$d(p, q) = 1 - \sum_{i=1}^n \min(p_i, q_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |p_i - q_i|,$$

где  $\sum_{i=1}^n |p_i - q_i|$  — расстояние Хэмминга. Данная мера различия двух дескриптивных наборов также изменяется в интервале  $[0, 1]$ .

Посредством вышеупомянутой меры сходства можно определить абсолютные и относительные меры разнообразия и концентрации каждого из дескриптивных наборов. Абсолютная мера разнообразия ( $R(p)$ ) дескриптивного набора  $p = (p_1, \dots, p_n)$  (Сёмкин, 1973) определяется как сходство дескриптивного набора  $p$  с дескриптивным набором  $q = \left(\frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right)$ :

$$R(p) = \sum_{i=1}^n \min\left(p_i, \frac{1}{n}\right),$$

где  $n$  — количество компонентов спектра ( $p_i \geq 0$ ;  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ ;  $i = 1, \dots, n$ );  $\frac{1}{n} \leq R(p) \leq 1$ . Относительную меру разнообразия ( $R_{rel}(p)$ ) определяем путем нормирования меры  $R$  к интервалу  $[0, 1]$ :

$$R_{rel}(p) = \frac{n R(p) - 1}{n - 1}.$$

Следует отметить, что разнообразие определяется не только числом компонентов спектра, но и выравненностью этих компонентов. Можно также использовать двойственную меру разнообразия ( $Q(p)$ ) меру концентрации (Акофф, Эмери, 1974):

$$Q(p) = 1 - R(p), \quad 0 \leq Q(p) \leq \frac{n-1}{n},$$

или относительную меру концентрации ( $Q_{rel}(p)$ ) дескриптивного набора  $p$ :

$$Q_{rel}(p) = \frac{n Q(p)}{n-1} = \frac{n \sum_{i=1}^n \left| p_i - \frac{1}{n} \right|}{2(n-1)}.$$

Очевидно, что меры  $R_{rel}(p)$  и  $Q_{rel}(p)$  в сумме составляют 1.

В нашем случае спектр состоит из трех компонентов ( $n = 3$ ), следовательно,  $p = (p_1, p_2, p_3)$ ,  $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ , где  $p_1$ ,  $p_2$  и  $p_3$  — это соответственно доля видов зеленых, бурых и красных водорослей. Мера процентного сходства двух спектров в данном случае равна:

$$J(p, q) = \min(p_1, q_1) + \min(p_2, q_2) + \min(p_3, q_3),$$

а соответствующая мера разнообразия:

$$R(p) = \min\left(p_1, \frac{1}{3}\right) + \min\left(p_2, \frac{1}{3}\right) + \min\left(p_3, \frac{1}{3}\right).$$

В альгофлористических исследованиях на основе DS-спектров рассчитывались различные отношения между компонентами спектра. Наиболее часто используются отношения между числом видов отделов Rhodophyta и Phaeophyta ( $R/P$  или  $p_3/p_2$ ), а также между числом видов Chlorophyta и Phaeophyta ( $C/P$  или  $p_1/p_2$ ), которые являются показателями широтной принадлежности флор (Feldman, 1937; Ключкова, 1996; Ключкова, Березовская, 2001). Иногда используется (для оценки экологического состояния водоемов) флористический коэффициент, равный сумме двух приведенных отношений (Cheney, 1977; Калугина-Гутник, 1989; Селиванова, 2004):

$$\frac{C}{P} + \frac{R}{P} = \frac{C+R}{P} = \frac{p_1 + p_3}{p_2}.$$

Можно использовать также индексы концентрации, зависящие только от одной доли, максимальной или минимальной (Berger, Parker, 1970; May, 1975; Сёмкин, 1987б; Песенко, Сёмкин, 1989; Мэгарран, 1992), — соответственно  $\lambda_{-\infty} = \min(p_1, p_2, p_3)$  или  $\lambda_{+\infty} = \max(p_1, p_2, p_3)$ . В нашем случае почти у всех DS-спектров  $\lambda_{+\infty} = p_3 = \frac{R}{(C+R+P)}$ , т.е. определяется как доля числа видов красных

водорослей. Этот индекс не зависит от числа высших таксонов (здесь отделов) и, как отмечает Мэй (May, 1975; Мэгарран, 1992), является лучшей мерой видового разнообразия. Следует также отметить, что индексы  $R/P$ ,  $C/P$ ,  $(C+R)/P$  определяются как отношения “часть к части” для D-спектра, а индекс  $R/(C+R+P)$  есть отношение “части к целому” и потому является более предпочтительным для определения отношений величин (Сёмкин и др., 2008; Semkin et al., 2009).

По-видимому, использование таксономических спектров или соотношения их компонентов для географических и экологических оценок не всегда правомерно. В частности, DS-спектры отражают систематическую структуру крупных фитоценозов, таких как флористические провинции, области, царства. Для широтного разграничения фитоценозов желательнее использовать широтные спектры (Сёмкин, 1987б).

## Результаты и их обсуждение

**Сходство таксономических спектров.** На основе DS-спектров флор сублиторали 40 участков побережья Дальнего Востока России (табл. 1) рассчитана матрица мер сходства (табл. 2). DS-спектры всех рассматриваемых 40 участков сходны на высоком уровне. Например, DS-спектр 40-го участка (зал. Петра Великого) сходен на уровне 99 % с DS-спектром участков 39 (бухта Валентина — мыс Поворотный), 35 (мыс Южный — мыс Садинг), 28 (зал. Анива), 20 (о. Симушир с прилежащими островами), 15 (мыс Толстый — п-ов Лисянского до мыса Энкен), причем приведенные участки разновелики по числу видов: соот-

## Таксономические спектры (DS-спектры) 40 участков сублиторали побережья Дальнего Востока России

Table 1

Taxonomic spectra for 40 sites in the sublittoral zone at the coast of Russian Far East

№	$C$	$P$	$R$	$\Sigma$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$R(p)$	$\lambda_\infty$
1	9	26	23	58	0,155	0,448	0,397	0,82	0,45
2	30	32	42	104	0,288	0,308	0,404	0,93	0,40
3	5	13	14	32	0,156	0,406	0,438	0,82	0,44
4	22	28	61	111	0,198	0,252	0,550	0,78	0,55
5	17	32	59	108	0,157	0,296	0,546	0,79	0,55
6	25	31	69	125	0,200	0,248	0,552	0,78	0,55
7	27	37	66	130	0,208	0,285	0,508	0,83	0,51
8	37	51	103	191	0,194	0,267	0,539	0,79	0,54
9	15	37	65	117	0,128	0,316	0,556	0,78	0,56
10	39	42	128	209	0,187	0,201	0,612	0,72	0,61
11	22	34	56	112	0,196	0,304	0,500	0,83	0,50
12	23	33	55	111	0,207	0,297	0,495	0,84	0,50
13	18	24	48	90	0,200	0,267	0,533	0,80	0,53
14	17	29	62	108	0,157	0,269	0,574	0,76	0,57
15	23	37	70	130	0,177	0,285	0,538	0,79	0,54
16	28	45	75	148	0,189	0,304	0,507	0,83	0,51
17	42	51	80	173	0,243	0,295	0,462	0,87	0,46
18	17	18	39	74	0,230	0,243	0,527	0,81	0,53
19	28	38	76	142	0,197	0,268	0,535	0,80	0,54
20	26	44	80	150	0,173	0,293	0,533	0,80	0,53
21	21	42	75	138	0,152	0,304	0,543	0,79	0,54
22	27	58	91	176	0,153	0,330	0,517	0,82	0,52
23	27	51	96	174	0,155	0,293	0,552	0,78	0,55
24	23	44	89	156	0,147	0,282	0,571	0,76	0,57
25	28	57	105	190	0,147	0,300	0,553	0,78	0,55
26	21	37	42	100	0,210	0,370	0,420	0,88	0,42
27	24	50	83	157	0,153	0,318	0,529	0,80	0,53
28	33	57	99	189	0,175	0,302	0,524	0,81	0,52
29	30	42	109	181	0,166	0,232	0,602	0,73	0,60
30	33	64	118	215	0,153	0,298	0,549	0,78	0,55
31	32	56	103	191	0,168	0,293	0,539	0,79	0,54
32	16	41	65	122	0,131	0,336	0,533	0,80	0,53
33	27	41	80	148	0,182	0,277	0,541	0,79	0,54
34	30	47	73	150	0,200	0,313	0,487	0,85	0,49
35	31	46	87	164	0,189	0,280	0,530	0,80	0,53
36	28	50	81	159	0,176	0,314	0,509	0,82	0,51
37	37	50	94	181	0,204	0,276	0,519	0,81	0,52
38	39	56	101	196	0,199	0,286	0,515	0,82	0,52
39	37	55	97	189	0,196	0,291	0,513	0,82	0,51
40	50	78	141	269	0,186	0,290	0,524	0,81	0,52

ветственно 269, 189, 164, 189, 150 и 117. Наблюдаемые резкие различия DS-спектров некоторых участков могут быть обусловлены как недостаточно подробным изучением данного участка в сравнении с другими, так и выпадением видов определенных компонентов спектра вследствие антропогенного пресса.

Однако есть некоторые неясные отклонения. Так, хорошо изученная альгофлора Командорских островов (10-й участок) имеет DS-спектр, резко отличающийся от других, за исключением о. Монерон (29-й участок).

**Индексы разнообразия таксономических спектров.** Следует отметить, что два DS-спектра, имеющих высокое сходство, всегда равны или близки по индексам разнообразия, но не наоборот, т.е. близкие или равные значения индексов разнообразия могут определяться для весьма различных DS-спектров. В

Матрица мер сходства DS-спектров 40 участков сублиторали  
побережья Дальнего Востока России

Table 2

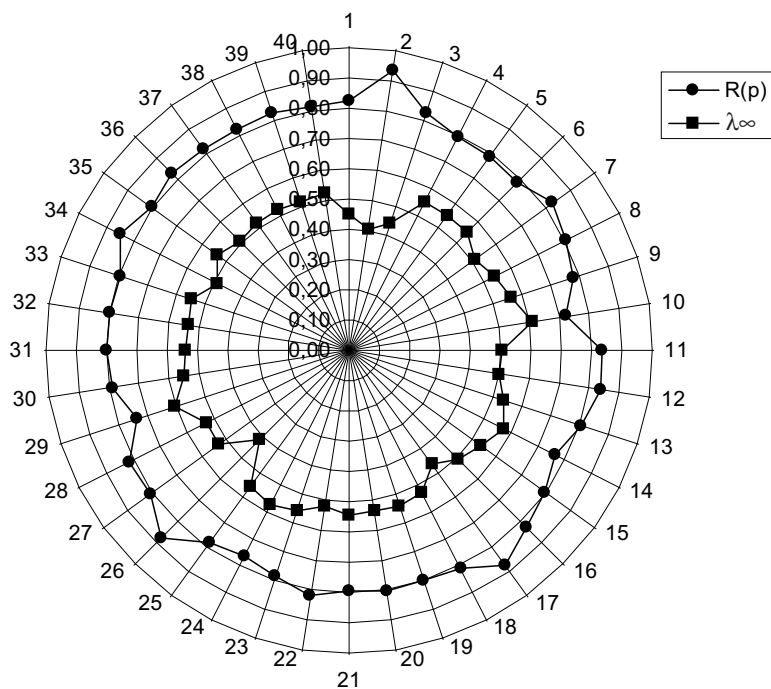
Matrix of similarity between 40 taxonomic spectra for the sublittoral zone  
of the Far Eastern seas

	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22		
<b>1</b>	×	99	99	98	98	99	96	98	95	98	97	92	99	97	90	96	95	97	96	<b>40</b>	
<b>2</b>	86	×	99	99	98	98	97	97	94	97	96	91	98	96	91	95	94	96	96	<b>39</b>	
<b>3</b>	96	87	×	99	97	98	97	97	93	97	95	91	98	95	90	95	94	96	96	<b>38</b>	
<b>4</b>	80	85	85	×	96	98	96	98	93	96	95	92	97	95	90	94	94	95	95	<b>37</b>	
<b>5</b>	85	86	89	96	×	97	98	96	96	97	96	91	99	98	91	96	94	96	95	<b>36</b>	
<b>6</b>	80	85	84	100	95	×	96	99	94	98	96	93	98	96	89	96	96	97	98	<b>35</b>	
<b>7</b>	84	90	88	96	95	96	×	95	93	95	94	88	96	95	93	93	92	93	95	<b>34</b>	
<b>8</b>	82	86	86	99	96	98	97	×	94	98	97	94	98	96	88	96	97	97	95	<b>33</b>	
<b>9</b>	84	84	88	93	97	93	92	93	×	96	96	90	96	98	89	96	95	96	95	<b>32</b>	
<b>10</b>	75	79	79	94	90	94	90	93	88	×	99	94	98	97	88	98	97	99	98	<b>31</b>	
<b>11</b>	86	90	90	95	95	94	98	96	93	89	×	93	97	98	87	99	98	100	96	<b>30</b>	
<b>12</b>	85	91	89	95	95	94	99	96	92	88	99	×	92	91	82	93	95	94	97	<b>29</b>	
<b>13</b>	82	87	86	98	96	98	97	99	93	92	96	96	×	98	90	97	95	97	90	<b>28</b>	
<b>14</b>	82	83	86	96	97	96	93	96	95	93	93	92	96	×	89	98	96	97	97	<b>27</b>	
<b>15</b>	84	87	88	97	98	96	97	98	95	92	96	96	98	96	×	87	85	87	99	<b>26</b>	
<b>16</b>	86	90	90	95	96	94	98	96	94	89	99	98	96	93	97	×	98	99	90	<b>25</b>	
<b>17</b>	85	94	89	91	91	91	95	92	89	85	95	96	93	89	92	95	×	98	96	<b>24</b>	
<b>18</b>	79	88	84	97	93	97	96	96	90	91	94	95	97	93	95	94	94	×	95	<b>23</b>	
<b>19</b>	82	87	86	98	96	98	97	100	93	92	96	96	100	96	98	96	93	97	×	<b>22</b>	
<b>20</b>	85	87	89	96	98	95	97	97	95	91	97	96	97	96	99	97	93	94	97	×	
<b>21</b>	85	86	89	95	99	94	94	96	98	90	96	94	95	96	98	96	91	92	95	98	×
<b>22</b>	88	86	92	92	97	92	95	94	96	87	96	95	94	94	96	96	91	91	94	96	97
<b>23</b>	84	85	89	96	99	95	95	96	97	91	95	94	96	98	98	96	91	93	96	98	99
<b>24</b>	83	83	87	95	98	95	94	95	97	92	93	92	95	99	97	94	89	92	95	96	97
<b>25</b>	84	85	88	95	99	95	94	95	98	90	95	94	95	97	97	95	90	92	95	97	99
<b>26</b>	92	92	95	87	87	87	91	88	86	81	92	92	89	85	88	91	92	87	88	89	88
<b>27</b>	87	86	91	93	98	93	95	95	97	88	96	95	95	95	97	96	91	92	95	97	99
<b>28</b>	85	88	90	95	98	95	97	97	95	90	98	97	97	95	98	98	93	94	97	99	98
<b>29</b>	78	80	83	95	94	95	91	94	92	97	90	89	93	96	94	90	86	92	93	93	93
<b>30</b>	85	86	89	95	100	95	95	96	97	90	95	95	95	97	98	96	91	92	96	98	99
<b>31</b>	84	86	89	96	99	95	96	97	96	91	96	96	97	97	99	97	92	94	97	99	98
<b>32</b>	86	84	90	92	96	91	92	93	98	86	93	92	93	93	95	94	89	90	93	96	97
<b>33</b>	83	86	87	98	97	97	97	99	95	92	96	95	98	97	99	97	92	95	99	98	97
<b>34</b>	87	91	91	94	94	93	97	95	93	87	99	98	95	91	95	98	96	93	95	95	94
<b>35</b>	83	87	87	97	97	97	98	99	94	92	97	97	99	96	99	98	93	96	99	98	96
<b>36</b>	87	89	91	94	96	93	97	95	95	89	98	97	95	94	97	99	93	93	95	98	97
<b>37</b>	83	88	87	97	95	97	99	98	92	91	97	98	99	95	97	97	94	97	98	97	95
<b>38</b>	84	89	88	97	96	96	99	98	93	90	98	98	98	94	98	98	95	96	98	97	95
<b>39</b>	84	89	88	96	96	96	99	97	93	90	99	98	98	94	97	99	95	95	98	98	96
<b>40</b>	84	88	88	96	97	96	98	98	94	91	98	97	98	95	99	98	94	95	98	99	97
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>

связи с этим при сравнении DS-спектров для резко изменяющегося флористического состава прибрежных сообществ при естественных или антропогенных катастрофических воздействиях нельзя использовать индексы разнообразия.

Индексы разнообразия  $R(p)$  и  $\lambda_{+\infty}$  (см. табл. 1) представим в виде лепестковой диаграммы (см. рисунок). Индекс концентрации  $\lambda_{+\infty}$  принимает максимальные значения в случае, когда индекс разнообразия имеет минимальное значение, и наоборот. Отсюда следует, что все DS-спектры имеют сходные значения индексов разнообразия и индексов концентрации (за редкими исключениями). Например, наибольшие значения индекса разнообразия имеют DS-спектры участков 2 (Анадырский залив), 17 (Шантарские острова), 26 (северо-восточный берег о. Сахалин и Амурский лиман) и 34 (мыс Фуругельма — мыс Тык). К ним

близки участки 7 (Кроноцкий залив), 11 (мыс Лопатка — мыс Утхолокский), 12 (бухта Квачина — мыс Баджедомова). Указанные спектры более “выровненные” по компонентам  $C$ ,  $R$  и  $P$ . Меры сходства между этими DS-спектрами имеют наибольшие значения. Наименьшие индексы разнообразия (наиболее “невыровненные” по компонентам спектра) имеют DS-спектры участков 10 (Командорские острова), 14 (мыс Тайганос — мыс Толстый), 24 (о. Шикотан) и 29 (о. Монерон). Эти же DS-спектры выделяются и по индексам концентрации (см. рисунок), и между ними определяется наибольшее сходство.



Индексы разнообразия и концентрации для 40 участков побережья Дальнего Востока РФ

Indices of diversity and concentration for 40 sites at the coast of Russian Far East

**Оценка антропогенной деструкции макрофитобентоса Авачинской губы на основе DS-спектров флоры.** Рассмотрим изменения систематической структуры альгофлоры при антропогенном воздействии на основе DS-спектров на примере Авачинской губы. Для этих целей возьмем 9 спектров, характеризующих три части Авачинской губы: вся губа, горло и внутренняя часть — в различные годы (1970, 1991, 1999), по данным Н.Г. Клочковой и В.А. Березовской (2001), и два DS-спектра флор в качестве контрольных эталонных районов: Авачинский залив до мыса Безымянного на юге и о. Парамушир с прилежащими островами.

Делались попытки (Селиванова, 2004) оценить экологическое состояние Авачинской губы с помощью коэффициентов  $(C + R)/P$ , не приведшие к успеху. Однако оценка той же системы с помощью отношений  $C/P$  и  $R/P$  позволила установить существенные изменения состояния участков Авачинской губы в период с 1970 по 1999 г. (Клочкова, Березовская, 2001).

Повторно проведем обработку данных Н.Г. Клочковой и В.А. Березовской (2001), используя вышерассмотренные математические методы, т.е. рассчитаем меры разнообразия (табл. 3) и меры сходства (табл. 4). Рассмотрим полученные результаты. Индексы разнообразия  $R(p)$  для отдельных районов будем обозначать как  $R(x)$ , где  $x$  — номер района (аналогично и для меры процентного сходства  $J$ ).

Таблица 3

Таксономические спектры (DS-спектры) Авачинской губы  
(Клочкова, Березовская, 2001) и индексы разнообразия

Table 3

Taxonomic spectra (Клочкова, Березовская, 2001) and indices of diversity  
for the Avachinskaya Bay

№	<i>C</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	$\Sigma$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$R(p)$	$\lambda_\infty$
1	32	47	86	165	0,194	0,285	0,521	0,81	0,52
2	22	37	83	142	0,155	0,261	0,585	0,75	0,58
3	31	41	66	138	0,225	0,297	0,478	0,86	0,48
4	31	45	82	158	0,196	0,285	0,519	0,81	0,52
5	24	36	76	136	0,176	0,265	0,559	0,77	0,56
6	30	37	63	130	0,231	0,285	0,485	0,85	0,48
7	30	27	46	103	0,291	0,262	0,447	0,89	0,45
8	25	27	45	97	0,258	0,278	0,464	0,87	0,46
9	30	15	19	64	0,469	0,234	0,297	0,86	0,47
10	37	51	103	191	0,194	0,267	0,539	0,79	0,54
11	28	38	76	142	0,197	0,268	0,535	0,80	0,54

*Примечание.* *C*, *R*, *P* — число зеленых, красных и бурых водорослей;  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  — доля соответственно *C*, *R* и *P*;  $R(p)$  — индекс разнообразия; 1, 2, 3 — DS-спектры для частей Авачинской губы (вся губа, горло, внутренняя часть) в 1970 г.; 4, 5, 6 — то же в 1991 г.; 7, 8, 9 — то же в 1999 г.; 10 и 11 — контрольные эталонные зоны (см. в тексте).

Таблица 4

Матрица мер сходства DS-спектров Авачинской губы

Table 4

Matrix of similarity for taxonomic spectra in the Avachinskaya Bay

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	×	93,7	95,7	99,8	96,2	96,3	90,3	93,6	72,5	98,2	98,3
2		×	89,4	93,4	97,4	90,0	86,2	87,9	68,6	95,5	95,1
3			×	95,9	91,9	98,8	93,3	96,7	75,6	93,9	94,3
4				×	96,0	96,5	90,5	93,8	72,7	98,0	98,3
5					×	92,6	88,5	90,5	70,8	98,0	97,6
6						×	94,0	97,3	76,2	94,5	94,9
7							×	96,6	82,3	90,2	90,6
8								×	78,9	92,5	92,9
9									×	72,5	72,8
10										×	99,6
11											×

*Примечание.* Обозначения как в табл. 3.

Индексы разнообразия DS-спектров имеют наибольшее численное значение во внутренней части Авачинской губы во все рассматриваемые годы, а также в горле и во всей губе в 1999 г. Численные значения мер разнообразия колеблются от 0,85 до 0,89: ( $R(3) = 0,855$ ;  $R(6) = 0,848$ ;  $R(9) = 0,864$ ;  $R(7) = 0,886$ ;  $R(8) = 0,869$ ). Для остальных DS-спектров индекс разнообразия изменяется в пределах от 0,75 до 0,81, т.е. имеет значения, близкие к эталонным DS-спектрам (см. табл. 3). Отсюда следует, что наибольшей антропогенной нагрузке подвергались участки внутренней части губы в разные годы, а вся губа и горло в 1999 г.

**Сравнение с эталонными зонами.** Из данных табл. 4 следует, что в 1970 г. DS-спектры всей губы (1) были сходны с контрольными эталонными зонами (10, 11) более чем на 98 % ( $J_{1,10} = 98,2$  %;  $J_{1,11} = 98,3$  %), DS-спектры горла — более чем на 95 % ( $J_{2,10} = 95,5$  %;  $J_{2,11} = 95,1$  %). Внутренняя часть губы уже значительно отличалась от эталонов ( $J_{3,10} = 93,9$  %;  $J_{3,11} = 94,3$  %). Это подтверждается и исследованиями Н.Г. Клочковой и В.А. Березовской (2001), которые утверждают, что уже в 1970 г. начался процесс полисапробизации.



К 1991 г. сходство для всей губы и горла по-прежнему высокое ( $J_{4,10} = 98,0$  %;  $J_{4,11} = 98,3$ ;  $J_{5,10} = 98,0$ ;  $J_{5,11} = 97,6$  %). Для внутренней части губы отмечается небольшой скачок в сторону увеличения сходства ( $J_{6,10} = 94,6$  %;  $J_{6,11} = 95,0$  %).

К 1999 г. происходит существенное изменение структуры DS-спектров во внутренней части Авачинской губы ( $J_{9,10} = 72,5$  %;  $J_{9,11} = 72,8$  %), в горле ( $J_{8,10} = 92,5$  %;  $J_{8,11} = 92,9$  %) и в целом в губе ( $J_{7,10} = 90,3$  %;  $J_{7,11} = 90,6$  %).

В общем, можно сказать, что методика сравнения флоры Авачинской губы с контрольными участками по мерам процентного сходства, рассчитанным на основе DS-спектров, позволила выделить этапы антропогенной деструкции макрофитобентоса Авачинской губы и ее частей.

**Сравнение частей и целого Авачинской губы.** Разнообразию DS-спектров внутренней части Авачинской губы в разные годы почти не менялось (см. табл. 3). Меры сходства были попарно различны, кроме меры сходства (около 99 %) между DS-спектрами внутренней части губы в 1970 и 1991 гг. ( $J_{3,6} = 98,8$  %;  $J_{3,9} = 75,6$ ;  $J_{6,9} = 76,1$  %). Наименьшее сходство всех DS-спектров наблюдается со спектром внутренней части губы в 1999 г. ( $J_{1,9} = 72,5$  %;  $J_{2,9} = 68,6$ ;  $J_{3,9} = 75,6$ ;  $J_{4,9} = 72,7$ ;  $J_{5,9} = 70,7$ ;  $J_{6,9} = 76,1$ ;  $J_{7,9} = 82,2$ ;  $J_{8,9} = 78,9$ ;  $J_{10,9} = 72,5$ ;  $J_{11,9} = 72,8$  %), и, следовательно, эта часть губы в большей степени была нарушена антропогенными воздействиями.

С 1970 по 1991 г. существенных изменений в систематической структуре Авачинской губы не обнаружено ( $J_{1,4} = 99,8$  %;  $J_{2,5} = 97,8$ ;  $J_{3,6} = 98,8$  %). Значительные изменения отмечаются в период с 1991 по 1999 г. ( $J_{4,7} = 90,5$  %;  $J_{5,8} = 90,5$ ;  $J_{6,9} = 76,2$  %).

Меры сходства, определенные по DS-спектрам как дескриптивным множествам, позволяют достаточно четко наблюдать изменения экологического состояния сообществ при антропогенных воздействиях.

## Заключение

Вышерассмотренные методы сравнительного анализа таксономических спектров (в данной работе на примере DS-спектров) могут быть использованы для сравнения также и других видов спектров — экологических, географических, спектров жизненных форм и др. Данные методы являются обобщением ранее используемых индексов отношений на  $n$ -мерный случай, где  $n$  — количество компонентов спектра.

Отдельно обратим внимание на соотношение индексов разнообразия и мер сходства. Приведенные в данной работе меры сходства более полно раскрывают отношения между сравниваемыми объектами, чем широко используемые в биологии меры разнообразия. Меры разнообразия, по сути, являются производными от мер сходства и учитывают только процентное соотношение компонентов без определения их качественных характеристик.

Вопреки привычным представлениям не наблюдается обратной связи между близкими индексами разнообразия и близкими мерами сходства, т.е. если DS-спектры близки или равны, следовательно, индексы разнообразия близки или равны, но обратное неверно, т.е. близким индексам разнообразия для двух DS-спектров могут соответствовать спектры, имеющие меру процентного сходства заключенного в интервале от 0 до 1. Например, расхождения для объектов 3 и 9, т.е. соответственно спектр внутренней части Авачинской губы в 1970 г. и спектр той же в 1999 г.

В целом меры разнообразия и концентрации для всех 40 участков оказались приблизительно равными, за исключением 8 участков. На 4 участках: 2 (Анадырский залив), 17 (Шантарские острова), 26 (северо-восточный берег о. Сахалин и Амурский лиман), 34 (мыс Фуругельма — мыс Тык) — численное значение разнообразия резко увеличено, а на 4 остальных: 10 (Командорские острова), 14 (мыс Тайганос — мыс Толстый), 24 (о. Шикотан), 29 (о. Монерон) — оно резко

уменьшено. Причины, определяющие резкое изменение разнообразия, могут быть следующими: 1) недостаточно полно определен список видов водорослей-макрофитов; 2) на участках не представлен весь набор экотопов данного района; 3) влияние антропогенных факторов; 4) участок является переходной зоной между крупными фитоценозами ранга флористической провинции, области или царства. При увеличении разнообразия происходит “выравнивание” компонентов, что характерно для флор при антропогенном влиянии. Уменьшение разнообразия здесь, видимо, отражает неполноту списков или неполноту учета экотопов.

Предложенные нами в данной работе математические методы могут заменить ранее используемые методы Фельдмана (Feldman, 1937) и Чини (Cheney, 1977).

### Список литературы

- Акофф Р.А., Эмери Ф.Ф.** О целеустремленных системах : монография. — М. : Сов. радио, 1974. — 272 с.
- Василевич В.И.** Статистические методы в геоботанике : монография. — Л. : Наука, 1969. — 232 с.
- Калугина-Гутник А.А.** Изменение видового состава фитобентоса в бухте Ласпи за период 1964–1985 гг. // Экология моря. — Киев : Наук. думка, 1989. — Вып. 31. — С. 7–11.
- Клочкова Н.Г.** Флора водорослей-макрофитов Татарского пролива и особенности ее формирования : монография. — Владивосток : Дальнаука, 1996. — 288 с.
- Клочкова Н.Г., Березовская В.А.** Макрофитобентос Авачинской губы и его антропогенная деструкция : монография. — Владивосток : Дальнаука, 2001. — 208 с.
- Константинов А.С.** Использование теории множеств в биогеографическом и экологическом анализе // Успехи соврем. биологии. — 1969. — Т. 67, вып. 1. — С. 99–108.
- Мэгарран Э.** Экологическое разнообразие и его измерение : монография. — М. : Мир, 1992. — 184 с.
- Песенко Ю.А.** Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях : монография. — М. : Наука, 1982. — 287 с.
- Песенко Ю.А., Сёмкин Б.И.** Измерение видового разнообразия сообществ и ширины экологических ниш видов: индуктивный и плюралистический подход // Экосистемные исследования: историко-методологические аспекты. — Владивосток : ДВО АН СССР, 1989. — С. 133–159.
- Селиванова О.Н.** Макрофиты российского шельфа Берингова моря, Командорских островов и юго-восточной Камчатки : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. — Владивосток : ДВГУ, 2004. — 39 с.
- Сёмкин Б.И.** Дескриптивные множества и их приложения // Исследование систем. Т. 1. Анализ сложных систем. — Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1973. — С. 83–94.
- Сёмкин Б.И.** К методике анализа разновеликих множеств в сравнительной флористике // Комаровские чтения. — 2009. — Вып. 56. — С. 170–185.
- Сёмкин Б.И.** Теоретико-графовые методы в сравнительной флористике // Теоретические и методические проблемы сравнительной флористики : мат-лы 2-го раб. совещ. по сравнит. флористике. — Л. : Наука, 1987а. — С. 149–163.
- Сёмкин Б.И.** Об использовании математических методов для оценки состояния окружающей среды // Методы оценки состояния природной среды. — Владивосток : ДВО АН СССР, 1987б. — С. 163–165.
- Семкин Б.И., Горшков М.В., Варченко Л.И.** Об изменениях содержания воды в однолетних побегах хвойных древесных растений в умеренной климатической зоне // Сибир. экол. журн. — 2008. — Т. 15, № 4. — С. 537–544.
- Сёмкин Б.И., Клочкова Н.Г., Гусарова И.С., Горшков М.В.** Дискретность и континуальность флор водорослей-макрофитов дальневосточных морей России. I. Общий видовой состав // Изв. ТИНРО. — 2010а. — Т. 160. — С. 57–70.
- Сёмкин Б.И., Клочкова Н.Г., Гусарова И.С., Горшков М.В.** Дискретность и континуальность флор водорослей-макрофитов дальневосточных морей России. II. Зеленые (Chlorophyta), бурые (Phaeophyta), красные (Rhodophyta) // Изв. ТИНРО. — 2010б. — Т. 162. — С. 104–112.

**Сёмкин Б.И., Орешко А.П., Горшков М.В.** Об использовании биоинформационных технологий в сравнительной флористике. III. Меры сходства и различия дескриптивных множеств // Бюл. БСИ ДВО РАН. — Владивосток, 2010в. — Вып. 6. — С. 76–89. <http://botsad.ru/journal/number6/76-89.pdf>.

**Сёмкин Б.И., Кононова Н.Н., Урусов В.М.** Ландшафтная составляющая биологического разнообразия Дальнего Востока и ее значение для формирования эколого-географического каркаса региона // Географические исследования на Дальнем Востоке : мат-лы Первой конф., посвящ. 150-летию образования Рус. географ. об-ва. — Владивосток : Дальнаука, 1997. — С. 123–126.

**Сёмкин Б.И., Орешко А.П., Горшков М.В.** Об использовании биоинформационных технологий в сравнительной флористике. I. Схемно-целевой подход. Абсолютные меры сходства и различия // Бюл. БСИ ДВО РАН. — Владивосток, 2009. — Вып. 3. — С. 102–111. <http://www.botsad.ru/journal/number3/02.pdf>.

**Толмачев А.И.** Введение в географию растений : монография. — Л. : ЛГУ, 1974. — 244 с.

**Уиттекер Р.** Сообщества и экосистемы : монография. — М. : Прогресс, 1980. — 327 с.

**Чернов Ю.И.** О некоторых индексах, используемых при анализе структуры животного населения суши // Зоол. журн. — 1971. — Т. 50, вып. 7. — С. 1079–1091.

**Шмидт В.М.** Статистические методы в сравнительной флористике : монография. — Л. : ЛГУ, 1980. — 176 с.

**Шорыгин А.А.** Питание, избирательная способность и пищевые взаимоотношения некоторых Gobiidae Каспийского моря // Зоол. журн. — 1939. — Т. 18, вып. 1. — С. 27–51.

**Юрцев Б.А., Сёмкин Б.И.** Изучение конкретных и парциальных флор с помощью математических методов // Ботан. журн. — 1980. — Т. 65, № 12. — С. 1706–1718.

**Berger W.H., Parker F.L.** Diversity of planktonic Foraminifera in deep sea sediments // Science. — 1970. — Vol. 168. — P. 1345–1347.

**Cheney D.T.** (R+C)/P — a new and improved ratio for comparing seaweed floras // J. Phycol. — 1977. — Vol. 13, № 2. — P. 12.

**Feldman J.** Recherches sur la vegetation marine de la Mediterranee. La cote des Alberes // Rev. algol. — 1937. — Vol. 10. — P. 1–339.

**Goodall D.W.** Sample similarity and species correlation // Handbook of Vegetation science. Part 5. Ordination and classification of vegetation. — The Hague, 1973. — P. 107–156.

**May R.M.** Patterns of species abundance and diversity // Ecology and evolution of communities. — Cambridge : Harvard Univ. Press, 1975. — P. 197–227.

**Semkin B.I., Gorshkov M.V., Varchenko L.I.** Multiyears and seasonal changing of water containing in annual sprouts of wood plants in temperate climatic zone // Proceedings from International conference: Ecology and diversity of forest ecosystems in the Asiatic part of Russia. — Kostelec nad Černými lesy, Czech Republic, 2009. — P. 85–91.

*Поступила в редакцию 27.08.10 г.*