

**Эколого-биогеохимическая оценка
элементного и биохимического состава растительности
антропогенно нарушенных экосистем
(на примере *Achillea millefolium* L.)**

А. И. СЫСО^{1,2}, Т. И. СИРОМЛЯ¹, М. А. МЯДЕЛЕЦ^{1,2}, А. С. ЧЕРЕВКО¹

¹ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090, Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 8/2

² Новосибирский государственный аграрный университет
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160
E-mail: syso@mail.ru

Статья поступила 02.10.15

Принята к печати 28.01.16

АННОТАЦИЯ

На загрязненных выбросами промышленности и транспорта территориях Новосибирской агломерации изучено и оценено по статистическим, гигиеническим и биогеохимическим критериям содержание 30 макро- и микроэлементов в почвах и в *Achillea millefolium* L. как в кормовом растении и аптечном сырье. Определены связи химических элементов в системе почва – растение между элементным и биохимическим составом *Achillea millefolium* L.

Ключевые слова: загрязнение окружающей среды, почвы, *Achillea millefolium* L., кормовые травы, лекарственные растения, макроэлементы, микроэлементы, биологически активные вещества, Новосибирская область.

Растения – это важнейший компонент биосферы и звено трофической цепи в биогеохимической миграции макро- и микроэлементов из горных пород и почв в животные организмы. Эволюционно для последних многие растения стали кормовыми и лекарственными, источниками жизненно важных минеральных и органических веществ. Поэтому здоровье и продуктивность животных, а также человека зависят от элементного и биохимического составов растений, как культурных, так и дикорастущих.

На минерально-биохимическую полноценность и экологическую безопасность растительной продукции влияют состав и свойства почв, уровень загрязнения окружающей среды и т. д. Одним из основных факторов загрязнения почв и растений наземных экосистем считаются техногенные атмосферные выбросы, способные разноситься на десятки и сотни метров от автомобильных дорог, десятки километров от промышленных городов и сотни километров от крупных промышленных агломераций [Методы..., 2010].

Из дикорастущих многолетних травянистых кормовых и лекарственных растений интерес представляет тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.). Он занимает третье место в рационах питания животных после бобовых и злаковых растений, относится к хорошо поедаемым и повышающим аппетит кормам, обладающим диетическими и лекарственными свойствами, способствующими увеличению надоев молока [Губанов, 1993].

Поскольку *Ach. millefolium* размножается семенами и корневищами, хорошо развивается на бедных, но не очень кислых почвах, не требователен к теплу и влаге, устойчив к избыточному увлажнению, любит открытые и солнечные места, выносит усиленный выпас, его широко используют при закладке многолетних пастбищ. В ранние фазы вегетации отличается высоким содержанием протеина (до 21,6 %), до цветения хорошо поедается всеми видами скота, используется как примесь к другим кормовым растениям [Прозорова, Черных, 2004].

Как лекарственное растение применяется в народной и научной медицине, препараты на основе тысячелистника используются в качестве кровоостанавливающих, бактерицидных, противовоспалительных, противоаллергических средств [Малачевская, 1961; Moloudizargari et al., 2014].

В связи с тем, что *Ach. millefolium* имеет евроазиатский ареал распространения и произрастает на значительной территории (от Исландии и севера Скандинавии до Гималаев и Монголии), вид активно исследуется как источник биологически активных веществ [Georgieva et al., 2015], при разработке фиторемедиационных технологий [Васильева, Брудастов, 2011], с целью повышения урожайности и качества получаемого сырья *Ach. millefolium* разрабатываются рекомендации по использованию удобрений [Тищенко, 2011].

Цель настоящей работы – исследование поведения химических элементов в системе почва – растение *Ach. millefolium* и оценка его элементного и биохимического составов, безопасности и качества как кормового и аптечного сырья, произрастающего в зоне антропогенного воздействия г. Новосибирска.

Объектами исследования являлись пробы почв (из слоя 0–20 см – основной зоны минерального питания) и растения *Ach. millefolium* (надземная часть, корни), собранные в фазу цветения. Образцы отбирались на пробных площадках в разных районах г. Новосибирска (Советский, Кировский, Октябрьский), в восточной части (Новосибирский, Колыванский, Искитимский и др. районы) Новосибирской обл. (НСО), входящих в состав Новосибирской агломерации.

Пробные площадки закладывались вдоль крупных автотрасс, в городских парках и скверах, на территории дачных обществ. На каждой площадке отбиралось не менее пяти индивидуальных проб почв и растений, из которых составлялась средняя проба. Всего отобрано по 27 образцов почв и растений, исследования выполнены в трех аналитических повторностях. Дополнительно проанализированы образцы аптечного сырья *Ach. millefolium* различных производителей.

Содержание физической глины (частиц менее 0,01 мм) определяли по ГОСТ 12536-79, потенциальную кислотность – $pH_{\text{сол}}$ – по ГОСТ 26483-85, подвижную форму химических элементов (ХЭ) в почвах – по РД 52.18.289-90. Определение общего количества ХЭ проводили методом атомно-эмиссионного спектрографического анализа с дуговым аргоновым двухструйным плазмотроном (в растениях – после сухого озelenения). Содержание ХЭ приведено в пересчете на абсолютно-сухое вещество.

Для оценки доступности ХЭ растениям из почвы рассчитывали их подвижность в почве, а также ряд биогеохимических коэффициентов.

В водно-спиртовых экстрактах, полученных по методу Г. И. Высочинной [2004] из надземной части растений, определялось количественное содержание фенольных соединений. Методом спектрофотометрии определено содержание флавонолов (в пересчете на рутин) [Беликов, Шрайбер, 1970] и дубильных веществ (в пересчете на танин) [Федосеева, 2005].

Количественное определение пигментов (хлорофилл *a* и *b*, каротиноиды в пересчете

на β -каротин) производилось в сухом растительном сырье спектрофотометрически без предварительного разделения в 100%-й ацетоновой вытяжке [Полевой, Максимова, 1978; Ермаков и др., 1987].

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью пакета программ SNEDECOR [Сорокин, 2009].

Проверка нормальности распределения исследуемых ХЭ проведена по критериям Уилка – Шапиро, Колмогорова – Смирнова, омега-квадрат, Кульбака, Джири. Проверка гипотез о равенстве дисперсий в нормально распределенных выборках проводилась по критериям Кокрена, Хартли, Бартлетта. При подтверждении гипотезы в дальнейшем для сравнительных оценок использовали критерий Стьюдента. При неравных дисперсиях, а также при аномальном распределении применяли непараметрические критерии Манна – Уитни, Вальда – Вольфовица, Колмогорова – Смирнова.

В таблицах использованы следующие обозначения: M – среднее арифметическое, SD – стандартное отклонение, Med – медиана, min – минимум, max – максимум, V – коэффициент вариации. На диаграммах размаха представлены медиана, верхний и нижний квартили, максимум и минимум, а также резко отличающиеся данные (“выбросы”).

Корреляционный анализ проводили с использованием коэффициента корреляции Пирсона (r) для нормально распределенных выборок, в остальных случаях использовали коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r_s).

Во всех процедурах статистического анализа критический уровень значимости p принимался равным 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изученные почвы в основном относились к двум разновидностям: супесчаные с нейтральной реакцией почвенной среды и легкосуглинистые с близкой к нейтральной реакцией среды. Легкий гранулометрический состав исследованных почв, вероятно, является причиной относительно низкого среднего валового содержания в них химических элементов, чем в целом в почвах восточной час-

ти НСО, имеющих преимущественно средне- и тяжелосуглинистый гранулометрический состав (табл. 1).

В супесчаных почвах обнаружено превышение ориентировочно-допустимой концентрации (ОДК) Ni и Zn по гигиеническим критериям ГН 2.1.7.2511-09. Причина данного факта видится не в техногенном загрязнении окружающей среды, а в региональной геохимической специфике изученной территории – естественном повышенном содержании этих элементов в почвах, а также низких значениях ОДК, не учитывающих подобные явления природы.

Антропогенное изменение почв в городах часто проявляется в искусственном облегчении их гранулометрического состава из-за обогащения песком, в случайных локальных загрязнениях веществами разного генезиса, что сказывается на гранулометрическом и элементном химическом составе почв. Этим мы объясняем отсутствие статистически значимой разницы между валовым содержанием всех исследованных ХЭ в супесчаных и легкосуглинистых почвах, хотя для естественных условий такие различия закономерны. Другое следствие указанного антропогенного изменения почв – высокое варьирование в почвах концентраций некоторых ХЭ и неподчинение их закону нормального распределения, что хорошо отражает диаграмма размаха содержания ХЭ относительно медианных значений (рис. 1).

При определении и оценке концентрации подвижной формы ХЭ в почвах также не выявлено статистически значимой разницы между почвами различного гранулометрического состава и экологически опасного загрязнения почв. Превышение ПДК Zn (23 мг/кг) (по ГН 2.1.7.2041-06) обнаружено только на одной пробной площадке в Советском р-не г. Новосибирска (33 мг/кг).

Отдельно следует отметить Инюшенский бор в Октябрьском р-не г. Новосибирска, где закладывались три пробных площадки. Его территория более 60 лет загрязнялась атмосферными выбросами Новосибирского оловянного комбината. В результате, в почвенном покрове бора накопились тяжелые металлы и мышьяк, а суммарное загрязнение ими почв (Zc) оказалось в диапазоне умерен-

Т а б л и ц а 1

Статистические показатели валового содержания химических элементов в почвах и коэффициентов их биологического поглощения ($n = 24$)

ХЭ	Содержание в почвах, мг/кг						A_x			
	HCO*	<i>M</i>	<i>SD</i>	min	max	<i>V</i> , %	Растения суши**	<i>Med</i>	min	max
Al	–	52 338	10 979	32 400	64 500	21	–	0,06	0,02	0,27
B	61,8	42,7	5,7	32,9	52,8	13	50,00	5,9	4,9	7,1
Ba	495	421	84	273	543	20	0,66	0,52	0,37	0,85
Be	2,06	2,04	0,24	1,61	2,43	12	0,80	0,26	0,24	0,31
Ca	–	31 585	24 462	8530	129 000	77	–	3,2	1,1	12,2
Cd	0,17	0,40	0,10	0,24	0,51	25	4,4	3,9	3,1	7,5
Co	13,8	11,1	2,6	5,4	15,1	24	1,37	0,29	0,17	0,37
Cr	93,0	67,2	16,6	38,2	94,5	25	1,03	0,02	0,02	1,06
Cu	31,6	21,4	10,3	8,4	60,1	48	2,27	6,4	1,7	16,0
Fe	27 482	25 863	6010	14 600	32 900	23	–	0,07	0,04	0,18
Ga	9,9	10,9	2,1	6,7	14,2	19	0,05	0,21	0,17	0,31
K	–	18 225	1993	13 800	21 600	11	–	17,8	15,0	22,5
La	34,2	20,7	4,1	11,8	26,7	20	0,33	0,61	0,53	0,82
Mg	–	7069	1876	3610	10 400	27	–	2,7	1,2	8,5
Mn	790	583	119	357	773	20	6,86	0,60	0,34	1,41
Na	–	15 250	2435	9900	19 400	16	–	0,09	0,05	0,34
Nb	13,9	20,4	6,5	11,7	40,4	32	–	0,01	0,01	0,02
Ni	45,0	38,3	6,7	24,1	48,8	18	1,54	0,42	0,30	0,87
P	792	728	215	382	1160	30	–	37,8	27,3	98,1
Pb	17,7	17,8	2,2	14,5	22,7	13	1,50	0,25	0,15	0,40
Sc	17,0	9,6	2,4	4,5	12,7	25	–	0,17	0,09	0,29
Si	–	266 875	340 26	191 000	323 000	13	–	0,09	0,05	0,21
Sn	4,7	2,7	1,2	1,2	5,1	45	1,85	–	–	–
Sr	209	187	59	95	305	32	3,04	3,7	1,8	4,8
Ti	3133	2893	728	1560	4030	25	0,20	0,06	0,03	0,14
V	87,0	75,3	19,4	39,9	97,3	26	0,39	0,11	0,08	0,19
Y	30,8	24,2	3,8	14,8	29,8	16	0,42	0,21	0,08	0,63
Yb	3,44	2,55	0,60	1,39	3,36	24	–	0,16	0,07	0,27
Zn	77,0	75,2	26,6	45,2	165	35	11,76	2,8	1,7	4,3
Zr	251,0	147,7	34,1	86,9	204,0	23	0,88	0,12	0,11	0,26

П р и м е ч а н и е. * – среднее содержание ХЭ в почвах восточной части Новосибирской обл. ($n = 250$); ** – интенсивность биологического поглощения рассеянных элементов растительностью суши [Добровольский, 2003]; прочерк – нет данных; рассчитать A_x для Sn не представляется возможным.

но опасного загрязнения [Андреевский, Сысо, 2012]. Поэтому дерново-подзолистые почвы бора, с низким валовым содержанием Ca (1,3 %), имеют высокое содержание тяжелых металлов (в мг/кг) – Cd (1,1), Pb (67), Zn (127) и Sn (96). Обнаруженное в почвах бора содержание олова в 20–80 раз выше, чем на других площадках. Здесь же в почвах выявлена повышенная концентрация подвижных Cd (0,5 мг/кг), Cu (2,5 мг/кг) и Zn

(19 мг/кг), а уровень Pb – 20 мг/кг – значительно превышает ПДК (6 мг/кг).

В растительных образцах *Ach. millefolium*, отобранных в Инюшенском бору, также выявлены аномальные концентрации ХЭ, из-за чего пробы ($n = 3$) с этой территории исключены из общей выборки. Поэтому на рис. 2 и далее результаты анализов данных проб представлены на отдельных графиках.

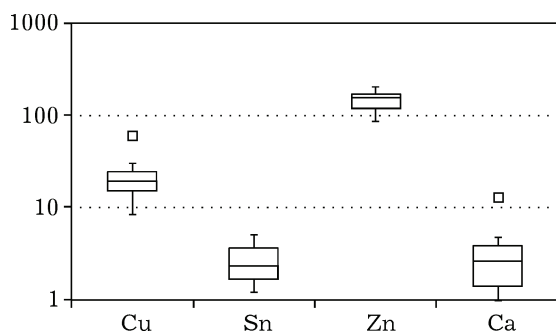


Рис. 1. Валовое содержание ХЭ в почве (Cu, Sn, Zn – мг/кг, Ca – %)

Подвижность ХЭ в почве рассчитывали как долю подвижной формы в общем содержании элемента. При этом установлено, что наибольшей подвижностью характеризуются Ca (до 53 %), Cd (до 45 %) и Pb (до 30 %), а наименьшей – Fe (до 0,1 %) и Na (до 1 %) (рис. 3). Обнаруженные различия обусловлены, по нашему мнению, тем, что первая группа ХЭ преобладает в составе загрязнителей окружающей среды, а вторая – в составе породообразующих минералов почв. Выявлена прямая сильная статистически значимая корреляционная зависимость ($r_s = 0,9$) между валовым содержанием Ca, Sr в почве и содержанием их подвижных форм. Для Cd, Pb и Zn аналогичная зависимость обнаруживается при расчете коэффициентов корреляции по Пирсону, однако коэффициенты корреляции по Спирмену, которые более приемлемы при учете аномального распределения выборки (см. табл. 1, рис. 1–2), статистически незначимы.

Анализ общего содержания макро- и микроэлементов в *Ach. millefolium* показал, что по большинству ХЭ их количество в изученных растениях близко кларкам в раститель-

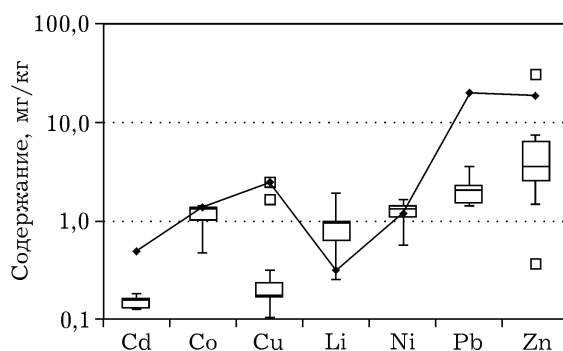
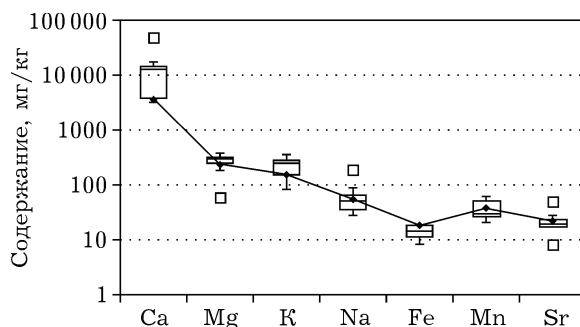


Рис. 2. Содержание подвижной формы ХЭ

ности суши (табл. 2), существенно ниже содержание Cr и Mn, но намного выше – Cd, Sc, Yb.

Оценка *Ach. millefolium* как аптечного сырья свидетельствует об отсутствии превышений допустимых значений содержания ХЭ (СанПиН 2.3.2.1078-01, для БАД на растительной основе), общей зольности и золы, нерастворимой в 10%-й HCl [ГФ XI, 1990], и подтверждает возможность использования растительной продукции в лекарственных целях.

Оценивая элементный химический состав изученных растений как источник грубого (сено) или сочного (на пастбище) корма для сельскохозяйственных животных по критериям минеральной полноценности и экологи-

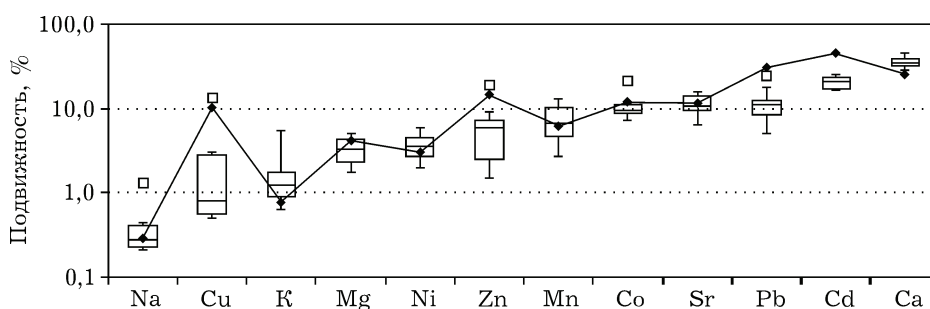


Рис. 3. Подвижность ХЭ в исследуемых почвах

Статистические показатели содержания ХЭ в растениях *Ach. millefolium*, мг/кг

ХЭ	<i>Med</i>	<i>M</i>	σ	<i>V</i> , %	<i>M</i> (Инюшин- ский бор)	<i>M</i> (аптечное сырье)	Кларк в рас- тениях суши [Романкевич, 1988]	$\frac{*НОРМА}{**МДУ}$ в грубых и соч- ных кормах
	надземная часть корни							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Al	317	361	201	56	332	828	300	-
	2462	2804	1535	55	6172			
Ba	22	21	5	23	26	26	22	-
	43	46	13	29	125			
Be	0,04	0,05	0,01	26	0,05	0,04	0,10	-
	0,08	0,09	0,03	31	0,20			
B	21,7	22,3	2,8	12	27,2	23,6	25	27-65
	13,4	13,0	2,0	15	23,6			>65
Ca	9156	10 094	2027	20	10 419	9351	15000	6000
	7139	7622	1374	18	9891			-
Cd	0,25	0,28	0,07	25	0,42	0,52	0,005	-
	0,40	0,41	0,12	30	1,05			0,3
Co	0,3	0,3	0,1	27	0,3	0,1	1,0	0,3-1,0
	0,6	0,6	0,2	32	1,1			1,0
Cr	0,2	0,2	0,2	69	0,2	0,9	1,8	-
	3,2	3,5	2,5	72	7,1			0,5
Cu	10,4	11,0	2,4	22	15,1	11,3	10	3-12
	14,2	14,5	2,0	14	21,6			30
Fe	161	187	99	53	190	319	200	25-50
	968	1095	590	54	2007			100
Ga	0,2	0,2	0,1	32	0,2	0,2	0,05	-
	0,5	0,5	0,1	31	0,8			
K	28 847	28 546	6191	22	28 524	20 982	11 000	3000
	17 351	18 492	4589	25	9701			-
La	1,0	1,1	0,3	24	1,3	0,4	0,8	-
	0,8	1,0	0,4	43	2,3			
Mg	1560	1673	482	29	2374	1816	3200	1800
	1061	1170	297	25	2049			-
Mn	28	34	11	32	91	46	240	20-60
	58	60	13	21	222			>500
Mo	1,2	1,3	0,6	46	0,9	1,3	0,6	0,2-2,5
	0,6	0,7	0,4	55	0,6			-
Na	127	209	155	74	173	214	1200	1000
	835	1064	1091	103	4099			-
Nb	0,06	0,09	0,04	51	0,03	0,04	<0,02	-
	0,19	0,33	0,22	66	2,19			
Ni	1,4	1,4	0,5	32	3,1	2,2	2,0	-
	2,2	2,3	0,7	32	6,1			3,0
P	2462	3023	1303	43	3852	2543	2000	1500
	1776	1668	484	29	3624			-
Pb	0,4	0,4	0,2	41	0,5	0,6	2,5	-
	0,6	0,7	0,2	27	3,5			5,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sc	<u>0,14</u> 0,40	<u>0,15</u> 0,42	<u>0,04</u> 0,20	<u>29</u> 47	<u>0,17</u> 0,84	0,20	0,008	–
Si	<u>2130</u> 5487	<u>2191</u> 6427	<u>562</u> 3183	<u>26</u> 50	<u>2306</u> 17 024	5436	3000	<u>10000</u> –
Sn	– 0,4	<0,1 0,4	<u>0,1</u> 0,1	– 31	<u>0,1</u> 5,6	0,4	0,25	–
Sr	<u>47</u> 64	<u>48</u> 65	<u>9</u> 13	<u>18</u> 21	<u>61</u> 137	69	40	–
Ti	<u>17</u> 78	<u>18</u> 102	<u>8</u> 63	<u>42</u> 62	<u>24</u> 279	28	32	–
V	<u>0,7</u> 3,0	<u>0,8</u> 3,3	<u>0,3</u> 1,3	<u>42</u> 38	<u>0,7</u> 5,9	0,8	1,5	–
Y	<u>0,5</u> 1,4	<u>0,5</u> 1,3	<u>0,3</u> 0,5	<u>61</u> 38	<u>0,6</u> 2,1	0,4	0,8	–
Yb	<u>0,03</u> 0,11	<u>0,04</u> 0,10	<u>0,01</u> 0,05	<u>38</u> 44	<u>0,04</u> 0,20	0,02	0,0015	–
Zn	<u>19,3</u> 16,5	<u>19,7</u> 18,6	<u>3,9</u> 4,7	<u>20</u> 25	<u>32,5</u> 64,4	25,0	50	<u>20–60</u> 50
Zr	<u>1,8</u> 4,5	<u>1,8</u> 5,2	<u>0,4</u> 2,5	<u>24</u> 47	<u>2,2</u> 15,3	1,9	7,5	–
Зола, %	<u>8,79</u> 6,31	<u>8,75</u> 7,23	<u>1,64</u> 1,61	<u>19</u> 22	<u>8,54</u> 9,51	6,85	<15 [ГФ XI, 1990]	
Н.о., %	<u>0,88</u> Не опр.	<u>0,90</u> Не опр.	<u>0,24</u> Не опр.	<u>27</u> Не опр.	<u>0,90</u> Не опр.	1,38	<3 [ГФ XI, 1990]	

Примечание. Прочерк – нет данных; рассчитать M и V для Sn не представляется возможным; н.о. – зола, нерастворимая в 10%-й HCl; *НОРМА – [Биогеохимические основы..., 1993]; **МДУ – [Таланов, Хмелевский, 1991].

ческой безопасности можно констатировать: количество макро- и микроэлементов в растениях в основном соответствует биогеохимической “НОРМЕ” в корме для крупного рогатого скота, за исключением железа, содержащегося в избытке, и магния с цинком, находящихся в дефиците; концентрация большинства гигиенически нормируемых элементов, за исключением железа, не превышает максимально допустимый уровень (МДУ) в грубых кормах для крупного рогатого скота.

Широко известно, что растения способны к избирательному поглощению ХЭ. Б. Б. Польшов предложил оценивать интенсивность поглощения как отношение количества ХЭ в золе растений к общему их количеству в почве, А. И. Перельман назвал данный показатель коэффициентом биологического поглощения A_x (в литературе часто обозначают КБН или Кб). В. В. Добровольский [2003] от-

мечает, что в зональных типах растительности интенсивность поглощения рассеянных элементов выдерживается с удивительным постоянством, хотя имеются колебания величины A_x отдельных ХЭ. А. И. Перельман и Н. С. Касимов [1999] указывают, что значение A_x для ХЭ не является постоянной величиной – для макроэлементов ведущее значение имеет генетический фактор, у микроэлементов же сильнее проявляется ландшафтно-геохимический (экологический) фактор (особенно в рудных и техногенных районах). По интенсивности биологического поглощения традиционно выделяют ХЭ “биологического накопления” ($A_x > 1$) и “биологического захвата” ($A_x < 1$), подразделяя их на четыре группы (иногда выделяют пятую), однако ХЭ с $A_x \approx 1$ могут переходить из группы в группу [Перельман, Касимов, 1999; Добровольский, 2003].

Рассчитанные для *Ach. millefolium* коэффициенты A_x в целом хорошо укладываются в общую градацию, но есть и особенности: Na проявился как элемент слабого накопления, сильно накапливаются растениями Cu и Cd, резко отличаются минимальные и максимальные значения A_x для Cr (0,02–1,1) и Mn (0,3–1,4) (см. табл. 1).

При сравнении рассчитанных коэффициентов со средними данными для растительности суши [Добровольский, 2003] отмечаются более низкие значения для B, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Zn. Это может быть связано как с видовыми особенностями *Ach. millefolium*, так и с уровнем содержания ХЭ в почвах, природно-климатическими условиями региона и т. д., что позволяет сделать благоприятный прогноз о возможном качестве растительного сырья данного вида в исследуемом регионе.

Коэффициент биологического поглощения отражает потенциальную биогеохимическую подвижность ХЭ, поэтому Н. С. Касимовым предложен коэффициент биогеохимической подвижности B_x , рассчитываемый как отношение содержания ХЭ в сухом веществе растений к его подвижным, доступным для растений воднорастворимым, солевым, органоминеральным формам ХЭ, извлекаемым из почв слабыми растворителями [Перельман, Касимов, 1999]. Он характеризует доступность ХЭ растениям и степень использования ими подвижных форм ХЭ, содержащихся в почве. Отмечают, что значения B_x у большинства ХЭ обычно значительно выше, чем A_x [Перельман, Касимов, 1999], однако в наших исследованиях для Ca, Sr, Cd, Pb – элементов, характеризующихся наибольшей

подвижностью в почвах, – коэффициент B_x оказался ниже (рис. 4), можно также отметить его высокую вариабельность.

Необходимо указать на серьезный недостаток B_x – из-за отсутствия четких методических указаний разные авторы используют в своих исследованиях различные экстрагенты, что очень затрудняет либо делает невозможным сопоставление полученных результатов. Так, для расчета коэффициента B_x (см. рис. 4) нами использован классический экстрагент – ацетатно-аммонийный буферный раствор с pH 4,8; в работе М. Я. Ловковой и др. [2014] использован не менее классический экстрагент – 1 н соляная кислота, полученные при этом коэффициенты B_x ниже в разы и на порядок (Pb – 0,03; Mn – 0,09; Co – 0,13; Sr – 0,13; Ni – 0,20; Zn – 0,68; Cu – 0,74 и т. д.). Как при этом проводить сравнительный анализ и делать выводы – не ясно, а ведь в некоторых работах авторы даже не указывают экстрагент, которым извлекали подвижную формы ХЭ, не говоря уже о подробном описании условий экстракции.

Степень накопления ХЭ растениями можно оценить и по коэффициенту корневого барьера Ккб (отношение содержания ХЭ в корнях к их концентрации в надземных органах). Величина Ккб больше единицы указывает на наличие барьера при поступлении ХЭ в надземную часть растений. Не останавливаясь подробно на возможных механизмах данного явления, широко обсуждаемых в литературе, можно отметить, что приводимые исследователями данные зачастую резко различаются между собой и напрямую зависят от природы ХЭ, видов растений, условий окружающей среды и т. д.

Исследованные нами растения *Ach. millefolium* безбарьерно поглощают К, Р, Са, Mg, В, Мо; значение Ккб изменяется от 0,5 до 2 для Cd, Zn, La. Остальные исследованные ХЭ содержатся в наземной части растений в меньшем количестве, чем в корнях, при этом Ккб значительно варьирует в разных точках – от 1 до 10 для Ba, Be, Co, Cu, Ga, Mn, Ni, Pb, Sc, Si, Sr, Y, Yb, Zr и от 1 до 40 для Al, Cr, Fe, Na, Nb, Ti, V.

Выявлена сильная статистически значимая корреляционная связь между валовым содержанием: 1) В, La, Мо, Sc и Cr (для данного

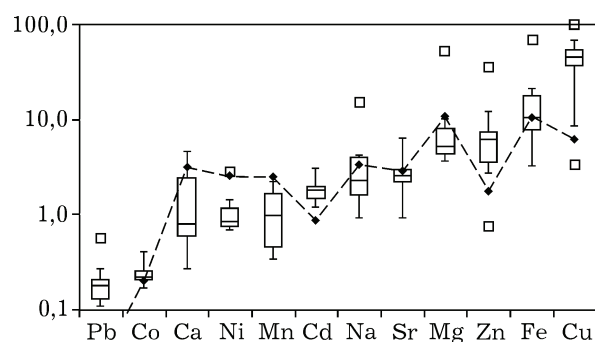


Рис. 4. Коэффициент биогеохимической подвижности (B_x)

Биохимический состав растений *Ach. millefolium*

Группы соединений	Статистические показатели						М	М	
	Me	M	σ	min	max	V, %	(Инюшин-ский бор)	(аптечное сырье)	
Флавонолы, %	1,31	1,32	0,65	0,23	2,28	50	0,87	2,02	
Дубильные в-ва, %	5,44	5,19	1,49	2,44	7,32	29	4,35	5,87	
Хлорофилл, мг/кг	a	0,70	0,78	0,33	0,29	1,38	43	0,55	0,30
	b	0,57	0,67	0,31	0,25	1,31	47	0,49	0,20
	a + b	1,31	1,44	0,64	0,55	2,69	45	1,04	0,50
	a/b	1,18	1,18	0,12	0,96	1,41	42	1,11	1,50
Каротиноиды, мг/г	0,30	0,34	0,14	0,13	0,63	10	0,27	0,05	

ХЭ связь обратная, $r_s = -0,74$) в корнях и надземной части; 2) Ca, Si, Ti, Zn и K (для K $r = -0,78$) в почве и в корнях; 3) Ca, Na в корнях и их подвижных форм в почве; 4) Be, P и Cd, Fe, Nb (для данных ХЭ связь обратная) в почве и надземной части.

Реакция растений на антропогенные загрязнители проявляется и на биохимических показателях. В качестве индикаторов зачастую используют концентрацию фенольных соединений. Они выполняют роль защитных барьеров, оберегающих растения от действия механических, химических, термических факторов среды [Запрометов, 1993], отмечено накопление фенолов под влиянием загрязнения почвы тяжелыми металлами [Школьник, Алексеева-Попова, 1983].

Нами проанализировано содержание биологически активных веществ (табл. 3). Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о том, что уровень содержания флавонолов и дубильных веществ снижается при увеличении концентрации в надземной части Cr ($r = -0,58-0,89$), Mg ($r = -0,62-0,90$) и уменьшении Si ($r = 0,62-0,76$). Увеличение содержания в почве подвижных форм Cd приводит к усилению синтеза флавонолов ($r = 0,62$). Данное явление может быть связано с иницированием окислительного стресса кадмием в растительных клетках [Dixit et al., 2001] и антиоксидантным действием фенольных соединений [Zhao, Zou, 2002]. Установленная зависимость между валовым содержанием в почве многих ХЭ и исследуемыми фенольными соединениями

Ach. millefolium показывает комплексное влияние ХЭ на продуцирование биологически активных веществ. Так, количество флавонолов связано с содержанием Cr, K, La, Mn, Ni, Si, Ti, Y, Zr ($r = 0,75-0,93$); B, Co, Mg, Sc, Yb ($r = 0,60-0,67$); Nb ($r = -0,60$), количество дубильных веществ – с содержанием Be, Mg, Y, Yb ($r = 0,75-0,88$); Cr, Ti, V, Zr ($r = 0,60-0,70$).

В среднем количество флавонолов в исследуемых образцах соответствует таковому в растениях, не испытывающих антропогенной нагрузки (0,42–1,28 %) [Тихонов и др., 2011], но ниже, чем в проанализированном нами аптечном сырье. Содержание дубильных веществ значительно выше обычного количества в надземной части *Ach. millefolium* (до 2,8 %) [Куцик, Зузук, 2002], но соответствует данным, полученным на растениях *Ach. millefolium*, выращенных в условиях Западной Сибири при внесении минеральных удобрений (4,0–6,6 %) [Тищенко, 2011].

Показатели фотосинтетического аппарата растений также являются информативными для диагностики экологического неблагополучия [Артамонов, 1986]. Содержание каротиноидов, хлорофилла a и b в исследуемых образцах несколько выше, чем в аптечных, и значительно варьирует, при этом соотношение пигментов остается постоянным (см. табл. 3). Выявлена статистически значимая корреляционная зависимость между количеством хлорофилла, каротиноидов и: 1) содержанием в растениях Cr ($r = 0,96$), Mg ($r = 0,76$), Si ($r = -0,76$); 2) валовым содержа-

нием в почве Be, Co, Cr, Fe, K, La, Mn, Sc, V, Zr ($r = -0,60-0,72$); Ni, Sn, Ti, Y, Yb ($r = -0,75-0,90$); Nb ($r = 0,62$); 3) содержанием подвижных форм Mg ($r = -0,57$), Pb ($r = 0,57$). Положительная корреляция пигментов с содержанием подвижных форм Pb подтверждает отсутствие токсичной концентрации данного элемента в почвах исследуемых экосистем [Ильин, Сысо, 2001].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории Новосибирской агломерации, несмотря на загрязнение ее выбросами промышленности и транспорта, растения *Ach. millefolium* по критериям экологической безопасности, минеральной и биохимической полноценности в основном соответствуют требованиям, предъявляемым к кормовым растениям и аптечному сырью. Элементный и биохимический составы *Ach. millefolium* взаимосвязаны и зависят от содержания ХЭ в почвах.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (проект № 15-16-30003).

ЛИТЕРАТУРА

- Андреевский В. С., Сысо А. И. Влияние различных типов антропогенного изменения почв на сообщества панцирных клещей в городских экосистемах // Сиб. экол. журн. 2012. № 6. С. 811–818.
- Артамонов В. И. Растения и чистота природной среды. М.: Наука, 1986. 172 с.
- Беликов В. В., Шрайбер М. С. Методы анализа флавоноидных соединений // Фармация. 1970. № 1. С. 66–72.
- Биогеохимические основы экологического нормирования / под ред. В. Н. Башкина, Е. В. Евстафьевой, В. В. Снакина и др. М.: Наука, 1993. 304 с.
- Васильева Т. Н., Брудастов Ю. А. Потенциальные фитоаккумуляторы металлов поллютантов урбанизированных почв города Оренбурга // Вестн. ОГУ. 2011. № 6. С. 142–146.
- Высочина Г. И. Фенольные соединения в систематике и филогении семейства гречишных. Новосибирск: Наука, 2004. 240 с.
- Губанов И. А. Лекарственные растения: справочник. М.: МГУ, 1993. 272 с.
- Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М.: Академия, 2003. 400 с.
- Ермаков А. И. и др. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 430 с.
- Запрометов М. Н. Фенольные соединения: Распространение, метаболизм и функции в растениях. М.: Наука, 1993. 272 с.
- Ильин В. Б., Сысо А. И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
- Куцук Р. В., Зузук Б. М. Тысячелистник обыкновенный *Achillea millefolium* L. (Аналитический обзор) // Провизор. 2002. № 14. С. 34–38.
- Ловкова и др. Почему растения лечат. М.: Ленанд, 2014. 288 с.
- Малачевская А. С. О фармакологическом действии тысячелистника // Фармакология и токсикология. 1961. № 6. С. 742–744.
- Методы организации и ведения агроэкологического мониторинга сельскохозяйственных угодий в зонах техногенного загрязнения и оценка экологической обстановки в сельском хозяйстве в регионах размещения атомных электростанций и аварии на ЧАЭС / под ред. Н. И. Санжаровой. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2010. 276 с.
- Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 610 с.
- Полевой В. В., Максимова Г. Б. Методы биохимического анализа растений. Л.: Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1978. 192 с.
- Прозорова Т. А., Черных И. Б. Кормовые растения Казахстана. Павлодар: Книга, 2004. 278 с.
- Романкевич Е. А. Живое вещество Земли (биогеохимические аспекты проблемы) // Геохимия. 1988. № 2. С. 292–306.
- Сорокин О. Д. Прикладная статистика на компьютере. Краснообск: ГУП РПО СО РАСХН, 2009. 222 с.
- Таланов Г. А., Хмелевский Б. Н. Санитария кормов: справочник. М.: Агропромиздат, 1991. 303 с.
- Тихонов Б. Б., Сидоров А. И., Сульман Э. М., Ожимкова Е. В. Комплексная экстракция гликанов и флавоноидов из растительного сырья // Вестн. ТвГТУ, 2011. Вып. 19. С. 57–63.
- Тищенко Н. Н. Диагностика минерального питания, эффективности удобрений, величины и качества урожая тысячелистника обыкновенного (*Achillea millefolium* L.) на лугово-черноземной почве Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. с./х. наук. Омск, 2011. 17 с.
- Федосеева Л. М. Изучение дубильных веществ подземных и надземных вегетативных органов бадана толстостолого (*Bergenia crassifolia* (L.) Fitch.), произрастающего на Алтае // Химия растительного сырья. 2005. № 2. С. 45–50.
- Школьник М. Я., Алексеева-Попова Н. В. Растения в экстремальных условиях минерального питания: эколого-физиологические исследования. Л.: Наука, 1983. 176 с.
- Dixit V., Pandey V., Shyam R. Differential Antioxidative Responses to Cadmium in Roots and Leaves of Pea (*Pisum sativum* L. cv. Azad.) // J. Exp. Botany. 2001. Vol. 52. P. 1101–1109.

- Georgieva L., Gadjalova A., Mihaylova D., Pavlov A. *Achillea millefolium* L. – phytochemical profile and in vitro antioxidant activity // Int. Food Res. Journ. 2015. Vol. 22, N 4. P. 1347–1352.
- Moloudizargari M. et al. A Current Update on the Phytopharmacological Aspects of *Achillea millefolium* // J. Farmaceutical Biomed. Sci. 2014. Vol. 4, N 4. P. 310–317.
- Zhao H. J., Zou Q. Protective effects of exogenous antioxidants and phenolic compounds on photosynthesis of wheat leaves under high irradiance and oxidative stress // Photosynthetica. 2002. Vol. 40. P. 523–527.

Ecological and Biogeochemical Assessment of Elemental and Biochemical Composition of the Vegetation of Anthropogenically Disturbed Ecosystems (Based on the Example of *Achillea millefolium* L.)

A. I. SYSO^{1,2}, T. I. SYROMLYA¹, M. A. MYADELETS^{1,2}, A. S. CHEREVKO¹

¹ *Institute of Soil Science and Agrochemistry, SB RAS
630090, Novosibirsk, Lavrentieva ave., 8/2*

² *Novosibirsk State Agricultural University
630039, Novosibirsk, Dobrolyubova str., 160
E-mail: syso@mail.ru*

The content of 30 macro- and microelements has been studied and assessed by statistical, hygienic and biochemical criteria in soils and *Achillea millefolium* L. as a forage and medicinal plant. The study has been conducted in the territories of Novosibirsk agglomeration contaminated by waste of industry and transport. In the soil-plant system the relationships have been determined between elemental and biochemical compositions of *Achillea millefolium* L.

Key words: pollution of environment, soils, *Achillea millefolium* L., forage grasses, medicinal plants, macroelements, microelements, biologically active substances, Novosibirsk Oblast.