

ЗАВИСИМОСТЬ АНТИОКСИДАНТНО-ПРООКСИДАНТНОГО РАВНОВЕСИЯ В МАКРОФИТАХ ОТ УРОВНЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Ю.В. Жильцова

УО «Международный государственный экологический университет имени
А.Д. Сахарова», Минск, Республика Беларусь

Введение

Задачи наблюдения за состоянием водных экосистем, своевременного выявления источников и путей поступления в них загрязняющих веществ, а также поиска новых нетрадиционных и высокочувствительных методов оценки качества водных ресурсов являются *актуальными* на сегодняшний день. Одним из подходов оценки состояния окружающей среды является реакция растений на различные виды загрязнителей. Известно, что при стрессирующих воздействиях на организм активизируется перекисное окисление липидов (ПОЛ). Если при этом синхронно увеличивается активность антиоксидантных (АО) систем, и отношение АО/ПОЛ не меняется, есть основание утверждать об успешной адаптации. Таким образом, зная динамику АО/ПОЛ равновесия, можно говорить о состоянии водного объекта в целом и о качестве растительного сырья [1, 2].

Целью настоящей работы являлась оценка возможности использования антиоксидантно-прооксидантного равновесия в высших водных растениях в качестве индикационного показателя загрязнения водной экосистемы тяжелыми металлами.

Методы исследования

В период с мая по октябрь 2010 года на пяти контрольных участках (КУ) р. Свислочь (ниже г. Заславля; вдхр. Цнянское, оз. Комсомольское, вдхр. Чижевское – в черте г. Минска; возле с. Королищевичи – 10,0 км ниже г. Минска) ежемесячно отбирались пробы растений и донных отложений.

Химический состав растений и донных отложений определялся рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре энергий рентгеновского излучения СЕР-01 согласно утвержденным методикам [3].

Антиоксидантную активность высших водных растений определяли фотохемилюминесцентным методом на анализаторе антиоксидантов и свободных радикалов Photochem. Калибровку и измерения проводили в соответствии со стандартными протоколами, установленными производителем. Результаты рассчитывали в эквивалентах аскорбиновой кислоты и тролокса для водорастворимых (АОАв) и жирорастворимых (АОАж) веществ соответственно и выражали в мкмоль/г сухого растения.

Интенсивность процесса ПОЛ в растениях определяли по содержанию малонового диальдегида (МДА). Концентрацию МДА определяли в реакции с тиобарбитуровой кислотой (ТБК) спектрофотометрическим методом при $\lambda=532$ нм и $\varepsilon=155$ $\text{мМ}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ [4] с некоторыми изменениями. К образцам высушенных и измельченных растений массой 1 г добавляли 10 мл 0,1% трихлоруксусной кислоты и настаивали в течение 1 часа. Экстракты растений центрифугировали 15 мин при 5000 g на центрифуге Avanti J-30 I. Смесь из 1 мл супернатанта и 2 мл 0,5% ТБК нагревали 30 мин при 95°C и быстро охлаждали в ледяной бане. Образцы повторно подвергали центрифугированию в течение 10 мин при 10000 g и 4°C. На спектрофотометре определяли оптическую плотность при 532 нм и неспецифическую оптическую плотность при 600 нм. Для расчета содержания МДА использовали следующую формулу:

$$K = \frac{(D_1 - D_2) \cdot V_1 \cdot 1000}{V_2 \cdot m \cdot \varepsilon}, [1]$$

где K – концентрация малонового диальдегида, мкмоль/г; D_1 – оптическая плотность образца при 532 нм; D_2 – неспецифическая оптическая плотность при 600 нм; V_1 – объем растворителя (ТХУ), мл; V_2 – объем экстракта, взятого для определения, мл; m – масса

взятого образца, г; l – длина кюветы, см; E – коэффициент молярной экстинкции, равный $155 \text{ мМ}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Статистическую обработку данных проводили с использованием дисперсионного и корреляционного анализов в пакете Microsoft Office Excel. Полученные результаты считали достоверными при заданном уровне значимости $p < 0,05$. Работа выполнялась при поддержке гранта БРФФИ-Наука-М-2010.

Результаты и обсуждение

В донных отложениях исследованных водоемов и водотоков были определены следующие элементы Ti , Cr , Mn , Fe , Co , Ni , Cu , Zn , Cd , Pb . Данные по концентрациям химических элементов в донных отложениях водных объектов сравнивались с региональными кларками микроэлементов сапропелей озер Беларуси и нормативами предельно и ориентировочно допустимых концентраций в почве [5–7], а также с концентрациями химических элементов в донных отложениях озер Браславской и Ушачской группы, Глубокского района и Березинского биосферного заповедника [8].

Коэффициенты превышения региональных кларков для титана колебались в пределах 1,2–3,4; для хрома – 6,5–12,3; для кобальта – 2,4–4,4 для всех КУ; для меди – 1,0–1,4 для КУ Комсомольское озеро и р. Свислочь возле с. Королищевичи; для марганца – в пределах 1,1–1,5 для КУ ниже Комсомольского озера; для никеля в 1,1 на КУ с. Королищевичи. Случаи превышения предельно допустимых концентраций были установлены для Pb и Co в пунктах отбора проб Комсомольское озеро и Королищевичи (в 1,1; 1,5 раз по Pb и 1,1; 1,4 по Co соответственно).

В результате сравнения данных по содержанию химических элементов в донных отложениях водоемов и водотоков г. Минска и водоемов, расположенных в условно чистых регионах республики (национальный парк «Браславские озера», Ушачская группа озер, озера Березинского биосферного заповедника), следует отметить, что для контрольных участков реки Свислочь, расположенных в г. Минске установлены превышения концентраций по таким химическим элементам, как хром (в 3,8; 5,7; 1,9 раз, соответственно), железо (1,5 и 2,0 раз по сравнению с концентрациями в донных отложениях водоемов национального парка «Браславские озера» и Ушачской группы озер), медь (в 1,4 и 2,3 раза), марганец (в 2,6 и 2,8 раз), никель (в 1,2 и 1,8 раз), цинк (в 1,7 и 4,2 раза), свинец (5,3 и 4,9 раз). Однако концентрации следующих металлов были выше в донных отложениях водоемов Березинского биосферного заповедника: по марганцу в 1,1 раз, железу – 1,8 раза, никелю – в 1,6 раз, меди – в 1,1 раза, цинку – 3,7 раз, свинцу – 1,3 раза.

Анализ данных показал, что в целом для донных отложений исследованных водных объектов г. Минска характерно повышенное содержания тяжелых металлов при движении вниз по течению реки Свислочь.

Результаты исследования образцов растений показали, что достоверно определяются такие химические элементы как Ni , Fe , Cu , Zn , Pb , Mn , Ti , Cr . Среднее фоновое содержание Ti в макрофитах республики 8,39 мг/кг сухой биомассы, причем максимальная концентрация в грязных водоемах 130,4 мг/кг по литературным данным [9]. В наших исследованиях максимальная концентрация Ti была зафиксирована для *Ceratophyllum demersum* L. (88,97 мг/кг) в р. Свислочь возле с. Королищевичи, что не превышает максимальной концентрации в грязных водоемах, однако в 10,6 раз выше среднего значения по республике. Содержание Cr в растениях изменялось в пределах от 0,39 (*Acorus calamus* L., Цнянское водохранилище, июнь месяц) до 19,94 мг/кг (*Ceratophyllum demersum* L., в р. Свислочь возле с. Королищевичи, сентябрь) при среднефоновой концентрации 0,34 мг/кг. Концентрация Mn колебалась в фитомассе в очень широких пределах: от 19,06 (*Acorus calamus* L., Цнянское водохранилище, май месяц) до 4252,89 мг/кг сухого веса (*Ceratophyllum demersum* L., р. Свислочь Комсомольское озеро, июль), что выше максимальной зафиксированной концентрации в загрязненных водоемах и водотоках (3180,0 мг/кг) по республике. Марганец – второй после ванадия поллютант, имеющий в водных растениях водоемов и

водотоков республики величины, превышающие не только естественные фоновые (301,15 мг/кг), но и критические (более 500 мг/кг сухого веса растения). Минимальная концентрация железа была зафиксирована в *Acorus calamus* L. и *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. в июле на Цнянском водохранилище (23,0 и 35,3 мг/кг, соответственно), а максимальная в *Ceratophyllum demersum* L. в мае в реке ниже города Минска возле с. Королищевичи. Концентрации никеля изменялись в пределах от 0,03 мг/кг (*Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud., р. Свислочь ниже г. Заславля, июль) до 8,64 мг/кг (*Spirodela polyrrhiza* L. Schleid., р. Свислочь, с. Королищевичи, июль) при среднефоновой по республике 0,3 мг/кг и максимальных для чистых и грязных водных объектов 11,25 и 40,8 мг/кг сухой биомассы соответственно. Самая низкая концентрация *Cu* отмечена в *Acorus calamus* L. (0,65 мг/кг, Цнянское водохранилище, сентябрь–октябрь), а самая высокая в *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (103,8 мг/кг сухого веса, с. Королищевичи, сентябрь) при среднефоновом содержании 3,48 мг/кг. Средняя фоновая концентрация *Zn* в макрофитах республики 1,41 мг/кг сухого веса, в наших исследованиях минимальная концентрация *Zn* была отмечена в *Acorus calamus* L. (8,9 мг/кг, Чижовское водохранилище, сентябрь), а максимальная зафиксированная концентрация составляла 549,38 и 287,5 мг/кг сухого веса в *Ceratophyllum demersum* L. и *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid., соответственно в р. Свислочь возле с. Королищевичи в сентябре. Таким образом, следует отметить, что концентрации по данному элементу были выше фоновых по республике в 6,3–389,6 раз. Максимальное содержание *Pb* (17,57 мг/кг) отмечено у *Ceratophyllum demersum* L. в реке Свислочь ниже с. Королищевичи, что в 7,4 раза превышает среднее фоновое по республике.

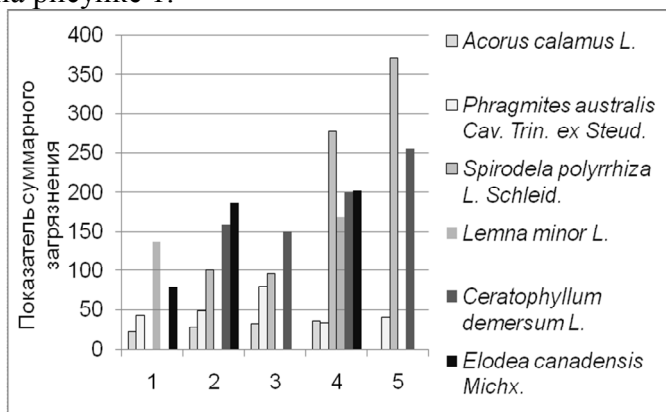
Таким образом, изучая динамику концентраций металлов в растениях, можно отметить три причины, влияющие на накопление химических элементов растениями: период отбора проб, вид отбираемого растения и место отбора. Минимальные количества химических элементов отмечались в начале вегетационного периода в растениях, принадлежащих к экологическим группам аэрогидрофитов и гигрогелофитов (*Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. и *Acorus calamus* L.) на контрольных участках, взятых в качестве фоновых (р. Свислочь ниже г. Заславля и Цнянское водохранилище). Максимальные концентрации наблюдались в растениях-эугидрофитах в середине или конце вегетационного сезона на контрольном участке ниже г. Минска.

Среднее содержание меди в общей совокупности макрофитов составляет 13,4, для цинка – 44,1, марганца – 655,4, железа – 698,4, титана – 16,4, хрома – 4,6, никеля – 1,4, свинца – 3,6 мг/кг. Анализ данных показал, что в целом для растений исследованных водных объектов характерно повышение концентраций при движении вниз по течению реки Свислочь. По некоторым металлам наблюдался скачок концентраций химических элементов в растениях на водоемах, расположенных в центре города. Так, максимальные концентрации хрома, марганца, железа и свинца в *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. обнаружены в Чижовском водохранилище в июле месяце, титана и цинка в *Ceratophyllum demersum* L. в Чижовском водохранилище в мае, титана, хрома, железа, меди, свинца в Чижовском водохранилище и марганца в Комсомольском озере в июне, хрома, марганца в Комсомольском, никеля, меди, свинца в Чижовском в июле, марганца в Чижовском в сентябре; титана в июне, меди и цинка в июле в Комсомольском озере в *Acorus calamus* L.; хрома, марганца, железа, никеля в мае, железа, меди, цинка в Комсомольском озере и титана, хрома, марганца, никеля, свинца в Чижовском водохранилище в июне, цинка, свинца в Комсомольском озере и марганца, железа в Чижовском в июле, титана, хрома, марганца, железа, свинца в сентябре, хрома, марганца в октябре в *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud.

Наблюдалось превышение концентраций химических элементов в высших водных растениях г. Минска относительно растений экологически благополучных территорий (национального парка «Браславские озера», Березинского биосферного заповедника): по хрому (76,6 и 2,5 раза, соответственно), марганцу (7,3 и 2,7), железу (5,6 и 1,4), меди (2,8 и 5,9), цинку (4,5 и 2,1), свинцу (9,7 и 5,4). Минимальные концентрации химических элементов

в растениях наблюдались для озера, принадлежащих к типам мезотрофные и мезотрофные с признаками олиготрофии Браславского педогеохимического подрайона (озера Ричи, Снуды, Волос Южный) [8]. Данные значения можно использовать в качестве фоновых для расчета значений показателя суммарного загрязнения (ПСЗ) [10]: по Ti – 0,51 мг/кг, Cr – 0,08 мг/кг, Mn – 50,90 мг/кг, Fe – 73,37 мг/кг, Ni – 0,07 мг/кг, Cu – 6,36 мг/кг, Zn – 13,24 мг/кг, Pb – 0,17 мг/кг.

Увеличение значений концентраций в растениях, отобранных на контрольных участках р. Свислочь, хорошо прослеживается по показателю суммарного загрязнения растений (ПСЗ) на рисунке 1.



цифры – КУ отбора проб.

1 – р. Свислочь ниже г. Заславля,

2 – Цнянское водохранилище,

3 – р. Свислочь Комсомольское озеро,

4 – р. Свислочь Чижовское водохранилище,

5 – р. Свислочь ниже г. Минска возле с. Королищевичи

Рисунок 1 – Изменение ПСЗ растений на различных КУ р. Свислочь

По величине среднего содержания в растениях элементы располагаются в следующем убывающем порядке: $Fe > Mn > Zn > Ti > Cu > Cr > Pb > Ni$. Наибольшее содержание меди выявлено у видов *Elodea canadensis* Michx., *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. и *Ceratophyllum demersum* L., цинка – *Ceratophyllum demersum* L. и *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid., марганца и железа – *Ceratophyllum demersum* L. и *Lemna minor* L., титана, хрома, никеля – *Ceratophyllum demersum* L., свинца – *Ceratophyllum demersum* L., *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid., *Lemna minor* L. и *Elodea canadensis* Michx. Наименьшее содержание химических элементов было выявлено в видах *Acorus calamus* L. и *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud.

Анализируя аккумуляционную способность растений по отношению к экологическим группам, растения можно расположить в следующий убывающий ряд: эуигдрофиты > плейстоигдрофиты > аэроигдрофиты и гигрогелофиты, что связано как с видовыми особенностями, так и с площадью растения, контактирующей с водной средой и таким образом участвующей в поглощении металлов.

Изменение среднего содержания химических элементов в макрофитах в зависимости от концентрации элементов в донных отложениях характеризовали с помощью коэффициентов корреляции. Следует отметить, что в целом корреляционная связь между концентрацией металлов в донных отложениях и водных растениях невелика. Максимальная достоверная ($p=0,05$) корреляционная зависимость между содержанием химических элементов в макрофитах и донных отложениях в валовой форме выявлена по цинку для *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (0,83) и *Ceratophyllum demersum* L. (0,76), по меди для *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (0,80). Корреляционную связь можно описать как заметная для *Ceratophyllum demersum* L. по железу (0,67), для *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. по свинцу (0,58) и для *Acorus calamus* L. по никелю (0,51). В других случаях связь является умеренной для *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (по титану 0,30, железу 0,45, никелю 0,32), *Lemna minor* L. (по титану – 0,35, марганцу – 0,35, цинку – 0,39), *Elodea canadensis* Michx. (по марганцу – 0,34). В остальных случаях связь была слабой (модуль значения коэффициента корреляции попадает в диапазон значений 1,10–0,29) или вообще отсутствовала.

Таким образом, наиболее тесная связь между содержанием химических элементов в растениях и донных отложениях отмечена у гидрофитов (плейстогидрофитов и эугидрофитов), а изменение содержания химических элементов в аэрогидрофитах и гигрогелофитах меньше связано с колебанием концентрации элементов в донных отложениях.

Выявлены растения макро-, микро- и деконцентраторы химических элементов в результате расчета коэффициента накопления, представляющего собой отношение концентрации элемента в растении к концентрации этого же элемента в донных отложениях. Интенсивность накопления химических элементов в среднем по макрофитам убывает в следующем порядке: $Mn > Cu > Zn > Ni > Pb \geq Fe > Cr \geq Ti$. По отношению к *Mn* изученные виды *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid., *Ceratophyllum demersum* L., *Lemna minor* L., *Elodea canadensis* Michx. являются макроконцентраторами. По отношению к *Ti*, *Cr*, *Fe*, *Pb*, *Ni* все растения являются деконцентраторами. По отношению к *Zn* к макроконцентраторам относятся *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid., *Ceratophyllum demersum* L. и *Elodea canadensis* Michx.. *Lemna minor* L. является микроконцентратором. По отношению к *Cu* макроконцентраторами являются *Ceratophyllum demersum* L., *Elodea canadensis* Michx. Однако в различных физико-географических условиях одни и те же виды могут встречаться в водоемах различного трофического уровня и иметь разное индикаторное значение.

Для выявления биоиндикаторов для конкретных экологических сообществ были рассчитаны коэффициенты специфического относительного накопления, определяемые как отношение содержания элемента в данном макрофите к среднему содержанию этого элемента во всех других растениях, растущих в том же месте. Такой показатель дает информацию о селективной способности растений к накоплению химических элементов при произрастании в одинаковых экологических условиях и позволяет выявлять фитоиндикаторы. На пункте учета реки Свислочь ниже г. Заславля в качестве биоиндикаторов можно предложить *Lemna minor* L. по *Ti* (4,02), *Cr* (2,6), *Mn* (2,6), *Fe* (5,6), *Pb* (2,3), *Elodea canadensis* Michx. по *Mn* (2,6) и *Pb* (1,6). В Цнянском водохранилище – *Ceratophyllum demersum* L. по *Ti* (2,9), *Cr* (2,5), *Mn* (2,5), *Ni* (2,1), *Elodea canadensis* Michx. по *Ti* (2,5), *Mn* (2,5), *Fe* (2,2), *Cu* (11,1), *Pb* (1,5) и *Spirodela polyrrhiza* L. по *Mn* (1,9), *Fe* (1,9), *Zn* (1,5), *Pb* (2,5); в Комсомольском озере *Ceratophyllum demersum* L. по *Ti* (6,9), *Cr* (1,8), *Mn* (12,1), *Fe* (3,9), *Pb* (2,5), *Spirodela polyrrhiza* L. по *Fe* (1,4), *Zn* (1,2), *Pb* (1,5); в Чижовском водохранилище *Ceratophyllum demersum* L. по *Ti* (4,2), *Cr* (2,6), *Mn* (2,7), *Fe* (1,8), *Ni* (4,3), *Cu* (1,7), *Zn* (2,2) и *Pb* (1,9), *Spirodela polyrrhiza* L. по *Cr* (1,2), *Mn* (2,4), *Fe* (1,8), *Zn* (1,1), *Lemna minor* L. по *Cr* (1,0), *Mn* (1,2), *Fe* (1,6), *Zn* (1,1), *Pb* (1,3), *Elodea canadensis* Michx. по *Ti* (1,3), *Fe* (1,1), *Ni* (2,5), *Cu* (1,4), *Pb* (1,6); на р. Свислочь возле с. Королищевици *Ceratophyllum demersum* L. по *Ti* (2,0), *Cr* (2,0), *Mn* (2,2), *Fe* (1,8), *Ni* (2,3), *Zn* (3,5), *Pb* (1,7), *Spirodela polyrrhiza* L. по *Ti* (2,2), *Cr* (1,7), *Fe* (1,3), *Ni* (2,6), *Cu* (4,0), *Zn* (1,7), *Pb* (1,9).

Антиоксидантная активность высших водных растений в общей совокупности исследованных макрофитов р. Свислочь колебалась от 8,55 до 165,29 (в 19,3 раз) мкмоль/г (для жирорастворимых компонентов) и от 1,66 до 231,77 (в 139,6 раз) мкмоль/г (для водорастворимых компонентов). Средняя антиоксидантная активность исследованных макрофитов составляет 52,1 мкмоль/г (для жирорастворимых компонентов) и 49,0 мкмоль/г (для водорастворимых компонентов).

Исследованные виды макрофитов по среднему значению антиоксидантной активности (мкмоль/г) располагаются в следующем убывающем порядке:

по содержанию жирорастворимых компонентов: *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (108,7) > *Acorus calamus* L. (82,1) > *Lemna minor* L. (45,1) > *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. (36,0) > *Ceratophyllum demersum* L. (28,0) > *Elodea canadensis* Michx. (12,5); по содержанию водорастворимых компонентов: *Acorus calamus* L. (131,0) > *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (108,7) > *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. (55,1) > *Lemna minor* L. (38,6).

Концентрация малонового диальдегида в общей совокупности исследованных макрофитов р. Свислочь колебалась от 11,19 до 127,31 (в 11,4 раз) мкмоль/г. Средняя концентрация малонового диальдегида исследованных макрофитов составляет 49,7 мкмоль/г.

По определенным показателям антиоксидантной активности и перекисного окисления липидов (концентрация малонового диальдегида) было рассчитано антиоксидантно-прооксидантное равновесие (АОАв/ПОЛ или АОАж/ПОЛ). АОАв/ПОЛ изменялось в пределах 0,02–14,84 (в 742,0 раз), а АОАж/ПОЛ от 0,13 до 8,00 (в 61,5 раз). Средние значения были следующими: 1,53 для АОАв/ПОЛ и 1,27 для АОАж/ПОЛ.

Исследованные виды макрофитов по среднему значению концентрации малонового диальдегида (мкмоль/г) располагаются в следующем убывающем порядке: *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (75,4) > *Lemna minor* L. (66,2) > *Ceratophyllum demersum* L. (54,3) > *Elodea canadensis* Michx. (52,5) > *Acorus calamus* L. (32,2) > *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. (17,7).

По изменению средних значений показателей антиоксидантно-прооксидантного равновесия растения можно расположить в следующие убывающие ряды:

по АОАв/ПОЛ: *Acorus calamus* L. (4,97) > *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. (3,31) > *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (0,67) > *Lemna minor* L. (0,24).

по АОАж/ПОЛ: *Acorus calamus* L. (2,80) > *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. (2,16) > *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (1,41) > *Ceratophyllum demersum* L. (0,56) > *Lemna minor* L. (0,47) > *Elodea canadensis* Michx. (0,24).

На основании полученных данных были рассчитаны коэффициенты корреляционной зависимости между содержанием химических элементов в растениях, показателями антиоксидантной активности, перекисного окисления липидов и антиоксидантно-прооксидантного равновесия.

Для всех видов растений была установлена положительная корреляционная связь между АОАж и АОАв, характеризующаяся как значительная для *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (0,78), *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. (0,76) и заметная для *Lemna minor* L. (0,50) и *Acorus calamus* L. (0,61).

Зависимость между АОАв/ПОЛ и АОАж/ПОЛ наблюдалась положительная. В случае *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. она была заметной (0,50), а для *Acorus calamus* L. и *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. значительной (0,81 и 0,84, соответственно).

Корреляционную связь между АОАв и ПОЛ можно описать как положительная заметная для *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (0,52). В случае же АОАж и ПОЛ связь значительная для *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (0,84), заметная для *Lemna minor* L. (0,53) и *Elodea canadensis* Michx. (0,55) и умеренная для *Acorus calamus* L. (0,37).

Корреляционная связь между показателями АОА или антиоксидантно-прооксидантного равновесия (АОА/ПОЛ) и концентрацией металлов в растениях чаще всего носила отрицательный характер, а связь ПОЛ с концентрацией химических элементов в биомассе – положительный.

Были рассчитаны коэффициенты корреляции между ПСЗ и показателями АОА, ПОЛ, антиоксидантно-прооксидантного равновесия. Для всех растений была установлена отрицательная корреляционная зависимость различной степени связи между ПСЗ и АОАв, АОАж, а также показателями антиоксидантно-прооксидантного равновесия. Так, для *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. связь между ПСЗ и АОАв была заметной (–0,60), а для *Lemna minor* L. и *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. умеренной (–0,49 и –0,48, соответственно). Заметная связь наблюдалась между ПСЗ и АОАж для *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. и *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. (–0,60 и –0,62). Значительной и заметной можно охарактеризовать зависимость между ПСЗ и отношением АОАв/ПОЛ для представителей семейства Рясковые *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (–0,79) и *Lemna minor* L. (–0,64). В случае *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. зависимость между ПСЗ и

отношением АОАв/ПОЛ, а также ПСЗ и АОАж/ПОЛ характеризовалась как умеренная (-0,36 и -0,43, соответственно).

На основании полученных данных были построены зависимости антиоксидантной активности экстрактов растений, а также показателей антиоксидантно-прооксидантного равновесия от показателя суммарного загрязнения.

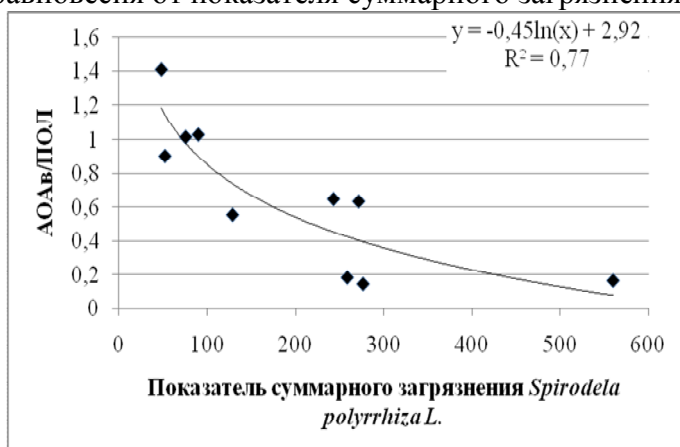


Рисунок 2 – Влияние показателя суммарного загрязнения *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. на антиоксидантно-прооксидантное равновесие экстрактов

Зависимости антиоксидантно-прооксидантного равновесия от ПСЗ растений видов *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. и *Lemna minor* L. наилучшим образом описывались логарифмическими аппроксимирующими кривыми с показателями детерминации 0,77 и 0,53, соответственно.

Выводы

В результате сравнения данных по содержанию химических элементов в донных отложениях с региональными кларками микроэлементов сапропелей озер Беларуси установлены значительные превышения (в 1,1–23,1 раза) для водоемов, расположенных в г. Минске и его окрестностях по таким химическим элементам, как титан, хром, кобальт, медь, марганец, никель. В ряде случаев были выявлены превышения среднефоновых для республики концентраций металлов в растениях. В целом для донных отложений и макрофитов исследованных водных объектов характерно повышение концентраций тяжелых металлов при движении вниз по течению реки Свислочь.

Значения концентраций элементов высших водных растений озер, принадлежащих к типам мезотрофные и мезотрофные с признаками олиготрофии Браславского педогеохимического подрайона (озера Ричи, Снуды, Волос Южный), могут использоваться в качестве фоновых: *Ti* – 0,51 мг/кг, *Cr* – 0,08 мг/кг, *Mn* – 50,90 мг/кг, *Fe* – 73,37 мг/кг, *Ni* – 0,07 мг/кг, *Cu* – 6,36 мг/кг, *Zn* – 13,24 мг/кг, *Pb* – 0,17 мг/кг.

В ходе исследований установлены видовые различия в накоплении химических элементов водными растениями. Аккумулирующая способность *Lemna minor* L., *Ceratophyllum demersum* L., *Spirodela polyrrhiza* L., *Elodea canadensis* Michx. изменялись в широком диапазоне значений, что позволяет судить о перспективах использования данных растений в качестве тест-объектов при проведении экологического мониторинга. С помощью рассчитанных коэффициентов специфического относительного накопления были выявлены биоиндикаторы для конкретных экологических сообществ. На контрольных участках г. Минска вид *Lemna minor* L. в наибольших количествах накапливал марганец, железо, и свинец, *Elodea canadensis* Michx. – медь и свинец, *Ceratophyllum demersum* L. способен накапливать марганец, цинк, хром, никель, медь, железо, титан и свинец, *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. – медь, цинк и свинец.

Между показателями антиоксидантной активности водо- и жирорастворимых веществ экстрактов растений *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid., *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud., *Lemna minor* L. и *Acorus calamus* L. существует положительная корреляционная связь.

Между показателем суммарного загрязнения растений и показателем антиоксидантной активности водных экстрактов растений, а также между показателем суммарного

загрязнения растений и антиоксидантно-прооксидантного равновесия наблюдалась отрицательная корреляционная зависимость. Данные зависимости характеризовались как заметные и значительные для растений семейства Lemnaceae (*Lemna minor* L. и *Spirodela polyrrhiza* L.) и наилучшим образом описывались логарифмическими кривыми с высокими коэффициентами детерминации.

Список литературы

1. Филимонова, М.В. Количественное содержание флавоноидов и аскорбиновой кислоты в лекарственных растениях Сургутского района в зависимости от уровня загрязнения окружающей среды / М.В. Филимонова // Всероссийская научная конференция Северный регион: стратегия и перспективы развития: тез. докл. Всерос. науч. практ. конф. – Ханты-Мансийск; Сургут: Изд-во СурГУ, 2003. – Ч. 2 – С. 65–67.

2. Кузьмина, С.С. Зависимость накопления флавоноидов и аскорбиновой кислоты в дикорастущих растениях Якутии от условий произрастания / С.С. Кузьмина, А.С. Попова // Наука и образование. – 2001. – № 1. – С. 80–84.

3. Методика выполнения измерений массовой доли химических элементов железа, кадмия, калия, кальция, марганца, меди, мышьяка, никеля, свинца, серы, стронция, титана, хрома, цинка в пробах растительного и животного происхождения методом рентгенофлуоресценции с использованием спектрометра энергий рентгеновского излучения СЕР-001 МВИ.МН – 3272-2009, 16.12.2009 [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.belgim.by/uploaded/temat_1_10_2011.pdf. – Дата доступа: 23.11.2011.

4. Активация окислительных процессов в растениях озимой пшеницы под воздействием *Fusarium Graminearum* / Л.А. Крючкова [и др.] // Физиология и биохимия культурных растений. – Киев. – 2007. – Т. 39, № 6 (230). – С. 522–530.

5. Гордобудская, О.М. Анализ регионального накопления микроэлементов в сапропелях / О.М. Гордобудская, Б.В. Курзо, Ю.Л. Бурак // Природопользование. – 1996. – Т. 1. – С. 17–24.

6. Гигиенический норматив 2.1.7.12-1-2004. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве. 2004 г.

7. Реестр методик выполнения измерений в области экологического контроля. Часть 2 Почвы и донные отложения.

8. Позняк, С.С. Оценка аккумуляции тяжелых металлов и образования антиоксидантных веществ в растениях Беларуси / С.С. Позняк, Ю.В. Жильцова, Ч.А. Романовский // Труды БГУ. – 2010. – Т. 5, ч. 1. – С. 89–93.

9. Власов, Б.П. Использование высших растений для оценки и контроля за состоянием водной среды: метод. рекомендации / Б.П. Власов, Г.С. Гигевич. – Минск: БГУ, 2002. – 84 с.

10. Макаренко, Т.В. Оценка степени загрязнения водоемов и водотоков г. Гомеля и прилегающих территорий тяжелыми металлами / Т.В. Макаренко // Экологический вестник МГЭУ им. А.Д. Сахарова. – 2010. – Т. 12, № 2. – С. 130–137.

DEPENDENCE BETWEEN ANTIOXIDANT-PROOXIDANT BALANCE IN MACROPHYTES AND THE LEVEL OF ANTHROPOGENIC LOAD

Yu.V. Zhyltsova

International Sakharov Environmental University, Minsk, Belarus

The article contains the data about the concentrations of metals (*Cu, Zn, Mn, Fe, Cr, Ti, Pb u Ni*), antioxidative capacity, and malonic dialdehyde in the macrovegetation. The correlation coefficient between the concentrations of elements in the plants and sediments, accumulation coefficients, antioxidant-prooxidant balance were calculated. The negative correlation dependence between the index of total plants' pollution and antioxidant-prooxidant balance were found. The species that can accumulate pollutants and be used as a test-object has been detected.