

УДК 582.4:504.054:574.3

С.С. АЙДОСОВА, К.С. САГЫНДЫК

ПРИМЕНЕНИЕ *ECHIMUM VULGARE L.* В ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

(Казахский национальный университет им. аль-Фараби)

Приведены результаты исследований *Echium vulgare L.*, произрастающего на производственных территориях г. Усть-Каменогорска Восточно-Казахстанской области. Установлены толерантность к действию тяжелых металлов и аккумулирующие свойства *Echium vulgare L.*, благодаря которым это растение может быть использовано в естественной фиторемедиации загрязненных регионов.

Биоразнообразие широко рассматривается как важный источник очистки экосистем от загрязнения тяжелыми металлами. Микроорганизмы, включая микоризные и немикоризные грибы, сельскохозяйственные, декоративные и дикорастущие растения, которые аккумулируют тяжелые металлы, тестируются как в лабораторных, так и в полевых условиях для очищения окружающей среды от металлосодержащих субстратов. На сегодняшний день известно около 400 растений, способных аккумулировать металлы [1].

Растения, способные аккумулировать металлы, имеют огромный потенциал в их применении для очистки и восстановления окружающей среды от тяжелых металлов. По всему миру ведутся исследования по выявлению аккумулирующих свойств различных растений. Известно, что огромный фиторемедиационный потенциал в выборочном накоплении марганца имеют лаконос американский (*Phytolacca americana*) [2], мелколепестник канадский (*Conyza canadensis*), *Gnaphalium affine* [3], хрома – Леерсия шеститычинковая, или рисовая трава (*Leersia hexandra*) [4], ртути – шандра обыкновенная (*Martubium vulgare*), щавель (*Rumex induratus*) [5], эйхорния или водяной гиацинт (*Eichornia crassipes*), пистия телорезовидная (*Pistia stratiotes*), камыш Табернмонта (*Scirpus tabernaemontani*), колоказия древняя (*Colocasia esculenta*) [6], в комплексной аккумуляции свинца, кадмия и цинка – горный салат (*Thlaspi caerulescens*) [7, 8] и паслен (*Solanum nigrum*) [9]. Токсичные остатки ракетного топлива – гептила или НДМГ аккумулируются щирицей хвостатой (*Amarantus caudatus L.*) [10].

Наряду с аккумуляцией и фиторемедиацией растения могут использоваться в качестве экспресс-индикаторов загрязнения окружающей среды. Например, виды полыни (*Artemisia terrae-albae*, *A. sieversiana*), ковыль (*Stipa capillata*) и овсяница (*Festuca valesiaca*) благодаря возникающим анатомическим изменениям могут применяться как биоиндикаторы радиоактивного загрязнения и загрязнения НДМГ при мониторинге окружающей среды [11–15]. Однако данные об использовании анатомических изменений в качестве индикаторных признаков при неблагоприятном воздействии тяжелых металлов по Восточному Казахстану отсутствуют.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований были выбраны два доминантных вида растений – синяк обыкновенный (*Echium vulgare L.*) и молочай мелкоплодный (*Euphorbia microcarpa Prokh.*), произрастающих на производственных территориях г. Усть-Каменогорска. Растения были собраны с четырех точек, три из которых являются загрязненными участками:

1. Промышленный переезд AES «Усть-Каменогорская ТЭЦ».
2. Ульбинский металлургический завод, ОАО «КазЦинк» (перекресток ул. Мызы и ул. Абая).
3. Свинцово-цинковый комбинат (перекресток ул. Бажова и ул. Гоголя).
4. контрольный участок в 60 км от города, с учетом климатических и почвенных условий.

Содержание тяжелых металлов в почвенных и растительных образцах определялось при дли-

не волны Pb – 283,3 нм, Cd – 228,8 нм, Cu – 324,7 нм и Zn – 213,8 нм в атомно-абсорбционном режиме с использованием спектральных ламп на атомно-абсорбционном спектрофотометре AAS-1N (Carl Zeise, Jena), по методике Прайса [16]. Сопоставление предельно-допустимых концентраций тяжелых металлов (свинца, цинка, меди и кадмия) в почве устанавливалось согласно нормативам предельно-допустимых концентраций вредных веществ РК [17] (табл. 1). Коэффициент биологической абсорбции определяли по формуле [18]:

$$K_{\text{ба}} = \frac{\text{содержание ТМ в растении}}{\text{содержание ТМ в почве}}$$

Для анатомических исследований были собраны на исследуемых участках и зафиксированы надземные и подземные вегетативные органы *Echium vulgare L.* Фиксацию материала и анатомические препараты готовили по общепринятым методикам М. Л. Прозиной (1960), А. И. Пермякова (1988), Р. П. Барыкиной и др. (2001, 2004) [19–21]. Толщина анатомических срезов 10–15 мкм. Для количественного анализа измерены анатомические параметры с помощью программы А. Черниговского PhotoM 1.31. Статистическая обработка морфометрических показателей

проводилась по методике Лакина Г.Ф. [22] и с помощью программы MS Excel. Микрофотографии сделаны на микроскопе Leica (увеличение x50, x100).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Echium vulgare L.Sp.pl. – Сиянок обыкновенный (Ранник синий) – Сем. Бурачниковые. Двулетник. 30–100 см выс. Покров длинными отстоящими щетинистыми волосками, с примесью мелких прилегающих; стебли прямостоячие, крепкие, коротковетвистые; цветки сидячие, расположены на коротких боковых веточках, выходящих из верхней части стебля и образующих узкое метельчатое соцветие; венчик сине-фиолетовый или ярко-синий, при расцветании розовато-красный; орешки серые, горбатые, с несколько выраженными выростами. Растет на пустырях и у дорог.

При изучении содержания тяжелых металлов в надземной и подземной частях данного вида, выявлено, что сиянок обыкновенный является уникальным биоаккумулятором свинца, цинка, меди и кадмия (табл. 2). При этом коэффициент биологической абсорбции для свинца доходит до 17,51, для цинка – 14, для кадмия – 17,52 и для

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в отобранных точках исследования

Точка	Pb		Zn		Cu		Cd	
	Содержание, мг/кг	Превышение ПДК	Содержание, мг/кг	Превышение ПДК	Содержание, мг/кг	Превышение ПДК	Содержание, мг/кг	Превышение ПДК
1	199,21	6,2	730,71	31,8	52,36	1,8	5,71	11,4
2	671,73	21	2315,81	100,7	87,42	3	14,87	30
3	294,14	9,2	1192,73	51,9	65,05	2,2	3,07	6
4 (контроль)	17,05	0,5	12,62	0,5	19,04	0,7	0,17	0,3

Таблица 2. Содержание (мг/кг) и коэффициенты биологической абсорбции тяжелых металлов в *Euphorbia microsarga* и *Echium vulgare*

Участок	Часть растения	Pb		Zn		Cd		Cu	
		Содержание	$K_{\text{ба}}$	Содержание	$K_{\text{ба}}$	Содержание	$K_{\text{ба}}$	Содержание	$K_{\text{ба}}$
1	Надземная	2748,24	13,79	10812,13	14,80	40,89	7,16	611,42	11,68
	Подземная	61,09	0,31	2742,07	3,75	3,96	0,69	231,25	4,42
2	Надземная	3155,56	4,69	10339,74	4,46	54,24	3,65	758,86	8,68
	Подземная	4612,10	6,87	3958,53	1,71	7,86	0,53	266,32	4,09
3	Надземная	5151,45	17,51	16698,73	14,0	53,78	17,52	2025,26	31,13
	Подземная	20,36	0,07	617,87	0,52	0,47	0,15	321,16	4,94
4	Надземная	30,38	1,78	34,86	2,76	0,65	3,82	28,11	1,48
	Подземная	10,87	0,64	37,22	2,95	0,22	1,29	22,59	1,19

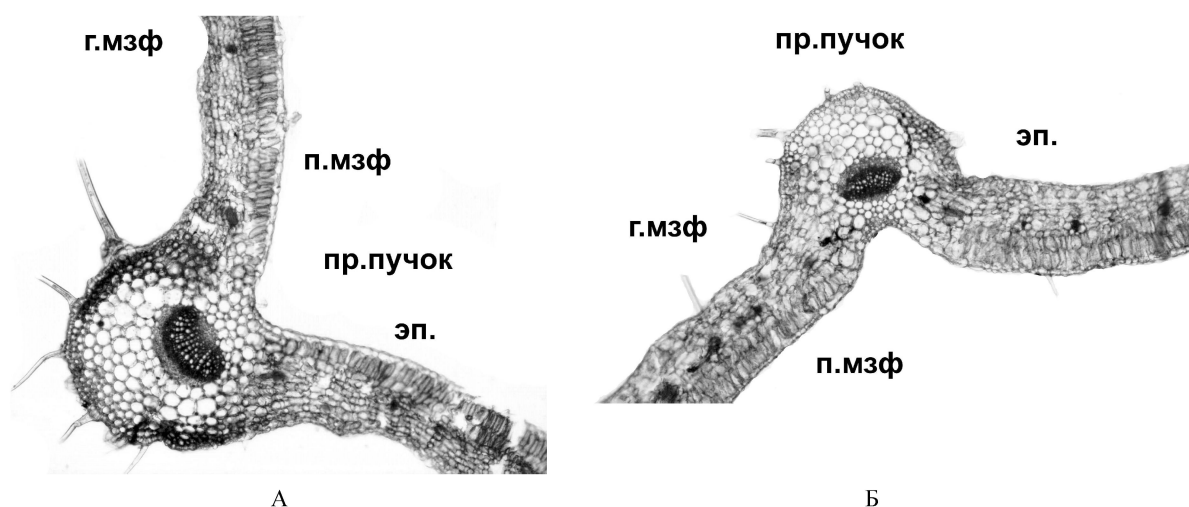


Рис. 1. Поперечный срез листовой пластинки *Echium vulgare*. Ув. x 50. А – контроль, Б – загрязненный участок (обозначения: эп. – эпидермис, п.мзф – палисадный мезофилл, г.мзф – губчатый мезофилл, пр. пучок – проводящий пучок)

меди – 31,13. Максимальное значение аккумуляции для всех металлов у *Echium vulgare* L. наблюдалось при среднем загрязнении почвы (участок 3).

Анатомические особенности *Echium vulgare* L.

Лист снаружи покрыт эпидермисом. Клетки эпидермиса плотно сомкнуты, без межклетников. Опушение листа представлено одноклеточными волосками. Мезофилл дифференцирован на палисадный и губчатый. Двухрядный, плотно сомкнутый палисадный мезофилл расположен на верхней, адаксиальной стороне листовой пластинки. На нижней, абаксиальной стороне размещен губчатый мезофилл с межклетниками. Закрытые коллатеральные сосудисто-волокнистые пучки пронизывают мезофилл листа. Проводящий пучок имеет паренхимную обкладку (рис.1).

На загрязненных участках наблюдается увеличение толщины столбчатого и губчатого мезофиллов и уменьшение площади проводящих пучков и ксилемных сосудов. Количественные

показатели толщины верхнего и нижнего эпидермисов увеличиваются на участках 1 и 3, и уменьшаются на сильно загрязненном участке 2. Иная чувствительность отмечается у ксилемных сосудов к содержанию тяжелых металлов в почве, так как их площадь близка к контролю на слабо загрязненном участке 1, и резко уменьшается на участках 2 и 3 (табл. 3).

В анатомическом строении стебля *Echium vulgare* четко выражены эпидермис, первичная кора, центральный цилиндр. Наружные стенки эпидермальных клеток значительно толще боковых и внутренних, с одноклеточными волосками. Первичная кора состоит из крупных паренхимных клеток с межклетниками. Паренхимные клетки прилежащего к склеренхимному кольцу слоя слабо вытянуты в тангентальном направлении и плотно примыкают друг к другу. Склеренхимное кольцо охватывает тесно расположенные открытые коллатеральные проводящие пучки. Сердцевина стебля выполнена крупными паренхимными клетками (рис. 2).

Таблица 3. Анатомические особенности листовой пластинки

Участок	Толщина эпидермиса, мкм		Толщина мезофилла, мкм		Площадь паренхимных клеток, $\times 10^{-3} \text{мм}^2$	Площадь ксилемных сосудов, $\times 10^{-3} \text{мм}^2$
	верхнего	нижнего	столбчатого	губчатого		
1	99,96 ± 0,53	101,26 ± 0,04	401,42 ± 0,26	511,07 ± 0,88	406,06 ± 1,64	1,35 ± 0,26
2	71,78 ± 0,03	61,94 ± 0,19	365,83 ± 0,16	407,83 ± 0,35	256,56 ± 0,65	0,47 ± 1,56
3	81,31 ± 1,42	81,79 ± 0,21	328,85 ± 1,29	438,89 ± 1,17	241,94 ± 0,73	0,71 ± 0,78
4 (контроль)	78,44 ± 1,57	75,36 ± 0,15	347,42 ± 0,77	388,82 ± 0,29	546,98 ± 1,59	1,14 ± 0,43

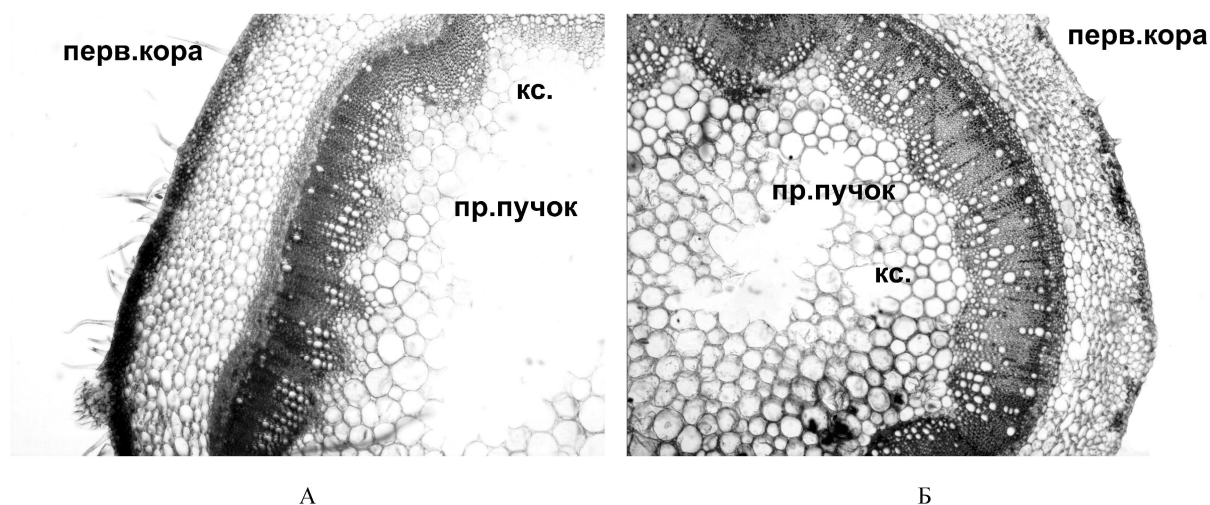


Рис. 2. Поперечный срез стебля *Echium vulgare*. Увел. x 50. А – контроль, Б – загрязненный участок (обозначения: перв. кора – первичная кора, пр. пучок – проводящий пучок, кс. – ксилема)

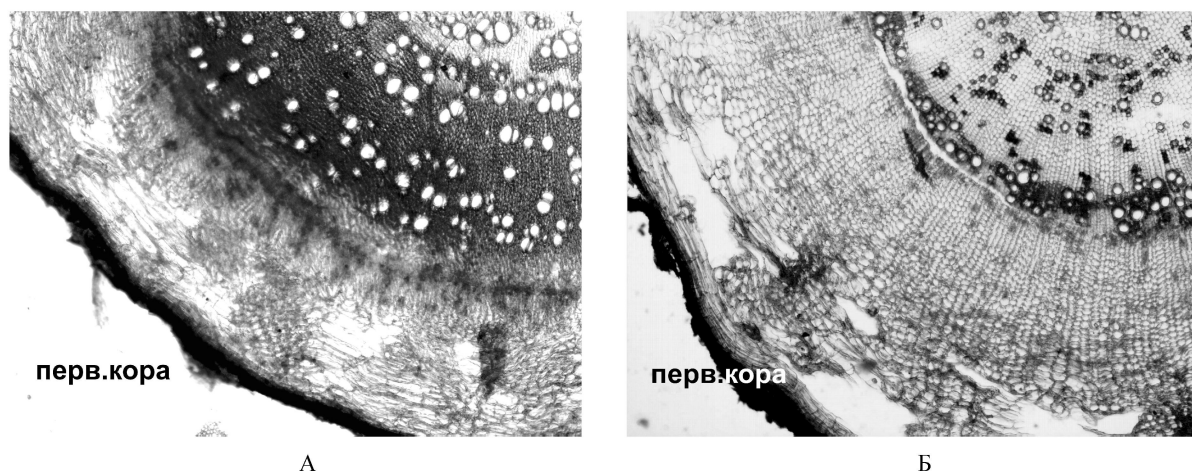


Рис. 3. Поперечный срез корня *Echium vulgare*. увел. X 50
А – контроль, Б – загрязненный участок (обозначения: перв. кора – первичная кора)

При загрязнении почвы тяжелыми металлами в анатомической структуре стебля наблюдалось уменьшение толщины первичной коры и хлоренхимной ткани. Слабое загрязнение стимулирует увеличение площади паренхимных клеток и ксилемных сосудов (табл.4).

Корень вторичного строения, снаружи покрыт перидермой. Перидермальные клетки уплощен-

ные. Субэпидермальный слой клеток первичной коры с хорошо выраженными межклетниками. В центральном цилиндре ксилемные сосуды расположены радиально. Радиальные лучи, состоящие из 2-4 рядов паренхимных клеток, в первичной коре расширяются (рис. 3).

На слабо загрязненном участке 1 в анатомической структуре корня происходит уменьшение

Таблица 4. Анатомические особенности стебля *Echium vulgare*

Участок	Толщина, мкм			Площадь проводящего пучка, $\times 10^{-3} \text{мм}^2$	Площадь ксилемных сосудов, $\times 10^{-3} \text{мм}^2$
	эпидермиса	первичной коры	хлоренхимы		
1	$44,73 \pm 1,73$	$973,32 \pm 0,19$	$119,11 \pm 1,26$	$101,48 \pm 0,69$	$6,82 \pm 0,61$
2	$55,85 \pm 0,74$	$1148,08 \pm 1,05$	$159,07 \pm 0,31$	$58,88 \pm 0,73$	$4,73 \pm 0,05$
3	$64,67 \pm 1,13$	$1038,25 \pm 0,01$	$141,13 \pm 0,24$	$55,97 \pm 1,51$	$6,33 \pm 0,72$
4 (контроль)	$48,49 \pm 1,79$	$1217,27 \pm 1,98$	$161,92 \pm 1,07$	$56,56 \pm 1,21$	$4,71 \pm 0,91$

Таблица 5. Анатомические особенности корня *Echium vulgare*

Участок	Толщина, мкм		Площадь ксилемных сосудов, $\times 10^{-3} \text{мм}^2$
	Перидермы	Первичной коры	
1	373,32 ± 0,68	1720,83 ± 0,39	27,63 ± 0,44
2	422,34 ± 0,15	2450,91 ± 1,49	13,11 ± 1,02
3	576,58 ± 1,38	3386,67 ± 0,08	6,85 ± 1,46
4	400,54 ± 0,87	1837,78 ± 0,55	16,03 ± 0,64

толщины перидермы и первичной коры и резкое увеличение площади ксилемных сосудов, тогда как с повышением степени загрязненности почвы на участках 2 и 3 отмечаются рост толщины перидермы и первичной коры и уменьшение площади ксилемных сосудов (табл.5).

Таким образом, в результате исследований было установлено, что синяк обыкновенный (*Echium vulgare*) наряду с незначительными анатомическими изменениями на загрязненных тяжелыми металлами территориях проявляет универсальные аккумулирующие свойства, что, в свою очередь, может найти широкое применение в фиторемедиации экологически неблагоприятных регионов Казахстана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Prasad M.N.V, Freitas H.M. Metal hyperaccumulation in plants – Biodiversity prospecting for phytoremediation technology // *Electronic Journal of Biotechnology*. 2003. V. 6, N3. Issue of December 15. P. 276-321.
2. Yuan Min, Tie boqing, Tang Meizhen and Isao Aoyama. Accumulation and uptake of manganese in a hyperaccumulator *Phytolacca Americana*. // *Minerals Engineering*. 2007. V. 20. Issue 2. February. P. 188-190.
3. Yun-Guo LIU, Hui-Zhi ZHANG, Guang-Ming ZENG, Bao-Rong HUANG, Xin LI Heavy. Metal Accumulation in Plants on Mn Mine Tailings, Pedosphere. 2006. V. 16. Issue 1. February. P. 131-136.
4. Xue-Hong Zhang, Jie Liu, Hai-Tao Huang, Jun Chen, Yi-Nian Zhu, Dun-Qiu Wang. Chromium accumulation by the hyperaccumulator plant *Leersia hexandra* Swartz. *Chemosphere*. 2007. <http://www.sciencedirect.com/science>
5. Moreno-Jimenez E., R. Gamarra, R.O. Carpena-Ruiz, R. Millan, J.M. Penalosa, E. Esteban. Mercury bioaccumulation and phytotoxicity in two wild plant species of Almaden area. *Chemosphere*. 2006. V. 63. Issue 11. June. P. 1969-1973.
6. Kathleen Skinner, Nicole Wright, Emily Porter-Goff. Mercury uptake and accumulation by four species of aquatic plants // *Environmental Pollution*. 2007. V. 145. Issue 1. January. P. 234-237.
7. Kirkham M.B. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. *Geoderma*. 2006. V. 137. Issues 1-2. 31 December. P. 19-32.
8. Junta Yanai, Fang-Jie Zhao, Steve P. McGrath, Takashi Kosaki. Effect of soil characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Environmental Pollution*. 2006. V. 139. Issue 1. January. P. 167-175.
9. Shuhe Wei, Qixing Zhou, Pavel V. Koval. Flowering stage characteristics of cadmium hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and their significance to phytoremediation. *Science of The Total Environment*. 2006. V. 369. Issues 1-3. 1 October. P. 441-446.
10. Айдосова С.С., Ахметова А.Б. Изменения морфологической структуры *Amarantus caudatus* L. под воздействием различных концентраций 1,1-ДМГ в почве // *Вестник КазНУ. Сер. биол.* 2005. № 2(25). С.36-39.
11. Айдосова С.С. Анатомическая структура растений в условиях техногенного загрязнения. Доклады НАН РК. 2004. №1. С.95-105.
12. Айдосова С.С. Мухитдинов Н.М., Ахтаева Н.З., Артемьев О.И. Кадырова Н.Ж. Влияние радиационного излучения на морфо-анатомическую структуру *Spiraea hypericifolia* L. Доклады НАН РК. 2004. №2. С.56-66.
13. Savinkov A., Semioshkina N., B.J. Howard, G. Voigt. Radiostromium uptake by plants from different soil types in Kazakhstan. *Science of The Total Environment*. 2007. V. 373. Issue 1. 1 February. P. 324-33.
14. Айдосова С.С., Сағындык К.С. Ұзаққа созылған иондаушы сәулелену жағдайындағы *Agropyron cristatum* (L.) Gaerth өсімдігінің жерүсті мүшелерінің морфологиялық-анатомиялық ерекшеліктері // Байтеновские чтения-2. Тр. III Международ. конф. Алматы, 2006 г. С.128-130.
15. Айдосова С.С., Сағындык К.С. Возможности применения биологических показателей семян *Agropyron cristatum* (L.) Gaerth. и *Festuca valesiaca* Gaudin. в качестве биоиндикационных признаков ионизирующей радиации // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Мат-лы. IV международ. научно-практ. конф. Семей, 2006. Т. 2. С. 414-417.
16. Прайс В. Аналитическая атомно-абсорбционная спектроскопия. М.: Мир, 1976. 235 с.
17. Совместный приказ Министра здравоохранения РК от 30 января 2004 года №99 и министра охраны окружающей среды РК от 27 января 2004 г. №21-п «Об утверждении нормативов предельно-допустимых концентраций вредных веществ, вредных микроорганизмов и других биологических веществ, загрязняющих почву».
18. Prasad M.N.V., Kenneth S Sajwan, Ravi Naidu. Trace Elements in the Environment: Biogeochemistry, Biotechnology, and Bioremediation. P. 744.
19. Прозина М.Л. Ботаническая микротехника. М., 1960. 208 с.
20. Пермяков М. Микротехника.-М.,1988,-208с.
21. Барыкина Р. П. Справочник по ботанической микротехнике. Основы и методы. М.: Изд-во МГУ, 2004. 312с.
22. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа. 1990. 352 с.