

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФИТОПЛАНКТОНА В МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

*Ю.В. Брянцева, Ю.Н. Токарев,  
Н.В. Бурмистрова, В.В. Мельников,  
В.Ф. Жук, В.И. Василенко,  
М.И. Силаков, Е.Ю. Георгиева,  
О.Н. Данилова, А.М. Лях*

Институт биологии южных морей  
НАН Украины  
г. Севастополь, пр. Нахимова, 2  
E-mail: brek\_v@mail.ru;  
y.tokarev@gmail.com

*При проведении мониторинговых исследований для оценки состояния сообществ фитопланктона впервые предложено использовать морфологическое разнообразие (вместо видового), рассчитанное по формуле Шеннона-Уивера на основе значений индекса сферичности. Были получены значимые связи между указанными параметрами и показателями развития микроводорослей. Рассматриваются два состояния сообщества, условно обозначенное как «устойчивое» и «не устойчивое». Исследование сезонной динамики морфологического показателя (индекса сферичности) фитопланктона и биолюминесценции показало сопряженность периодов минимумов и максимумов этих характеристик, а также отличие состояния сообщества открытой части моря от акватории Севастопольской бухты.*

**Введение.** При проведении мониторинга за состоянием морских экосистем обязательным компонентом исследований является фитопланктон, как один из ключевых звеньев трофической цепи. При описании фитопланктона традиционно используют такие параметры, как численность, биомасса, объем клеток или площадь поверхности. Однако они имеют настолько широкий диапазон колебаний в пространственно-временных масштабах, что, как правило, их средние значения при сопоставлении различаются не значительно.

Более показательными критериями состояния сообществ являются индексы видового разнообразия Шеннона-Уивера индекс Мейера и Диро, однако они имеют ряд ограничений статистического характера.

Все это обусловило потребность в таком критерии, который соответствовал бы строгим требованиям математической статистики, изменялся бы в узких пределах, отражал состояние фитопланктона на разных уровнях организации и, наконец, для расчета которого не требовалась бы высокая квалификация.

В качестве такого универсального критерия был предложен новый индекс, который можно выразить как степень близости определенной формы к шару или отклонения от неё. С одной стороны, это самая совершенная форма с точки зрения геометрии (минимальная площадь поверхности при данном объеме), имеющая только один линейный размер, а с другой – самая простая с точки зрения эволюции.

Изменчивость условий водной среды (температура, солёность, плотность, вязкость и т.д.) способствовала изменению формы в процессе эволюции по пути её усложнения и возникновению адаптаций, повышающих плавучесть организмов. Ведь, чем больше форма тела отклоняется от формы шара, тем меньше скорость его погружения [1].

Можно предположить, что усложнение условий водной среды (увеличение факторов воздействия) приводит к изменению формы клеток фитопланктона в сторону увеличения отношения площади поверхности к объёму. И наоборот, изотропия среды приводит к преобладанию в сообществе видов близких к шарообразной форме.

Если форму шара принять за единицу, то любая другая фигура будет иметь меньший индекс, стремящийся к нулю с усложнением формы, что делает его удобным при сопоставлении сообществ микроводорослей.

Имея такой безразмерный показатель, характеризующий разнообразие форм микроводорослей, при расчете информационной энтропии Шеннона-Уивера можно использовать вместо значений обилия видов, величины индекса сферичности. Тогда морфологическое разнообразие может рассматриваться как одно из понятий «биоразнообразия».

**Материалы и методы.** В период с декабря 2007 по август 2008 года были исследованы структурные характеристики фитопланктона в рамках мониторинга за состоянием Севастопольской бухты.

Пробы отбирали в 3-х точках: в двухмильной зоне Севастополя (район бухты Круглая) – ст. № 1, в форватере Севастопольской бухты в районе равелина со стороны открытого моря – ст. № 2 и со стороны бухты – ст. № 3. С августа 2008 г. стали отбирать пробы на ст. № 4 (у причала зернового терминала Авлита). Схема расположения станций в Севастопольской бухте представлена на рисунок 1.



Рисунок 1 – Схема расположения станций в прибрежной акватории Севастополя при мониторинге 2007 – 2008 гг.

Пробы отбирали 5-литровым батометром с поверхности на всех станциях, а на ст. № 1 проводили дополнительный отбор проб с горизонтов максимальной и минимальной интенсивности биолюминесценции, в соответствии с показаниями предварительного зондирования водной толщи с помощью гидробиофизического комплекса «Сальпа – М» [2] (рисунок 2).

Затем пробы сгущали методом обратной фильтрации через мембранные фильтры с диаметром пор 2 мкм и фиксировали раствором Люголя. Подсчет клеток каждого вида и их измерения проводили в счетной камере, объемом 0,1 мл. Результаты обработки заносили в компьютер с помощью специальной программы «Планктон» (разработчики – Брянцева Ю.В., Лях А.М., Кокшаров С.А., Силаков М.И.). Дополнительно рассчитывали объемы и площади поверхности клеток динофлагеллят, имеющих сложную форму, с помощью программы трехмерного моделирования формы клеток (3DDino, Лях А.М.).

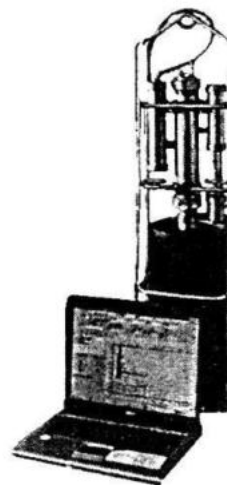


Рисунок 2 – Гидробиофизический комплекс «Сальпа – М»

Для оценки состояния фитоценозов использовали новые индексы, рассчитанные на основе морфометрических параметров клеток микроводорослей: 1. Индекс сферичности, который отражает степень отклонения конкретной формы клетки от формы шара. Его можно выразить как отношение «минимальной» поверхности объекта, т. е. той, которую он бы имел в форме шара при данном объеме, к реальной

$$\varpi = \frac{S_1}{S}, \quad (1)$$

где  $S_1$  – «минимальная» и  $S$  – реальная поверхность. Обобщенная формула имеет вид

$$\varpi = \frac{4,836 \cdot V^{0,667}}{S}. \quad (2)$$

2. Индекс морфологического разнообразия, рассчитанный на основе известной формулы информационной энтропии Шеннона-Уивера [3]

$$H = -\sum p_i \cdot \log_2 p_i, \quad (3)$$

где, вместо численности видов использовали количество клеток каждого диапазона формы (выраженных индексами сферичности).

3. Индекс выравнивания (по определению Ллойда и Геларди, цит. по [4]), который является отношением индекса разнообразия к его максимально возможному значению

$$e = \frac{H}{H_{\max}}. \quad (4)$$

Последний индекс используется для корректного статистического сопоставления выборок, имеющих разные по длине ряды. Поскольку второй и третий индексы связаны между собой прямой корреляционной связью, то нет необходимости привлекать индекс морфометрического разнообразия для сопоставления с другими характеристиками фитопланктона, достаточно использовать индекс выравненности по форме.

**Результаты и обсуждение.** Как показали предшествующие исследования [5], индекс сферичности оказался репрезентативным на всех уровнях организации от популяции до сообществ в целом. Так, например, индекс сферичности у популяции вида *Cerataulina pelagica* (Cleve) Hendey изменялся в годовом цикле в соответствии с сезонным ходом температуры: когда условия для плавучести были более благоприятны (в холодное время года, при высокой вязкости воды) сообщество имело относительно округлые пропорции клетки, в то время как в теплый – преобладали более вытянутые формы [5].

Сравнение средних значений индекса у основных классов микроводорослей, встречающихся в Севастопольской бухте показали значимое отличие формы клеток диатомовых от всех остальных классов, и преобладание формы близкой к шару у представителей жгутиковых водорослей [6].

Относительно сообщества в целом индекс  $\omega$  отражает преобладание той или иной формы, что согласуется с положением о сукцессионной смене определенных групп микроводорослей, различающихся по таксономическому положению и форме клеток. Так, выделенные по методике Виноградовой Л.А. [7] 8 комплексов соответствовали трем стадиям сезонной сукцессии (рисунок 3): начальная стадия характеризуется высоким значением индекса сферичности, который резко снижается по мере замещения мелких низко цилиндрических клеток вытянутыми мелкими формами диатомовых водорослей (объем < 1000 мкм<sup>3</sup>). Затем он возрастает (у крупных вытянутых форм) и достигает первоначального значения у крупных низко цилиндрических форм диатомовых. Динофлагелляты (с 5 по 8 комплексы) характеризовались более высокими значе-

ниями индекса и узким диапазоном его колебания (от  $0,89 \pm 0,01$  до  $0,96 \pm 0,01$ ).

4-я стадия (не отражена на рисунке) характеризуется преобладанием мелких жгутиковых форм, включающих представителей разных типов – золотистые, зеленые, цианобактерии, криптофитовые и т.д. При этом наблюдается максимальные значения индекса сферичности, что может служить индикатором неблагоприятного состояния среды в результате эвтрофикации.



Рисунок 3 – Значения индекса сферичности, средних для комплексов видов, расположенных по мере доминирования соответствующих стадий в сезонной сукцессии. Севастопольская бухта (2000–2005 гг.)

Поскольку, стадии сукцессии определяются у поверхности слое, то индекс сферичности был рассчитан для горизонта 0 м в открытой части моря (ст. 1).

В 2007 – 2008 гг. индекс сферичности сообщества и биолюминесценция в Севастопольской бухте были минимальными в марте и августе, когда преобладали диатомовые водоросли, характеризующие вторую стадию сукцессии, и достигали абсолютного максимума в июне (рисунок 4), с доминированием мелких золотистых водорослей, что свидетельствует о завершающих стадиях сукцессии. Июньские максимумы указанных характеристик был наиболее выражен на станциях вблизи равелина (перед входом в бухту и внутри нее).

Сопоставление значений сферичности в пространственном и сезонном аспектах показали значимые различия в состоянии сообществ открытой части моря, а также вблизи и внутри бухты. Причем, по остальным параметрам (численность, биомасса, средний объем клеток) эти станции значимо не различались. Сообщество в открытой части моря

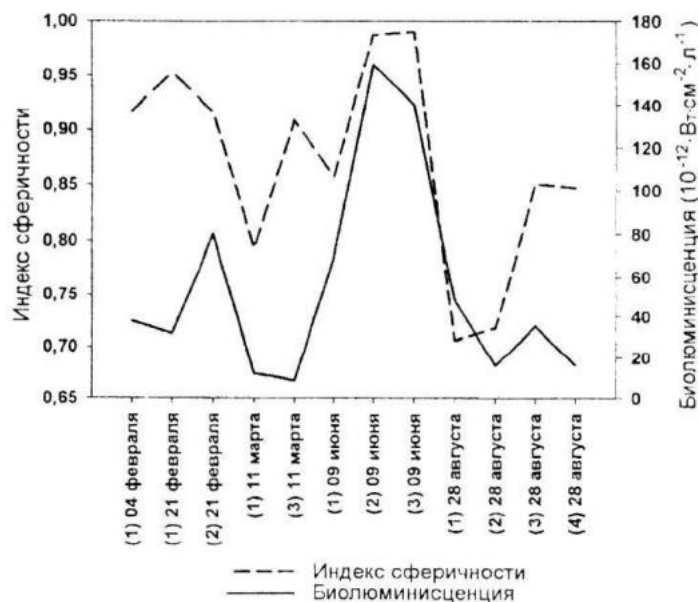


Рисунок 4 – Сезонная динамика индекса сферичности сообщества фитопланктона и интенсивности биолюминесценции у берегов Севастополя (горизонт 0 м., 2007 – 2008 гг.)

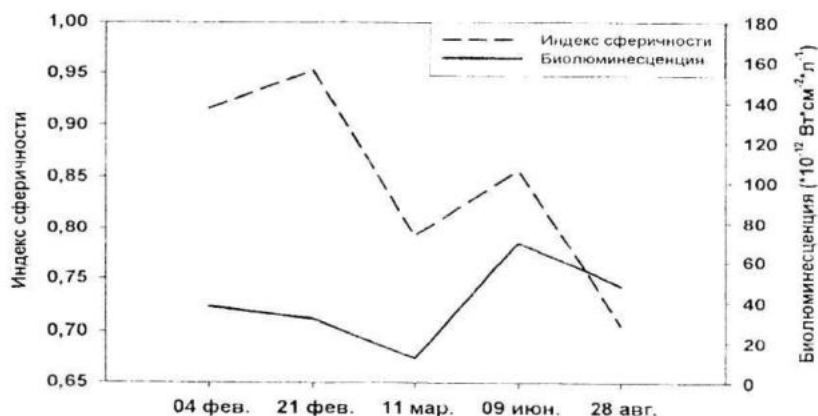


Рисунок 5 – Сезонная динамика индекса сферичности и интенсивности биолюминесценции в поверхностном горизонте на станции I

(ст. 1) во все исследованные сезоны характеризовалось относительно низкими значениями индекса сферичности, по сравнению с остальными станциями бухты. В периоды с минимальными значениями биолюминесценции, ст. 1 характеризовалась наибольшими ее значениями относительно других станций, а в периоды максимумов – наименьшими.

Отмечена противоположно направленная тенденция в сезонной динамике исследуемых параметров (рисунок 5). В отличие от индекса сферичности, значения биолюминесценции были ниже в холодное время года и выше – в теплое. Это связано с тем, что большинство

динофлагеллят, в том числе и светящихся, интенсивнее вегетируют в теплое время года. Тогда как вклад мелких золотистых водорослей в суммарную численность достигает максимума в холодное время года при зимней стагнации в развитии остальных групп микроводорослей.

При сопоставлении среднего для сообщества индекса сферичности ( $\omega$ ), морфологического разнообразия, с показателями развития основных групп микроводорослей были получены связи с уровнем значимости 0,05 и ниже, представленные значениями коэффициента корреляции в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица связей между различными параметрами фитопланктона в Севастопольской бухте в 2007 – 2008 гг.

	V	$\omega$	H	E	%ND	%BD
$\omega$	-0.528**		-0.683**			
E	0.559**	-0.632**	0.793**			
%ND		-0.527**	0.497**			
NP		-0.674**	0.496*			
%NP	0.568**	-0.433*		0.564**		-0.450*
BP		-0.729**	0.496*			
%BP	0.467*			0.633**		0.864**
NCh		0.503**	-0.465*	-0.532**	-0.524**	
%NCh		0.611**	-0.525**	-0.533**	-0.778**	
BCh						
%BCh		0.607**	-0.577**	-0.623**		

**Условные обозначения:**  $\omega$  – средний для сообщества индекс сферичности; e – индекс выравненности; % ND – доля диатомовых водорослей в суммарной численности; NP – суммарная численность динофлагеллят; % NP – доля динофлагеллят в суммарной численности водорослей; BP – суммарная биомасса; NCh – суммарная численность золотистых водорослей; % NCh – доля золотистых в суммарной численности; BCh – суммарная биомасса золотистых; % BCh – доля золотистых в суммарной биомассе водорослей.

На основе этих связей была построена схема (рисунок 6), отражающая в обобщенном виде, основные типы состояния сообщества микроводорослей. Их можно обозначить как «устойчивое» и «не устойчивое». Первое характеризуется высоким разнообразием по форме и низким индексом сферичности; второе, наоборот, высоким индексом сферичности и низким разнообразием.

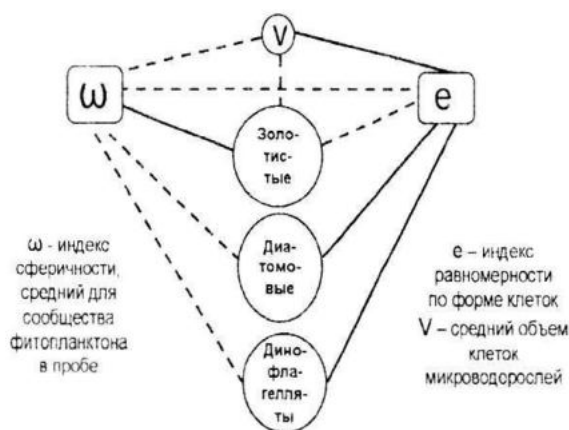


Рисунок 6 – Схема связей между показателями обилия водорослей и различными морфометрическими индексами

Из этой схемы видно, что «не устойчивое состояние» наступает тогда, когда в сообществе преобладают мелко-клеточные представители золотистых

водорослей, доминирование которых по численности приводит к уменьшению морфологического разнообразия в сообществе по форме. Это наблюдается, как правило, при завершающей стадии сезонной сукцессии. «Устойчивое» состояние, наблюдается при возрастании роли диатомовых и перидиниевых водорослей, приводящей к увеличению среднего объема клеток сообщества в целом, что свидетельствует о более ранних стадиях его развития (II и III).

Полученные значимые связи между интегральной формой сообщества и его морфологическим разнообразием (выравненностью) свидетельствует о том, что данные показатели отражают реально существующие свойства сообществ микроводорослей, по которым можно судить о его состоянии. Отсюда вытекает возможность использования их для сопоставления в пространственно-временных масштабах.

**Выводы.** 1. При сопоставлении основных структурных характеристик фитопланктона с морфологическими индексами были получены значимые связи, которые характеризуют 2 типа состояния сообщества: 1) «устойчивое» – с низким значением индекса сферичности и высоким морфологическим разнообразием, которое наблюдается при преобладании в сообществе диатомовых водорослей и динофлагеллят;

2) «неустойчивое» - обратное первому, наступающее при завершающей стадии сезонной сукцессии, когда преобладают золотистые и мелкие жгутиковые формы микроводорослей.

2. Индекс сферичности формы обладает рядом преимуществ по сравнению с другими показателями: изменяется в узких пределах (от величины, бесконечно приближающейся к 0, до 1); является безразмерным показателем, поэтому соблюдается принцип однородности анализируемых рядов; для его расчета не требуется трудоемких таксономических определений, что позволит в перспективе использовать компьютерную обработку данных.

3. Исследование сезонной динамики фитопланктонных сообществ по морфологическому критерию (индексу сферичности) и биолуминесценции показало сопряженность периодов минимумов и максимумов этих характеристик, а также отличие состояния сообществ открытой части моря от акватории Севастопольской бухты.

#### Л и т е р а т у р а

1. W.H. Munk and G.A. Riley. Absorption of nutrients by aquatic plants. *J. Mar. Res.* 1952. – 11, – P. 215 – 240.  
2. Н.В. Бурмистрова, Ю.Н. Токарев, В.И. Василенко, В.Ф. Жук. Организация

и проведение биофизического мониторинга планктонного сообщества прибрежной акватории Севастополя: первые результаты // Современные проблемы морской инженерной экологии: Материалы международной научной конференции (г. Ростов-на-Дону, 9 – 11 июня 2008 г.) / Отв. ред. акад. Г.Г. Матишов. Ростов на Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. – С. 59 – 62.

3. C.E. Shannon and W. Weaver. *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Urbana. 1963. 125 p.

4. Т.Р. Парсонс, М. Такахаша, Б. Харгрэйв Биологическая океанография: пер. с англ. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – С. 20

5. Ю.В. Брянцева Индекс формы одноклеточных водорослей как новый морфометрический критерий. // *Экология моря*. 2005. – Вып. 67. – С. 27 – 31.

6. Ю.В. Брянцева Морфологический критерий для оценки состояния сообществ микроводорослей // Любимцевские чтения, 2006 (сборник докладов) Современные проблемы эволюции. Ульяновский государственный педагогический университет, 2006. – С. 320 – 331.

7. Л.А. Виноградова и др. Размерно-функциональные группы и схема потока вещества в планктоне Северного моря // *Труды АтлантНИРО*. – Калининград, 1979. – Вып. 78. – С. 3 – 16.