

## ВОДОРОСЛИ-МОНИТОРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРСКОЙ СРЕДЫ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ В РОССИИ

Коженкова С. И., Чернова Е. Н.,

*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток*

**Аннотация.** Омывающие территорию Российской Федерации моря в разной степени исследованы с помощью водорослей-мониторов, аккумулирующих тяжелые металлы. Многолетние наблюдения ведутся в Белом, Балтийском, Баренцевом, Черном и Японском морях, у Тихоокеанского побережья п-ва Камчатка. Наиболее часто используют бурые водоросли порядков Fucales (например, *Fucus distichus*, *Sargassum miyabei*, *S. pallidum* и др.) и Laminariales (такие как *Saccharina bongardiana*, *S. japonica* и др.). Среди зеленых водорослей как мониторы используют виды порядков Cladophorales (*Cladophora glomerata*) и Ulvales (*Ulva lactuca*, *U. linza*). Красные водоросли в целях мониторинга загрязнения морских прибрежных вод в России почти не применяют. Виды-мониторы различаются по продолжительности жизни, среди них есть эфемерные, одно- и многолетние. Среди многолетних видов-мониторов выделено три группы по соотношению «старых» («прошлогодних») и «молодых» (выросших в текущем году) частей таллома. Для стандартизации отбора проб для химического анализа содержания тяжелых металлов предложено либо отбирать однолетние части талломов (для видов порядка Fucales), либо использовать выечку из средней части пластины (для видов порядка Laminariales).

**Ключевые слова:** биомониторинг, макрофиты, загрязнение морской среды, тяжелые металлы, стандартизация отбора проб

## MACROALGAE AS BIOMONITORS OF MARINE POLLUTION BY HEAVY METALS IN RUSSIA

Kozhenkova S.I., Chernova E.N.

*Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok*

**Abstract.** Research related to the use of macroalgae to biomonitor pollutants in coastal waters is being conducted in the seas of the Russian Federation. Long-term monitoring is carried out in the White, Baltic, Barents, Black and Japan Seas, as well as along the Pacific coast of the Kamchatka Peninsula. Brown algae of the order Fucales (e.g. *Fucus distichus*, *Sargassum miyabei*, *S. pallidum*, etc.) and Laminariales (e.g. *Saccharina bongardiana*, *S. japonica*, etc.) are the most commonly used. Some species of green algae of the order Cladophorales (for example, *Cladophora glomerata*) and Ulvales (for example, *Ulva lactuca*, *U. linza*) are also use as biomonitors. Red algae are almost never used for these purposes in coastal waters in Russia. Among species of macroalgae there are ephemeral, annual and perennial ones. We identified three groups of species for perennial biomonitors in accordance with the ratio of «old» and «young» parts of the thalli. To standardize sampling for chemical analysis of heavy metal concentrations in algae thalli, it is proposed to either use annual parts of thalli (for species of the order Fucales) or take a cutting from the middle part of the plate (for species of the order Laminariales).

**Key words:** biomonitoring, macroalgae, marine pollution, heavy metals, standardization of sampling.

**Введение.** Биомониторинг с использованием макроводорослей впервые стали применять в начале 1950-х гг. в Великобритании и Канаде [9]. В настоящее время этот подход широко используется во всем мире, в том числе в морях Российской Федерации, для

оценки степени загрязнения как эстуарных, так и прибрежных морских вод. Макрофиты привлекали внимание исследователей способностью аккумулировать химические элементы с высоким коэффициентом накопления (до  $10^4$ - $10^6$ ), относительной простотой отбора, меньшей вероятностью загрязнить пробы при отборе (в отличие от проб воды).

Универсального вида-монитора среди водорослей, который был бы распространен во всех климатических зонах Земли, не найдено. За последние несколько десятилетий по всему миру проведены исследования необходимой для биомониторинга концентрационной способности металлов наиболее массовыми и доступными для отбора видами водорослей. Исследовали разнообразные виды зеленых, бурых и красных водорослей, имеющих разную продолжительность жизни (эфемеры, однолетние и многолетние виды) и форму таллома (нитевидную, пластинчатую, трубчатую, кустистую и др.). В настоящее время накопленные данные являются основой для выбора видов-мониторов в конкретных географических условиях.

**Материалы и методы.** Проанализировано более 200 российских и иностранных публикаций, посвященных изучению содержания тяжелых металлов в различных видах морских водорослей в фоновых и импактных условиях [1-6, 10, 11, 13, 14 и др.], включая обзорные статьи, построенные по данным нескольких сотен опубликованных работ [7, 9 и др.]

**Результаты и обсуждение.** В таблице приведены наиболее часто используемые в биомониторинге роды водорослей. Среди зеленых водорослей на первом месте стоят представители *Ulva* и *Cladophora*, среди бурых – *Sargassum*, *Padina* и *Fucus*, среди красных – *Gracillaria*, *Hypnea* и *Laurencia*. Учитывая видоспецифические особенности накопления металлов разными водорослями, первостепенную важность при выборе монитора имеет точность определения вида, что в ряде случаев является сложной задачей, поскольку близкородственные виды морфологически могут быть одинаковыми. В современной научной литературе посвященной биомониторингу загрязнения прибрежных вод тяжелыми металлами нередко встречаются работы, где указан лишь род водоросли, а вид не установлен, например, *Ulva* sp. Кроме того, в конце XX – начале XXI столетий систематика водорослей была подвергнута серьезному пересмотру, и на основе результатов молекулярно-генетических анализов многие видовые и родовые названия изменили [12]. В частности, род *Enteromorpha* Link был объединен с родом *Ulva* Linneus. Вид *Ulva fenestrata* P. et R., произрастающий в дальневосточных морях и в северо-восточной части Тихого океана, сведен в синонимы *Ulva lactuca* L. Среди бурых водорослей семейства *Sargassaceae* (порядок *Fucales*), произрастающих у российского материкового побережья Японского моря, таксономические изменения затронули вид *Cystoseira crassipes* (Merten ex Turner) C. Agardh. На основе данных ДНК-штрихкодирования была установлена полифилетичность рода *Cystoseira* C. Agardh, а также родов *Bifurcaria* Stackhouse, *Halidrys* Lyngbye и *Sargassum* C. Agardh [8]. Все виды родов *Cystoseira* и *Halidrys* из северной Пацифики были переведены в восстановленный род *Stephanocystis* Trevisan, и новой номенклатурной комбинацией для широко распространенного в дальневосточных морях России вида *C. crassipes* является *Stephanocystis crassipes* (Mertens ex Turner) Draisma, Ballesteros, Rousseau et Thibaut.

Поскольку наибольшее число исследований проведено по видам родов *Ulva* (+ *Enteromorpha*) и *Sargassum* (таблица), то информация о содержании металлов в их тканях может стать хорошим источником данных для глобальных сравнительных оценок степени загрязнения морской среды. Другие роды водорослей – зеленых, красных и бурых, имеющих большое значение в формировании местных прибрежных сообществ, нужно использовать как мониторы изменения среды на региональном и локальном уровнях.

Моря, омывающие территорию Российской Федерации, в разной степени исследованы с помощью водорослей-мониторов. Многолетние наблюдения ведутся в Белом, Балтийском, Баренцевом, Черном и Японском морях, у Тихоокеанского побережья п-ва Камчатка.

Проведены исследования содержания тяжелых металлов в макрофитах из прибрежной зоны Курильских островов. При этом наиболее часто используют бурые водоросли порядков Fucales (например, *Fucus distichus* Linnaeus, *Sargassum miyabei* Yendo, *S. pallidum* (Turner) C. Agardh и др.) и Laminariales (например, *Saccharina bongardiana* (Postels & Ruprecht) Selivanova, Zhigadlova & G.I.Hansen, *S. japonica* (Areschoug) C.E. Lane, C. Mayes, Drhuehl & G.W. Saunders, и др.). Среди зеленых водорослей как мониторы используют виды порядков Cladophorales (например, *Cladophora glomerata* (Linnaeus) Kützing) и Ulvales (например, *Ulva lactuca* Linnaeus, *Ulva linza* Linnaeus). Красные водоросли в целях мониторинга загрязнения морских прибрежных вод в России почти не применяют. (табл. 1).

Таблица 1

Список родов водорослей, наиболее часто используемых  
в биомониторинге загрязнения в мире [по: 7, 9]

Зеленые водоросли	Красные водоросли	Бурые водоросли
<i>Ulva</i> (и <i>Enteromorpha</i> )	<i>Gracilaria</i>	<i>Sargassum</i>
<i>Cladophora</i>	<i>Hypnea</i>	<i>Padina</i>
<i>Caulerpa</i>	<i>Laurencia</i>	<i>Fucus</i>
<i>Codium</i>	<i>Corallina</i>	<i>Cystoseira</i>
<i>Chaetomorpha</i>	<i>Gelidium</i>	<i>Dictyota</i>
	<i>Porphyra</i>	<i>Ascophyllum</i>

**Примечание:** на первом месте указаны наиболее часто используемые роды.

Виды-мониторы различаются по продолжительности жизни, среди них есть эфемерные, одно- и многолетние. К эфемерным видам относится, например, *Ulva linza* – зеленая водоросль с коротким циклом вегетации, в течение года дает несколько генераций. Однолетними водорослями являются бурые *Costaria costata* и *Scytosiphon lomentaria*; двухлетней - *Saccharina japonica*, многолетними - *Fucus distichus*, *Silvetia babingtonii*, *Stephanocystis crassipes* и др. В растущих в течение нескольких лет талломах водорослей концентрации металлов в тканях увеличиваются в периоды повышенного содержания в воде и уменьшаются при снижении концентраций поллютантов в среде, поэтому химический анализ тканей видов-мониторов дает интегральную характеристику степени загрязнения прибрежных вод за определенный и продолжительный (несколько лет) временной интервал. Напротив, эфемерные и однолетние водоросли отражают состояние среды в год отбора проб.

Среди многолетних видов-мониторов можно выделить три группы по соотношению «старых» («прошлогодных») и «молодых» (выросших в текущем году) частей таллома. К **первой** группе относятся виды, у которых масса «старых» участков примерно равна либо превышает массу «молодых» частей таллома. К таким видам относятся, например, бурые водоросли *Fucus distichus* и *Silvetia babingtonii*. Их дихотомически ветвящиеся талломы ежегодно прирастают апикальными частями, увеличивая массу и размер растений. Ко **второй** группе относятся, например, *Sargassum miyabei*, *Sargassum pallidum* и *Stephanocystis crassipes*. От многолетнего стволика, прикрепленного подошвой или ризоидами к субстрату, у этих видов ежегодно отрастают многократно ветвящиеся ветви, которые после спороношения полностью или частично опадают. Масса новых, ежегодно отрастающих частей таллома зачастую в несколько десятков раз превышает массу многолетнего основания таллома. К **третьей** группе относятся ламинариевые водоросли, например, *Saccharina japonica*, являющаяся двухлетней. Основная зона роста ламинариевых расположена между стволиком и пластиной, поэтому самыми «старыми» частями таллома являются ризоиды, а также верхняя часть растения, наиболее удаленная от зоны роста. Напротив, нижняя часть пластины является наиболее «молодой».

Различия в концентрациях металлов в разных частях таллома могут быть довольно существенными. При исследовании разных участков *Fucus vesiculosus* из Балтийского моря

было установлено, что концентрации Mn, Fe, Zn и Ni в нижних «старых» частях достоверно выше, чем в апикальных «молодых», длиной 1-3 см. Однако для Cd, Pb и Cu существенные различия между частями таллома не были выявлены [14]. При изучении этого же вида P. Kangas и H. Autio [11] показано, что концентрации цинка и меди от верхушек растений к их основанию постепенно увеличивались, в то время как максимальные уровни железа были обнаружены в средней части талломов. В фукусах, собранных у Курильских островов, выявлена тенденция увеличения концентраций Fe, Mn, Zn, Cu, Cd и Ni в более старых талломах, имеющих 7-8 дихотомических ветвлений, по сравнению с молодыми (с 2-3 дихотомическими ветвлениями). Однако для Pb и Cr такие закономерности не обнаружены [1].

В ходе изучения содержания металлов в разных частях таллома ламинариевой водоросли алярии, собранной у Алеутских островов, было показано, что в ризоидах концентрации элементов были выше, чем в других участках. Например, в средней части пластины концентрации Cd, Cr и Mn составляли  $0.6 \pm 0.1$ ,  $1.2 \pm 0.3$  и  $15.4 \pm 2.5$ , а в ризоидах –  $1.1 \pm 0.2$ ,  $2.9 \pm 0.6$  и  $49.4 \pm 8.2$  мкг/г сырой массы, соответственно, то есть в 2-3 раза больше [6]. У двухлетних представителей бурой ламинариевой водоросли *Saccharina bongardiana*, произрастающей в Авачинской губе на побережье Камчатки, выявлены различия в содержании цинка между верхней и нижней частями ее пластины [3].

**Выводы.** В мониторинге загрязнения морей России тяжелыми металлами в основном используются бурые и зеленые водоросли, среди них есть эфемерные, одно- и многолетние виды. Возраст части таллома или целого растения является фактором, влияющим на концентрационную способность вида-монитора. Поэтому необходимо стандартизировать методику отбора части растений для химических анализов. В ходе исследования нужно либо брать только одновозрастные части многолетних талломов, либо, если на анализ берется целый таллом, то отбор проб необходимо проводить в одно и то же время (месяц, сезон), чтобы соотношение «молодых» и «старых» тканей было одинаковым из года в год [11]. Наиболее удобным способом для стандартизации отбора проб является использование только молодых частей растений [9]. Для многолетних видов-мониторов, отнесенных нами к первой и второй группам по соотношению «старых» («прошлогодных») и «молодых» (выросших в текущем году) частей таллома, целесообразно отбирать на анализ однолетние ветви; для ламинариевых водорослей, относящихся к третьей группе, - использовать высечку из средней части пластины.

## Литература

1. Малиновская Т.М. Содержание металлов в разновозрастных талломах бурой водоросли *Fucus evanescens* Курильских островов // Биология моря, 1998. Т. 24, № 6. С. 397-399.
2. Теубова В.Ф. Особенности накопления тяжёлых металлов в разновозрастных талломах цистозиры (Новороссийская бухта, Чёрное море) // Морской экологический журнал, 2011. Т. 10, № 3. С. 67-75.
3. Федорченко В.П., Макаров Е.О., Ключкова Н.Г. О возможности использования *Saccharina bongardiana* (Phaeophyta, Laminariales) в качестве индикатора металлического загрязнения морских прибрежных вод Камчатки // Вестник КамчатГТУ, 2011. № 17. С. 101-106.
4. Христофорова Н.К. Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжелыми металлами. Л.: Наука, 1989. 192 с.
5. Чернова Е. Н., Коженкова С. И. Определение пороговых концентраций металлов в водорослях-индикаторах прибрежных вод северо-западной части Японского моря // Океанология, 2016, Т. 56, № 3. С. 393-402.

6. Burger J., Gochfeld M., Jeitner C., Gray M., Shukla T., Shukla S., Burke S. Kelp as a bioindicator: does it matter which part of 5 m long plant is used for metal analysis? // *Environ. Monit. Assess.*, 2007. Vol. 128. P. 311–321.
7. Costa G.B., Koerich G., de Ramos B., Ramlov F., Martínez-Crego B., Costa M.M., Jesus D., Santos R.O.P., Horta P.A. A review of common parameters and descriptors used in studies of the impacts of heavy metal pollution on marine macroalgae: identification of knowledge gaps and future needs. Doi: 10.1590/0102-33062020abb0072 // *Acta Botanica Brasilica*, 2020. P. 1-19.
8. Draisma S.G.A., Ballesteros E., Rousseau F., Thibaut T. DNA sequence data demonstrate the polyphyly of the genus *Cystoseira* and other Sargassaceae genera (Phaeophyceae) // *Journal of Phycology*, 2010. Vol. 46(6). P. 1329-1345.
9. García-Seoane R., Fernández J.A., Villares R., Aboal J.R. Use of macroalgae to biomonitor pollutants in coastal waters: optimization of the methodology // *Ecological Indicators*, 2018. Vol. 84. P. 710–726.
10. Gubelit Y.I., Shigaeva T.D., Kudryavtseva V.A., Berezina N.A. Heavy metal content in macroalgae as a tool for Environmental Quality Assessment: The Eastern Gulf of Finland Case Study // *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023. Vol. 11(9). P. 1640.
11. Kangas P., Autio H. Macroalgae as indicators of heavy metal pollution // *Publ. Water Res. Inst.*, 1986. Vol. 68. P. 183-189.
12. Kozhenkova S.I. Checklist of marine benthic algae from the Russian continental coast of the Sea of Japan // *Phytotaxa* 2020 437 (4): 177–205.
13. Obluchinskaya E., Zakharova L. Metal concentrations in three species of *Fucus* L. on the Murmansk coast of the Barents Sea // *Polar Science*, 2021. Vol. 21. P. 100646.
14. Soderlund S., Forsberg A., Pedersen M. Concentration of cadmium and other metals in *Fucus vesiculosus* L. and *Fontanalis dalecarlica* Br. Eur. from the northern Baltic Sea and the southern Bothnian Sea // *Environment Pollution*, 1988. Vol. 51. P. 197-212.