

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ В МОНИТОРИНГЕ И ОЦЕНКЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОИНДИКАТОРОВ

Чернова Е.Н.,

ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток

Аннотация. Показано, что для оценки загрязнения окружающей среды с использованием организмов не разработано предельно допустимых концентраций. Геохимические реперные величины – фон и кларк представляют собой средние значения выборок, используются для определения степени обогащения или обеднения природных компонентов, и для оценки степени загрязнения не могут быть использованы. В качестве аналога ПДК рекомендуется использовать величину Медиана + 2МАО (двойная медиана абсолютных значений от медианы), как верхний пороговый уровень фоновых концентраций элемента. Пороговые значения фоновых концентраций уже рассчитаны для массовых видов морских макрофитов-индикаторов состояния среды Японского, Охотского, Белого, Южно-Китайского морей, Сейшельских островов, пресноводных моллюсков-унионид Днепра (Украина), Вьетнама, Приморского края (Россия). В качестве ориентировочного порогового уровня для определения степени загрязнения элементами морской среды и без учета систематических особенностей биомониторов можно рекомендовать значение Q3 из обобщенной выборки Мировых данных для морских трав, отделов зеленых, бурых и красных водорослей.

Ключевые слова: биоиндикаторы, биомониторы, кларк, фон, пороговые значения фоновых концентраций.

GEOCHEMICAL AND ECOLOGICAL CRITERIA IN MONITORING AND ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION USING BIOINDICATORS

Chernova E. N.,

Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok

Annotation. It is shown that no maximum permissible concentrations have been developed to assess environmental pollution using organisms. Geochemical reference values – background and Clark represent the average values of the samples, are used to determine the enrichment or depletion of natural components and cannot be used to assess the degree of contamination. It is recommended to use the Median + 2MAD (double the median of absolute deviation from the median), the upper threshold level of background concentrations of the element as an analog of the MPC. Threshold values have already been calculated for mass species of marine macrophytes-indicators of the Japan, Okhotsk, White, South-China Seas, and Seychelles, freshwater bivalves Unionidae from Dnieper (Ukraine), Vietnam, Primorskii Krai (Russia). In case of insufficient data for calculating threshold concentrations, the Q3 value from a generalized sample of Global data for seagrasses, green, brown and red algae divisions can be recommended as an approximate threshold level for determining the degree of pollution by elements of the marine environment and without taking into account the systematic features of biomonitors.

Keywords: bioindicators, biomonitors, clarke, background, threshold values of background concentrations.

Введение. Для экологической оценки состояния окружающей среды необходимы критерии – граничные (реперные) величины параметров среды, которые разделяют ее на чистую и загрязненную. В частности, экологическими критериями загрязнения пищевых продуктов, воды, почвы, атмосферного воздуха являются предельно допустимые концентрации (ПДК) веществ или элементов, или предельно допустимые уровни (ПДУ) воздействия физических факторов (шума, электромагнитного излучения), направленные на сохранение здоровья населения и качества окружающей среды, и обеспеченные нормативными документами санитарной и экологической государственных служб. Для живых организмов – индикаторов качества среды – таких нормативов нет. Имеются только санитарно-гигиенические ПДК для четырех наиболее токсичных элементов (As, Hg, Cd, Pb – [1]) в пищевых продуктах. Сравнение полученных в исследованиях концентраций элементов в организмах с этими ПДК отвечает на вопрос о том, безопасно ли человеку употреблять пищевые продукты животного или растительного происхождения, но не отвечают на вопрос о безвредности (токсичности) этих концентраций для самих живых организмов.

Все известные реперные величины, используемые в формулах для определения обогащения или степени загрязнения природных компонентов можно свести к трем – кларк и фоновый уровень, ПДК. Коэффициенты концентрации, нормализованные по среднему содержанию химического элемента в литосфере (кларку), в какой-либо геохимической системе (почве, горной породе, растительности и т.д.) или ее таксономической части (тип почвы, тип горной породы и т. д.), называются кларками концентрации. Коэффициенты концентрации, нормализованные по отношению к геохимическому фону (среднему значению или медиане), называются коэффициентами аномальности (контрастности) или фактором обогащения. Коэффициенты, рассчитанные как отношение полученной концентрации элемента (вещества) в компоненте среды к его ПДК в этом же компоненте среды ($C_i / C_{\text{ПДК}}$), называются коэффициентами опасности (Ko) или индексами экологического риска (для человека и его среды обитания).

Биомониторинг – метод слежения за состоянием экосистемы, в частности, за содержанием в ней тяжелых металлов, с использованием массовых видов живых организмов. Он основан на том, что прикрепленные организмы легко доступны, толерантны по отношению к широкому диапазону концентраций металлов, накапливают биодоступные формы элементов пропорционально их содержанию в среде. Однако существует видоспецифичность в накоплении элементов, что усложняет расчет универсальных реперных констант при переводе биомониторинга на уровень оценки состояния среды.

Целью данной работы было изучить подходы к оценке степени загрязнения экосистем микроэлементами с использованием биоиндикаторов.

Материалы и методы: анализ научных публикаций по проблемам использования в экологической оценке реперных величин концентраций химических элементов – фоновые концентрации, кларки, ПДК.

Результаты и обсуждение. В геохимии существует понятие кларка, как средней концентрации элемента в земной коре или какой-либо ее части. Это понятие было разработано и внедрено в геохимию в 40-е годы 19-го столетия как показатель распространенности химических элементов в природе, которую А. Е. Ферсман назвал «новой константой мира» [2]. При поиске полезных ископаемых концентрации элементов в руде сравнивали с кларком в близкой по составу горной породе. На земле, вокруг найденных и уже разрабатываемых месторождений полезных ископаемых, исследователи отмечали природные и антропогенные аномалии – ореолы рассеяния элементов в горных породах, почвах, водах, в повышенных, относительно кларков, концентрациях. Избыток или недостаток каких-либо элементов в среде часто сопровождается изменениями состава растительности, животного мира, увеличением частоты возникновения определенных эндемичных заболеваний человека и животных. Появилось понятие о нормальном, повышенном или пониженном биогеохимическом «фоне».

Изучение антропогенных ореолов рассеяния элементов в населенных пунктах, соседствующих с местами добычи полезных ископаемых, привело к возникновению понятия «загрязнение».

Аналогично кларку природные фоновые концентрации веществ в среде определяются как «показатели их содержания в воздухе или воде, отвечающие средним условиям, характерным для данной территории или акватории, которые контролируются глобальными или макрорегиональными природными процессами» [3]. Когда кривая распределения отличается от нормальной, за оценку среднего значения может быть принято среднее геометрическое, или медианное значение. Только фоновая концентрация ксенобиотиков в компонентах экосистем стремится к нулю, так как до их синтеза данные вещества в природе не существовали.

Коэффициенты аномальности и кларки концентрации элементов в компонентах экосистем, в том числе биоиндикаторах, рассчитанные на основе средних концентраций и кларков отвечают на вопрос о дефиците или избытке элемента, но не отвечают на вопрос о наличии или отсутствии загрязнения. Для оценки степени загрязнения среды нужны разработанные ПДК вредных веществ, однако для массовых организмов-мониторов, населяющих эти среды они отсутствуют.

Любая статистическая величина имеет доверительный интервал. Следовательно, он должен быть учтен при использовании средней величины концентраций элементов. Вместе с ним средняя концентрация превращается в интервал значений с верхней и нижней границами. Введенные последними экологические нормативы стали рассчитываться с учетом наличия этого интервала. Так, за фоновую концентрацию вещества в морской среде приняли «статистически обоснованную верхнюю доверительную границу возможных средних значений концентрации этого вещества, рассчитанную по результатам гидрохимических наблюдений для наиболее неблагоприятного в отношении качества морской воды периода (сезона) в годовом цикле... на станциях систематических наблюдений, расположенных вне зоны влияния действующих выпусков сточных вод» [4].

Для всех биологических видов, в том числе и человека, действует закон толерантности, открытый еще в 1840 г. Ю. Либихом (закон минимума) и получившим развитие в работах В. Шелфорда в 1913 г. Закон постулирует благоприятное существование организма в рамках некоторого диапазона толерантности (зона оптимума) каждого из значимых факторов среды. За пределами оптимума значений фактора справа и слева находятся зоны, в которых интенсивность жизнедеятельности организмов снижается (зоны пессимума). Не только избыток, но и недостаток любого значимого для организма фактора, в том числе микроэлемента, может служить причиной угнетения его жизненных функций, снижения продуктивности популяции и ее гибели.

Экспериментальным поиском оптимальных концентраций микроэлементов для сельскохозяйственных животных в 1940-80-е годы занимались последователи В.И. Вернадского – А.В. Виноградов, В.В. Ковальский с коллегами. В. Ковальский [5] экспериментально определил величины нормальных (=оптимальных) концентраций ряда микроэлементов в кормовых растениях для крупного рогатого скота в 1945-1974 гг. и указал на концентрации, как низкие, так и высокие, вызывающие заболевания. Его кривые в целом сходны с кривой закона толерантности.

Таким образом, оптимальные или нормальные концентрации природных веществ в компонентах наземных экосистем не равны нулю и представляют собой некоторый диапазон значений (син.: фоновые концентрации) как с точки зрения законов статистики, так и с точки зрения экологии.

В водной среде, в отличие от наземной, фоновая концентрация микроэлементов – это диапазон, который всегда существенно сдвинут в область низких значений. Это связано с тем, что для гидробионтов дефицит микроэлементов практически не наблюдается и быстро компенсируется – даже в центральных частях океанов с очень низкими содержаниями

микроэлементов, вокруг коралловых островов, существуют высокопродуктивные экосистемы. Недостаток биогенных элементов в водной среде уравнивается высокой скоростью круговорота веществ или снижением биомассы системы. Концентрации микроэлементов в организмах таких систем, как правило, низки, коэффициент концентрирования из воды чрезвычайно высок [6], но они не испытывают дефицита элементов, как на суше. Уже в мониторинговых исследованиях международного проекта Mussel Watch, Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA) под эгидой ЮНЕСКО, за пороговую величину фоновой концентрации металла в биоиндикаторах – мидиях и устрицах принят 85-перцентиль выборки [7]. Авторы полагают, что концентрации металлов выше уровня 85-го перцентилля в организмах свидетельствуют о загрязнении акватории.

В XXI столетии на почвенных геохимических данных, а также выборке по микроэлементному составу пресноводных моллюсков было показано, что наиболее приемлемым для определения верхней границы пороговой концентрации элементов фонового диапазона является расчет медианы плюс двойная медиана абсолютных отклонений от медианы (медиана + 2МАО) [8, 9]. Эта величина может быть использована как для данных с нормальным распределением, так и иным, близка по значению к 85-перцентиллю [10], легко вычисляется, поэтому может быть использована в качестве пороговой величины концентраций, разделяющей организмы фоновых районов от загрязненных. Остается только набрать статистические данные по микроэлементному составу массовых родов (семейств) биомониторов. В частности, нами были рассчитаны пороговые концентрации фонового диапазона ряда металлов для водорослей и морских трав западного побережья Японского (табл. 1), Охотского, Белого и Южно-Китайского морей, Сейшельских островов (табл. 2) [11]. Для пресноводных систем рассчитаны пороговые уровни концентраций ряда металлов в моллюсках сем. Unionidae р. Днепр, рек Вьетнама, Приморского края (Россия) [9, 12].

Таблица 1

Пороговые значения фоновых концентраций металлов ($C_{\text{порог}} = \text{Медиана} + 2\text{МАО}$, мкг/г сух. массы) в макрофитах-мониторах для оценки загрязнения металлами прибрежных вод Японского моря прочерк – нет данных.

| Вид | Fe | Mn | Cu | Zn | Cd | Pb | Ni |
|--|-----|------|-----|------|------|-----|-----|
| <i>Fucus distichus</i> sbsp <i>evanescens</i> | 100 | 68 | 4,1 | 80 | 3,1 | 1,9 | 9,3 |
| <i>Silvetia babingtonii</i> | 54 | 22,4 | 3,5 | 39 | 1,6 | – | – |
| <i>Sargassum pallidum</i> | 672 | 455 | 3,9 | 23,8 | 1,7 | 1,5 | 3,8 |
| <i>Sargassum miyabei</i> | 746 | 714 | 4,7 | 19,9 | 2,9 | 1,8 | 3,6 |
| <i>Stephanocystis crassipes</i> | 194 | 11,3 | 3,6 | 42,7 | 3,2 | 1,4 | 4,2 |
| <i>Saccharina</i> sp. | 82 | 8,1 | 4,0 | 43,1 | 2,7 | – | – |
| <i>Costaria costata</i> | 215 | 22,3 | 6,3 | 55,4 | 0,6 | 1,4 | 4,9 |
| <i>Ulva lactuca</i> | – | 34 | 7,3 | 13 | 0,15 | 2,9 | 3,5 |
| <i>Zostera marina</i> , лист | 547 | 925 | 9,1 | 35,8 | 3,4 | – | 4,5 |
| <i>Phyllospadix iwatensis</i> , лист | 547 | 925 | 9,1 | 68,8 | 3,4 | – | 4,5 |
| ПДК водоросли [1] | – | – | – | – | 5 | 2,5 | – |

В отсутствии рассчитанных пороговых концентраций элементов в массовом для региона морском макрофите - биомониторе, можно использовать статистические параметры концентраций металлов из выборки по литературным данным за 1952–2015 гг. (табл. 3). Авторы рассчитали 0,2-усеченное среднее, медиану, 1-й и 3-й квартили [13]. По аналогии с 85-м перцентилем [7] третий квартиль (75-й перцентиль) также можно рекомендовать для использования в качестве ориентировочного порогового уровня фоновых концентраций.

Таблица 2

Пороговые значения фоновых концентраций металлов (Спорог = Медиана + 2МАО, мкг/г сух. массы) в макрофитах-мониторах для оценки загрязнения металлами прибрежных вод Белого и Охотского морей, Южно-Китайского моря и Сейшельских островов

| Вид | Fe | Mn | Cu | Zn | Cd |
|---|-----|------|-----|------|------|
| Белое | | | | | |
| <i>Fucus sp.</i> | 359 | 166 | 3,8 | 27,7 | 0,65 |
| <i>Ascophyllum nodosum</i> | 68 | 26 | 3,7 | 33,7 | 0,76 |
| <i>Saccharina sp.</i> | 278 | 21,5 | 2,3 | 23 | 0,9 |
| Охотское | | | | | |
| <i>Fucus distichus</i> sbsp <i>evanescens</i> | 332 | 87 | 3,9 | 33,0 | 4,8 |
| Южно-Китайское | | | | | |
| <i>Sargassum sp.</i> | 301 | 72 | 3,2 | 14,7 | 2,0 |
| Сейшельские острова | | | | | |
| <i>Sargassum sp.</i> | 194 | 19,1 | 3,3 | 21,2 | 1,7 |

Таблица 3

Расчетные по литературным данным (1956-2014 гг.) значения Q3 концентраций металлов (мкг/г сух. массы) в макрофитах - биомониторах для оценки загрязнения металлами прибрежных вод по: [13]

| Металлы | Концентрации металлов (мкг/г сух. массы) | | | |
|---------|--|------------------------|---------------------|-----------------------|
| | Морские травы | Зеленые Chlorophyta | Бурые Phaeophyta | Красные Rhodophyta |
| Fe | 944 | 1270 | 848 | 630 |
| Mn | 71,5 | 182 | 135 | 78,7 |
| Cu | 14,6 | 12,6 | 13,0 | 10,6 |
| Zn | 70,2 | 60,6 | 120 | 59,4 |
| Cd | 1,57 | 0,90 | 2,15 | 1,35 |
| Pb | 10,1 | 11,6 | 11,0 | 7,87 |
| Ni | 12,4 | 7,07 | 11,4 | 9,28 |
| Co | 1,39 | 3,10 | 6,12 | 1,56 |
| Cr | 10,5 | 4,80 | 4,18 | 4,51 |
| Hg | 0,078 | 0,170 | 0,105 | 0,169 |
| As | 18,1 | 13,9 | 65,3 | 17,2 |

Заключение

Таким образом, геохимический критерий разделения выборки концентраций элементов в горных породах, почвах, донных отложениях, на концентрации обогащенные и обедненные (дефицитные), относительно кларка (средней величины) может быть использован и в биогеохимических исследованиях (кларки элементов в биомассе рассчитаны). Но на основе коэффициентов обогащения (кларков концентрации) давать экологическую оценку загрязнения среды элементами (чисто - загрязнено) не рекомендуется, так как средние величины – это лишь центральные величины фонового (нормального, оптимального) диапазона.

Для оценки экологического состояния среды с использованием биомониторов в качестве пороговой концентрации элемента, разделяющей организмы фоновых районов от загрязненных, рекомендуется использовать величину Медиана+2МАО. Пороговые значения уже рассчитаны для массовых видов морских макрофитов-индикаторов Японского,

Охотского, Белого, Южно-Китайского морей, Сейшельских островов. Для пресноводных систем рассчитаны пороговые уровни концентраций ряда металлов в моллюсках сем. Unionidae р. Днепр, рек Вьетнама, Приморского края (Россия). В качестве ориентировочного порогового уровня фоновых концентраций металлов в макрофитах без учета систематических особенностей мкарофитов - биомониторов для определения степени загрязнения элементами среды можно рекомендовать значение Q3 из обобщенной выборки Мировых данных для морских трав, отделов зеленых, бурых и красных водорослей.

Благодарность. Работа выполнена по теме НИР ФГБУН ТИГ ДВО РАН: № 125021302113-3.

Литература

1. СанПиН 2.3.2.1078–01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 14 ноября 2001 г. № 36) ; введ. 2002–09–01 (с изм. от 15 апреля 2003 г., 16 июля, 01 октября 2008 г.) // Гарант.ру : информационно-правовой портал. – URL: <https://base.garant.ru/4178234/?ysclid=m46dhjg4sl100397556> (дата обращения 21.01.2022).
2. Перельман А. И. Геохимия: учебник – Изд. 3-е. – М.: Ленанд, 2016. – 528 с.
3. Котляков В. М. Комарова А. И. География. Понятия и термины : пятиязычный академический словарь – русский, английский, французский, испанский, немецкий. – М.: Наука, 2007. – С. 438.
4. Рекомендации по применению действующих нормативно-методических документов в целях определения фоновой концентрации загрязняющих веществ при расчете НДС водовыпусков во внутренние морские воды и территориальное море Российской Федерации // Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова : офиц. сайт. М.: ГОИН, 2013. – URL: <http://oceanography.ru/index.php/2013-10-25-13-45-55/2013-05-24-14-27-12> (дата обращения: 23.02.2018).
5. Ковальский В. В. Геохимическая экология: очерки. – М.: Наука, 1974. – 300 с.
6. Чернова Е. Н., В. М. Шулькин Концентрация металлов в воде и в водорослях: биоаккумуляционный фактор // Биология моря. – 2019. Т. 45. – № 3. – С. 177–187.
7. Cantillo A. Y. Comparison of results of Mussel Watch Programs of the United States and France with Worldwide Mussel Watch Studies / A. Y. Cantillo // Mar. Pollut. Bull. – 1998. Vol. 36, is. 9. – Pp. 712–717.
8. Reinmann C., Filzmoser P., Garrett R. G. Background and threshold: critical comparison of methods of determination // Science of the Total Environment. – 2005. Vol. 346, is. 1–3. – Pp. 1–16.
9. Лукашев Д. В. Метод расчета фоновых концентраций тяжелых металлов в мягких тканях двустворчатых моллюсков для оценки загрязнения р. Днепр // Биология внутренних вод. – 2007. – № 4. – С. 97–106.
10. Чернова Е. Н. Определение фоновых концентраций металлов в бурой водоросли *Sargassum pallidum* из северо-западной части Японского моря // Биология моря. – 2012. – Т. 38/ – № 3. – С. 249–256.
11. Чернова Е.Н. Региональные фоновые уровни тяжелых металлов в гидробионтах. Автореф. дисс. д.б.н. – Томск. 2025. – 50 с.
12. Chernova E. N., Prozorova L. A., Bogatov V. V. Use of threshold background concentrations of heavy metals in mollusks to assess the ecological status of water bodies in the Amur-Primorsky basin // Problems of geochemical ecology under conditions of biosphere technogenesis : Proceedings of XIV International Biogeochemical School-Conference, September 15-20, 2025, Tomsk, Russia (in press).
13. Sánchez-Quiles D., Marbà N., Tovar-Sánchez A. Trace metal accumulation in marine macrophytes: Hotspots of coastal contamination worldwide // Science of the Total Environment. – 2017. – Vol. 576. – Pp. 520–527.