

ОЦЕНКА АККУМУЛЯЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ОБРАЗОВАНИЯ АНТИОКСИДАНТНЫХ ВЕЩЕСТВ В РАСТЕНИЯХ БЕЛАРУСИ

С.С. Позняк, Ю.В. Жильцова, Ч.А. Романовский

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

Введение

Работы многих исследователей показали, что между химическим составом растений и элементным составом среды существует определенная связь, но прямая зависимость содержания ТМ в растениях от содержания в компонентах биосферы часто нарушается из-за избирательной способности растений к накоплению элементов в необходимом количестве [1]. Одним из подходов оценки состояния окружающей среды является реакция растений на различные виды загрязнителей в результате активации процессов системы антиоксидантной защиты [2]. Использование растений в качестве тест-объектов состояния экосистем имеет ряд преимуществ благодаря их многочисленности, широкой распространенности и способности чутко реагировать на изменения в среде своего обитания. Кроме того, растения являются ценным кормовым ресурсом и промышленным сырьем и, вследствие их способности аккумулировать химические элементы и интегрировать во времени изменения их концентрации в среде, могут быть использованы в качестве биологических фильтров для очистки стоков, содержащих тяжелые металлы. Результаты комплексных исследований различных экосистем с одновременным определением элементного состава компонентов и такого интегрального показателя, как антиоксидантная активность, в Республике Беларусь отсутствуют.

Целью работы являлась оценка накопления химических элементов и образование антиоксидантов растениями Беларуси в зависимости от экологических факторов.

Методы исследования

Материалом для настоящей публикации послужили исследования химических элементов: в 1134 пробах 33 видов высших водных растений, относящихся к 20 семействам и 5 экологическим группам – эугидрофиты (7), плейстогидрофиты (6), аэрогидрофиты (11), эугигрофиты (4), гирогелофиты (5); а также в 1457 образцах луговой растительности, относящейся к 18 семействам.

Для всех растений определялся химический состав в наземных органах. Для определения зависимости содержания химических элементов в растениях от их концентрации в среде обитания проанализировано 88 проб донных отложений и 76 почвенных образцов. Для 316 проб 8 видов высших водных растений (*Lemna minor* L., *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid., *Acorus calamus* L., *Ceratophyllum demersum* L., *Elodea canadensis* Michx., *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud., *Staurogeton trisulcus* L. Schur., *Stratiotes aloides* L.) была определена антиоксидантная активность. Отбор образцов растений был произведен в летние периоды 2008 и 2009 года в соответствии с методическими рекомендациями [3].

Содержание химических элементов в растениях и донных отложениях определяли методом рентгено-флуоресцентного анализа на спектрометре энергий рентгеновского излучения СЕР-001 (Украина) согласно утвержденной методике [4].

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

Статистическая обработка данных проводилась с использованием дисперсионного и корреляционного анализов в пакете *Microsoft Office Excel* и с использованием прикладных программных пакетов «*MatLab R2007b*».

Результаты и обсуждение

В донных отложениях и почвенных образцах были определены следующие элементы *Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb*. Данные по донным отложениям озер были сгруппированы по их принадлежности к педогеохимическим районам и сравнивались с региональными кларками микроэлементов сапропелей озер Беларуси. Интенсивность техногенного воздействия на почвы и растительность оценивалась при помощи коэффициента концентрации, коэффициента биологического накопления и показателя суммарного загрязнения.

В ходе исследований установлено, что по величине среднего содержания в высших водных растениях элементы располагаются в следующем убывающем порядке: *Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Co > Cr > Ni > Cd*. Сходный порядок расположения химических элементов в макрофитах отмечают и другие исследователи [5, 6].

Выявлены значительные колебания содержания химических элементов внутри семейств макрофитов: у *Potamogetonaceae* (по меди и марганцу), у *Poaceae* Vamhart. (по свинцу), у *Lemnoideae* (по железу, меди, свинцу), у *Hydrocharitaceae* (по марганцу, железу, меди, свинцу), у *Araceae* (по меди и свинцу), у *Typhaceae* и *Superaceae* (по меди), *Alismataceae* (по меди и железу). Аккумуляционная способность исследованных растений была проанализирована по отношению к экологическим группам. В результате проведенных исследований было выявлено, что в среднем гидрофиты накапливают большие концентрации всех исследованных химических элементов кроме меди, никеля и кадмия, чем гигрофиты. В группе гидрофитов мы рассматривали три подгруппы: эугидрофиты, плейстогидрофиты и аэрогидрофиты. Минимальное содержание химических элементов обнаружено у аэрогидрофитов (кроме кадмия). По средним концентрациям химических элементов эугидрофиты имели достоверно большие значения по сравнению с плейстогидрофитами для титана, никеля, марганца, железа, цинка и кадмия, что, возможно, связано с тем, что эугидрофиты поглощают химические элементы из воды и донных отложений всей поверхностью. Группа гигрофитов была рассмотрена нами как две подгруппы эугигрофитов и гигрогелофитов. Концентрации титана, хрома, железа, кобальта, никеля, меди, свинца были выше у эугигрофитов.

В результате исследований установлено, что более высокое содержание меди и олова в растениях луговых фитоценозов отмечалось на гидроморфной торфяной почве низинного типа, что может быть связано с повышенным содержанием органического вещества в торфе по сравнению с дерново-подзолистой легкосуглинистой почвой. В зонах выявленных геохимических аномалий отмечалось избыточное накопление тяжелых металлов в растениях. В ходе исследований впервые проведена группировка растений по их устойчивости к накоплению тяжелых металлов в зависимости от принадлежности к различным семействам, что позволит планировать оптимальное размещение сельскохозяйственных культур в севооборотах, особенно в зоне воздействия крупных промышленных центров.

На содержание химических элементов в растениях влияют как внутренние (видовая принадлежность, степень адаптации растения к условиям среды, характер поглощения элемента растением), так и внешние факторы (концентрация элемента в воде, донных отложениях и почве, его валовое содержание и форма соединения).

В работе были рассчитаны корреляционные зависимости содержания химических элементов в высших водных растениях и донных отложениях. Максимальные достоверные корреляционные зависимости между содержанием химических элементов в макрофитах и донных отложениях в валовой форме выявлены для озер северной провинции Браславо-Глубокско-Городокского района Браславского подрайона по цинку (0,94), меди (0,75) и титану (0,54); для озер центральной провинции Вилейско-Докшицкого района по хрому (0,95), марганцу (0,82), меди (0,70), железу (0,52).

Максимальная достоверная ($p=0,05$) корреляционная зависимость между содержанием химических элементов в макрофитах и донных отложениях в валовой форме выявлена для хрома: *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (0,40); для марганца: *Lemna minor* L. (0,96), *Stratiotes aloides* L. (0,85), *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (0,81), *Ceratophyllum demersum* L. (0,79); для железа: *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (0,92), *Stratiotes aloides* L. (0,83), *Typha latifolia* L. (0,83); для кобальта: *Stratiotes aloides* L. (0,89); для меди: *Lysimachia vulgaris* L. (0,64); для цинка: *Stratiotes aloides* L. (0,75), *Typha latifolia* L. (0,74); для кадмия: *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. (0,35); для свинца: *Acorus calamus* L. (0,41).

В результате проведенных опытов установлено, что все растения, произрастающие в луговых естественных фитоценозах, обладают избирательной поглотительной способностью по отношению к микроэлементам и тяжелым металлам, и их химический состав зависит от биологических особенностей и условий выращивания. В незагрязненных почвах к элементам со средней степенью биологической аккумуляции относятся цинк, медь, серебро, селен, стронций, ванадий, барий, олово, ртуть и свинец; к элементам со слабой степенью аккумуляции – сурьма, кобальт, кадмий, марганец, никель и хром, а к элементам с незначительным накоплением – железо, цирконий, титан и йод.

По результатам исследований были рассчитаны коэффициенты накопления (КН) и коэффициенты специфического относительного накопления (КСОН). Коэффициент накопления был рассчитан как отношение концентраций элемента в растении и донных отложениях. По величинам коэффициентов накопления, которые зависят от видовой специфики растений и химической природы металла, растения можно разделить на макроконцентраторы ($КН > 2$), микроконцентраторы ($КН$ в пределах 1–2), и деконцентраторы ($КН < 1$). Интенсивность накопления химических элементов в среднем по макрофитам убывает в следующем порядке: $Zn > Mn > Cu > Pb > Ni > Cr > Co > Fe > Hg > Ti$.

Коэффициент специфического относительного накопления определялся 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. КСОН для *Ti* изменяется в границах от 0,24 до 22,06 (в 92,6), *Cr* – от 0,19 до 7,71 (в 41,2), *Mn* – от 0,14 до 7,21 (в 52,8), *Fe* – от 0,12 до 12,27 (в 101,0), *Co* – от 0,11 до 5,81 (в 52,6), *Ni* – от 0,28 до 5,12 (в 18,4), *Cu* – от 0,22 до 2,85 (в 13,1), *Zn* – от 0,27 до 9,51 (в 35,2), *Cd* – от 1,49 до 9,26 (в 6,2), *Hg* – от 1,37 до 69,60 (в 50,8), *Pb* – от 0,10 до 4,39 (в 43,5).

Определено, что из 33 исследованных видов макрофитов по уровню концентрирования химических элементов можно отнести:

для меди к макроконцентраторам – 5 видов (15,2%), к микроконцентраторам – 13 видов (39,4%), к деконцентраторам – 15 видов (45,5%);

для марганца к макроконцентраторам – 6 видов (18,2%), к микроконцентраторам – 7 видов (21,2%), к деконцентраторам – 20 видов (60,6%);

для цинка к макроконцентраторам – 19 видов (57,6%), к микроконцентраторам – 9 видов (27,3%), к деконцентраторам – 5 видов (15,2%);

для никеля к микроконцентраторам – 2 вида (6,1%).

Установлено, что гидрофиты накапливают химические элементы активнее гигрофитов. Аэрогидрофиты минимально накапливают химические элементы (за исключением никеля) в сравнении с эугидрофитами и плейстогидрофитами. Эугидрофиты активнее плейстогидрофитов накапливают титан, железо, никель, цинк и ртуть.

Исследованиями установлено, что антиоксидантная активность высших водных растений в общей совокупности исследованных макрофитов озер Беларуси колебалась от 4,36 до 205,86 (в 47,16 раз) мкмоль/г (для жирорастворимых компонентов) и от 0,05 до 269,65 (в 5343,38 раз) мкмоль/г (для водорастворимых компонентов). Средняя антиоксидантная активность исследованных макрофитов составляет 41,7 мкмоль/г (для жирорастворимых компонентов) и 55,1 мкмоль/г (для водорастворимых компонентов).

Исследованные виды макрофитов по среднему значению антиоксидантной активности (мкмоль/г) располагаются в следующем убывающем порядке: по содержанию жирорастворимых компонентов: *Lemna minor* L. (97,8)>*Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (54,8)>*Acorus calamus* L. (52,0)>*Ceratophyllum demersum* L. (41,1)>*Elodea canadensis* Michx. (33,8)>*Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. (26,0)>*Staurogeton trisulcus* L. Schur (20,5)>*Stratiotes aloides* L. (7,9); по содержанию водорастворимых компонентов: *Acorus calamus* L. (135,3)>*Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. (71,4)>*Stratiotes aloides* L. (69,5)>*Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. (58,4)>*Lemna minor* L. (49,7)>*Ceratophyllum demersum* L. (25,4)>*Staurogeton trisulcus* L. Schur (19,3)>*Elodea canadensis* Michx. (11,9).

Исследованные виды макрофитов принадлежат к пяти семействам. Наблюдается уменьшение антиоксидантной активности жирорастворимых экстрактов в следующем ряду: *Lemnoideae* (57,7)>*Araceae* (52,0)>*Ceratophyllaceae* S.F. Gray (41,1)>*Poaceae* Bamhart. (26,0)>*Hydrocharitaceae* Juss. (20,8). Для водорастворимых экстрактов ряд следующий: *Araceae* (135,3)>*Poaceae* Bamhart. (58,4)>*Lemnoideae* (46,8)>*Hydrocharitaceae* Juss. (40,7)>*Ceratophyllaceae* S.F. Gray (25,4).

На основании полученных данных были рассчитаны коэффициенты корреляционной зависимости между содержанием химических элементов в растениях и показателями антиоксидантной активности. Установлена высокая отрицательная корреляционная связь между содержанием меди в *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. и антиоксидантной активностью жирорастворимых экстрактов растения (АОАж) (-0,93), а также между содержанием меди и антиоксидантной активностью водорастворимых экстрактов (АОАв) (-0,73). Установлена отрицательная корреляционная зависимость средней силы между содержанием цинка в *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. и АОАж (-0,58). Коэффициент корреляции между АОАж и АОАв равен 0,53. Для *Lemna minor* L. наблюдалась корреляционная зависимость средней силы между содержанием цинка и АОАв и АОАж (-0,56 и -0,49 соответственно), марганцем и АОАв (-0,53), а также высокая отрицательная зависимость между содержанием железа и АОАж (-0,70), железа и АОАв (-0,77), АОАж и АОАв (0,79).

Выводы

В ходе исследований установлены видовые различия в накоплении химических элементов. Групповым концентратором хрома, марганца, железа, кобальта, меди, ртути и свинца являются *Lemna minor* L., *Ceratophyllum demersum* L. способен накапливать марганец, цинк, хром, *Elodea canadensis* Michx. – титан, медь и свинец, *Hydrocharis morsus-ranae* L. – марганец, железо, свинец, *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid. – хром, железо, свинец, марганец. Растения семейства *Potamogetonaceae* Dum. также можно рассматривать как групповые концентраторы хрома, никеля, кадмия и свинца. Установлено, что погруженные гидрофиты обладают повышенной способностью аккумулировать титан, никель, марганец, железо, цинк и кадмий в сравнении с плавающими.

Для многих растений луговых фитоценозов, которые относятся к наиболее распространенным в Центральной зоне Республики Беларусь видам – полынь обыкновенная, полынь горькая, одуванчик лекарственный, ромашка непахучая, василек синий, бодяк полевой, – отмечалась большая разница между минимальным и максимальным значением содержания химических элементов, что является наилучшим подтверждением предположения о том, что чем больше микроэлементов с широким интервалом концентраций сочетаются в одном растении, тем больше экологическая амплитуда произрастания данного растения и, как следствие, выше его адаптационные способности в условиях техногенного загрязнения.

Высшие водные растения накапливают значительное количество веществ, обладающих антиоксидантной активностью. Растения *Acorus calamus* L., *Stratiotes aloides* L., *Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steud. предлагается использовать в качестве дополнительных пищевых и кормовых ресурсов.

Список литературы

1. Ильин, В.Б., Тяжелые металлы в системе почва-растение / В.Б. Ильин // Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1991. – 151 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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/file/MVI%20Tem%20perech%201-01-2010.pdf>. – Дата доступа 01 июня 2010.
5. Панин, М.С. Эколого-бигеохимическая оценка аккумуляции тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb, Cr) макрофитами реки Иртыш / М.С. Панин, А.К. Свидерский // «Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде: Доклады II Международной научно-практической конференции» г. Семипалатинск, 16–18 октября 2002. – Том 2. – С. 64–82.
6. Малева, М.Г. Содержание пигментов как тест-показатель действия тяжелых металлов на высшие водные растения / М.Г. Малева, Г.Ф. Некрасова // Ученые записки НТГСПА. Материалы VI Всероссийского популяционного семинара / НТГСПА. – Н. Тагил. – 2004. – С. 167–172.

**THE ASSESSMENT OF HEAVY METALS' ACCUMULATION
AND ANTIOXIDANTS FORMATION IN THE PLANTS OF BELARUS****S.S. Pazniak, Yu.V. Zhyltsova, Ch.A. Romanovsky***Saharov International State Ecological University, Minsk, Belarus*

The results of heavy metals' accumulation (Cu, Zn, Mn, Fe, Cr, Ti, Co, Pb, Ni, Cd) and antioxidative capacity of plant' extracts are presented. The species that can accumulate pollutants in high concentrations have been detected. The possibility of plants' using as a test-object has been estimated.