

А. М. Т О И Ч К И Н, Ю. К. Ф И Р С О В

**МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
БУРОЙ ВОДОРΟΣЛИ *CYSTOSEIRA BARBATA*
КАК ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ПРИБРЕЖНЫХ ВОД ЧЁРНОГО МОРЯ**

Рассмотрена возможность использования морфометрических характеристик бурой водоросли *Cystoseira barbata* в целях биологической индикации качества прибрежных вод Чёрного моря. Изучены морфометрические параметры цистозеры (массы, площади поверхности, удельной площади поверхности) в зависимости от индивидуального возраста ветвей в разные сезоны года и районах исследования. Предлагается использовать в качестве биомаркёра кроме морфометрических характеристик макрофита так же индивидуальный возраст ветвей цистозеры.

Биомаркёры делятся на два основных класса: функциональные и структурные. К функциональным биомаркёрам относятся параметры, характеризующие химический состав гидробионтов, активность ферментов, скорость процессов и т. д. [1, 2, 9, 11, 13]. Структурные биомаркёры объединяют параметры, характеризующие видовую и возрастную структуру сообществ, а также морфологические показатели самих организмов [6, 7]. Изменение структурных биомаркёров может свидетельствовать о наличии в регионе постоянного длительного антропогенного фактора.

К биоиндикаторам предъявляется ряд требований [12, 14]. Основные критерии – это массовость, широкое распространение, прикрепленность или малоподвижность, доступность отбора, толерантность гидробионтов к изменяющимся условиям обитания и, главное, существование отклика на изменения, происходящие в исследуемом регионе.

Представители рода *Cystoseira* Ag., как и многие другие бурые водоросли, довольно чувствительны к загрязнению, на которое они реагируют изменением скорости роста и интенсивности фотосинтеза [3]. По этой причине структура слоевища водоросли и его морфометрические параметры могут изменяться в зависимости от качества окружающей среды [5]. Цистозера относится к многолетним прикрепленным макрофитам, размерами превосходящая все остальные водоросли Чёрного моря, а её структурные элементы удобны для морфометрического анализа и определения индивидуального возраста водоросли. Важной частью экологических исследований является изучение структуры и функций слоевища водоросли в размерно-возрастных онтогенетических рядах [7, 8].

Цель нашей работы – исследовать возможность использования морфометрических характеристик ветвей цистозеры бородатой *Cystoseira barbata* (Stackhouse) C. Ag. для биоиндикации состояния прибрежных вод Чёрного моря.

Материал и методы. Образцы слоевищ *Cystoseira barbata* отбирали в течение следующих сезонов: июль – август и ноябрь 2002 г., а также февраль – март, май и август 2003 г. Исследования проводили в бухтах г. Севастополя, которые являются местом интенсивной хозяйственной деятельности [6], а основными источниками их загрязнения служат промышленные, коммунальные и ливневые стоки, нефтебаза и корабли. Сбор проб производили в нескольких районах с разной антропогенной нагрузкой: ГРЭС, Стрелецкая бухта, Казачья бухта, два участка у м. Херсонес (северо-западная сторона, далее – с-з; юго-западная сторона, далее – ю-з).

Слоевище цистозеры имеет сложноорганизованную иерархическую структуру, элементарной единицей которой является ось разных порядков. В основе ветви цистозеры лежит ось первого порядка (K_{01}), на ней расположены оси второго порядка (K_{02}), на осях второго порядка – оси третьего порядка (K_{03}) и т. д. (рис. 1).

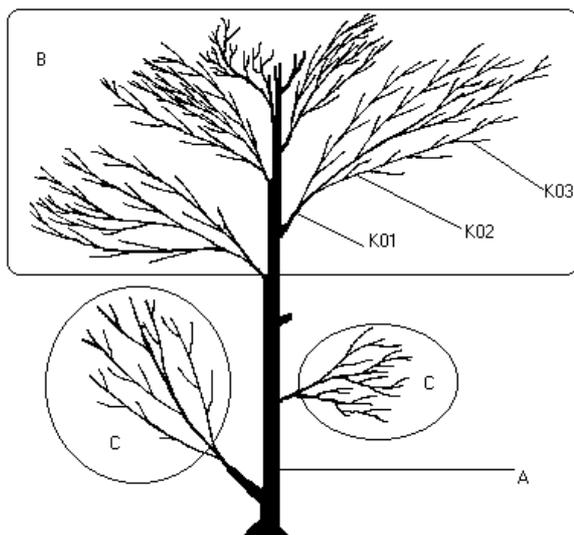


Рисунок 1. Иерархическая структура слоевища *Cystoseira barbata*: А – ствол; В – основные ветви; С – адвентивные ветви; К₀₁ – К₀₃ – оси первого – третьего порядков.

Figure 1. Hierarchical structure of *Cystoseira barbata* thallus: А – trunk; В – basic branches; С – the adventitious branches; К₀₁ – К₀₃ – axes of the first – third orders.

Для исследования были отобраны трёхлетние слоевища цистозеры. В этом возрасте слоевище обладает достаточно разветвлённой структурой, но не так подвержено обрастанию, как слоевища старших возрастов. Каждый образец водоросли разделяли на структурные элементы – оси разных порядков. Затем измеряли морфологические параметры: длину, диаметр, сырую массу осевых структур, вычисляли площадь поверхности и удельную площадь поверхности ветвей цистозеры разных возрастов.

На разных стадиях онтогенеза основные ветви слоевища цистозеры имеют свои особенности: двухмесячные ветви, представляют собой ось с зачатками ветвей высших порядков, обладают слабо разветвлённой структурой; трёхмесячные ветви имеют полностью сформированную структуру; 4 – 5-месячные ветви с максимально разветвлённой структурой и большим количеством рецептакул (генеративных органов); 6 – 7-месячные ветви – ветви, постепенно теряющие осевые структуры (в это время наступает конечный этап онтогенеза ветвей цистозеры).

У разновозрастных ветвей цистозеры определяли массу, площадь поверхности, удельную площадь поверхности.

Ветви цистозеры представляют собой совокупность осей разных порядков (рис. 1). Площадь поверхности ветвей вычисляли, используя геометрическую форму осей. Отдельная ось представляет собой цилиндрическую фигуру. По формуле:

$$S = \pi d l,$$

где d – диаметр оси, а l – длина оси, вычисляли площадь поверхности каждой оси. Суммируя площади поверхности осей разных порядков, находили площадь поверхности ветви.

Зависимости площади поверхности (Y) и массы ветвей (Y) цистозеры от её возраста (x) аппроксимированы степенной функцией, уравнение которой имеет вид:

$$\ln(Y) = a \ln(x) + b,$$

где a и b – параметры регрессии степенной функции.

Зависимость удельной площади поверхности (Y) от возраста ветвей (x) было аппроксимировано линейной функцией:

$$Y = kx + c,$$

где k и c – параметры уравнения линейной функции.

По значениям параметров регрессии степенной и линейной функции оценены тенденции изменения реакции растения на состояние окружающей среды в зависимости от сезонов года и районов исследования.

Результаты и обсуждение. Экспериментальные данные и их аппроксимирующие кривые, которые описывают зависимость массы, площади и удельной площади ветвей цистозеры от их возраста в течение всех четырёх сезонов года, приведены на рис. 2 (А, Б, В). Для того чтобы выявить влияние сезонов года, значения морфометрических параметров одновозрастных ветвей цистозеры из всех исследованных районов были объединены.

Основываясь на графиках (рис. 2), можно сказать, что с увеличением возраста ветви до 6 мес. в зависимости от сезона значения массы этих ветвей варьируют в широком диапазоне. В целом можно выделить несколько характерных трендов, которые отражают биологические циклы ветвей цистозеры.

Начиная с 3 – 4-месячного возраста, в осенний и весенний сезоны ветви увеличивают свою массу более интенсивно, чем в летний и зимний сезоны (рис. 2-А). Это связано с тем, что весной и осенью цистозера вступает в период размножения, на ветвях старше трёхмесячного возраста появляются органы размножения (рецептакулы) и воздушные пузыри.

Летний и осенний сезоны – период покоя у цистозеры. В это время масса шестимесячных ветвей в шесть раз ниже, в сравнении с весенним и осенним сезонами.

Зависимости площади поверхности ветвей цистозеры в разные сезоны года аналогичны зависимостям масс ветвей (рис. 2-В). Площадь поверхности ветвей одинакового возраста больше в весенний и осенний сезоны.

Надо отметить, что у ветвей старше 5 мес. в период летнего покоя масса в 2 – 2,5 раза больше, чем в состоянии зимнего покоя. В это время, хотя и с меньшей скоростью, чем весной и осенью, растёт масса структурных элементов ветви. Площадь поверхности ветвей старше пяти месяцев, наоборот, в зимний период в 2 раза больше, по сравнению с летним, когда структурные элементы ветви в большей мере увеличиваются в линейных размерах.

Зависимость удельной площади поверхности ветвей цистозеры от их возраста представлена на рис. 2-В. Данные по всем исследуемым районам объединены и аппроксимированы линейной функцией ($Y = kx + c$). Исходя из коэффициента наклона прямой, можно говорить об отношении двух морфометрических параметров: площади поверхности к массе для разновозрастных ветвей цистозеры в различные сезоны года.

Прямые, которые аппроксимируют летний и осенний сезоны, имеют отрицательный угол наклона. В летний сезон этот угол наклона (k) больше, чем осенью. В зимний и весенний периоды угол наклона аппроксимирующей прямой – положительный, при этом в весенний период угол немного больше, чем в зимний. Преобладание площади поверхности ветвей над их массой свидетельствует о том, что в весенний и зимний сезоны ветви цистозеры растут и чувствуют себя комфортнее, чем летом и осенью. Обеспеченность потоком питательных веществ единицы массы цистозеры летом уменьшается с возрастом ветвей, а осенью эта онтогенетическая зависимость незначительна.

На рис. 2 (Г, Д, Е) представлены зависимости параметров ветвей цистозеры (массы ветвей, площади поверхности и удельной площади поверхности соответственно) от их возраста из пяти исследуемых районов.

Масса ветвей цистозеры в районе м. Херсонес (с-3) больше, чем в других районах. Далее по убыванию следуют бухта Казачья и бухта Стрелецкая. Значения масс ветвей цистозеры из района м. Херсонес (ю-3) и в районе ГРЭС приблизительно равны и находятся на низком уровне.

Вероятно, большие значения массы ветвей цистозеры на м. Херсонес (с-3) связаны с высоким водообменом в данной точке отбора проб и незначительным уровнем загрязнения прибрежных вод. В Казачьей бухте сила прибой меньше, водообмен в её акватории ниже, но степень загрязнённости выше, чем на станции у м. Херсонес (с-3), поскольку на берегах бухты Казачьей расположены дачные участки, крупная нефтебаза,

дельфинарий. Тем не менее, масса ветвей цистозеры, исследованной нами в б. Казачья, имеет довольно высокие значения, хотя и ниже, чем у водорослей на станции у м. Херсонес (с-з).

Участки отбора проб, расположенные в б. Стрелецкой и в районе ГРЭС, имеют слабый водообмен, их акватории загрязнены сточными водами и отходами расположенных здесь судоремонтных предприятий. Как следствие, у произрастающей на этих участках цистозеры отмечены низкие значения массы ветвей.

Низкие значения массы ветвей цистозеры из района м. Херсонес (ю-з), возможно, связаны с влиянием городского выпуска сточных вод, который расположен в этом районе.

Площадь поверхности ветвей цистозеры, взятых из разных акваторий прибрежной зоны Севастополя, уменьшается в ряду: Казачья бухта > м. Херсонес (с-з) > Стрелецкая бухта = ГРЭС = м. Херсонес (ю-з). Наибольшая площадь поверхности отмечена в Казачьей бухте и у м. Херсонес (с-з).

Площадь поверхности цистозеры, как и масса, зависят от водообмена и наличия питательных веществ в среде. Поскольку через площадь поверхности поступают все необходимые питательные вещества, то значения площади поверхности ветвей цистозеры говорят о степени разветвленности структуры слоевища и отражают условия произрастания слоевищ цистозеры.

Казачья бухта достаточно хорошо защищена от прибоя, но имеет высокий водообмен, а загрязнение сточными водами, по сравнению с другими бухтами города, невелико. Поэтому у слоевищ цистозеры из этого района количество структурных элементов, а вместе с тем и площадь поверхности, значительны. Большая прибойность в районе м. Херсонес (с-з), вероятно, не даёт возможности для развития разветвленной структуры слоевищ цистозеры.

Значения площади поверхности цистозеры на станциях Стрелецкая бухта, ГРЭС, м. Херсонес (ю-з) низкие и приблизительно одинаковы. Как уже отмечалось, для этих районов характерна повышенная загрязненность акваторий, что также неблагоприятно влияет на развитие структуры ветвей.

Удельная площадь поверхности аппроксимирована линейной функцией, коэффициент которой позволяет судить об изменении этого морфометрического параметра относительно возраста ветвей.

Удельная площадь поверхности уменьшается в ряду: Казачья бухта > м. Херсонес (с-з) > Стрелецкая бухта > ГРЭС > м. Херсонес (ю-з).

По всем морфометрическим параметрам ветвей цистозеры среди всех исследованных нами районов выделяются два: бухта Казачья и м. Херсонес (с-з).

Бухта Казачья обладает наибольшими морфометрическими показателями и коэффициентом наклона (рис. 2-Е), что свидетельствует о благоприятной обстановке для развития цистозеры в этом районе.

Несмотря на то, что значения удельной площади поверхности ветвей из акватории м. Херсонес (с-з), имеют относительно небольшой положительный угол наклона прямой, но, у них, довольно высокие показатели удельной площади поверхности, что говорит о благоприятных условиях для роста цистозеры.

Район м. Херсонес (ю-з), напротив, имеет очень низкие показатели удельной площади поверхности и отрицательный угол наклона, что может свидетельствовать о неблагоприятных условиях в этом районе для развития цистозеры. Для районов бухты Стрелецкой и ГРЭС (рис. 2-Е) характерны небольшие коэффициенты наклона, слабовыраженная динамика увеличения удельной площади поверхности.

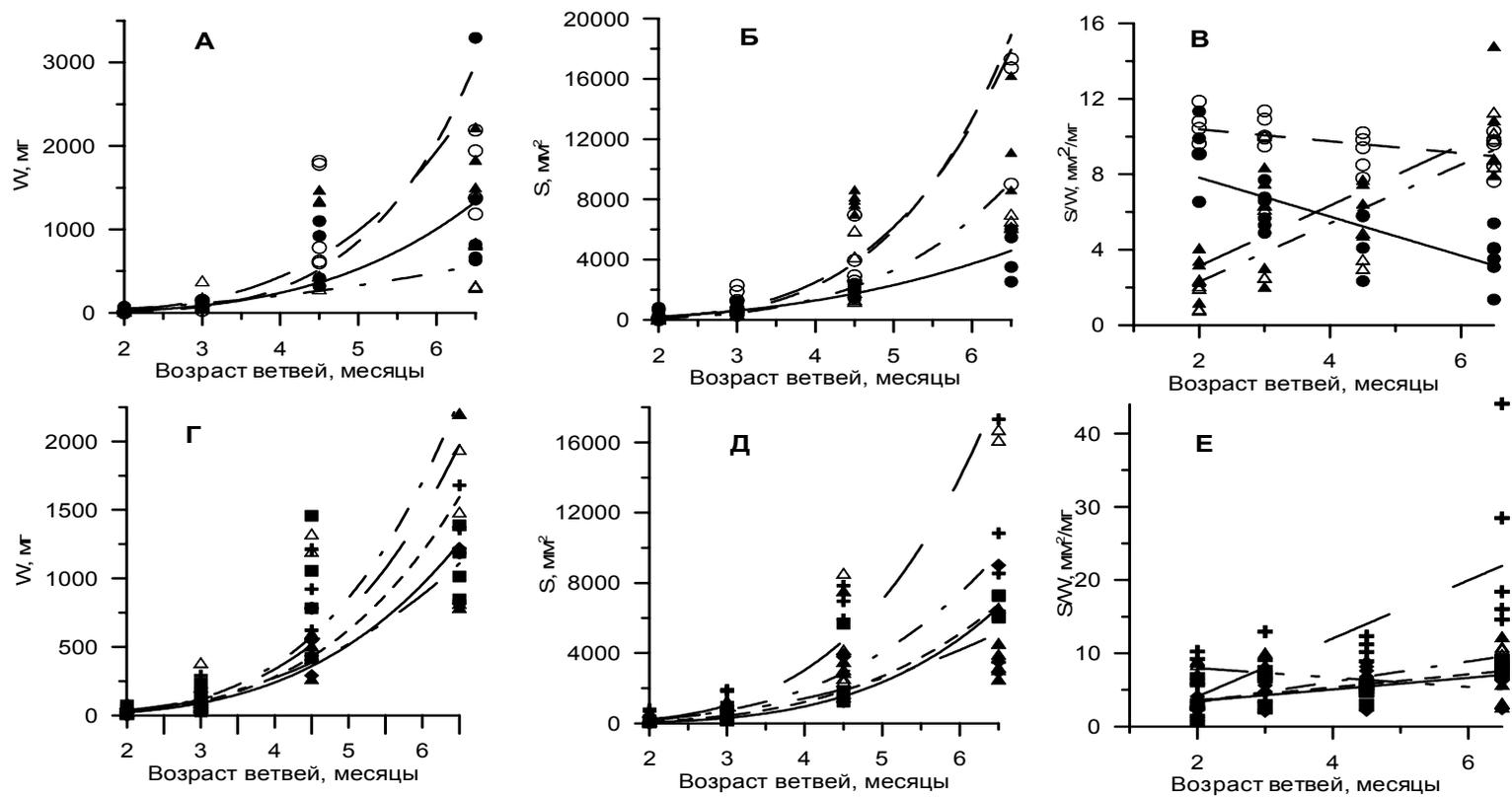
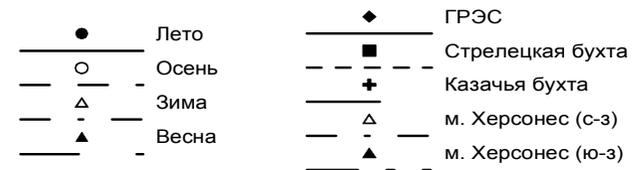


Рисунок 2. Зависимости морфометрических параметров ветвей цистозеры от их возраста в различные сезоны года для разных районов исследования
 Figure 2. Dependence of morphometrical parameters of branches of *Cystoseira* on their age in different seasons of year for different districts of research.



Выводы. 1. Площадь поверхности и масса ветвей *Cystoseira barbata*, взятых из различных районов прибрежной зоны Севастополя, отличающихся по степени антропогенной нагрузки, менее всего различаются между собой в начале онтогенеза макрофитов. Чем больше структурных элементов входит в возрастную группу ветвей цистозеры, тем заметнее их отклик на условия и качество среды (ветви старше 5 месяцев). **2** Масса ветвей цистозеры и площадь их поверхности максимально увеличиваются осенью и весной. **3.** В импактных экосистемах (таких, как бухта Стрелецкая и район ГРЭС) отношение площади поверхности к массе ветвей цистозеры во всём их возрастном диапазоне находится приблизительно на одном уровне. В чистых районах – бухта Казачья и мыс Херсонес (северо-западная сторона) – с возрастом ветвей это отношение меняется в сторону увеличения площади поверхности водоросли. **4.** Наиболее благоприятные условия для развития цистозеры находятся в акватории Казачьей бухты и на северо-западной стороне м. Херсонес. Бухта Стрелецкая и район ГРЭС, напротив, обладают самыми неблагоприятными условиями для произрастания этой водоросли, что свидетельствует о низком качестве водной среды в этих районах.

1. Гавриленко Е. Е., Золотухина Е. Ю. Накопление и взаимодействие ионов меди, цинка, марганца, кадмия, никеля и свинца при их поглощении водными макрофитами. // Гидробиол. журн. – 1989. – 25, №5. – С. 54 – 61.
2. Калугина-Гутник А. А. Некоторые особенности развития чёрноморской цистозеры (*Cystoseira barbata* и *C. crinita*) // – Ботан. журн. - 1973. – 58, №1. – С. 20 – 32.
3. Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Чёрного моря. – Киев: Наук. думка, 1975. – 246 с.
4. Ковардаков С. А., Празукин А. В., Фирсов Ю. К., Попов А. Е. Комплексная адаптация цистозеры к градиентным условиям: научные и прикладные проблемы. – Киев: Наук. думка, 1985. – 300 с.
5. Ковардаков С. А., Хайлов К. М., Парчевский В. П. Многопараметрическое исследование природной популяции черноморской цистозеры для изучения её экологии и обоснования её эксплуатации // Шельфы. Проблемы природопользования и охрана окружающей среды. – Владивосток, 1982. – С. 104 – 105.
6. Павлова Е. В., Овсяный Е. И., Гордина А. Д. и др. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты // Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу – Севастополь: Аквавита, 1999. – Ч. 2. – С. 70 – 94.
7. Парчевский В. П., Парчук Г. В. Анализ морфологических признаков черноморских цистозер в онтогенетическом ряду в природных условиях. – В кн.: 3 Всесоюзное совещание по морской альгологии - микрофитобентосу. – Киев: Наук. думка, 1979. – С. 96 – 98.
8. Празукин А. В. Феноменологическое описание роста ветвей *Cystoseira barbata* как основа периодизации их онтогенеза // Экология моря. – 1983. – Вып. 13. – С. 49 – 58.
9. Фёдоров В. Д., Сахаров В. Б., Левич А. П. Количественные подходы к проблеме оценки нормы и патологии экосистем // Человек и биосфера: МГУ, 1982. – С. 3 – 42.
10. Хайлов К. М., Парчевский В. П. Иерархическая регуляция структуры и функции морских растений. - Киев: Наук. думка, 1983. – 254 с.
11. Хоружая Т. А. Перспективы использования биохимических тест функций в биомониторинге природных вод. // Гидробиол. журн. – 1989. – 25, №5. – С. 47 – 51.
12. Butler P. A., Andren L., Bonde G. J. et al. Monitoring organisms // Food and agricultural organization technical conference on marine pollution and its effects on living resources and fishing. - Rome, 1970. London: Fishing News, 1971. – P. 101 – 112.
13. Khailov K. M. Ontogenetic trends in morphological of *Cystoseira barbata* thalli. – Bot. Mar. – 1979. – 22. – P. – 299 – 313.
14. Phillips D. J. H. The use of biological indicator organisms to metal pollution in marine and estuarine environments - a review // Environ. Poll. – 1977. – 13. – P. 381 – 317.

A. M. TOYCHKYN, Yu. K. FIRSOV

**MORPHOMETRYCAL DESCRIPTIONS
OF THE BROWN WATER-PLANT *CYTOSEIRA BARBATA*,
AS AN INDEX OF OFF-SHORE WATERS QUALITY IN BLACK SEA**

Summary

Possibility of the use of morphometrycal characteristics of brown water-plant of *Cystoseira barbata* for the biological indication of off-shore waters quality in the Black Sea is considered. The morphometrycal parameters of *Cystoseira* (the masses, areas of surface, specific area of surface) are studied depending on individual age of branches in different seasons of year and research districts. It is suggested to use as a bio-marker except for morphometrycal descriptions of macrophytas similarly individual age of branches of *Cystoseira*.