

УДК 574.2

**МЫШЬЯК В РАСТЕНИЯХ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ  
ЛАНДШАФТОВ ШЕРЛОВОГОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА  
ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ****Солодухина М.А.***ФГБУН Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения  
Российской академии наук, Чита, e-mail: mabn@ya.ru*

Изучены содержание мышьяка (As) и особенности его биологического захвата растениями, произрастающими на территории рудного района Забайкальского края. Концентрация As в разных растениях варьирует достаточно широко: от значений чувствительности анализа – 0,001 до 847 мг/кг. Травянистые и кустарниковые растения более интенсивно вовлекают As в биологический круговорот, чем древесно-кустарниковые. Явными концентраторами As являются – полынь Гмелина, пятилистник кустарниковый, пятилистник мелколистный, лапчатка скученная, таран узколистный, подмаренник настоящий, мак голостебельный и дендрантема Завадского.

**Ключевые слова:** мышьяк, биологический захват, растения**ARSENIC IN PLANTS OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC LANDSCAPES  
OF CHELOVECHESKOGO ORE DISTRICT OF THE ZABAİKALSKY KRAI****Soloduhina M.A.***Federal state budget institution of science, Institute of Nature Recourses, Ecology and Cryology,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Chita, e-mail: mabn@ya.ru*

Examine the contents of arsenic and especially its biological capture by plants growing on the territory of the ore district of the Zabaikalsky Krai. Concentration in different plants vary widely: of 0.001-847 mg/kg. Herbaceous and shrubby plants more intensively involved As in the biological cycle than woody shrub. Clear hub arsenic are *Artemisia gmelinii* Weber ex Stechm., *Pentaphylloides fruticosa* (L.) O. Schwarz, *Pentaphylloides parvifolia* (Fischer ex Lehm.) Sojak, *Potentilla acervata* Sojak *Aconogonon angustifolium* Pallas, *Gallium verum* L., *Papaver nudicaule* L., *Dendranthemum zawadskii* (Herb.) Tzvelev.

**Keywords:** arsenic, biological capture plants

Мышьяк (As) – канцерогенный химический элемент, при длительном употреблении которого могут возникнуть опасные заболевания (кератоз, арсеникоз, онкологические, кожные и другие) [9]. По данным Всемирной организации здравоохранения, более 100 млн. человек из разных стран мира подвержены влиянию опасной концентрации As в грунтовой воде вследствие её природного загрязнения. К таким странам относятся Индия, Бангладеш, Китай, Таиланд, Вьетнам, Тайвань, США, Мексика, Чили, Аргентина, Боливия, Сальвадор, Никарагуа, Перу, Венгрия, Финляндия и другие. Всемирная организация здравоохранения активно занимается вопросами изучения влияния As на здоровье человека. За это время ученые установили причины возникновения «мышьякового кризиса», открыли способы контроля и очистки питьевой воды от избытка As, доказали его канцерогенность. Тем не менее, проблема мышьякового загрязнения окружающей среды остается актуальной. Имеются сведения о его высоком содержании в основных продуктах питания в странах юго-восточной Азии [8]. Биогеохимические особенности поведения As изучены недостаточно.

В России, согласно ГОСТу 17.4.1.02-83, As относится к 1 классу опасности. Известно, что он является попутным компонентом в рудах золоторудных, полиметаллических, олово-полиметаллических и других месторождений Забайкалья.

Шерловогорский рудный район Забайкальского края выделен как мышьяковая биогеохимическая провинция [5]. Поскольку растения – часть трофической цепи, конечным звеном которой является человек, изучение содержания As в них – одно из важных направлений в системе гигиенического анализа качества окружающей среды.

Известно, что токсическое действие As связывают с его способностью конкурировать с жизненно важными элементами, например, с железом или фосфором. Полагают, что существует три механизма поступления элементов в растения. Два из них – через корневую систему, а один – адсорбция листьями [1]. Доступность As в почве для растений ограничена наличием в ней арсенат-ионов, связанных с железом, алюминием, кальцием и магнием в твердой фазе [2].

Растительный кларк As составляет 0,1 мг/кг [7], 0,2 мг/кг [1].

Концентрация As в растениях на незагрязненных почвах, по данным [2] 0,01–

5 мг/кг, по [4] она варьирует в пределах 0,009–1,5 мг/кг.

Растения по-разному поглощают As, одни более интенсивно (дугласия), другие менее [4]. Известно, что зеленые листовые овощи содержат больше As по сравнению с фруктами [2].

Полагают, что концентрация As в растении, не влияющая на его нормальный рост и развитие, составляет 1–1,7 мг/кг, токсичная (избыточная) – 5–20 мг/кг [4]. Избыточные уровни его содержания в растениях зафиксированы в разных странах мира и составляют от 1,2 до 8200 мг/кг в зависимости от источника загрязнения и вида растения [4].

В рудных районах на обогащенных As почвах, на сельскохозяйственных землях, обработанных мышьяксодержащими пестицидами, в центрах развития металлообработки промышленностью его содержание в растениях выше (до нескольких тысяч раз), чем в природных ландшафтах. Достоверно известно, что его повышенная (критическая) концентрация в листьях сельскохозяйственных культур негативно влияет на урожайность. Неизученными остаются вопросы, связанные с его биохимической ролью. Не установлены толерантные виды растений к избытку As, а также мышьякофилы и мышьякофобы. Неизвестны особенности его биологической миграции и распределения в органах растений.

**Целью исследования** является изучение содержания As в растениях, произрастающих в разных геохимических условиях на территории рудного района Забайкальского края и выявление особенностей его биологического захвата ими.

#### **Материалы и методы исследования**

В основу данной работы положены материалы, собранные автором и ее коллегами в течение полевых сезонов 2002–2012 годов на территории Шерловогорского рудного района в пределах природных и антропогенных ландшафтов (природный – фоновый участок, природно-техногенный – месторождения, карьерно-отвалный – техногенные массивы). Описание структуры ландшафтов приведено в публикации [6]. Участок природного, антропогенно не измененного ландшафта был выбран как фоновый, за пределами месторождений, но в рамках Шерловогорского рудного района.

Объединенные пробы доминантных видов растений отбирали из каждого яруса. Ими были полынь Гмелина (*Artemisia gmelinii* Weber ex Stechm.), полынь холодная (*Artemisia frigida* Willd.), таран (горец) узколистный (*Aconogonon angustifolium* Pallas), подмаренник настоящий (*Gallium verum* L.), мак голостебельный (*Papaver nudicaule* L.), лапчатка скученная (*Potentilla acervata* Sojak), пятилистник кустарниковый (*Pentaphylloides fruticosa* (L.) O. Schwarz), пятилистник мелколистный (*Pentaphylloides parvifolia*

(Fischer ex Lehm.) Sojak), дендрантема Завадского (*Dendranthemum zawadskii* (Herb.) Tzvelev), Иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.); древесно-кустарниковые растения: боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguinea* Pallas), береза повислая (*Betula pendula* Roth), тополь душистый (*Populus suaveolens* Fischer). Каждая проба растений формировалась из 10–20 экземпляров с площади 10x10 м. Растения промывали сначала проточной водой, а затем дистиллированной и высушивали до воздушно-сухого состояния.

Растения не озоляли, а непосредственно переводили в раствор. Разложение измельченного материала в смеси кислот и перекиси водорода позволило свести к минимуму потери As. Анализ растений проведен методом масс-спектрометрии индуктивно связанной плазмой на приборе ICP-MS Elan DRC II PerkinElmer (США), в Институте тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН. Аналитики – В.Е. Зазулина, А.Ю. Лушникова, Д.В. Авдеев и Е.М. Голубева.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

##### **As в растениях природного ландшафта**

На фоновом участке было отобрано и изучено 76 проб растений, которые включают 1140 экземпляров.

Содержание As в растениях фонового участка варьирует незначительно: от значений ниже порога чувствительности прибора до 6,01 мг/кг (сережки березы) (табл. 1), а в органах изученных растений в большинстве случаев его концентрации в несколько раз превышают кларк.

Лишь в одном случае из 76 его содержание чуть выше нижней границы токсичной концентрации, соответствующей 6,01 мг/кг в сережках березы плосколистной. Но и эта величина не является критической для растений. Среднее же содержание As в растениях фонового участка не превышает 1 мг/кг, поэтому такую его концентрацию в растениях можно принять как эталонные для Шерловогорского рудного района.

Невысокое его содержание и незначительный размах значений хорошо согласуется с выбором этого участка в качестве фонового.

Исходя из данных, представленных на рис. 1, следует, что в разных видах растений фонового участка наблюдаются разные тенденции его захвата.

Интересно, что генеративные органы боярышника и березы концентрируют больше As, чем вегетативные органы. Это также характерно и для подмаренника настоящего. На основании вышеизложенного можно сделать некий предварительный вывод о его необходимости для участия в процессах жизнедеятельности растений. Но в этих случаях для боярышника исследованы не семена, а плоды в целом, так же как и для березы

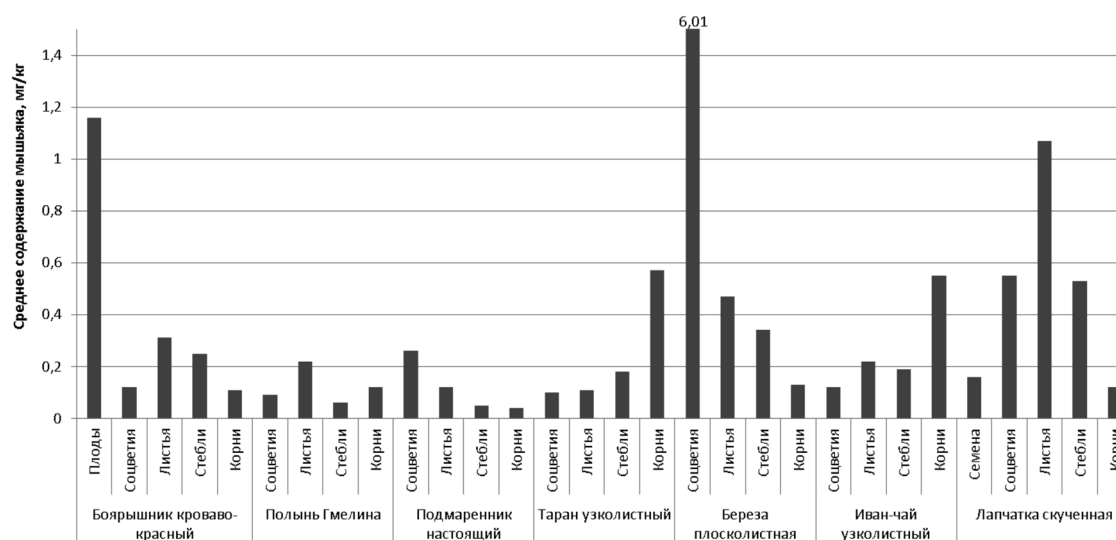
сережки, не являющиеся семенами. Поэтому нельзя однозначно говорить о некоем отличии этих видов от других, для которых выявлено минимальное содержание As в семенах.

**Таблица 1**

Содержание As в растениях фонового участка, мг/кг

Название растения	Статистические характеристики					
	x	Min	Max	$\sigma$	V, %	n
Боярышник кроваво-красный	0,19	$\geq 0,001$	0,65	0,17	95	225
Подмаренник настоящий	0,19	$\geq 0,001$	0,32	0,11	58	105
Таран узколистный	0,26	0,001	1,3	0,33	127	195
Иван-чай узколистный	0,28	0,12	0,55	0,16	57	90
Полынь Гмелина	0,31	$\geq 0,001$	1,38	0,44	143	150
Лапчатка скученная	0,53	$\geq 0,001$	1,19	0,42	80	135
Береза повислая	0,68	0,01	6,01	1,46	215	240
Всего экземпляров						1140

**П р и м е ч а н и я :** x – среднее содержание, min- минимум, max – максимум,  $\sigma$  – стандартное отклонение, V – коэффициент вариации, n – число экземпляров растений в выборке. Растения расположены в порядке возрастания среднего содержания As.



*Рис. 1. Мышьяк в органах растений фонового участка*

Ряд возрастания концентрации As в органах растений для семи изученных видов выглядит следующим образом.

1. Боярышник кроваво-красный: корень → соцветия → стебель → лист → плоды
2. Полынь Гмелина: стебель → соцветия → корень → лист
3. Подмаренник настоящий и береза повислая: корень → стебель → лист → соцветия
4. Лапчатка скученная: корень → семена → стебель → соцветия → лист
5. Иван-чай узколистный: соцветия → лист → стебель → корень
6. Таран узколистный: соцветия → лист → стебель → корень

Таким образом, изученные растения можно разделить на две группы. Первая группа с максимумом As в корне: Иван-чай и таран узколистный, вторая с максимумом As в надземных частях растений: боярышник, подмаренник, береза, лапчатка и полынь Гмелина.

**Мышьяк в растениях антропогенных ландшафтов**

**Мышьяк в растениях природно-техногенного ландшафта.** В растениях, произрастающих на территории природно-техногенного ландшафта, концентрация As варьирует довольно широко: от значений ниже 0,001 до 847,29 мг/кг (табл. 2).

Таблица 2

Содержание As в растениях природно-техногенного ландшафта, мг/кг

Название растения	Статистические характеристики					
	x	Min	Max	$\sigma$	V, %	n
Береза повислая	1,58	$\geq 0,001$	6,07	1,45	92	420
Боярышник кроваво-красный	3,07	$\geq 0,001$	16,36	4,43	144	360
Лапчатка скученная	10,25	0,02	60,31	14,3	140	660
Полынь Гмелина	11,1	0,16	138,51	22,09	199	930
Дендрантема Завадского	11,25	2	45,25	11,65	104	225
Пятилистник кустарниковый	15,52	3,24	37,78	19,31	124	45
Полынь холодная	23,26	1,34	92,29	30,63	132	120
Подмаренник настоящий	25,39	1,18	145,39	34,92	138	315
Таран узколистный	26,17	0,15	847,29	100,05	382	1095
Пятилистник мелколистный	26,72	1,28	68,96	26,23	98	120
Мак голостебельный	30,27	0,32	161,27	42,34	140	390
Всего экземпляров						4680

Примечания:  $\bar{x}$  – среднее содержание, min – минимум, max – максимум,  $\sigma$  – стандартное отклонение, V – коэффициент вариации, n – число экземпляров растений в выборке. Растения расположены в порядке возрастания среднего содержания As.

Среднее содержание As в растениях этого ландшафта в 2,7 раза превышает таковое в растениях карьерно-отвального и почти в 28 раз содержание в растениях природного ландшафтов. Максимум зафиксирован в корне тарана узколистного и составляет 847,29 мг/кг, минимум – в плодах и в соцветиях боярышника кроваво-красного ( $\geq 0,001$ ).

Исходя из данных, представленных в табл. 2, следует, что его среднее содержание в древесно-кустарниковых растениях находится в пределах допустимых значений. Береза и боярышник в среднем концентрируют As умеренно, не превышая нижней границы токсичной концентрации, даже максимальное содержание не является критическим. Тем не менее, у травянистых растений выявлена такая его концентрация, которая может быть токсичной и критической для них. Этот факт дает основания полагать, что указанные травянистые растения, произрастающие в условиях повышенного содержания мышьяка в почвах, являются безбарьерными видами по отношению к нему. Среднее содержание As в них превышает кларк в 55 раз и более. В полыни холодной, подмареннике, таране, пятилистнике мелколистном и маке среднее содержание превышает критическую концентрацию. Более того, визуально признаков токсического отравления растений, некрозов обнаружено не было. Такая особенность изученных растений может указывать на высокую степень толерантности по отношению к его высокому содержанию.

**Мышьяк в растениях карьерно-отвального ландшафта.** Содержание As

в растениях этого ландшафта варьируется от значений ниже чувствительности анализа до 47,65 мг/кг (табл. 3).

Максимальное содержание превышает кларк в 238 раз, а мировую фоновую концентрацию – в 9,5. Среднее же содержание As в растениях техногенных массивов для шести изученных видов (боярышник, береза, тополь, Иван-чай, полынь Гмелина, дендрантема) из десяти, не превышает мировую фоновую концентрацию. Только в четырех видах высших растений установлено такое его содержание, которое превышает мировой фон (лапчатка, подмаренник, мак и таран), но максимум в 3 раза (табл. 3).

Характер захвата As разными видами растений техногенных массивов подобен таковому в природно-техногенном ландшафте. Ряд возрастных среднего содержания As в разных видах растений в этих ландшафтах схож. Разница заметна лишь в концентрации. Так боярышник, растущий на поверхности техногенных массивов, содержит в 5,7 раз меньше As, чем растущий на месторождении, лапчатка в 2 раза, полынь Гмелина и дендрантема в 2, подмаренник в 3,5, таран в 1,6, мак в 3,1 раза меньше соответственно (рис. 2). Фактически все растения, за исключением березы, в хвостохранилище поглощают в несколько раз меньше As, чем в природно-техногенном ландшафте.

Береза, растущая на техноземах техногенных массивов, подобно березе, растущей на природных почвах, захватывает практически одинаковые концентрации As, что, возможно, связано с наличием у неё барьерных механизмов.

Таблица 3

Содержание As в растениях техногенных массивов, мг/кг

Название растения	Статистические характеристики					
	x	Min	Max	$\sigma$	V, %	n
Боярышник кроваво-красный	0,53	$\geq 0,001$	0,89	0,52	98	45
Иван-чай узколистый	1,21	0,39	3,2	1,33	110	60
Береза повислая	1,99	0,5	8,33	2,1	106	195
Тополь душистый	2,88	$\geq 0,001$	17,25	3,83	133	555
Полынь Гмелина	4,57	0,41	20,23	4,58	100	510
Дендрантема Завадского	4,96	0,69	22,2	5,99	121	180
Лапчатка скученная	5,13	$\geq 0,001$	25,25	7,02	137	210
Подмаренник настоящий	7,24	0,11	24,23	7,58	105	180
Мак голостебельный	9,71	0,84	47,65	15,75	162	120
Таран узколистый	15,72	5,63	38,39	13,63	87	90
Всего экземпляров						2145

Примечания: x – среднее содержание, min- минимум, max – максимум,  $\sigma$  – стандартное отклонение, V – коэффициент вариации, n – число экземпляров растений в выборке. Растения расположены в порядке возрастания среднего содержания As.

Травянистые растения, по-видимому, не обладают барьерностью по отношению к As, особенно мак и таран.

В целом у растений техногенных массивов не обнаружена способность к гипераккумуляции As, хотя в отдельных пробах наблюдалась его критическая концентрация.

Схожий характер захвата As разными видами растений антропогенных ландшафтов, с существенно различным его содержанием в питающей среде, указывает на следующую тенденцию. Захват и накопление As растениями определяется двумя факторами: наследственностью и формами его нахождения в питающей среде. Какой из них важнее, пока неизвестно. На первый фактор еще в 1985 г. обратил внимание

В.Б. Ильин: «Благодаря наследованию сохраняется специфичность элементного химического состава растительного вещества, которую следует рассматривать как результат эволюционно закрепленного приоритета в использовании одних ионов перед другими» [3, С. 34]. Среди факторов, влияющих на элементный состав растений, именно генетический контроль он считал наиболее важным. А.А. Титлянова (1972) при оценке долевого участия различных факторов в формировании элементного состава луговой растительности пришла к такому же выводу, однако добавила, что наряду с генетическим контролем, на химический состав растений влияет фаза развития и экологический фактор [3].

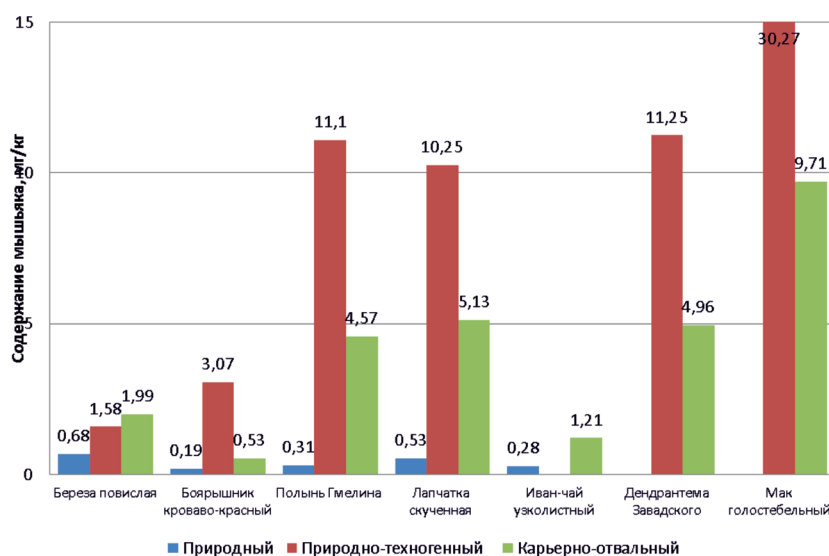


Рис. 2. Среднее содержание As в растениях Шерлогогорского рудного района

### Заключение

Выявлены существенные различия захвата As разными растениями. Травянистые и кустарниковые растения более интенсивно вовлекают As в биологический круговорот, чем древесно-кустарниковые. Из древесно-кустарниковых растений боярышник и береза не обладают гипераккумуляцией As, в отличие от кустарников: пятилистник мелколистный и пятилистник кустарниковый, полукустарника – полыни Гмелина, в которых обнаружена токсичная и критическая концентрация As. Явными концентраторами As являются изученные травянистые растения: лапчатка скученная, таран узколистный, подмаренник настоящий, мак голостебельный, дендрантема Завадского и полукустарник – полынь Гмелина. Эти растения целесообразно использовать как растения-индикаторы для экологического мониторинга территорий мышьяковых геохимических аномалий. Кроме этого необходимо провести санитарно-гигиеническую

оценку продуктов питания местного сельскохозяйственного производства.

### Список литературы

1. Брукс Р.Р. Биологические методы поисков полезных ископаемых: пер. с англ. М.: Недра, 1986. – 311 с.
2. Гамаюрова В.С. Мышьяк в экологии и биологии. – М.: Наука, 1993. – 208 с.
3. Ильин В.Б. Элементный химический состав растений. Новосибирск: Наука, 1985. – 128 с.
4. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
5. Солодухина М.А. Мышьяк в компонентах ландшафтов Шерловогорского рудного района: автореф. дис. канд. геогр. наук. Томск: ТГУ, 2012. – 20 с.
6. Солодухина М.А., Помазкова Н.В. Ландшафты Шерловогорского рудного района Забайкальского края // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 9. – С. 70–78.
7. Федорчук В.П. Минеральное сырье. Мышьяк: справочник. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. – 23 с.
8. D. Chandrasekharam Scenario of arsenic pollution in groundwater: West Bengal // Geology in China. – 2010. – Vol. 37. – № 3. – P. 712–722.
9. Yan ZHENG Mobilization of natural arsenic in groundwater: targeting low arsenic aquifers in high arsenic occurrence areas // Geology in China. 2010. – Vol. 37. – № 3. – P. 723–728.