

УДК 574.4 : 546.711 + 546.47 + 546.56 + 546.812 + 546.73

## Особенности накопления тяжелых металлов высшими водными растениями водоемов и водотоков г. Гомеля и прилегающих территорий

Т. В. МАКАРЕНКО

### Введение

Для того, чтобы противостоять избыточному поступлению тяжелых металлов в организм, растения располагают системой защитных реакций и механизмов, выработанных в процессе эволюции а также в ответ на изменение среды обитания. При поступлении тяжелых металлов из почвы в растения первый барьер на их пути – это корневая система. Избыточная аккумуляция металлов разными видами растений ограничивается избирательной способностью корневого поглощения по отношению к определенным элементам [1, 2].

Из литературных источников известно, что при незначительном содержании химических элементов в почвах растения поглощают все доступные для них формы соединений. При высоких концентрациях веществ в почвах у растений наблюдается насыщение химическим элементом, при котором его количество в растениях может оставаться на определенном уровне или даже снижаться при дальнейшем увеличении содержания элемента в почве [3]. В работе [4] указывается, что линейная зависимость аккумуляции металлов в системе почва-растение наблюдается только в диапазоне малых концентраций микроэлементов в среде произрастания. При высоких концентрациях наблюдается обратная зависимость – чем выше содержание элемента в среде, тем ниже степень его поглощения [4].

Целью проведенных исследований явилось изучение особенностей накопления элементов из донных отложений представителями высших водных растений в водоёмах с различной степенью антропогенной нагрузки, а также изучение возможностей использования водных растений в качестве мониторов загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами.

Принимая во внимание вышесказанное, для характеристики процессов накопления загрязнителей в растениях используют не только абсолютные содержания веществ в растительных тканях, но и значение коэффициента биологического поглощения или коэффициент накопления элементов [5]. Коэффициент накопления элемента – это величина, которая рассчитывается как отношение концентрации элемента в золе водных растений к его содержанию в донных отложениях:

$$K_n = C_{\text{раст.}}/C_{\text{д.о.}}$$

Коэффициент накопления свидетельствует о наличии факта “контроля” со стороны растений за поступлением загрязнителей в метаболически важные центры и позволяет косвенно судить о степени доступности элемента в среде обитания для растительных организмов и о поведении поллютантов в системе “среда обитания – растение”.

По величине аккумуляции металлов макрофиты условно подразделяют на макро-, микро- и деконцентраторы [6]. К макроконцентраторам относят растения с  $K_n > 2$ , к микро – с  $K_n = 1-2$  и к деконцентраторам – с  $K_n < 1$ . Один и тот же вид при разных уровнях содержания металлов в донных отложениях может одновременно относиться к разным классификационным группам. По характеру накопления и распределения металлов в зависимости от содержания их в среде обитания растения также делят на 3 группы [7]: 1) “накопители” – характеризуются повышенным содержанием металлов в органах независимо от концентрации последних в среде обитания ( $K_n > 1$ ); 2) “индикаторы” – поглощение металлов пропорционально их концентрации в среде обитания ( $K_n = 1$ ); 3) у “исключителей” концентрация данного ме-

талла поддерживается на постоянно низком уровне независимо от внешних концентраций ( $K_n \ll 1$ ). Предполагается, что механизмы устойчивости растений к токсичности отдельных тяжелых металлов действуют независимо один от другого. Для растений характерно наличие активной “внутренней” детоксикации соединений металлов. Растения разных групп различаются местом, где происходит обезвреживание: у “накопителей” оно осуществляется, главным образом, в надземной части, а у “исключителей” – в корнях.

### Материалы и методы

Отбор проб донных отложений и высших водных растений производился с мая по август 2000 г. в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий, различающихся по степени антропогенной нагрузки. Пробы растений (надводную часть) после тщательного ополаскивания последовательно высушивали до воздушно-сухого, затем абсолютно сухого состояния и озоляли до белой золы в муфельной печи при  $450^\circ\text{C}$  [8]. Донные отложения отбирали с помощью дночерпателя Боруцкого, высушивали до воздушно-сухого, затем абсолютно сухого состояния и озоляли до белой золы в муфельной печи при  $450^\circ\text{C}$  [8]. Содержание металлов в золе растений и донных отложений определяли атомно-эмиссионным спектральным методом на спектрофотометре IGSM в лаборатории физико-химического анализа Института геологических наук НАН Беларуси (аналитик И.Н. Тетерева).

В процессе выполнения работы собраны макрофиты, широко распространенные в водоемах Беларуси, которые относятся к 4 экологическим группам: I – свободноплавающие неприкрепленные – ряска малая (*Lemna minor* L.) и водяной орех (*Trapa natans* L.); II – плавающие прикрепленные растения – кубышка желтая (*Nuphar luteum* (L) Sm.) и горец земноводный (*Polygonum amphibium* L.); III – подводные (погруженные) растения – элодея канадская (*Elodea canadensis* Rich.), роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum* L.), рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.); IV – надводные (земноводные или воздушно-водные) растения – стрелолист обыкновенный (*Sagittaria sagittifolia* L.), сусак зонтичный (*Butomus umbellatus* L.), частуха подорожниковая (*Alisma peantago-aquatica* L.), манник напывающий (*Gluceria fluitans*), болотница болотная (*Eleocharis palustris*), камыш озерный (*Scirpus lacustris* L.), тростник обыкновенный (*Phragmites communis* Trin) [9].

### Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показывают значительные различия в накоплении металлов из донных отложений у изучаемых видов водных растений (табл. 1). Например, погруженные растения III группы, отобранные в оз. Дедно, накапливают свинец из донных осадков до уровней, которые 4 раза выше, чем у надводных растений IV группы и в 10 раз выше в сравнении с растениями II группы. Такая же тенденция при накоплении металла наблюдается для представителей других водоемов опробования, в которых произрастают плавающие прикрепленные растения – коэффициенты накопления свинца макрофитами III и IV групп в 2, 5 – 5 раз выше таковых у растений II экологической группы (за исключением старицы). Погруженные растения III группы аккумулируют свинец в количествах, которые в 1, 4 – 1, 8 раза выше в сравнении с воздушно-водными макрофитами IV группы. У растений из загрязненного оз. Волотовского различие между значением  $K_n$  элемента у погруженных и воздушно-водных представителей составляет 23 раза. Полученные данные подтверждают предположение о том, что доступность свинца из донных осадков для растений зависит от их биологии, позволяющей регулировать его содержание в различных видах даже при одинаковом количестве металла в грунтах исследуемых водоемов. Исходя из предложенных ранее классификаций, все изучаемые виды макрофитов относятся к деконцентраторам и “исключителям” свинца. Как видно из рисунка 1, при низких концентрациях элемента в донных отложениях у водных растений отмечаются высокие значения коэффициентов накопления. Примером может служить накопление свинца растениями старичного комплекса. Грунты старицы у

д. Поляновка характеризуются низкими концентрациями металла, а  $K_n$  свинца водными растениями имеют высокие значения. По мере увеличения содержания элемента в осадках водоемов коэффициент накопления у всех видов растений уменьшается, т.е. все меньшая доля содержащегося в донных грунтах токсиканта переходит в корневые системы. Вышесказанное свидетельствует о наличии некоторого механизма защиты у растений, ограничивающего

Таблица 1.

Коэффициенты накопления металлов растениями разных экологических групп в зависимости от их содержания в донных отложениях водоемов

Водоем	Экологическая группа	Металл						
		Pb	Ni	Co	Cr	V	Mn	Cu
Гребной канал	II	0,025	–	–	–	0,019	0,714	0,100
	III	0,096	0,043	–	0,130	0,250	0,700	0,380
	IV	0,085	0,031	0,051	0,096	0,136	0,415	0,210
Оз. Володькино	II	0,091	0,082	–	0,026	–	2,576	0,286
	III	0,222	1,378	0,800	0,110	0,140	1,480	0,630
Оз. Дедно	II	0,045	0,040	–	–	–	2,193	0,104
	III	0,457	0,280	0,670	0,090	0,210	13,08	0,320
	IV	0,115	0,129	–	0,069	0,086	1,803	0,736
Оз. Круглое	II	0,008	0,012	–	0,007	0,013	0,392	0,008
	III	0,033	0,081	–	0,040	0,080	2,250	0,020
	IV	0,020	0,062	–	0,010	0,035	0,440	0,043
Р. Сож, Ченки	II	0,051	–	–	–	–	0,036	0,055
	III	0,261	0,070	0,360	0,115	0,155	0,930	0,620
	IV	0,185	0,131	0,290	0,123	0,146	0,225	0,750
Р. Сож, Кленки	III	0,230	–	–	0,151	–	47,37	0,630
	IV	0,083	0,360	–	0,050	0,050	14,80	0,171
Старица, Ветка	II	0,139	–	–	–	–	3,502	0,810
	III	0,476	0,222	–	–	–	16,30	3,780
	IV	0,108	0,146	–	–	–	1,270	0,798
Оз. Волоотовское	III	0,281	1,300	0,630	0,130	0,220	3,400	0,570
	IV	0,012	–	–	–	–	0,060	0,027
Оз. Любенское	III	0,266	0,179	0,350	0,077	0,140	1,500	0,280
	IV	0,177	0,013	–	0,064	0,091	0,187	0,212
Оз. Малое	III	0,321	0,171	0,160	0,188	0,140	1,350	0,090
	IV	0,179	0,216	0,250	0,115	0,120	0,670	0,207
Оз. Шапор	III	0,321	0,313	0,420	0,032	0,160	5,000	0,400
	IV	0,202	0,438	0,122	0,055	0,091	1,750	0,780

свободное поступление поллютантов в органы растений. Одним из таких механизмов, вероятно, является корневой барьер. Благодаря корневому барьеру при повышении концентрации металла в грунте величина  $K_n$  изменяется незначительно. Минимальные значения коэффициентов накопления свинца отмечены для водных растений оз. Круглое, осадки которого содержат максимальное количество металла. У макрофитов данного водоема наблюдается на-

сыщение свинцом, и дальнейшее его поступление в органы растений может привести к срыву регуляторных процессов и гибели растений. Исключение составляют растения, произрастающие в оз. Малое, значения  $K_n$  для которых повышаются при увеличении металла в донных осадках, что не соответствует тенденции для остальных водоемов. При достаточно высоких концентрациях элемента в донных отложениях барьерная функция, скорее всего, нарушается, и любое повышение концентрации свинца в грунтах ведет к пропорциональному накоплению его корнями растений.

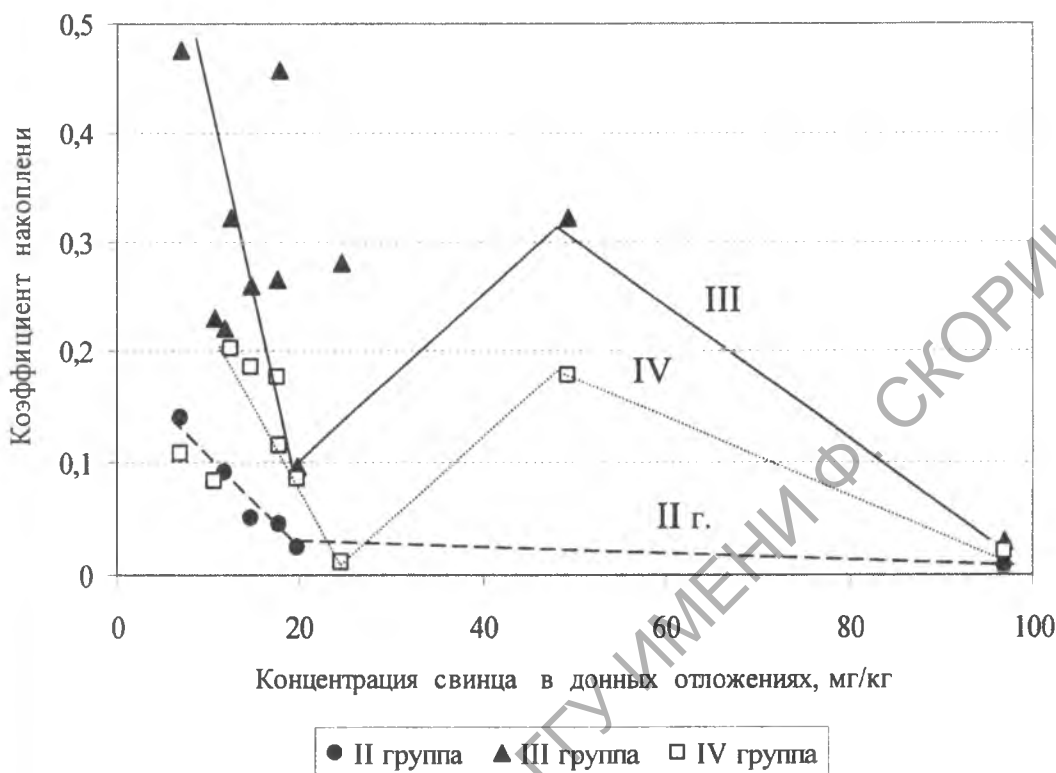


Рис. 1. Коэффициенты накопления свинца в растениях различных экологических групп

По нашим оценкам, пороговые концентрации свинца в донных отложениях водоемов, при достижении которых происходит скачкообразный переход функционального состояния растения (в том числе способность аккумулировать тяжелые металлы) на новый уровень устойчивости, находятся в диапазоне от 20 до 25 мг/кг сухой массы. По величине коэффициентов накопления свинца для растений разных экологических групп можно выстроить следующий ряд:  $K_n$  III гр. >  $K_n$  IV гр. >  $K_n$  II гр. Погруженные виды растений III группы поглощают элемент интенсивнее надводных и прикрепленных растений с плавающими листьями. Но многие виды погруженных макрофитов III группы неоднозначны как объекты водного мониторинга, поскольку на протяжении вегетационного сезона могут менять источники поступления вещества в свои ткани.

Похожая картина наблюдается при накоплении меди в тканях изучаемых видов водных растений. В диапазоне низких концентраций металла в донных отложениях (старица у д. Поляновка) отмечаются максимальные значения коэффициентов накопления меди растениями ( $K_n$  II гр. = 0,81;  $K_n$  III гр. = 3,78;  $K_n$  IV гр. = 0,798). Представители II группы, произрастающие в старице, аккумулируют металл в 3–14 раз интенсивнее в сравнении с растениями той же группы из всех остальных водоемов опробования (для оз. Круглое и старицы различия в значении  $K_n$  достигают 100 раз). Погруженные виды растений (III гр.) накапливают медь из грунтов старицы до уровней, которые в 6–14 раз выше, чем у растений данной группы из других водоемов (для оз. Круглое и старицы различия составляют 19 раз, для оз. Малое – 42 раза). Значения  $K_n$  элемента у представителей IV группы старицы в 4–5 раз выше по сравне-

нию с другими водоемами (для оз. Круглое различия составляют 18 раз, для оз. Волотовское – 30 раз). Погруженные виды растений старицы накапливают медь из грунтов почти в 5 раз интенсивнее, чем остальные водные растения данного водоема. В оз. Волотовское, где дно загрязнено металлами, значения  $K_n$  у растений III группы в 21 раз выше, в сравнении с плавающими прикрепленными и воздушно – водными растениями. В озерах Малое, Дедно, Шапор, наоборот, растения IV группы поглощают металл в количествах, которые в 2 раза выше, чем у погруженных макрофитов. По мере увеличения концентрации меди в осадках водоемов, значения коэффициентов накопления элемента в растениях уменьшаются (рис. 2). Грунты оз. Круглое содержат медь в максимальных количествах, а коэффициенты накопления металла макрофитами всех трех групп, как и в случае со свинцом, имеют самые низкие, по сравнению с другими водоемами, значения.

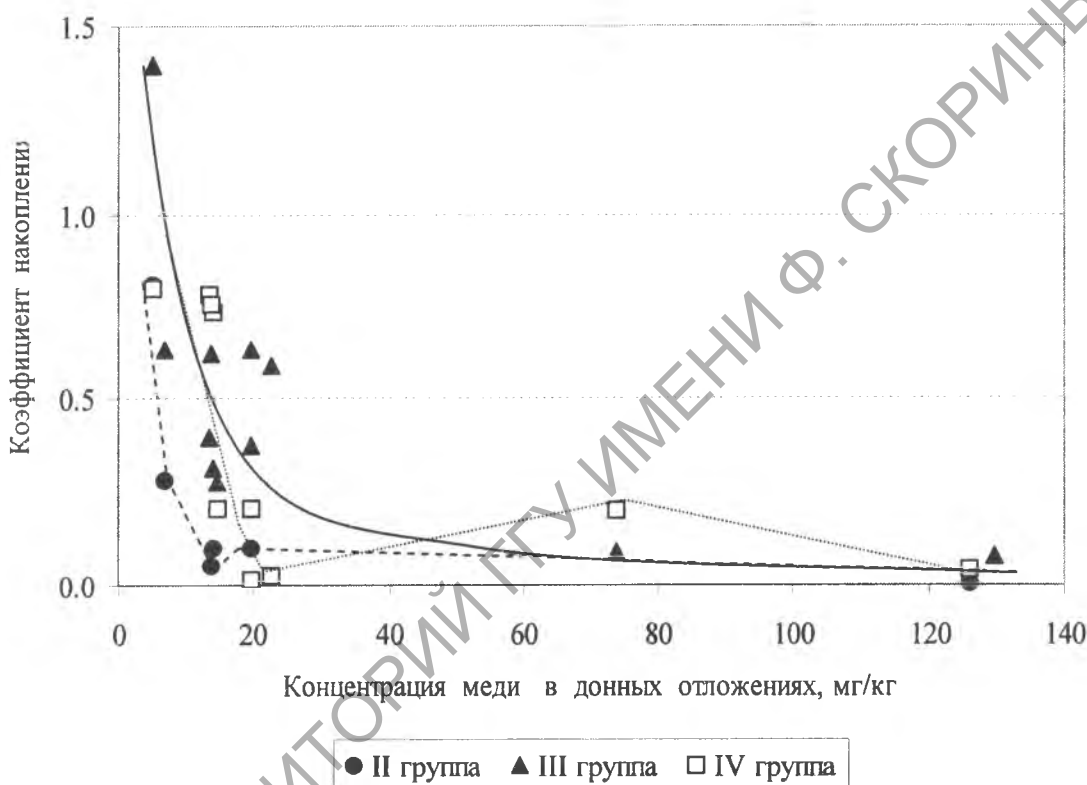


Рис. 2. Коэффициенты накопления меди в растениях различных экологических групп

Макроконцентраторами и “накопителями” меди являются погруженные виды растений III группы, произрастающие в старице. “Индикаторами” элемента можно назвать растения III и IV групп из р. Сож ниже города (д. Ченки), растения III группы из озер Дедно, Шапор, а также растения II и III групп из старицы у д. Поляновка. Остальные макрофиты являются деконцентраторами данного металла. Ряд накопления меди водными растениями имеет вид:  $K_n \text{ III э.г.} \geq K_n \text{ IV э.г.} > K_n \text{ II э.г.}$ , хотя значения коэффициентов накопления меди у воздушно – водных растений IV группы, в некоторых случаях, были выше, чем у погруженных растений III группы. По нашим предположениям, критические пороговые концентрации меди для растений в донных отложениях находятся в диапазоне от 13 до 20 мг/кг сухой массы. На низкую биодоступность элемента в условиях техногенного загрязнения почв указывают А. Кабата-Пендиас и Х. Пендиас в обзорной работе, посвященной проблеме поведения микроэлементов в системе почва-растение [4].

Коэффициенты накопления марганца растениями II и III групп, произрастающих в изучаемых водоемах различаются в 4–6 раз, а в р. Сож у д. Ченки – в 26 раз. Для макрофитов III и IV групп различия составляют 2–7 раз, в старице – 13 раз, в оз. Волотовское – 56 раз. Это говорит о разной поглотительной способности растений различных экологических групп

по отношению к металлу даже при одинаковых условиях произрастания. По содержанию марганца подавляющее число макрофитов из всех экологических групп отнесены нами к макроконцентраторам и “накопителям”, особое место среди которых занимают плавающие прикрепленные растения из оз. Дедно и р. Сож (д. Кленки), а также погруженные растения из р. Сож (д. Кленки) и старицы. К микроконцентраторам и “индикаторам” элемента относятся погруженные виды растений оз. Володькино, р. Сож (д. Ченки), озер Любенское и Малое а также надводные растения озер Дедно, Шапор и старицы. Деконцентраторами и “исключителями” марганца являются растения всех экологических групп Гребного канала, прикрепленные плавающие растения оз. Круглое и р. Сож (д. Кленки), воздушно – водные растения р. Сож (д. Кленки), озер Круглое, Волотовское и Малое. Из числа макроконцентраторов выделяются своей способностью аккумулировать металл погруженные виды растений, произрастающие в р. Сож выше города. У растений на данном участке реки, где определено самое низкое содержание элемента в донных отложениях, отмечены самые высокие коэффициенты накопления металла (рис. 3). По мере увеличения концентрации марганца в донных осадках водоемов, значения коэффициентов накопления уменьшаются и достигают минимума при максимальных содержаниях элемента в грунтах р. Сож у д. Ченки. Ряд накопления металла изучаемыми растениями выстраивается следующим образом: :  $K_{н III \text{ э.г.}} > K_{н IV \text{ э.г.}} > K_{н II \text{ э.г}}$  Критические пороговые концентрации марганца в донных отложениях находятся в диапазоне от 500 до 700 мг/кг сухой массы.

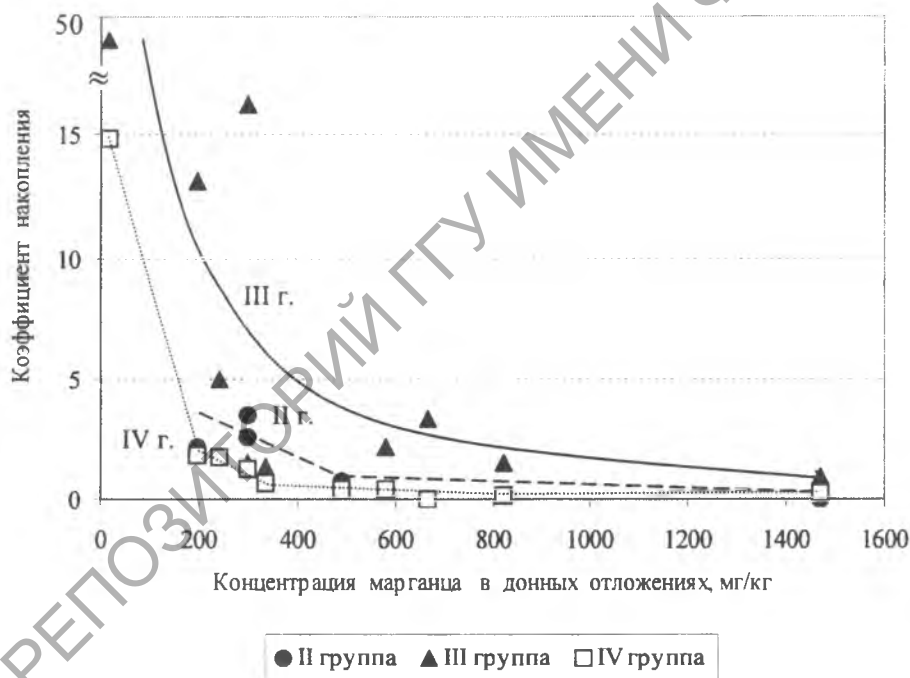


Рис. 3. Коэффициенты накопления марганца в растениях различных экологических групп.

По отношению к хрому все изученные виды макрофитов являются деконцентраторами и “исключителями”. Среди водных растений водоемов опробования выделяются погруженные растения оз. Малого, имеющие максимальные значения коэффициентов накопления хрома (в 1, 5 – 6 раз выше, чем в других водоемах) и плавающие прикрепленные растения из оз. Круглое с минимальной величиной  $K_n$  данного металла (различия с растениями изучаемых водоемов составляют 4, 5 – 26 раз). Полученные результаты указывают на низкую аккумулирующую способность всех плавающих прикрепленных растений II группы по отношению к хрому: в четырех из шести изучаемых водоемов макрофиты не аккумулируют металл вообще, а в двух других значение  $K_n$  минимально. Интересно отметить следующее: содержание хрома в донных отложениях исследуемых водоемов изменяется в тех же пределах, что и

концентрация меди, но максимальное значение константы накопления хрома не превышает величину, равную 0,188, тогда как значение  $K_n$  меди намного выше и достигает отметки 3,78. Этот факт свидетельствует о низкой биодоступности хрома для водных растений из грунтов водоемов опробования.

При аккумуляции хрома растениями оз. Круглое наблюдается тенденция, отмеченная при накоплении свинца и меди у макрофитов водоема: в грунтах озера содержание хрома, также как свинца и меди, максимально, а значения  $K_n$  данного элемента, как и двух указанных ранее металлов, низкие. Из общей схемы выпадают растения оз. Малое, имеющие максимальные значения  $K_n$  хрома при достаточно высоком содержании его в донных осадках водоема. Возможно, у данных макрофитов произошел срыв регуляторных процессов, что вызвало поглощение хрома (также как свинца и меди) до высоких пределов. Не соответствуют общей тенденции и растения старицы, которые при минимальном содержании хрома в донных отложениях не накапливают металл вообще. Высокой вариабельности в значениях коэффициентов накопления элемента, характерной для других металлов, не отмечается. Ряд накопления хрома водными растениями имеет вид:  $K_n \text{ III э.г.} \geq K_n \text{ IV э.г.} > K_n \text{ II э.г.}$ . Критические пороговые концентрации металла в донных осадках находятся у отметки 30 мг/кг сухой массы (рис. 4).

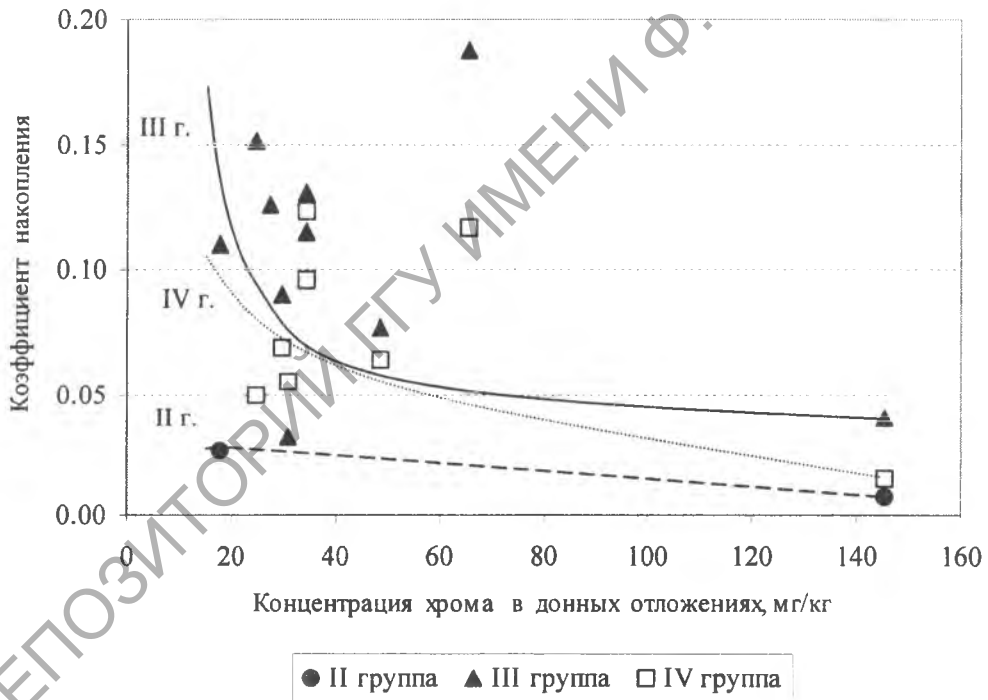


Рис. 4. Коэффициенты накопления хрома в растениях различных экологических групп

Низкими значениями коэффициентов накопления никеля характеризуются растения всех групп в оз. Круглое, донные отложения которого содержат никель в высоких концентрациях. Это согласуется с тенденцией, отмеченной для других изучаемых металлов — по мере увеличения концентрации элемента в донных осадках водоемов значения  $K_n$  данного элемента в растениях уменьшаются (рис. 5). Однако минимальная величина коэффициента накопления никеля определена для представителей IV группы оз. Любенское, осадки которого загрязнены элементом незначительно. Причем, способность к накоплению металла у макрофитов III группы данного озера отличается от таковой у погруженных растений (III гр.) из других водоемов незначительно при существенных различиях в содержании элемента в донных отложениях. Этот факт требует дальнейшего изучения.

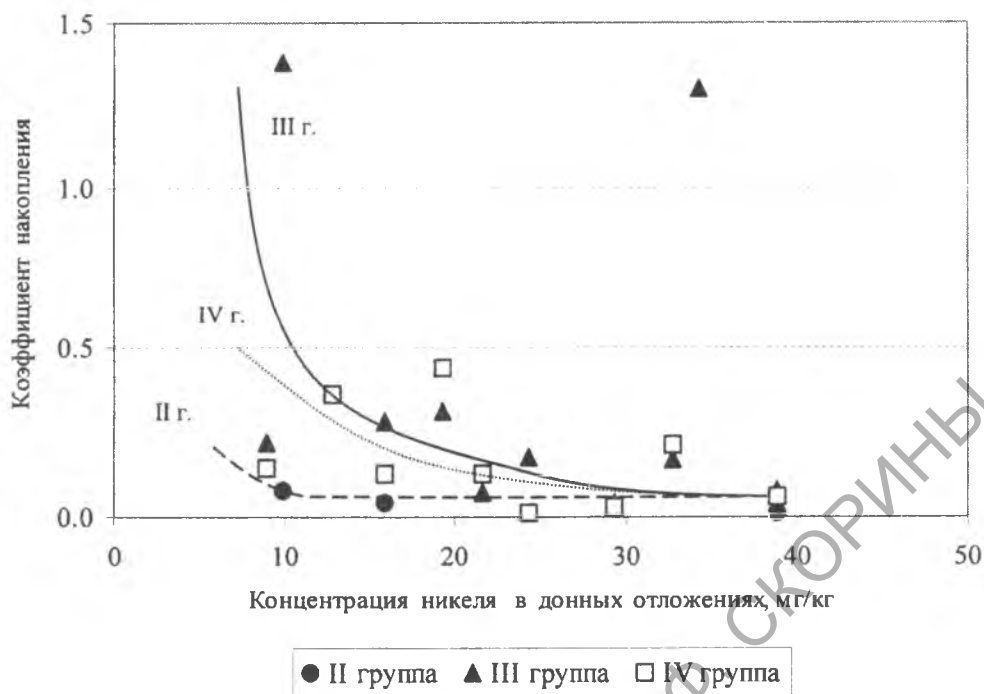


Рис. 5. Коэффициенты накопления никеля в растениях различных экологических групп

Погруженные макрофиты оз. Волотовское имеют максимальные значения  $K_n$  никеля при повышенном содержании его в грунтах водоема (в 4,0 – 34 раза выше, чем у представителей группы в других водоемах). Видимо, как и в случае с растениями оз. Малое при накоплении свинца и хрома, у макрофитов оз. Волотовское нарушились защитные механизмы, предотвращающие излишнее поступление металлов в растения. В оз. Володькино различия в накоплении никеля погруженными, воздушно – водными и плавающими прикрепленными растениями составляют 17 раз. Это еще раз подтверждает предположение о существовании различных механизмов поступления металлов в водные растения. Высокой поглотительной способностью по отношению к никелю характеризуются погруженные растения озер Дедно и Круглое в сравнении с плавающими прикрепленными видами (у погруженных растений значение  $K_n$  в 7 раз выше). В оз. Любенское величина коэффициента накопления элемента у растения III группы в 13,5 раз выше в сравнении с макрофитами IV группы. Микроконцентраторами и “накопителями” никеля являются погруженные растения III группы озер Володькино и Волотовское. Следует отметить тот факт, когда при высокой накопительной способности растений III группы в оз. Волотовское, у растений IV группы данного водоема элемент не обнаружен. Не накапливают металл представители II группы, отобранные в старице, р. Сож ниже города и в Гребном канале, а также растения III группы из р. Сож выше города. Все остальные изучаемые макрофиты относятся к деконцентраторам и “исключителям” данного элемента. По величине коэффициентов поглощения никеля для растений разных экологических групп можно выстроить следующий ряд:  $K_n$  III гр. >  $K_n$  IV гр. >  $K_n$  II гр. Как и в случае с медью, в некоторых водоемах (озера Малое, Шапор, р. Сож выше и ниже города) макрофиты IV группы накапливают никель интенсивнее, чем растения III группы. Пороговые концентрации элемента для растений в донных отложениях находятся в диапазоне от 10 до 20 мг/кг сухой массы (рис. 5).

При сравнительно одинаковом содержании никеля и ванадия в донных осадках исследуемых водоемов последний поглощается водными растениями в значительно меньшей степени – значения коэффициентов накопления ванадия не превышают 0.25 (Гребной канал). Не на-



капливают металл грунты старицы и в растениях водоема элемент не обнаружен. Низкая аккумулярующая способность по отношению к ванадию отмечена у плавающих прикрепленных растений II группы во всех изучаемых водоемах. Как и в случае с хромом, в четырех из шести водоемов опробования макрофиты не аккумулируют металл вообще, а в двух других значение  $K_n$  минимально. Максимальными значениями  $K_n$  элемента отличаются погруженные растения Гребного канала, что не соответствует общей тенденции, так как в грунтах водоема не отмечается повышенного содержания металла. На втором месте по накоплению ванадия находятся погруженные макрофиты оз. Волотовское с минимальным содержанием элемента в донных отложениях. Но в указанном водоеме, вопреки общей закономерности, ванадий не накапливается в воздушно – водных растениях IV группы. Для изучаемых растений наиболее четкие различия между значениями коэффициентов накопления ванадия отмечены у представителей II и III групп (рис.6). Значения  $K_n$  у погруженных и воздушно – водных растений во всех водоемах отличаются незначительно (1, 5 – 2, 5 раза). Ряд накопления элемента для растений водоемов опробования выглядит следующим образом:  $K_n$  III э.г. >  $K_n$  IV э.г. >  $K_n$  II э.г. Изученные виды растений являются деконцентраторами и “исключителями” ванадия.

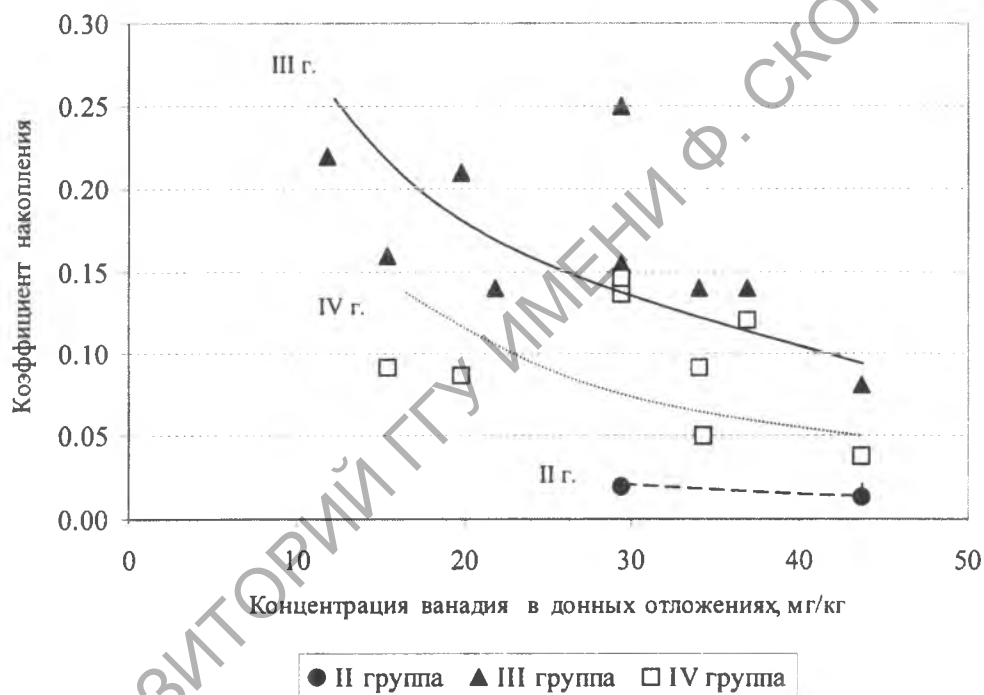


Рис. 6. Коэффициенты накопления ванадия в растениях различных экологических групп

Из всех изучаемых металлов больше всего вопросов возникает при рассмотрении накопления кобальта (рис.7). При довольно низких концентрациях его в донных отложениях (в 100 раз меньше, чем марганца и в 10 – чем хрома и меди) коэффициенты накопления металла у растений были достаточно высокими, что говорит о нахождении элемента в биодоступных формах в донных отложениях отдельных водоемов опробования. Следует отметить, что у растений разных экологических групп одного водоема имеются значительные различия в аккумуляции кобальта. Например, в озерах Волотовское, Любенское и Дедно в воздушно – водных растениях элемент не накапливается, тогда как погруженные макрофиты водоемов активно аккумулируют кобальт из донных отложений (значение  $K_n$  в 2 – 5, 5 раза выше, чем у представителей группы в других водоемах). У плавающих прикрепленных растений ни в одном из изучаемых водоемов металл не обнаружен. Донные отложения оз. Круглое содержат максимальное количество элемента, но в растениях кобальт не накапливается вообще. Возможно, это связано с присутствием элемента в грунтах водоема в формах, недоступных для растений. Это также может быть вызвано работой блокирующих механизмов, предотвращающих поступления токсичных веществ в растительные организмы. Как было указано

выше, дно оз. Круглое сильно загрязнено изучаемыми элементами и значения  $K_n$  практически для всех металлов у макрофитов озера минимальны. Это говорит о сильной активизации механизмов устойчивости растений оз. Круглое к токсическому действию металлов, что может полностью подавлять накопления кобальта в макрофитах водоема. При одинаковом содержании элемента на участках реки выше и ниже города, растения, собранные у д.Кленки (выше города) не содержат соединений никеля, что требует дальнейшего изучения. Значения коэффициентов накопления металла у погруженных растений в 1, 5 – 6, 5 раза выше, чем у воздушно – водных (за исключением макрофитов оз. Малое и Гребного канала). Активнее всех поглощают элемент из донных осадков погруженные растения озер Дедно, Володькино и Волотовское. Данные растения мы можем отнести к “индикаторам” кобальта, остальные являются деконцентраторами и “исключителями” металла. Минимальные значения  $K_n$  – у надводных растений Гребного канала и оз. Шапор. Погруженные виды водных растений занимают первое место по поглощению кобальта из донных отложений, за ними стоят надводные макрофиты, а прикрепленные растения с плавающими листьями не поглощают данный металл вообще.

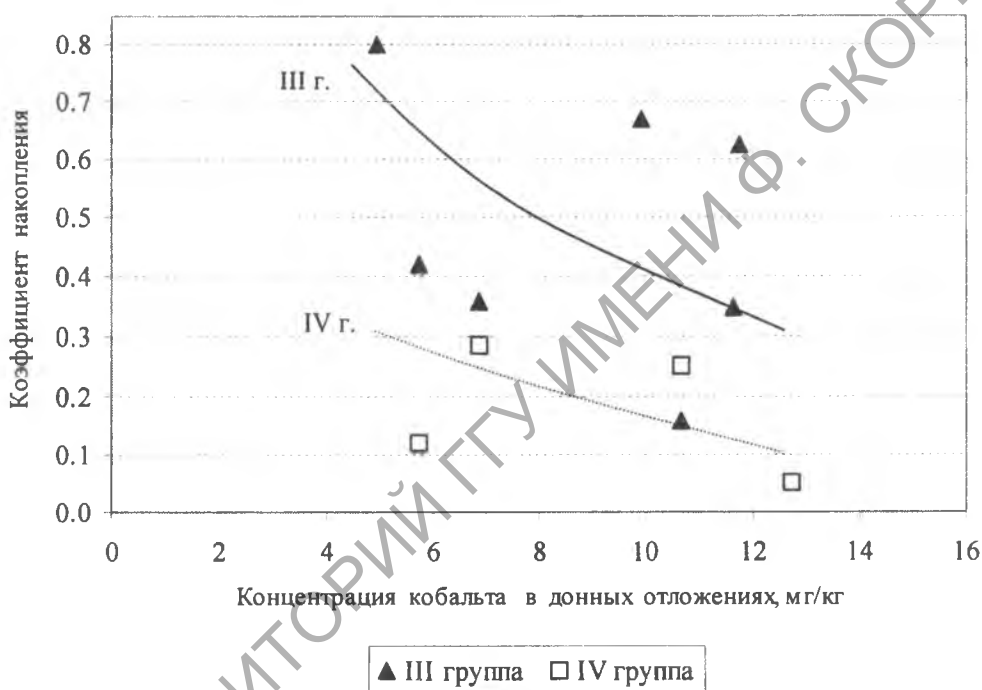


Рис. 7. Коэффициенты накопления кобальта в растениях различных экологических групп

Полученные данные позволяют сделать выбор объектов биомониторинга тяжелых металлов при изучении загрязнения водных экосистем. Ими могут быть макроконцентраторы марганца и никеля, а также “индикаторы” марганца, меди и кобальта, у которых значения  $K_n$  металлов близки к единице. Остальные растения являются деконцентраторами изучаемых металлов, и это может вызвать определенные сложности при использовании их в качестве объектов биомониторинга. Из графического материала видно, что интенсивнее всех поглощают минеральные вещества из донных осадков погруженные виды водных растений, в меньшей степени – надводные макрофиты. Низкая аккумулярующая способность, характерная для плавающих прикрепленных растений, затрудняет использование их в качестве мониторов загрязнения водоемов тяжелыми металлами. В процессе проведения исследований были установлены пороговые уровни содержания свинца, меди, марганца, никеля и хрома в донных отложениях водоемов опробования. По биодоступности для водных растений из донных осадков изучаемые элементы можно выстроить в следующий ряд:  $Mn > Co > Ni > Cu > Pb > V > Cr$ .

Для большинства изучаемых металлов прослеживается тенденция снижения значения коэффициентов накопления элементов в растениях по мере увеличения их в донных отложениях: в диапазоне низких концентраций химических элементов в грунтах водоемов степень поглощения их растениями высока, а при высоких концентрациях у растений наблюдается насыщение элементом и степень его поглощения снижается – значение  $K_n$  стабилизируется. Таким образом, на доступность металла для растений влияют содержание и форма нахождения его в среде обитания, а также природа самого химического элемента. Можно предположить также, что для некоторых металлов процесс накопления их макрофитами определяется, в частности, критическими уровнями концентраций, при достижении которых происходит скачкообразный переход функционального состояния растения (в том числе, способность аккумулировать тяжелые металлы) на новый уровень устойчивости. Доступность металлов в донных отложениях для водных растений зависит также и от их биологии, позволяющей регулировать содержание химических элементов в различных видах даже при одинаковом количестве металлов в грунтах водоемов. Полученные данные могут быть использованы при решении такой проблемы, как оценка экологической емкости водных экосистем по отношению к тяжелым металлам.

#### Abstract

The accumulation of most metals under consideration in plants tends to decrease when their concentration in bottom sedimentation is increased. In case the amount of chemical elements in the ground of water bodies is low, the degree of their absorption by plants is high. Accordingly, if their concentration is big, the degree of their absorption decreases. The coefficient  $K$  is stabilized, i.e. the availability of the metals is influenced by the form and content in which they are found, as well as by the nature of the chemical element. We can presume that the accumulation of certain metals by macrophytes is determined, in particular, by the critical levels of concentration. Upon reaching these levels, the functional state of plants, including their ability to accumulate heavy metals, reaches a new level of stability. The availability of metals for plants in bottom sedimentation also depends on their biology which allows regulating the amount of chemical elements in different types of water, even if the concentration of metals in the ground of water bodies remains the same.

#### Литература

1. Школьник М.Я. Микроэлементы в жизни растений. – М.: Наука, 1974. – 325 с.
2. Власюк П.А. Микроэлементы в обмене веществ растений. – Киев: Наукова думка, 1976. – 154 с.
3. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. – Л.: Агропромиздат, 1987. – 142 с.
4. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 436 с.
5. Ялынская Н.С., Лопотун А.Г. Накопление микроэлементов и тяжелых металлов в растениях рыбоводных прудов // Гидробиологический журнал. – 1993. – Т. 29, № 5. С – 40–46.
6. Никаноров А.М., Жулидов А.В., Емец В.М. Тяжелые металлы в организмах ветлендов России. – С.-П.: Гидрометеиздат, 1993. – 282 с.
7. Лукина Л.Ф., Смирнова Н.Н. Физиология высших водных растений. – Киев: Наукова думка, 1998. – 184 с.
8. Никаноров А.М., Жулидов А.В., Покаржевский А.Д. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 143 с.
9. Савченко В.В., Вадковская И.К. Микроэлементы в водных растениях Беларуси (на примере рек Березина и Свислочь) // Природопользование. – 1996. – вып.1. – С. 124–126.