

Д.В.Рисник, А.П.Левич, Н.Г.Булгаков, И.Г.Радченко
ПОКАЗАТЕЛИ РАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ФИТОПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВ И АНАЛИЗ ИХ ИЗМЕНЧИВОСТИ НА ФОНЕ СЕЗОННЫХ, ГЕОГРАФИЧЕСКИХ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ.*

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Биологический факультет.
E-mail: biant3@mail.ru*

Предложены методы преобразования численностей клеток фитопланктона различных размеров в интегральный показатель, характеризующий размерную структуру пробы. Предложен принцип разделения клеток в пробе на размерные классы. Исследовано влияние на различные показатели размерной структуры сезонных, географических и метрологических факторов с целью дальнейшего применения показателей для биоиндикации качества вод.

Размерная структура (РС) фитопланктонных сообществ реагирует на состояние окружающей среды. Т.е. при изменении состояния окружающей среды происходит не только замена одних видов на другие, но и замена групп, объединяющих виды с близкими объемами клеток [1-3].

Для определения размеров клеток не обязательно требуется высокая квалификация фитопланктологов, поскольку оно может быть полностью автоматизировано в режиме реального времени (метод проточной цитофлуориметрии, подсчет численности и объема клеток фитопланктона с помощью счетчика Коултера, применение цифровой обработки изображений [4]). Таким образом, определение показателей РС можно использовать в качестве экспресс-метода экологического мониторинга.

При этом возникают следующие задачи: 1) преобразовать измеренные значения размеров и численностей (или биомасс) клеток в пробе в количественный показатель, характеризующий РС каждой отдельной пробы; 2) определить зависимость показателей от факторов, не влияющих на степень экологического благополучия, например, от географического расположения места отбора пробы, сезона наблюдений; 3) проанализировать влияние на показатели РС погрешностей в определении численностей организмов; 4) найти граничное значение показателя, разделяющее "благополучные" и "неблагополучные" условия среды.

В настоящей работе решены первые три задачи.

Исходные данные. В качестве исходных данных для анализа использованы численности и биомассы различных видов фитопланктона, встречавшихся в протоколах многолетнего (1979-2008 гг.) гидробиологического мониторинга по Нижней, Средней и Верхней Волге (<http://ecograde.belozersky.msu.ru>). В связи с тем, что гидробиологический мониторинг не всегда предусматривал определение размеров клеток или биомасс определенного вида [5], был произведен поиск размеров отдельных клеток каждого вида фитопланктона по различным источникам (определители, базы данных в Интернете, частные сообщения, см. http://ecograde.belozersky.msu.ru/db/size/volga_don.xls). Поскольку о размерах клеток, определенных до рода и с неопределенным видом, невозможно судить по литературным источникам, во избежание их возможного вклада, который нельзя учесть, при относительной численности хотя бы одного такого вида более 3% пробу исключали из анализа; при численности менее 3% эти виды не учитывали, т.е. считали их численность равной нулю.

* Работа частично поддержана грантами РФФИ № 10-04-00013а, 09-04-00541.

Показатели размерной структуры. В работе рассмотрены несколько показателей РС:

1) Средний размер клеток в пробе: $\bar{m} = \frac{b}{n}$, где b и n – соответственно суммарные биомасса и численность фитопланктона в данном наблюдении [6].

2) Показатели РС, характеризующие соотношения между собой размерных классов (крупных, средних, мелких видов) в пробе. Для определения этих показателей необходимо выделение нескольких размерных классов клеток. Разбиение на классы проводили на всем массиве данных Волги. Принцип разбиения был основан на той предпосылке, что размерные классы должны быть равны по суммарной численности составляющих их видов на всем массиве данных. Аналогичным образом производили разбиение по равнонаполненности классов по суммарной биомассе.

Расчеты производили для двух, трех и четырех размерных классов:

Применяли два подхода к расчету показателей РС:

1. Первый подход основан на сравнении более крупных классов со всеми более мелкими. Для двух классов предложены показатели: $S_n = \frac{n_K}{n_K + n_M}$, где n_K и n_M – соответственно численности классов крупных и мелких, и $S_b = \frac{b_K}{b_K + b_M}$, где b_M и b_K – соответственно биомассы классов мелких и крупных клеток [6].

Для трех классов предложены – $S_n = \frac{1}{3} \left(\frac{n_K}{n_K + n_C} + \frac{n_K}{n_K + n_M} + \frac{n_C}{n_C + n_M} \right)$, где n_K , n_C и n_M – соответственно численности классов крупных, средних и мелких; аналогичная формула для показателя S_b .

Для четырех классов предложены –

$S_n = \frac{1}{6} \left(\frac{n_K}{n_K + n_{KC}} + \frac{n_K}{n_K + n_{MC}} + \frac{n_K}{n_K + n_M} + \frac{n_{KC}}{n_{KC} + n_{MC}} + \frac{n_{KC}}{n_{KC} + n_M} + \frac{n_{MC}}{n_{MC} + n_M} \right)$, где n_K , n_{KC} , n_{MC} и n_M – соответственно численности классов крупных, средних более крупных, средних более мелких и мелких (т.е. класс средних размеров разделен на два класса); аналогичная формула для показателя S_b .

Предложенные показатели изменяются от нуля (в пробе представлены только мелкие клетки) до единицы (в пробе присутствуют только крупные клетки). При равенстве численностей (или биомасс) всех классов показатели равны 0,5.

Во всех приведенных выше формулах отношение $\frac{n_x}{n_x + n_y}$ или $\frac{b_x}{b_x + b_y}$ (где n_x и n_y – суммарные численности клеток, b_x и b_y – суммарные биомассы клеток в размерных классах x и y соответственно, причем класс x всегда крупнее класса y) при равенстве нулю суммы численностей, находящихся в знаменателе ($n_x + n_y = 0$ или $b_x + b_y = 0$) полагали, что отношение $\frac{n_x}{n_x + n_y} = 1$ или $\frac{b_x}{b_x + b_y} = 1$ при соседстве классов x и y и при наличии в пробе более крупных не пустых размерных классов и одно-

временном отсутствии более мелких непустых размерных классов; $\frac{n_x}{n_x + n_y} = 0$ или

$\frac{b_x}{b_x + b_y} = 0$ при соседстве классов x и y и при наличии в пробе более мелких непустых

размерных классов и одновременном отсутствии более крупных непустых размерных классов. Во всех остальных случаях при $n_x + n_y = 0$ или $b_x + b_y = 0$, полагали

$\frac{n_x}{n_x + n_y} = 0,5$ или $\frac{b_x}{b_x + b_y} = 0,5$.

2. Второй подход оценивает соотношение между размерными классами по тангенсу угла наклона прямой, аппроксимирующей методом наименьших квадратов относительные численности (или биомассы) размерных классов в пробе, с последующим отображением тангенса угла в интервал значений показателя от 0 до 1.

Уравнение прямой, проведенной по методу наименьших квадратов для большего

количества точек, описывается системой уравнений:
$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N y_i x_i = a \sum_{i=1}^N x_i^2 + b \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N y_i = a \sum_{i=1}^N x_i + Nb \end{cases}, \text{ где}$$

$(x_i; y_i)$ – координаты i -той точки, N – общее число точек (классов), a – тангенс угла наклона прямой, b – свободный член в уравнении прямой. Тангенс угла наклона пря-

мой соответственно равен:
$$tg\alpha = a = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i}$$
, где $(x_i; y_i)$ – координаты

i -той точки, n – общее число точек. В нашем случае, например, для разбиения на четыре класса величины x_i – это номера классов (1 – мелкие, 2 – средние более мелкие, 3 – средние более крупные, 4 – крупные), а y_i – соответствующие численности ($y_1 = n_m$, $y_2 = n_{mc}$, $y_3 = n_{kc}$, $y_4 = n_k$). На рисунке 1 приведена графическая иллюстрация определения $tg\alpha$ в программе MS Excel. Чтобы получить показатель РС, изменяющийся в диапазоне от 0 до 1, делили полученный $tg\alpha$ на максимальный его разброс и добавляли слагаемое 0,5.

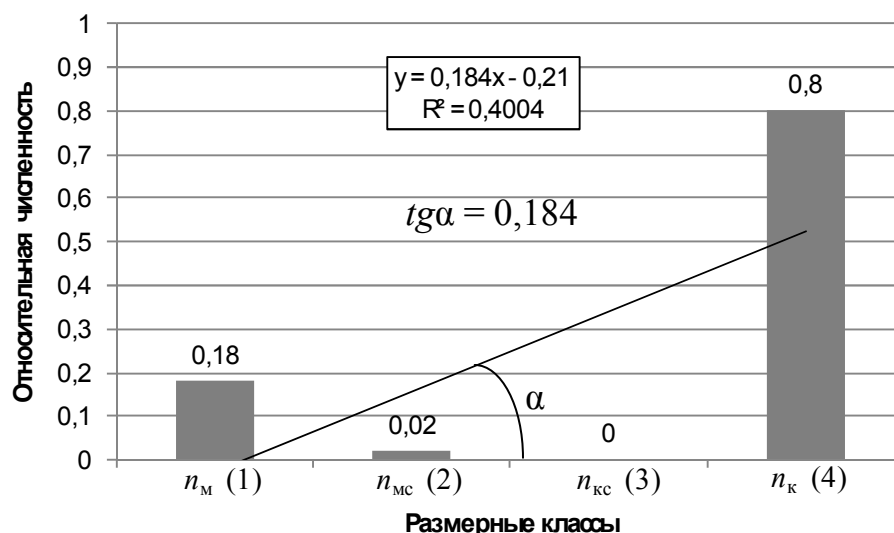


Рис.1 Определение тангенса угла наклона прямой, аппроксимирующей методом наименьших квадратов, численности клеток в четырех размерных классах. По оси x отложены номера размерных классов: 1 для численности класса мелких клеток, 2 – для средних более мелких, 3 – для средних более крупных, 4 – для крупных.

Таким образом, для двух классов $S_n = \frac{n_K - n_M}{2 \times (n_K + n_M)} + 0,5 = \frac{1 \times n_K + 0 \times n_M}{n_K + n_M}$, где n_K

и n_M – соответственно численности классов крупных и мелких, 2 – максимально возможный разброс всех значений тангенса угла (от - 1 до 1), 0,5 – поправка для приведения полученного показателя к положительным значениям. Численность минимального класса с множителем 0 приведена во всех формулах, чтобы подчеркнуть симметричность формулы. Как видим, формула для двух классов в этом подходе совпадает с формулой, используемой в предыдущем подходе. Аналогично для показателя S_b .

Для трех классов $S_n = \frac{0,5 \times (n_K - n_M)}{1 \times (n_K + n_C + n_M)} + 0,5 = \frac{1 \times n_K + 0,5 \times n_C + 0 \times n_M}{n_K + n_C + n_M}$, где n_K ,

n_C и n_M – соответственно численности классов крупных, средних и мелких, 1 – максимально возможный разброс всех значений тангенса угла (от - 0,5 до 0,5), 0,5 в сумме – поправка для приведения полученного показателя к положительным значениям. Аналогично для показателя S_b .

Для четырех классов:

$$S_n = \frac{0,3 \times n_K + 0,1 \times n_{КС} - 0,1 \times n_{МС} - 0,3 \times n_M}{0,6 \times (n_K + n_{КС} + n_{МС} + n_M)} + 0,5 = \frac{1 \times n_K + \frac{2}{3} \times n_{КС} + \frac{1}{3} \times n_{МС} + 0 \times n_M}{n_K + n_{КС} + n_{МС} + n_M}$$

, где n_K , $n_{КС}$, $n_{МС}$ и n_M – соответственно численности классов крупных, средних более крупных, средних более мелких и мелких, 0,6 – максимально возможный разброс всех значений тангенса угла (от - 0,3 до 0,3), 0,5 – поправка для приведения полученного показателя к положительным значениям. Аналогично для показателя S_b .

Итоговая формула в общем виде $S_n = \frac{(N-1) \times n_K + (N-2) \times n_{КС} + \dots + (N-N) \times n_M}{(N-1)(n_K + n_{КС} + \dots + n_M)}$, где n_K , $n_{КС}$ и n_M – соответственно

численности классов крупных, средних более крупных и мелких, N – общее число размерных классов.

Группы однородности. Разбиение на группы однородности производили, исходя из предположения, что РС фитопланктона может зависеть от географического положения водного объекта и сезона года. Разбиение производили для того, чтобы при использовании показателей в биоиндикации исключить зависимость показателей РС от факторов, не влияющих на степень экологического благополучия. Испытана гипотеза, согласно которой внутри групп однородности РС должна быть более сходна, чем между ними. Были выделены следующие группы однородности: по отношению к подбассейну (Верхняя (ВВ), Средняя (СВ), Нижняя Волга (НВ)) и по календарным сезонам (весна, зима, лето, осень), кроме того, были выделены группы однородности по сезонам внутри бассейнов (Весна ВВ, Весна СВ, Весна НВ, Лето ВВ, Лето СВ, Лето НВ, Осень ВВ, Осень СВ, Осень НВ, Зима ВВ, Зима СВ). Наблюдения по Нижней Волге в зимний сезон отсутствовали.

При помощи критерия проверки на симметричность и значение эксцесса [7, модификации Д'Агостино] выявлено, что все показатели РС внутри групп однородности не распределены по нормальному закону. Следовательно, для анализа их различий не применимы параметрические методы (тест Стьюдента, дисперсионный анализ). Поэтому для сравнения групп однородности был использован U -критерий Манна-Уитни как непараметрический метод статистического анализа, не требующий нормальности распределения.

Анализ повторностей. Анализ повторностей проводили для того, чтобы различить разбросы показателей РС, вызванные различным качеством вод и разбросы, вызванные погрешностями в отборе и обработке проб.

Для анализа повторностей были использованы данные по 51 повторности отбора проб с поверхности Белого моря в июне 1969 г. в период, когда плотность фитопланктона невелика, и 50 повторностям отбора проб с поверхности Белого моря в августе 1969 г., когда плотность фитопланктона значительно выше [8].

Поскольку в этих исследованиях производили только подсчет численностей видов без определения биомассы и размеров клеток, размеры клеток были взяты из литературных источников, подобно тому, как это было сделано для волжских видов. После удаления видов, определенных только до рода, остались 11 июньских и 44 августовских проб. Были выделены границы для двух, трех и четырех размерных классов на основании принципа равнонаполненности классов по численности и по биомассе клеток. Анализ четырех размерных классов по численности клеток оказался невозможным, поскольку численность вида *Thalassionema nitzschioides* составляла в пробах около 50% от общей численности.

Результаты и обсуждение.

Выбор подхода к определению показателей S_n и S_b . Анализ подхода, основанного на сравнении классов, и подхода, основанного на определении тангенса угла наклона аппроксимирующей прямой, показал, что оба метода на массиве данных по Волге дают сходные результаты: коэффициент детерминации R^2 для массивов показателей РС, полученных по разным подходам, колебался от 0,75 до 0,90. Однако, метод сравнения классов в ряде случаев дает некорректные результаты из-за неадекватного вклада классов с нулевой численностью. Так, наличие одного пустого класса крупных средних даёт два нулевых слагаемых в соответствующей формуле. Это может приводить к меньшим ожидаемым значениям показателей, иногда вплоть до доминирования более мелких видов над крупными, когда численность крупных видов составляет порядка 80% (рис.1). Или обратный результат: при нулевом классе мелких средних и численности мелких видов порядка 80% вклад нулевого класса в знаменатель слагае-

мых даёт два слагаемых, равных 1, что и приводит к завышению значения показателя. Таким образом, метод, основанный на определении тангенса угла наклона аппроксимирующей прямой, можно рекомендовать как более корректный при работе с нулевыми классами.

Анализ разбиений. Разбиение по принципу равнонаполненности классов по численности в сравнении с разбиением по равнонаполненности классов по биомассе дает больше достоверно различных групп однородности (табл. 1, 2). Лучше различимы бассейны Верхней и Нижней Волги, а также весенний и осенний, весенний и зимний сезоны. Но в тоже время разбиение по равнонаполненности классов по численности характеризуется более низкими коэффициентами вариации, т.е. может оказаться слабо чувствительным к качеству вод. Для разбиений по принципу равнонаполненности классов по биомассе, в отличие от разбиения по численности, характерны более низкие значения показателей S_n и S_b за счет сдвига значений границ в сторону более крупных клеток, из-за чего при высоких значениях показателя S_n , показатели S_b могут оказаться более низкими.

Анализ групп однородности. Результаты анализа групп однородности по U -критерию Манна-Уитни приведены в таблицах 1 и 2. Для заключения о неравенстве двух групп однородности необходимо, чтобы U -критерий был меньше табличного U_0 (последний столбец таблицы), причем, чем меньше U -критерий, тем сильнее различия исследуемых групп. Анализ групп однородности показал, что наилучшими для учета факторов, не влияющих на качество вод, являются показатели S_n и S_b для двух размерных классов при разбиении по равнонаполненности классов по численности. Они позволяют различить Верхнюю и Нижнюю Волгу а также весенний и зимний, весенний и осенний сезоны. Кроме того, они различают 17 из 55 сочетаний более мелких групп однородности. Незначительно хуже показатели S_b для трех и четырех размерных классов при разбиении по равнонаполненности классов по численности, они также позволяют различить Верхнюю и Нижнюю Волгу; весенний и зимний, весенний и осенний сезоны, но среди более мелких групп однородности различают 15 из 55 и 14 из 55 соответственно. На третьем месте можно расположить показатели \bar{m} , S_n для трех классов при разбиении по равнонаполненности классов по биомассе и S_n для трех и четырех классов при разбиении по равнонаполненности классов по численности. Они не различают подбассейнов Волги, но различают весенний и зимний, весенний и осенний сезоны, среди более мелких групп однородности различают 14 из 55, 16 из 55, 12 из 55 и 14 из 55 соответственно. Остальные показатели учитывают факторы, не влияющие на качество вод, значительно хуже, поэтому их применение не желательно. В целом, из показателей S_n и S_b предпочтение можно отдать показателю S_b , поскольку он дает больше достоверно различных групп однородности.

Таблица 1. Результаты поиска групп однородности по сезонам года и подбассейнам Волги при разбиении по равнонаполненности классов по численности. В таблице приведены значения U -критерия Манна-Уитни, деленные на 1000. Обозначения: НВ – Нижняя Волга, ВВ – Верхняя Волга, СВ – Средняя Волга, жирным шрифтом выделены значения U -критерия, соответствующие значимым различиям исследуемых групп.

Группы однородности		2 размерных класса		3 размерных класса		4 размерных класса		\bar{m}	U_0	N	
		S_n	S_b	S_n	S_b	S_n	S_b				
ВВ	НВ	259	258	351	239	343	240	346	273	844	726
ВВ	СВ	558	566	554	549	524	507	572	496	844	1305
НВ	СВ	558	571	539	576	520	535	564	425	726	1305

Весна	Зима	11	11	10	11	10	11	10	12	719	47
Весна	Лето	632	622	663	646	648	602	557	388	719	1203
Весна	Осень	175	183	161	170	164	198	219	290	719	904
Зима	Лето	26	28	26	28	26	28	23	20	47	1203
Зима	Осень	21	21	20	21	20	21	18	15	47	904
Лето	Осень	516	529	529	533	522	531	521	490	1203	904
Весна ВВ	Весна НВ	17	17	17	17	17	17	15	12	142	207
Весна ВВ	Весна СВ	27	27	31	31	27	25	30	21	142	370
Весна ВВ	Зима ВВ	0	0	0	0	0	0	0	0	142	9
Весна ВВ	Зима СВ	2	2	1	1	1	2	1	2	142	38
Весна ВВ	Лето ВВ	42	41	46	46	45	43	41	24	142	419
Весна ВВ	Лето НВ	30	28	31	29	31	23	25	16	142	285
Весна ВВ	Лето СВ	54	54	57	57	56	52	51	29	142	499
Весна ВВ	Осень ВВ	30	29	32	31	31	28	26	16	142	274
Весна ВВ	Осень НВ	22	21	24	24	25	22	24	13	142	232
Весна ВВ	Осень СВ	44	43	43	43	43	39	40	23	142	398
Весна НВ	Весна СВ	33	32	41	40	34	35	41	32	207	370
Весна НВ	Зима ВВ	1	1	1	1	1	1	1	1	207	9
Весна НВ	Зима СВ	2	3	2	2	2	3	2	3	207	38
Весна НВ	Лето ВВ	60	58	71	68	61	59	59	36	207	419
Весна НВ	Лето НВ	12	17	9	14	17	31	33	24	207	285
Весна НВ	Лето СВ	81	79	88	85	78	73	74	43	207	499
Весна НВ	Осень ВВ	13	15	7	10	13	18	19	23	207	274
Весна НВ	Осень НВ	17	18	11	12	16	20	16	20	207	232
Весна НВ	Осень СВ	64	63	66	64	62	54	57	34	207	398
Весна СВ	Зима ВВ	1	1	1	1	1	1	1	1	370	9
Весна СВ	Зима СВ	4	4	4	5	4	4	4	5	370	38
Весна СВ	Лето ВВ	49	49	45	45	39	40	58	66	370	419
Весна СВ	Лето НВ	29	31	30	37	27	36	50	45	370	285
Весна СВ	Лето СВ	48	46	49	48	44	48	63	80	370	499
Весна СВ	Осень ВВ	26	27	25	27	22	25	39	43	370	274
Весна СВ	Осень НВ	30	30	28	29	23	24	31	36	370	232
Весна СВ	Осень СВ	37	38	44	44	40	44	50	63	370	398
Зима ВВ	Зима СВ	0	0	0	0	0	0	0	0	9	38
Зима ВВ	Лето ВВ	2	2	2	2	2	2	2	1	9	419
Зима ВВ	Лето НВ	1	1	2	1	1	1	1	1	9	285
Зима ВВ	Лето СВ	3	3	3	3	3	3	3	2	9	499
Зима ВВ	Осень ВВ	1	1	2	2	2	1	1	1	9	274
Зима ВВ	Осень НВ	1	1	1	1	1	1	1	1	9	232
Зима ВВ	Осень СВ	2	2	3	2	2	2	2	1	9	398
Зима СВ	Лето ВВ	7	7	7	8	7	8	6	6	38	419
Зима СВ	Лето НВ	4	4	4	4	4	4	3	4	38	285
Зима СВ	Лето СВ	9	10	8	10	8	10	8	7	38	499
Зима СВ	Осень ВВ	5	5	4	5	5	5	4	4	38	274
Зима СВ	Осень НВ	3	3	3	4	3	4	3	3	38	232
Зима СВ	Осень СВ	8	8	6	7	7	7	6	5	38	398
Лето ВВ	Лето НВ	62	66	62	76	64	81	75	51	419	285
Лето ВВ	Лето СВ	114	118	113	113	108	106	110	90	419	499
Лето ВВ	Осень ВВ	50	52	52	55	52	57	59	49	419	274
Лето ВВ	Осень НВ	57	57	52	55	54	57	50	41	419	232
Лето ВВ	Осень СВ	70	71	77	82	79	87	80	72	419	398
Лето НВ	Лето СВ	86	96	81	99	82	98	96	61	285	499
Лето НВ	Осень ВВ	29	29	33	26	31	24	31	33	285	274
Лето НВ	Осень НВ	26	38	34	27	36	23	23	28	285	232

Лето НВ	Осень СВ	37	35	65	76	69	74	37	48	285	398
Лето СВ	Осень ВВ	66	71	68	71	64	68	73	58	499	274
Лето СВ	Осень НВ	76	79	67	72	68	70	66	49	499	232
Лето СВ	Осень СВ	89	97	98	106	93	106	102	86	499	398
Осень ВВ	Осень НВ	21	22	26	26	24	26	32	26	274	232
Осень ВВ	Осень СВ	58	58	55	54	54	51	58	46	274	398
Осень НВ	Осень СВ	63	64	53	54	57	53	52	39	232	398

Таблица 2. Результаты поиска групп однородности по сезонам года и подбассейнам Волги при разбиении по равнонаполненности классов по биомассе. В таблице приведены значения U -критерия Манна-Уитни, деленные на 1000. Обозначения те же, что в табл. 1.

Группы однородности		2 размерных класса		3 размерных класса		4 размерных класса		\bar{m}	U_0	N	
		S_n	S_b	S_n	S_b	S_n	S_b				
ВВ	НВ	351	347	345	342	245	259	346	273	844	726
ВВ	СВ	597	600	636	634	601	610	572	496	844	1305
НВ	СВ	595	594	636	636	618	615	564	425	726	1305
Весна	Зима	11	11	9	10	13	13	10	12	719	47
Весна	Лето	485	480	541	522	503	478	557	388	719	1203
Весна	Осень	374	369	245	388	381	360	219	290	719	904
Зима	Лето	21	21	21	21	25	25	23	20	47	1203
Зима	Осень	17	16	16	16	19	19	18	15	47	904
Лето	Осень	524	526	545	548	536	539	521	490	1203	904
Весна ВВ	Весна НВ	10	10	13	12	13	12	15	12	142	207
Весна ВВ	Весна СВ	27	27	31	30	30	29	30	21	142	370
Весна ВВ	Зима ВВ	1	1	0	0	1	0	0	0	142	9
Весна ВВ	Зима СВ	2	2	1	2	2	2	1	2	142	38
Весна ВВ	Лето ВВ	31	30	37	35	37	34	41	24	142	419
Весна ВВ	Лето НВ	19	19	23	22	20	18	25	16	142	285
Весна ВВ	Лето СВ	39	39	49	47	47	44	51	29	142	499
Весна ВВ	Осень ВВ	20	19	23	21	23	20	26	16	142	274
Весна ВВ	Осень НВ	17	17	21	19	20	19	24	13	142	232
Весна ВВ	Осень СВ	32	32	38	37	36	34	40	23	142	398
Весна НВ	Весна СВ	54	53	52	52	49	50	41	32	207	370
Весна НВ	Зима ВВ	0	0	0	0	1	1	1	1	207	9
Весна НВ	Зима СВ	1	1	1	1	2	2	2	3	207	38
Весна НВ	Лето ВВ	61	59	63	60	60	58	59	36	207	419
Весна НВ	Лето НВ	38	39	18	18	30	29	33	24	207	285
Весна НВ	Лето СВ	76	75	84	81	76	74	74	43	207	499
Весна НВ	Осень ВВ	18	19	19	35	20	34	19	23	207	274
Весна НВ	Осень НВ	15	14	11	12	17	18	16	20	207	232
Весна НВ	Осень СВ	62	62	66	64	57	56	57	34	207	398
Весна СВ	Зима ВВ	1	1	1	1	2	2	1	1	370	9
Весна СВ	Зима СВ	5	5	5	5	6	6	4	5	370	38
Весна СВ	Лето ВВ	77	75	83	81	84	79	58	66	370	419
Весна СВ	Лето НВ	60	60	57	60	64	67	50	45	370	285
Весна СВ	Лето СВ	98	97	112	110	108	104	63	80	370	499
Весна СВ	Осень ВВ	52	53	51	54	50	54	39	43	370	274
Весна СВ	Осень НВ	44	45	42	44	43	45	31	36	370	232
Весна СВ	Осень СВ	67	68	59	61	65	68	50	63	370	398
Зима ВВ	Зима СВ	0	0	0	0	0	0	0	0	9	38
Зима ВВ	Лето ВВ	2	2	2	1	2	2	2	1	9	419
Зима ВВ	Лето НВ	1	1	1	1	1	1	1	1	9	285
Зима ВВ	Лето СВ	2	2	2	2	3	2	3	2	9	499
Зима ВВ	Осень ВВ	1	1	1	1	1	1	1	1	9	274

Зима ВВ	Осень НВ	1	1	1	1	1	1	1	1	9	232
Зима ВВ	Осень СВ	2	2	2	2	2	2	2	1	9	398
Зима СВ	Лето ВВ	6	6	6	6	7	7	6	6	38	419
Зима СВ	Лето НВ	3	3	2	2	3	4	3	4	38	285
Зима СВ	Лето СВ	8	8	8	8	9	9	8	7	38	499
Зима СВ	Осень ВВ	4	4	3	4	4	4	4	4	38	274
Зима СВ	Осень НВ	3	3	2	2	3	4	3	3	38	232
Зима СВ	Осень СВ	6	6	7	7	7	7	6	5	38	398
Лето ВВ	Лето НВ	67	66	70	70	82	77	75	51	419	285
Лето ВВ	Лето СВ	113	113	122	121	115	116	110	90	419	499
Лето ВВ	Осень ВВ	59	59	62	64	62	63	59	49	419	274
Лето ВВ	Осень НВ	49	49	51	51	54	52	50	41	419	232
Лето ВВ	Осень СВ	74	74	71	71	80	79	80	72	419	398
Лето НВ	Лето СВ	87	87	100	100	104	103	96	61	285	499
Лето НВ	Осень ВВ	35	36	37	37	29	33	31	33	285	274
Лето НВ	Осень НВ	29	29	28	29	20	20	23	28	285	232
Лето НВ	Осень СВ	72	72	35	35	34	35	37	48	285	398
Лето СВ	Осень ВВ	75	76	85	84	80	82	73	58	499	274
Лето СВ	Осень НВ	65	65	75	76	72	71	66	49	499	232
Лето СВ	Осень СВ	97	97	101	100	105	105	102	86	499	398
Осень ВВ	Осень НВ	31	31	30	30	32	30	32	26	274	232
Осень ВВ	Осень СВ	61	62	66	67	61	63	58	46	274	398
Осень НВ	Осень СВ	53	53	59	59	53	53	52	39	232	398

Анализ повторностей. Коэффициенты вариации значений показателей внутри групп однородности и коэффициенты вариации значений показателей, полученных для повторностей Белого моря, приведены в табл. 3 и 4. Коэффициенты вариации групп однородности оказались ниже коэффициентов вариации повторностей только для показателей S_n и S_b весенних проб Нижней Волги при разбиении по равнонаполненности классов по численности. Поскольку разбросы значений показателей S_n и S_b весенних проб Нижней Волги могут быть полностью объяснены погрешностями в отборе и обработке проб, пробы данной группы однородности не должны быть использованы для поиска границ, отличающих "благополучные" значения показателя от "неблагополучных". Значения коэффициентов вариации показателей S_n и S_b при разбиении по равнонаполненности классов по биомассе, а также \bar{m} значительно выше соответствующих показателей для повторностей Белого моря, следовательно, все значения этих показателей могут быть использованы в целях биоиндикации качества вод.

Таблица 3. Коэффициенты вариации внутри групп однородности при разбиении по равнонаполненности классов по численности в сравнении с коэффициентами вариации повторностей Белого моря. Обозначения: НВ – Нижняя Волга, ВВ – Верхняя Волга, СВ – Средняя Волга, Белое море 1 – августовские пробы Белого моря, Белое море 2 – июньские пробы Белого моря, жирным шрифтом выделены значения коэффициентов вариации, которые были ниже соответствующих коэффициентов вариации повторностей Белого моря.

Группы однородности	2 размерных класса		3 размерных класса		4 размерных класса		\bar{m}	N
	S_n	S_b	S_n	S_b	S_n	S_b		
ВВ	0,65	0,49	0,48	0,36	0,51	0,40	1,78	844
НВ	0,33	0,13	0,37	0,15	0,34	0,13	1,01	726
СВ	0,67	0,48	0,49	0,34	0,49	0,37	2,49	1305
Весна	0,31	0,21	0,31	0,21	0,30	0,21	1,58	719
Зима	0,89	0,59	0,73	0,45	0,69	0,44	1,60	47
Лето	0,62	0,41	0,46	0,29	0,47	0,33	2,67	1203

Осень	0,72	0,48	0,51	0,34	0,51	0,36	2,18	904
Весна ВВ	0,32	0,19	0,30	0,20	0,29	0,19	1,00	142
Весна НВ	0,13	0,02	0,13	0,02	0,23	0,13	0,97	207
Весна СВ	0,38	0,28	0,38	0,28	0,34	0,25	1,95	370
Зима ВВ	0,76	0,68	0,30	0,27	0,40	0,39	1,56	9
Зима СВ	0,94	0,58	0,84	0,49	0,77	0,45	1,53	38
Лето ВВ	0,68	0,52	0,50	0,39	0,54	0,43	1,66	419
Лето НВ	0,35	0,08	0,37	0,08	0,35	0,09	0,72	285
Лето СВ	0,71	0,54	0,46	0,35	0,47	0,40	3,15	499
Осень ВВ	0,77	0,56	0,49	0,39	0,54	0,44	2,31	274
Осень НВ	0,41	0,22	0,48	0,25	0,37	0,18	0,76	232
Осень СВ	0,87	0,56	0,54	0,35	0,56	0,39	2,21	398
Белое море 1	0,10	0,03	0,09	0,05	-	-	0,19	44
Белое море 2	0,29	0,04	0,28	0,04	-	-	0,44	11

Таблица 4. Коэффициенты вариации внутри групп однородности при разбиении по равнонаполненности классов по биомассе в сравнении с коэффициентами вариации повторностей Белого моря. Обозначения те же, что в табл. 3.

Группы однородности	2 размерных класса		3 размерных класса		4 размерных класса		\bar{m}	N
	S_n	S_b	S_n	S_b	S_n	S_b		
ВВ	2,34	1,66	1,59	1,12	1,33	0,97	1,78	844
НВ	2,89	1,81	1,79	1,08	1,11	0,61	1,01	726
СВ	2,70	2,06	2,08	1,60	1,64	1,21	2,49	1305
Зима	2,06	1,55	1,46	1,06	1,44	1,22	1,58	719
Весна	4,27	4,28	2,50	2,17	1,24	0,93	1,60	47
Лето	2,90	2,11	1,97	1,51	1,42	0,98	2,67	1203
Осень	2,87	2,00	1,99	1,39	1,51	0,97	2,18	904
Весна ВВ	1,94	1,55	1,26	0,96	1,07	0,85	1,00	142
Весна НВ	1,67	1,23	1,29	0,81	1,13	0,67	0,97	207
Весна СВ	2,35	1,81	1,66	1,28	1,43	1,18	1,95	370
Зима ВВ	3,00	3,00	1,99	2,14	1,37	1,34	1,56	9
Зима СВ	4,30	4,30	2,71	2,17	1,43	1,21	1,53	38
Лето ВВ	2,43	1,71	1,71	1,20	1,50	1,09	1,66	419
Лето НВ	3,46	2,00	1,70	1,12	0,73	0,39	0,72	285
Лето СВ	2,82	2,11	2,39	1,81	1,86	1,32	3,15	499
Осень ВВ	2,25	1,59	1,55	1,07	1,40	0,94	2,31	274
Осень НВ	3,60	2,12	2,01	1,25	1,09	0,63	0,76	232
Осень СВ	2,84	2,17	2,21	1,71	1,66	1,13	2,21	398
Белое море 1	0,27	0,15	0,19	0,14	0,19	0,14	0,19	44
Белое море 2	0,38	0,15	0,28	0,08	0,29	0,10	0,44	11

Заключение.

Произведенный анализ осуществляли с целью дальнейшей биоиндикации состояния вод бассейна Волги. Для оценки экологического состояния вод необходимо для показателей РС установить границу, разделяющую "благополучные" и "неблагополучные" значения показателей. Для определения этой границы необходим одновременный анализ полученных показателей РС и физико-химических факторов, характеризующих состояние водной среды. Поскольку в реальных условиях экосистема подвержена одновременному влиянию многих факторов, методы корреляционного анализа в данном случае не применимы. Для одновременного определения границ экологического благополучия и экологически допустимых уровней факторов, разделяющих "допустимые" и "недопустимые" значения фактора, был предложен метод ЭДН [9-14]. Анализ значений границ экологического благополучия для показателей

РС и экологически допустимых уровней, полученных методом ЭДН на массиве биологических и физико-химических данных по Нижней Волге, будет приведен в последующих публикациях.

Благодарности

Авторы глубоко признательны Л.В. Ильяш, Ф.Б. Шкундиной и В.Г. Девяткину за предоставленные данные по размерам видов, а также своим коллегам: В.А. Курочкиной, Е.И. Комаровской и В.И. Ярошевичу за помощь в поисках размеров видов по различным источникам.

Литература

1. *Rapport D.J., Regier H.A., Hutchinson T.C.* Ecosystem behavior under stress // *Am. Nat.* 1985. V.125. Pp.617-640.
2. *Левич А. П., Булгаков Н. Г., Замолодчиков Д. Г.* Оптимизация структуры кормовых фитопланктонных сообществ. Под редакцией проф. В.Н. Максимова. М.: Товарищество научных издателей КМК. 1996. – 136 с.
3. *Каменир Ю., Михайлюк Т.И., Попова А.Ф., Кемп Р., Дубинский Ц.* Влияние антропогенного загрязнения на фитопланктон Каневского водохранилища (Украина). 2. Сравнение размерных спектров // *Альгология.* – 2008. – Т. 18, № 2. – С. 145-159
4. *Лях А.М., Суворов А.М., Брянцева Ю.В.* Обзор методов количественного учета фитопланктона. // *Системы контроля окружающей среды.* Сб. науч. тр. НАН Украины. МГИ: - Севастополь. 2002. – С. 425-430.
5. *Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем /* Под ред. Абакумова В.А. СПб., 1992. – 318 с.
6. *Булгаков Н. Г., Курочкина В. А., Левич А. П., Максимов В. Н. Мамихин С. В.* Биоиндикация экологического состояния по размерной и ранговой структурам фитопланктона водных объектов Московского региона // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический.* 2009. Т. 4. Вып. 3, Приложение 1. Часть 1. – С. 106–114.
7. *Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б.* Сравнительный анализ критериев проверки отклонения распределения от нормального закона // *Метрология.* 2005. № 2. с. 3-23
8. *Кольцова Т.И., Конопля Л.А., Максимов В.Н., Федоров В.Д.* К вопросу о представительности выборок при анализе фитопланктонных проб. // *Гидробиологический журнал.* 1971. Т. 7. №3. с. 109-116.
9. *Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н.* Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга. М.: НИИ-Природа, 2004. 271 с.
10. *Левич А.П. Булгаков Н.Г., Максимов В.Н., Рисник Д.В.* Создание экологически эффективной системы контроля состояния природной среды на основе нормативов качества, устанавливаемых непосредственно по систематическим данным мониторинга // *Актуальные проблемы экологии и природопользования.* Вып. 12: Сборник научных трудов. – М.: ИПЦ «Луч», 2010. с. 20-24.
11. *Левич А.П., Булгаков Н.Г., Рисник Д.В., Милько Е.С.* Экологический контроль окружающей среды по данным биологического и физико-химического мониторинга природных объектов // *Компьютерные исследования и моделирование.* 2010. №2. С.199-207.
12. *Левич А.П., Рисник Д.В., Булгаков Н.Г., Милько Е.С., Леонов А.О.* Методические вопросы применения показателей видового разнообразия фитопланктона для анализа качества вод Нижней Волги // *Использование и охрана природных ресурсов России.* 2010. №5. С.44-48. №6. С. 33-37.
13. *Булгаков Н.Г., Рисник Д.В., Левич А.П., Милько Е.С.* Анализ экологического состояния вод для отдельных створов Нижней Волги на основе биоиндикации по показателям видового разнообразия фитопланктона // *Вода: химия и экология.* 2010. №12. С.27-34.

14. Левич А.П., Милько Е.С. Нормирование качества среды и биоиндикация экологического состояния природных объектов как ранговый корреляционный анализ зависимостей "доза-эффект" для функций многих переменных. // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сборник научных трудов. (Данный сборник)

D. V. Risnik, A. P. Levich, N. G. Bulgakov, I.G.Radchenko

**INDICES OF SIZE STRUCTURE OF PHYTOPLANKTON COMMUNITIES
AND ANALYSIS OF ITS VARIABILITY IN THE BACKGROUND OF SEASONAL,
GEOGRAPHICAL AND METROLOGICAL VARIATIONS.**

Lomonosov Moscow State University, Biological Faculty

Methods of transformation of phytoplankton cells number of various sizes into the integral index characterizing the size structure of the sample are proposed. The principle of cells partition into the size classes are proposed. The effect of seasonal, geographical and meteorological factors influence on different indices of size structure is studied with a view to further development of the indices for bioindication of water quality.