

**Влияние содержания тяжёлых металлов в воде малых рек, используемой для полива кукурузы армянской популяции**

© 2018. А. Р. Сукиасян, к. б. н., доцент,  
 Национальный политехнический университет Армении,  
 0009, Армения, г. Ереван, ул. Терьяна, д. 105,  
 e-mail: sukiasyan.astghik@gmail.com

Экологическая безопасность малых рек для населения региона, их роль в формировании биоты во многом определяются химическим составом воды. При изменении интенсивности действия климатических и антропогенных факторов химический состав и, как следствие, качество воды могут существенно изменяться. В связи с этим проведение мониторинговых исследований состава воды этих источников представляется весьма актуальным. Изучены особенности миграции ряда тяжёлых металлов (ТМ) в триаде вода-почва-растение на примере однолетнего травянистого культурного растения – сахарной кукурузы, произрастающего на прибрежных территориях реки Шнох. В качестве контрольного растения использовалась кукуруза инбредной линии В73. В специально оборудованной системой кондиционирования климатической комнате моделировали засуху изменением оптимальной относительной влажности почвы опытных вазонов. В контрольных вазонах оптимальная относительная влажность почвы (ОВП) составляла 54%, в случае умеренной засухи – 43%, при этом визуально не наблюдалось увядания листьев растения. Во время моделирования сильной засухи оптимальная относительная влажность почвы составляла 34%, а увядание листьев наблюдалось в течение дня. Содержание ТМ в образцах речной воды, прибрежной почвы и зёрен растений осуществлялось с помощью портативного анализатора «Thermo Scientific™ Niton™ XRF PortableAnalyser». Проведён анализ кинетических данных роста растения в условиях моделируемой засухи. Определены кинетические параметры роста растений в трёх условиях моделируемой засухи. Установлена корреляционная связь между скоростью роста биологических образцов и засухой, кинетические параметры роста растений в условиях моделируемой засухи. Выявлена корреляционная связь между величиной водного потенциала и осмотического давления у трёхдневных побегов пятого листа кукурузы в условиях засухи. Рассмотрен физиологический ответ роста растения по степени засухи, показателям водного потенциала и осмотического давления. Выявлена определённая пространственная динамика распределения некоторых ТМ в триаде вода-почва-растение. Полученный экспериментальный материал позволяет осуществить комплекс мероприятий по мониторингу степени загрязнённости речной воды, которую используют в оросительных целях с учётом почвенно-климатических условий произрастания.

**Ключевые слова:** растение, засуха, кинетика роста, водный потенциал, осмотическое давление, тяжёлые металлы.

**Influence of heavy metals content in water of small rivers used for irrigation of maize of Armenian population**

© 2018. A. R. Sukiasyan ORCID: 0000-0001-5549-3146  
 National Polytechnic University of Armenia,  
 105, Teryan St., Armenia, Yerevan, 0009,  
 e-mail: sukiasyan.astghik@gmail.com

Ecological safety of small rivers for the population of the region, their role in the formation of biota is largely determined by the chemical composition of water. The intensity of climatic and anthropogenic factors changes, the chemical composition and, as a consequence, the quality of water can be vary significantly. In this regard, the monitoring studies of the water composition of these sources are very relevant. The features of migration of a number of heavy metals (HM) in the water-soil-plant triad were studied using the example of an annual herbaceous cultural plant – sugar corn (*Zea mays* L.) growing on the coastal areas of the Shnogh River. As a control plant corn inbred line B73 was used. With a specially equipped air-conditioning system the drought was modeled in climatic room by changing the optimum soil water content in the experimental vases. In the control vases, the optimum soil water content was 54%, in the case of a mild drought – 43%, wherein the wilting of leaves of the plant was not visually observed. During the modeling of severe drought, the optimum soil water content was 34%, and leaf wilting was observed during one day. The content of HM in samples of river water, coastal soil and plant grains were carried out using a portable analyzer “Thermo Scientific™ Niton™ XRF Portable Analyzer. An analysis of the kinetic data of plant growth under simulated drought conditions was carried out. Kinetic parameters of plant growth in three conditions of simulated drought were determined. A correlation was established between the growth rate of biological samples and the drought. The kinetic parameters of plant growth under simulated drought conditions were established. A correlation was found between the water potential and osmotic

pressure in the three-day shoots of the fifth maize sheet under conditions of drought. The physiological response of plant growth according to the degree of drought and indicators of water potential and osmotic pressure were considered. A certain spatial dynamics of distribution of some HM in the water-soil-plant triad is revealed. The obtained experimental material will makes it possible to carry out a complex of measures to monitor the degree of contamination of river water which used for irrigation purposes taking into account soil and climatic conditions of growth.

**Keywords:** plant, drought, growth kinetics, water potential, osmotic pressure, heavy metals.

Объекты промышленной разработки различных рудных полезных ископаемых являются источниками основного поступления тонкодисперсных минеральных частиц и негативного влияния на окружающую среду. Установлена закономерность в характере распределения содержания ряда элементов, которая выражается в чётко выраженном увеличении концентраций W, Mo и Zn. Не является исключением и Техутское молибденовое месторождение, в связи с эксплуатацией которого химический состав воды реки Шнох претерпел изменения, что отразилось на ландшафте и запасах пресной воды. Река Шнох принадлежит бассейну реки Дебет и её воды используются для орошения близлежащих земель населённых пунктов Техут и Шнох. С одной стороны, неблагоприятные условия окружающей среды накладывают серьёзные ограничения на рост растений, традиционно выращиваемых на данной территории [1], с другой – абиотический стресс засухи ограничивает рост растения, снижая уровень продуктивности сельскохозяйственных растений в странах с сухим континентальным климатом [2]. На территории Армении сахарная кукуруза является характерным приусадебным культурным растением. В большей степени она культивируется в северных регионах вблизи береговых линий рек. Кукуруза отличается высокой приспособляемостью к климатическим изменениям, о чём свидетельствует рост урожайности и увеличение её посевных площадей в мире. За последние три года мировое производство зерна кукурузы достигло 638 млн тонн [3].

Приоритетными являются исследования, направленные на изыскание сортов растений с повышенной адаптивной способностью к меняющимся условиям окружающей среды [2]. Временный дефицит воды, возникающий на разных фазах развития растений, серьёзно влияет на их рост, поэтому весьма актуально изучение ответной реакции растений на засуху [4]. Изменение кинетики роста растения является частью его реакции при засухе [5]. Небольшие листья теряют меньше воды из-за уменьшенной площади транспирации. Очевидно, что изменение количества воды на

любой стадии развития кукурузы может отразиться на её урожайности.

Исходя из вышесказанного, целью работы является оценка влияния загрязнённости речной воды на рост растений с учётом абиотического стресса – засухи, что позволяет статистически достоверно изучать процессы адаптации растения при различных уровнях засухи.

### Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследований были выбраны сорта армянской популяции однолетнего травянистого культурного растения – сахарной кукурузы (*Zea mays* L.), распространённой в Лорийском районе Армении вблизи реки Дебет (Шнох – 41°08'52" с. ш., 44°50'16" в. д., Техут – 41°07'05" с. ш., 44°50'45" в. д.) и кукурузы B73 (Iowa Stif Stalk Synthetic) в качестве биологического контроля. Моделирование абиотической засухи осуществлялось в специально оборудованной системе кондиционирования климатической комнате. В контрольных вазонах оптимальная относительная влажность почвы (ОВП) составляла 54%. Моделирование засухи осуществлялось путём изменения ОВП режимом полива. В случае умеренной засухи ОВП составляла 43%, при этом визуально не наблюдалось увядания листьев растения. Во время моделирования сильной засухи ОВП составляла 34%, и наблюдалось увядание листьев в течение дня [6]. В экспериментах использовалась почва фирмы Jiffy (Нидерланды). Измерения содержания химических элементов в исследуемых образцах (зола семян кукурузы, вода и почва) осуществлялись с помощью портативного анализатора «Thermo Scientific™ Niton™ XRF Portable Analyser» [7].

Статистическую обработку выполняли на основе 10 биологических и до 5 технических повторностей экспериментов при  $p < 0,05$  [8].

### Результаты и их обсуждение

В проведённых нами ранее исследованиях были изучены физиологические изменения роста кукурузы, которые вызывала засуха. Осуществлённая моделируемая засуха из-

менила значение степени удлинения листа (СУЛ), сохраняя при этом общую кинетическую закономерность роста растения. Изучение кинетических параметров роста растений в условиях моделируемой засухи позволило обнаружить корреляционную связь между скоростью роста биологических образцов и засухой. При этом адаптационные механизмы растений регулируют вызванные изменения путём ограничения потери воды с поверхности листьев. Было показано, что величина транспирации может быть использована в качестве критерия при оценке влияния абиотического стресса на ряд физиологических показателей роста растения [9]. При этом необходимо учитывать достигаемость корневой системы кукурузы до уровня грунтовых вод, сопоставляя удалённость самого растения от основного русла реки [10]. Естественно, можно предположить, что осмотически устойчивые растения будут более толерантны к различным экологическим стрессам, приводящим к водному дефициту растений. Определение величины тургора имеет большое значение, в частности, для экологических исследований: его определение позволяет судить о максимальной способности растения поглощать воду из почвы и удерживать её в условиях абиотического стресса [11]. Водный потенциал клеток изменяется также в присутствии органических веществ, связывающих воду [12].

Об изменении динамики роста растения в условиях засухи можно судить по коэффициентам связи уравнения  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$  [9]. Согласно полученным результатам, значение

нулевого полиномиального коэффициента, определяющего начальную скорость прорастания 5-го листа растения, отличается от контрольного значения при умеренной засухе в два раза, а при сильной засухе – в три раза соответственно. Количественные изменения первого полиномиального коэффициента составило 79% при сравнении с контрольным образцом В73 в тех же условиях и 23% – в случае сильного стресса (табл. 1).

Исходя из того, что тепловой стресс вызывает изменения в обмене веществ клеточной стенки, тем самым являясь важным физиологическим механизмом проявления толерантности растений, в дальнейших экспериментах были исследованы изменения водного потенциала и осмотического давления у трёхдневных побегов пятого листа кукурузы в условиях засухи. В проведённых экспериментах сильная засуха способствует повышению значения водного потенциала растительной клетки на 79% (табл. 2), что может быть связано с клеточным расширением, обеспечивающим адаптацию растения при засухе [13].

Реакция растения в ответ на воздействие засухи определяется функциональными возможностями его клеточной стенки. В течение периода повышенной температуры в клеточной стенке растения создаётся вторичное осаднение, прекращающее удлинение клеток. После воздействия высокой температуры эти белки обеспечивают укрепление клеточной стенки, помогая растению адаптироваться к высокой температуре. Поэтому клеточные стенки с повышенным уровнем расширения

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты полиномиальной связи для описания кинетики роста сахарной кукурузы при засухе  
Relationship between polynomial coefficients for describing the growth kinetics of *Zea mays* L. under drought

Образец / Sample		Шнох Shnogh	Техут Tekhut	В 73
$a_0$ – нулевой полиномиальный коэффициент the zero polynomial coefficient	1	39,77	31,45	20,04
	2	82,19	55,77	44,62
	3	126,0	116,6	116,6
$a_1$ – первый полиномиальный коэффициент the first polynomial coefficient	1	72,15	112,1	108,4
	2	51,32	92,04	87,00
	3	9,53	28,47	28,47
$R^2$ – коэффициент аппроксимации the coefficient of approximation	1	0,997	0,996	0,993
	2	0,999	0,998	0,991
	3	0,9	0,9	0,9

Примечание: 1 – контроль (относительная влажность почвы – 54%); 2 – умеренная стресс-засуха (относительная влажность почвы – 43%); 3 – сильная стресс-засуха (относительная влажность почвы – 34%).

Note: 1 – Control (Soil Water Content – 54%); 2 – Mild stress (Soil Water Content – 43%); 3 – Severe stress (Soil Water Content – 34%).

Таблица 2 / Table 2

Изменение потенциометрических параметров пятого листа сахарной кукурузы при моделируемой засухе  
Variation in the potentiometric parameters of the fifth leaf of *Zea mays* L. under simulated drought

Образец Sample	Водный потенциал, МПа Waterpotential, MPa	Осмотическое давление, МПа Osmoticpotential, MPa
Контроль (относительная влажность почвы – 54%) Control (Soil Water Content – 54%)		
Шнох / Shnogh	-0,312	-0,175
Техут / Tekhut	-0,245	-0,393
В 73	-0,09	-0,273
Умеренный стресс (относительная влажность почвы – 43%) Mild stress (Soil Water Content – 43%)		
Шнох / Shnogh	-0,313	-0,169
Техут / Tekhut	-0,256	-0,45
В 73	-2,51	-3,01
Сильный стресс (относительная влажность почвы – 34%) Severe stress (Soil Water Content – 34%)		
Шнох / Shnogh	-0,09	-0,161
Техут / Tekhut	-0,112	-0,229
В 73	-2,27	-2,39

ослабляются, становятся более эластичными, сохраняя клеточные функции во время теплового стресса, а засуха может стать посредником при метаболических изменениях клеточной стенки, изменяя синтез лигнина [13, 14].

Определение значения осмотического давления внесло некоторое пояснение в поведении клеток при засухе. Величина осмотического давления показывает возможности растительной клетки поглощать воду. Поток воды через клеточную оболочку увеличивает в ней гидростатическое давление, которое и растягивает саму оболочку, тем самым обеспечивая необходимый водный запас клетки. Но при растягивании сама клеточная оболочка оказывает противодействие (водный потенциал), регулирующее количество необходимой воды, поступившей в клетку [14].

В результате разработки Техутского молибденового месторождения в речной воде Шноха отмечается увеличение загрязнителей, которые содержат соединения тяжёлых металлов (ТМ), делая воду непригодной для использования в оросительных целях. В процессе адаптации растения, особенно в условиях засухи, не последнюю роль играют концентрационные изменения ТМ в среде [15]. Данные химические соединения, попадая в почву, претерпевают ряд превращений, рассеиваются или накапливаются в зависимости от характера геохимических барьеров, свойственных данной территории и определяющих их миграцию по основным составляющим биоты с дальнейшим попаданием в организм человека [16]. В последующей

серии экспериментов определяли значение концентрации некоторых опасных микроэлементов в триаде вода-почва-растение в период созревания растений, которые орошались водами бассейна реки Шнох (табл. 3).

Содержание молибдена и вольфрама в образцах воды из Техута, используемых в оросительных целях для растений, произрастающих в прибрежной зоне бассейна реки Шнох, оказалось наиболее высоким по сравнению с другими микроэлементами As, Pb, Zn и Cu. Образцы оросительной воды из реки Шнох содержали невысокие концентрационные значения ТМ, за исключением цинка. Общая картина по содержанию данных химических элементов в пробах береговых почв произрастания кукурузы сохранилась в неизменности, за исключением содержания вольфрама. Концентрация данного химического элемента снизилась почти на порядок.

В следующей экспериментальной серии измерялись концентрации исследуемых микроэлементов в спелых зёрнах кукурузы. В этом случае для сравнительного анализа в качестве биологического контроля использовалась кукуруза инбредной линии В73. В процессе исследований было установлено, что сахарная кукуруза обладает избирательной накопительной активностью данных ТМ. Содержание Mo, As, Pb в образцах растений из двух регионов были зафиксированы на уровне их содержания в контрольном экземпляре. Иначе обстоит дело с цинком медью и вольфрамом. Содержание Zn было выше по сравнению

Таблица 3 / Table 3

Содержание некоторых тяжёлых металлов и мышьяка в триаде «вода-почва-растение»  
Content of some heavy metals and arsenic in the triad "water-soil-plant"

Тяжёлые металлы / металлоид Heavy metals / metalloid	Mo	As	Pb	W	Zn	Cu
Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в оросительной воде, мг/л The content of heavy metal sand arsenic in irrigation water, mg/L						
Шнох / Shnogh	0,035	0,019	0,030	0,459	0,837	0,255
Техут / Tekhut	2,421	0,175	0,403	2,162	0,384	0,684
Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в почве, мг/г The content of heavy metals and arsenic in soil, mg/g						
Шнох / Shnogh	0,004	0,045	0,074	0,039	0,255	0,630
Техут / Tekhut	0,002	0,010	0,012	0,020	0,054	0,048
Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в зерне кукурузы, мг/г The content of heavy metals and arsenic in corn of maize, mg/g						
Шнох / Shnogh	0,071	0,047	0,006	0,149	2,629	0,365
Техут / Tekhut	0,036	0,010	0,011	0,013	1,301	0,239
В73	0,051	0,027	0,180	0,727	1,980	0,552

с В73 в образцах растений из Техута на 34% и Шноха на 74%. Концентрация меди была ниже по сравнению с В73 только в образцах зёрен кукурузы из Техута на 57% и Шноха на 87%. В остальных рассматриваемых случаях уровень содержания W был ниже в растительных образцах, выращенных в Техуте, на 81%, и в Шнохе – почти на порядок.

При интоксикации отмечается предотвращение возникновения стресса путём ограниченного поглощения элемента из почвы корневой системой растения [17]. Работа таких адаптационных механизмов достигается процессами иммобилизации металлов в комплексообразовании с помощью органических соединений [18]. В случае драматического развития данного сценария, если ТМ удаётся проникнуть в растительные ткани, то растением активируются механизмы детоксикации, сущность которых заключается в обособлении ТМ в различных внутриклеточных отсеках (например, вакуоли) [19, 20]. С другой стороны, как только ТМ удаётся преодолеть биофизический барьер и ионы металлов входят в ткани и клетки, растение начинает активировать другие механизмы клеточной защиты, чтобы свести на нет и уменьшить неблагоприятные последствия воздействия ТМ. Очевидно, что, по сути, включение любых из этих механизмов и биомолекул предопределяется видом растения и степенью его толерантности к ТМ [21].

### Заключение

В зависимости от содержания влаги в почве именно количество поступившей в

клетку воды отражается на физиологическом уровне, регулируя рост и развитие растения при стресс-засухе. Расширение клеточной оболочки контролируется разницей между водным потенциалом и осмотическим давлением, вызывая упругие деформации растительной клетки при адаптации во время засухи. При этом на произрастание кукурузы определённую избирательность оказывает химический состав речной воды и содержание в ней некоторых ТМ. Полученный экспериментальный материал по миграции ТМ в триаде вода-почва-растение позволяет осуществить комплекс мероприятий по контролю и снижению степени загрязнённости речной воды, которую используют в оросительных целях.

### References

- Ingram J., Bartels D. The molecular basis of dehydration tolerance in plants // *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 1996. V. 47. P. 377–403. doi 10.1146/annurev.arplant.47.1.377.
- Bray E.A., Bailey-Serres J., Weretilnyk E. Responses to abiotic stresses // *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. American Society of Plant Physiologists, Rockville, MD. 2000. P. 1158–1249.
- Food security in the 2030 Agenda for Sustainable Development [Internet resource] <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx> (Accessed: 25.09.2015).
- Sukiasyan A.R. Regulation of water balance of the plant from the different geo environmental locations // *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*. 2016. V. 10. No. 8. P. 895–898. urn:dai:10.1999/1307-6892/10005669.



5. Boyer J.S. Plant productivity and environment // Science. 1982. V. 218. P. 443–448. doi 10.1126/science.218.4571.443
6. Sukiasyan A.R., Tadevosyan A.V., Simonyan G.S., Pirumyan G.P. The influence of abiotic stress on the growth of plants // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2016. No. 7. P. 168–172 (in Russian).
7. Sukiasyan A.R. Antioxidant capacity of maize corn under drought stress from the different zones of growing // International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering. 2016. V. 10. No. 8. P. 413–416. doi: 10.1999/1307-6892/10005083.
8. Kirakosyan A.A., Sukiasyan A.R. Using MATLAB as an express method for estimating experimental results // Information technology: Mezhd. molodezhnaya konf. Yerevan, Armenia, 2005. P. 34–37 (in Russian).
9. Sukiasyan A.R., Tadevosyan A.V., Nagdalyan A.G., Baghdasaryan S.S. Transpiration as a criterion for assessing abiotic stress // Vestnik natsionalnogo politekhnicheskogo universiteta Armenii: Gidrologiya i gidrotekhnika. 2015. No. 2. P. 9–14 (in Russian).
10. Mkrtychyan S.M., Avakyan A.P. Regularities of the influence of the depth of groundwater on the productivity of agricultural crops of wetlands of the Gegharkunik marz // Izvestiya Natsionalnogo agrarnogo universiteta Armenii. 2009. No. 2. P. 86–90 (in Russian).
11. Ilyin V.B. Heavy metals in the soil plant system. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoye otdeleniye. 1991. 151 p. (in Russian).
12. Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K.V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review // Annals Botany. 2003. V. 91. P. 179–194.
13. Xu Q., Xu X., Shi Ya., Xu J., Huang B. Transgenic tobacco plants overexpressing a grass PpEXP1 gene exhibit enhanced tolerance to heat stress // PLoS One. 2014. V. 9. P. e100792. doi: 10.1371/journal.pone.0100792.
14. Lima R.B., dos Santos T.B., Vieira L.G., Ferrarese M. de L., Ferrarese-Filho O., Donatti L., Boeger M.R., Petkowicz C.L. Heat stress causes alterations in the cell wall polymers and anatomy of coffee leaves (*Coffea arabica* L.) // Carbohydrate Polymers. 2013. V. 93. P. 135–143. doi: 10.1016/j.carbpol.2012.05.015.
15. Moussa H.R., Abdel Aziz S.M. Comparative response of drought tolerant and drought sensitive maize genotypes to water stress // Australian Journal of Crop Science. 2008. No. 1. P. 31–36.
16. Sharp R.E., Poroyko V., Hejlek L.G., Spollen W.G., Springer G.K., Bohnert H.J., Nguyen H.T. Root growth maintenance during water deficits: physiology to function algenomics // Journal of Experimental Botany. 2004. V. 55. P. 2343–2351. doi: 10.1093/jxb/erh276.
17. Patra M., Bhowmik N., Bandopadhyay B., Sharma A. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance // Environmental and Experimental Botany. 2004. V. 52. No. 3. P. 199–223. doi:10.1016/j.envexpbot.2004.02.009.
18. Manara A. Plant responses to heavy metal toxicity // Plants and heavy metals / Ed. A. Furini. Springer, Dordrecht, Netherlands. 2012. P. 27–53. doi: 10.1007/978-94-007-4441-7\_2.
19. 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. V. 2. No. 9. P. 362–368. http://dx.doi.org/10.1155/2015/756120.
20. Viehweger K. How plants cope with heavy metals // Botanical Studies. 2014. V. 55. No. 35. P. 1–12. doi: 10.1186/1999-3110-55-35
21. Sukiasyan A., Kirakosyan A., Tadevosyan A., Aslikyan M., Gharajyan K. Peculiarities of accumulation of some heavy metals on the chain of water soil plant // International Journal of Advanced Engineering and Management Research. 2017. V. 2. No. 5. P. 1534–1541.