

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ВОДЫ И РАСТВОРЕННЫХ В НЕЙ НЕКОТОРЫХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

А.Р. Сукиасян¹, А.В. Тадевосян¹, Н.Р. Хачатурян²

¹Национальный политехнический университет Армении

² ЗАО "Саур"

Исследована миграция ряда тяжелых металлов (ТМ) в системе почва–растение на фоне изменения величины транспирации растения-индикатора, в качестве которого была использована наземная часть *полыни горькой*. Изучены кинетические процессы влагоудаления в растительных образцах, напрямую приводящие к нарушению клеточного гомеостаза. Рассмотрена корреляция между общим содержанием ТМ и водопроницаемостью растительной мембраны. Показано, что расширение стенок растительной клетки (тургор) отражает степень ее проницаемости влагой и зависит от концентрации растворенных в воде ТМ. На основании проведенных исследований апробированные методы можно рекомендовать к использованию на больших территориях с целью экологического картографирования.

Ключевые слова: система почва–растение, тяжелые металлы, тургор.

Введение. Явления, приводящие к экологически необратимым процессам, однозначно отражаются на растениях, вызывая сложные физиологические процессы. В числе негативных экологических факторов особое место занимают температурные стрессы почвы и воздуха, техногенные загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами, подвижность и опасность которых для растений в последние годы возросла [1,2].

Очевидно, что вопросы экологической устойчивости и адаптации растений в итоге сводятся к всестороннему исследованию механизмов обмена веществ как сложной цепи взаимосвязанных многоуровневых процессов, реагирующих на изменения внешней среды. Среди основных процессов, с помощью которых растение регулирует рост и развитие в ответ на изменение водного внутриклеточного баланса поступающей воды, следует выделить тургор (расширение) стенок растительной клетки [3]. При этом разница концентраций растворенных веществ в воде между внутренней и внешней сторонами клеточной стенки играет доминирующую роль и вызывает тургор [4,5].

Естественно предположить, что осмотически устойчивые растения будут более толерантны к различным экологическим стрессам, приводящим к водному дефициту растений. При этом движение воды может быть вызвано накоплением биологически активных ТМ [6,7]. Последние способны напрямую генерировать повреждения системы, приводя к нарушению клеточного гомеостаза [8].

В представленной работе рассмотрена корреляция между суммарным содержанием некоторых ТМ и показателем водопоглощения у растения-индикатора *полыни горькой*, произрастающего в трех отличных по степени экологической загрязненности территориях.

Материалы и методы исследования. В качестве растения-индикатора использовалась наземная часть *полыни горькой*, которая после отбора помещалась в специальный контейнер для перемещения с температурой хранения $+4^{\circ}\text{C}$. *Полынь горькая* является стержнекорневым сорняком, ее стержневой главный корень проникает в глубь почвы до 1,5...2 м. Поэтому по месту произрастания растения были взяты также пробы почвы глубиной до 2 м.

Образцы растения были измельчены до размеров $5\pm 0,5$ мм гомогенизатором марки НМ-23000 при частоте вращения ротора 1200 об./мин в холодных условиях (при температуре $+4^{\circ}\text{C}$). Полученный растительный порошкообразный образец использовался в качестве исходного материала для определения как величины транспирации (показатель влагопоглощения растительной клетки, приводящий к тургору), так и концентрации в них некоторых ТМ. Влагоудаление в образцах растений осуществляли гравиметрическим способом при температуре $+30\pm 2^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 1% в сушильной камере.

ТМ были определены атомно-адсорбционным методом. С этой целью образцы были подвергнуты озолению, а затем растворены в 0,5М растворе соляной кислоты. Концентрацию ионов металлов в полученных растворах определяли на атомно-адсорбционном спектрофотометре с графитовым атомизатором и печью GFA-EX71.

Результаты экспериментов были статистически обработаны с учетом t-критерия Стьюдента, где показатель погрешности не превышает 5%.

Результаты и их обсуждение. Известно, что при почвообразовании происходит некоторое перемещение ТМ в профиле почвы [9]. При изучении содержания ТМ в совокупности основных типов почв разных регионов было показано, что использования данных о среднем содержании ТМ в почвенном покрове вообще в качестве фоновых при работе с конкретными загрязненными почвами недостаточно [10]. Поэтому в проведенных нами исследованиях сравнивались данные о содержании ТМ в конкретных территориях с незагрязненными почвами [11].

В представленной работе основным критерием для выбора ТМ в ходе проведенных исследований послужил факт их действия в экологической цепочке почва–растение. Исходя из этого, в первой стадии экспериментов была определена скорость миграции ТМ из почвы для одного и того же растения, но отличного по ареалу произрастания. При этом главным критерием выбора пункта сбора образцов растения и соответствующей почвы послужила степень абиотической загрязненности местности. Пунктом сбора №1 был выбран г. Севан, пунктом сбора №2 – северо-восточная пригородная часть г. Степанакерта. В качестве контроля была использована почва Ботанического сада г. Еревана (пункт сбора №3).

В табл. 1 представлены результаты расчета индекса поступления ТМ (ИндПТМ) из почвы в растение, определенные как отношение содержания металла в растении к его содержанию в почве. В представленной работе исследованы концентрации изменения меди, свинца, молибдена, цинка и хрома.

Таблица 1

Количественные изменения индекса поступления некоторых тяжелых металлов из почвы в растение в зависимости от места его произрастания

Вариант	ИндПТМ*				
	Cu	Zn	Pb	Cr	Mo
Пункт №1	1,26	0,14	2,5	1,97	2,7
Пункт №2	0,99	0,10	3,95	0,37	8,24
Пункт №3	0,74	0,12	0,04	0,92	3,75

*Отношение содержания тяжелого металла в растении к его содержанию в почве.

Медь выступает в качестве катализатора окислительно-восстановительной реакции в митохондриях, хлоропластах, а в цитоплазме клеток – в качестве электронного носителя в процессах дыхания растений. Имобилизация хрома в вакуоли растительной клетки является основной причиной его чрезмерного накопления в корнях. В растительном организме молибден входит в состав ферментов, под действием которых происходит восстановление в клетках нитратного азота, играя большую роль в азотном обмене и синтезе белковых веществ. Под влиянием молибдена в растениях увеличивается содержание углеводов, каротина и аскорбиновой кислоты, белковых веществ, хлорофилла и повышается интенсивность фотосинтеза.

Согласно полученным результатам, величина ИндПТМ явно отличается по зоне произрастания растений (табл.1). При сравнении полученных результатов

отмечается очень высокое значение индекса поглощения для образцов из пункта №2.

Свинец выступает своеобразным индикатором загрязнения не только почвы, но и атмосферы. В сухую погоду свинец накапливается на поверхности растений, а после обильных дождей его значительная часть смывается. Этим, вероятно, объясняется сравнительно высокое значение ИндПТМ свинца для всех образцов.

Цинк является важным микроэлементом, связывающим его с ДНК и РНК растений, способствуя их регулированию и стабилизации. Биодоступность/фитоактивность ТМ зависит от его общей концентрации в почве, присутствия других ТМ, рН почвы. При изучении процессов накопления и миграции цинка из почвы в растение отмечается его высокая поглотительная способность растением. Это подтверждает и тот факт, что для всех исследуемых образцов значение ИндПТМ имеет сравнительно низкое значение, так как содержание химического элемента в почве превышает его концентрацию в растении более чем в 7 раз.

В последующей стадии экспериментов образцы растений были подвергнуты термической обработке с целью полного удаления из них влаги. Математическая интерпретация кинетики влагоудаления позволяет разделить процесс на два этапа по скорости протекания [12]:

1. Начальный этап (“быстрая” диффузия) переноса влаги через мембрану:

$$A = 6\sqrt{\frac{D}{\pi}} a^2 \sqrt{\tau} \quad (1)$$

2. Конечный этап (“медленная” диффузия) переноса влаги:

$$\ln A = \ln\left(\frac{6}{\pi}\right)^2 - \frac{(D\pi^2 \cdot \tau)}{a^2}, \quad (2)$$

где τ – продолжительность процесса влагоудаления, с; a – определяющая линейная геометрическая величина, м; D – коэффициент диффузии Фика, m^2/s .

Полученные результаты представлены в виде параметра D/a^2 для каждого этапа диффузии воды через растительную мембрану при сушке (табл. 2). Далее были сравнены параметры диффузии по влагоудалению с суммарным содержанием исследуемых ТМ, в результате чего отмечается почти функциональная прямая корреляция между значениями параметров диффузии D/a^2 и суммарным значением данных ТМ.

Таблица 2

Параметры диффузии при влагоудалении и суммарной концентрации некоторых тяжелых металлов для образцов растений в зависимости от места их произрастания

Вариант	Σ ТМ, мг/мг	$D/a^2, c^{-1}$ *	$D/a^2, c^{-1}$ **
Пункт №1	33,2	$(2,5066 \pm 0,0086) \cdot 10^{-7}$ $R^2=0,991$	$(2,56 \pm 0,28) \cdot 10^{-7}$ $R^2=0,996$
Пункт №2	17,9	$(3,4397 \pm 0,0039) \cdot 10^{-7}$ $R^2=0,997$	$(3,47 \pm 0,65) \cdot 10^{-7}$ $R^2=0,996$
Пункт №3	22,3	$(3,7772 \pm 0,0011) \cdot 10^{-7}$ $R^2=0,998$	$(3,70 \pm 0,56) \cdot 10^{-7}$ $R^2=0,990$

R^2 - величина достоверности линейной аппроксимации

* - по уравнению (1); ** - по уравнению (2)

Сравнение значений параметров диффузии и содержания ТМ для образцов пункта №1 показало, что наибольшему суммарному содержанию ТМ соответствует наименьшее значение величины D/a^2 и наоборот – для пункта №2. Это объясняется высоким содержанием молибдена в данных образцах. Вероятно, переходный характер данного элемента обуславливает его влияние на стабильность мембран растения, в особенности, в условиях засухи.

Выводы. Результаты экспериментов показали наличие взаимосвязи между содержанием некоторых ТМ и водопроницаемостью мембраны растительной клетки. Тургор растительной клетки отражает степень влагопроницаемости и зависит от концентрации растворенных в воде некоторых ТМ. В этой связи рекомендуется использование *полыни горькой* в качестве растения-индикатора при оценке последствий таких абиотических стрессов, как засуха и загрязнение. На основе проведенных исследований возможно использование предложенных методов на больших площадях с целью их экологического картографирования.

Литература

1. **Болдырев М.И.** Оценка роли экологических факторов, вызывающих стрессы у растений // Докл. межрег. науч.-практ. конф. “Научные основы устойчивого садоводства в России”, 11 -12 марта 1999 г. – Мичуринск, 1999.- С. 32-37.
2. **Большаков В.А., Борисочкина Т.И., Краснова Н.М., Докучаева В.В.** Влияние загрязнения воздуха на растительность и почвы // Химия в сельском хозяйстве.- 1994. - № 1.- С. 23-26.
3. **Tuteja N.** Mechanisms of high salinity tolerance in plants, Meth. Enzymol // Osmosens. Osmosignal.- 2007.- 428.- P. 419-438.
4. **Hall J.L.** Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance // Journal of Experimental Botany.- 2002.- Vol. 53, no. 366.- P. 1-11.
5. **Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K.V.** Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review //Ann. Bot.- 2003.- 91.- P. 179-194.
6. **Halliwell B.** Reactive species and antioxidants: redox biology is a fundamental theme of aerobic life // Plant Physiol.- 2006.- 14.- P. 312-322.
7. **Polle A.S.** Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection bymycorrhization // Journal of Experimental Botany.- 2002.- Vol. 53, no. 372.- P. 1351-1365.
8. **Dalvi A., Bhalerao S.A.** Response of plants towards heavy metal toxicity: an overview of avoidance, tolerance and uptake mechanism //Annals of Plant Sciences.- 2013.- Vol. 2, no. 9.- P. 362-368.
9. **Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.** Микроэлементы в почвах и растениях.- М.: Мир, 1989.- 439 с.
10. **Ильин В.Б.** К вопросу о разработке предельно допустимых концентраций тяжелых металлов в почвах // Агрохимия.- 1985.- № 10.- С. 94-101.
11. **Сагателян А.К.** Особенности распределения тяжелых металлов на территории Армении: Монография. – Ер.: Изд-во Центра экологоноосферных исследований НАН РА, 2004. - 154 с.
12. **Crank J.** The mathematics of diffusion.- London: Oxford University Press, 1975.- 414 p.

*Поступила в редакцию 03.08.2015.
Принята к опубликованию 17.12.2015.*

**ԲՆԱՊԱՀՊԱՆԱԿԱՆ ԻՐԱՎԻՃԱԿԻ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ՝ ԶՐԻ
ՍԱԿԱՎՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՆՐԱՆՈՒՄ ԼՈՒԾՎԱԾ ՈՐՈՇ ԾԱՆՐ ՄԵՏԱՂՆԵՐԻ
ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ**

Ա.Ռ. Սուքիասյան, Ա.Վ. Թադևոսյան, Ն.Ռ. Խաչատրյան

Հետազոտվել է որոշ ծանր մետաղների (ԾՄ) տարածումը հող - բույս համակարգում բույսի տրանսպիրացիայի չափաբաժնի փոփոխման ընթացքում: Որպես ինդիկատոր օգտագործվել է «դառը օշինդր» բույսի վերգետնյա մասը: Հետազոտվող ԾՄ-երը մասնակցում են օքսիդավերականգնման գործընթացներին, ուղղակիորեն հանգեցնելով բջջային հոմեոստազի կազմալուծմանը: Ուսումնասիրվել են ջրահեռացման կինետիկ գործընթացները բուսական նմուշներում, որոնք դիտարկվել են ԾՄ-երի պարունակության և ջրակլանման գործակցի միջև ընդհանուր հարաբերակցություններում: Բուսական բջջի տուրգորի միջոցով որոշվել է ջրակլանման աստիճանը, որը կախված է ջրում լուծված ԾՄ-երի քանակից: Հետազոտության արդյունքները հավաստում են, որ փորձարկված մեթոդները կարելի է կիրառել շրջակա միջավայրի ավելի մեծ տարածքների քարտեզագրման նպատակով:

Առանցքային բառեր. հող – բույս համակարգ, ծանր մետաղներ, տուրգոր:

**EVALUATING THE ENVIRONMENTAL STATE UNDER THE
CONDITIONS OF WATER DEFICIT AND SOME HEAVY METALS
DISSOLVED IN IT**

A.R. Sukiasyan, A.V. Tadevosyan, N.R. Khachaturyan

The migration of some heavy metals (HM) in the system of soil – plant on the background of the change of the transpiration of the plant cell is investigated. As an indicator – plant, the above-the-ground part of *Artemisia Absinthium* has been used. The considered HM take part in the redox processes, directly leading to the disruption of cellular homeostasis. Kinetic processes in plant samples have been studied. The correlation between the total content of heavy metals, and water permeability of the plant membrane have been considered. It is shown that expanding (turgor) of the plant cell reflects the degree of moisture permeability and depends on the concentration of the dissolved HM in water. Based on these studies, the tested methods can be used over large areas for environmental mapping.

Keywords: system of soil – plant, heavy metals, turgor.