

## Основные параметры распределения микроэлементов (Zn, Pb, Ag, Mo и Co) в растительном покрове Яман-Касинского медноколчеданного месторождения

В.Б. Черняхов, к.г.-м.н., Е.Г. Щеглова, к.б.н.,  
ФГБОУ ВО Оренбургский ГУ

Проблема основных параметров, особенностей и закономерностей распределения микроэлементов в растительном покрове в зоне медноколчеданных месторождений на протяжении многих десятилетий привлекает внимание исследователей [1–5]. В связи с этим вызывает большой интерес содержание цинка, олова, серебра, молибдена и кобальта в растительной среде, обусловленной экстремально высоким содержанием этих микроэлементов в субстрате Яман-Касинского медноколчеданного месторождения [6, 7].

Особенности поглощения Zn растениями в основном благоприятны для использования его в качестве биогеохимического индикатора рудных месторождений. Это один из наиболее контрастных химических элементов, который поглощается различными видами растений, произрастающих в одинаковых условиях. В пределах Яман-Касинского месторождения все растения в значительной степени обогащены этим элементом, у большинства видов концентрация Zn в 20–60 раз превышает РКР (табл.). В условиях ортоэлювиальных ландшафтов наибольшие концентрации отмечаются у кустарника *Spiraea crenata* и составляют соответственно в стеблях и листьях  $116,6 \cdot 10^{-3}$  и  $71,5 \cdot 10^{-3}\%$  соответственно. Различия в концентрировании цинка отдельными видами одной и той же биоморфы существенны. Особенно это проявляется на примере полукустарничков *Thymus marschallianus*, *Artemisia marschalliana* и *A. austriaca*, произрастающих в одинаковых условиях. Среднее содержания Zn у *Thymus marschallianus* в стеблях в 2 раза превышает среднее содержание Zn в стеблях *Artemisia austriaca* и в 5 раз — у *A. marschalliana* и соответственно составляет  $56 \cdot 10^{-3}$ ;  $27,6 \cdot 10^{-3}$  и  $10,8 \cdot 10^{-3}\%$  (табл.). В листьях у *Thymus marschallianus* и *Artemisia austriaca* содержание Zn становится равным  $46,3 \cdot 10^{-3}\%$  и  $48,0 \cdot 10^{-3}\%$ , превышая в 1,7 раза его содержание в листьях *A. marschalliana*. Концентрирующая способность *Artemisia austriaca* относительно *A. marschalliana* выявляется более ярко при сопоставлении их концентраций в пробах, отобранных на одних и тех же площадках.

В суперкальневых и трансэлювиально-аккумулятивных ландшафтах в связи с большой миграционной способностью цинка им обогащены и древесные породы. Среднее содержание Zn в ветвях *Betula pendula* составляет  $127,5 \cdot 10^{-3}\%$  (табл.). Из травянистых растений высокими содержаниями Zn выделяются в условиях рудного поля морфологически и физиологически измененные

экземпляры *Veronica iticana*. Содержание Zn в таких экземплярах составляет  $50 \cdot 10^{-3}\%$ . Как и Cu, Zn в почвах на площадках отбора таких экземпляров в 3 раза превышает пороговые концентрации, равные  $7 \cdot 10^{-3}\%$ .

Распределение цинка по органам характеризуется теми же особенностями, что и распределение меди [1]. Содержание цинка в корнях *Artemisia marschalliana* почти в 3 раза превышает содержание в стеблях и листьях соответственно. У травянистых растений в корнях, например *Galatella villosa*, цинка содержится в 2 раза больше, чем в стеблях, и в 4,4 раза больше, чем в листьях. С возрастом в органах содержание Zn увеличивается. Стебли прошлого и текущего года у *Artemisia marschalliana* содержат Zn в контуре рудного тела и на отдельных площадках соответственно  $100 \cdot 10^{-3}$  и  $3 \cdot 10^{-3}\%$ ,  $20 \cdot 10^{-3}\%$  и  $6 \cdot 10^{-3}$ ;  $100 \cdot 10^{-3}$  и  $40 \cdot 10^{-3}\%$ .

В пределах месторождения произрастающие растения обогащены свинцом (табл.). Однако степень обогащения неодинакова у видов различных жизненных форм. Самые высокие концентрации имеют кустарники — *Caragana frutex* и *Spiraea crenata*  $27,3 \cdot 10^{-3}$  и  $62,2 \cdot 10^{-3}\%$ , что 7–15 раз превышает РКР по этому элементу. Виды полыней *Artemisia austriaca* и *A. marschalliana*, отобранные на одних и тех же площадках, не отличаются по концентрирующей способности свинца. У кустарников избирательность к поглощению свинца выражена более резко, у злаков и травянистых многолетников она вновь сглаживается. Распределение свинца в отдельных органах растений малоконтрастное акропетальное. Корни *Artemisia marschalliana* содержат Pb в 1,5 раза больше, чем стебли, и в 3 раза больше, чем листья. У *Galatella villosa* соотношение между указанными органами соответственно равно 2 и 3,6. Старые органы (стебли прошлого года) заметно обогащены свинцом по сравнению со стеблями текущего года и соответственно составляют в контуре рудного тела на 1 пл.  $40 \cdot 10^{-3}$  и  $2 \cdot 10^{-3}\%$ , на 3 пл. —  $6 \cdot 10^{-3}$  и  $2 \cdot 10^{-3}\%$ ,  $50 \cdot 10^{-3}$  и  $3 \cdot 10^{-3}\%$ .

На Яман-Касинском месторождении все виды растений, за исключением травянистых многолетников, обогащены серебром. В многолетниках серебро содержится лишь в золе петрофила *Galatella villosa* (табл.). Средние концентрации Ag у большинства растений в 3–7 раз превышают РКР. Максимальное содержание Ag у ряда растений в контуре рудного тела достигает высоких величин. Так, у *Koeleria cristata* они составляют  $1 \cdot 10^{-3}\%$ , а у *Galatella villosa* —  $3 \cdot 10^{-3}\%$ . Серебро более или менее равномерно распределено в различных органах растений. У полукустарничков содержание серебра в корнях и листьях одинаковое, в стеблях несколько

меньше. Однако в стеблях прошлого года у *Artemisia marschalliana* содержание серебра значительно превышает его содержание в стеблях текущего года и соответственно составляет  $0,1-0,2 \cdot 10^{-3}\%$ , тогда как в стеблях текущего года содержание серебра составляет  $0,03-0,04 \cdot 10^{-3}\%$ , или ниже чувствительности спектрального анализа. У *Amygdalus nana* максимальное содержание серебра сосредоточено в ветвях, у *Artemisia austriaca* и *Koeleria cristata* – в листьях. Поэтому при биогеохимических исследованиях можно использовать надземную часть полностью у полукустарничков и злаков, прошлогодние ветви у *Artemisia marschalliana*, одно-двухлетние ветви у кустарников, листья и одно-двухлетние побеги у древесных пород.

Содержание молибдена в растениях на месторождении ниже РКР, равно  $0,2 \cdot 10^{-3}\%$ . Биологическая аккумуляция лучше выражена у таких биоморф, как полукустарнички, дерновинные злаки и травянистые многолетники. Однако и у этих биоморф величины содержаний Мо не превышают РКР. Лишь у *Echinops ritro* содержание молибдена равно региональному кларку, а у *Filipendula vulgaris*, *Veronica incana* и *Artemisia austriaca* превышает его и равно соответственно  $5 \cdot 10^{-3}$  и  $20 \cdot 10^{-3}\%$ . При нормальном содержании Мо в почвах растения мало

отличаются друг от друга по его концентрации в золе одинаковых органов. Даже бобовые культуры относятся к растениям-концентраторам, отличаясь от большинства опробованных видов не более чем в 1,2–2,0 раза. Наибольшие содержания Мо находятся в корнях растений. В надземной части распределение Мо носит базипетальный характер, причём листья содержат больше Мо, чем стебли.

Встречаемость Со в золе опробованных растений составляет 85%. Лучше его концентрируют деревья, кустарники и полукустарнички. В целом его содержание в опробованных растениях близко к нормальному и составляет  $0,3-1,0 \cdot 10^{-3}\%$ . В подземных органах растений Со содержится несколько больше, чем в стеблях и листьях.

Оценка корреляционной связи между содержанием вышерассмотренных элементов в корнях, стеблях, листьях одного и того же растения показала, что сила и характер этой связи различны для разных элементов. На примере *Artemisia marschalliana*, произрастающей на липарито-дацитовых порфирах, эта зависимость представляется следующим образом.

Для Рb выявлена высокая положительная связь между содержанием этого элемента в корнях и стеблях ( $\tau = +0,70$ , при критическом значении  $r_q = +0,48$ ). Зависимость между содержанием Рb в

Среднее содержание химических элементов,  $n \cdot 10^{-3}\%$  в золе растений, приуроченных к липарито-дацитовым порфирам Яман-Касинского месторождения

Вид растений	Рb		Zn		Ag	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
Деревья						
<i>Betula pendula</i> Roth.	14,5/8,14	11,45/3,58	127,0/76,4	118,7/34,9	0,05/0,08	0,318/0,707
<i>Populus tremula</i> L.	7,8/2,7	7,95/1,78	60,7/81,9	47,4/60,8	0,06/0,05	4,490/0,020
Кустарники						
<i>Amygdalus nana</i> L.	12,6/3,3	4,24/0,7	37,7/13,4	33,2/18,2	0,06/–	4,470/–
<i>Caragana frutex</i> (L.) C. Koch	27,3/4,0	5,22/4,08	53,7/42,3	28,4/32,0	0,04/–	0,028/–
<i>Cerasus fruticosa</i> (Pall.) Woron.	18,6/2,4	12,84/0,85	58,0/8,33	4,5/4,6	–/–	–/–
<i>Cotoneaster melanocarpa</i> Lodd.	–/6,0	–/2,83	–/32,0	–/39,6	–/–	–/–
<i>Cytisus ruthenicus</i> Fisch.	8,7/4,3	8,27/1,86	107,2/72,0	56,9/46,5	0,03/–	18,300/–
<i>Rosa cinnamomea</i> L.	7,7/5,2	6,43/1,92	24,3/19,4	31,1/33,9	–/–	–/–
<i>Spiraea crenata</i> L.	62,2/14,9	1,46/11,90	116,6/71,5	3,6/63,2	0,06/–	2,240/–
Полукустарнички						
<i>Artemisia marschalliana</i> Spreng	3,7/3,3	4,37/2,66	10,8/27,3	12,2/23,0	0,03/0,04	0,005/0,024
<i>Artemisia austriaca</i> Jack.	4,8/6,3	2,61/3,60	27,6/48,0	20,6/30,8	0,05/0,07	0,030/0,140
<i>Thymus marschallianus</i> Willd.	20,6/7,3	9,59/2,77	56,0/45,3	29,7/2,7	0,05/–	0,003/–
Злаки						
<i>Festuca sulcata</i> Hack.	3,6/9,4	4,79/5,08	28,127,8	8,6/10,1	–/0,04	–/0,021
<i>Keeleria crisata</i> (L.) Pers.	5,6/4,1	5,45/5,57	56,6/40,0	32,7/14,1	0,05/0,05	0,008/0,025
<i>Poa stepposa</i> (Kryl.) Roshev.	22,9/4,16	24,37/3,52	74,2/15,0	75,9/5,5	0,10/0,04	0,088/–
<i>Stipa rubens</i> P. Smirn.	–/11,0	–/12,73	–/75,0	–/35,4	–/0,06	–/0,007
Многолетние травянистые растения						
<i>Gilatella villosa</i> (L.) Reichb.	5,4/3,2	4,12/1,20	42,4/19,1	35,3/7,4	0,04/–	0,020/–
<i>Filipendula vulgaris</i> Moench.	1,8/4,8	1,16/1,92	32,6/46,2	2,6/40,6	–/–	–/–
<i>Sanguisorba officinalis</i> L.	1,9/2,7	1,72/0,57	21,5/70,0	19,2/52,0	–/–	–/–
<i>Salvia stepposa</i> Schost.	2,1/6,2	2,79/4,70	22,3/34,0	25,6/27,9	–/–	–/–
<i>Veronica incana</i> L.	4,7/11,0	1,15/12,72	46,6/55,0	5,8/63,6	–/–	–/–
Средний элементарный состав золы растений для Южного Урала, %	$4 \cdot 10^{-2}$		$2 \cdot 10^{-3}$		$1 \cdot 10^{-5}$	

Примечание: в числителе – содержание элементов в ветвях или стеблях; в знаменателе – в листьях

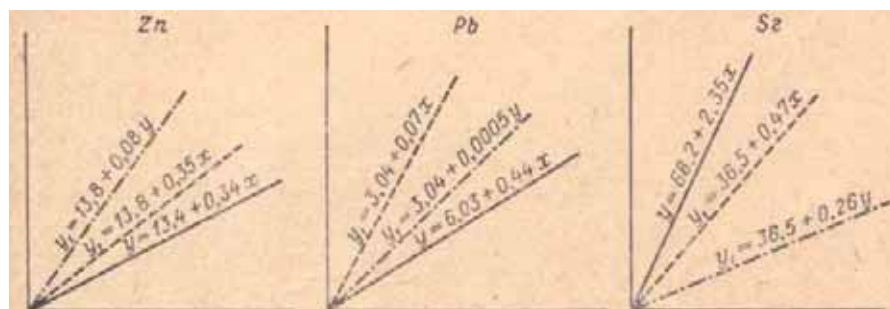


Рис. – Положение линий регрессии, отражающих коррелятивную связь между соответствующими элементами в различных органах растений:

1 – система корни – стебли; 2 – система корни – листья; 3 – система стебли – листья. Содержание элементов:  $x$  – в корнях;  $y$  – в стебле;  $y_1$  – в листьях

корнях и стеблях описывается уравнением регрессии в виде уравнения прямой:

$$y = a + bx, \quad x = a_1 + b_1y.$$

Корреляционная зависимость между содержанием Zn в корнях и стеблях также положительная и высокая ( $\tau = +0,67$ ). Характер связи сохраняется и между содержанием Zn в корнях – листьях и стеблях – листьях с коэффициентами корреляции соответственно равными  $+0,49$  и  $+0,51$ . Положение линий регрессии с указанием соответствующих коэффициентов, отражающих прямую зависимость между содержанием Zn и Pb в корнях, стеблях и листьях, отражено на рисунке.

**Выводы.** Зависимость между содержанием элементов в сравниваемых органах носит сложный характер. Определение величин коэффициентов корреляции, отражающих тесноту связи и тип зависимости между элементами, позволяет решать многие теоретические и практические вопросы, связанные с биогеохимической индикацией: характер поглощения химических элементов растениями, выявление физиологических барьеров поглощения, выбор органов опробования, наиболее целесообразных при биогеохимических поисках. Коэффициенты корреляции позволяют также при составлении биогеохимических карт использовать данные о содержании химических элементов в разных видах и органах растений. Основанные

на строгой математической зависимости, коэффициенты корреляции имеют определённые преимущества перед другими биогеохимическими коэффициентами и параметрами ОСВР – относительным содержанием элементов в отдельных видах растений, ОСОР – относительным содержанием элементов в отдельных органах растений, применяемыми с этой же и целью в биогеохимических исследованиях.

### Литература

1. Кучеренко В.Д., Черняхов В.Б. Микроэлементы в степной и солонцово-солончаковой растительности Оренбургской области // Почвы Южного Урала и Поволжья. Уфа, 1960. Вып. 4. С. 167–171.
2. Ковальский В.В., Петрунина Н.С. Геохимическая экология и эволюционная изменчивость растений // Доклады АН СССР. 1964. Т. 159. № 5. С. 1175–1178.
3. Малюга Д.П. О биогеохимических провинциях на Южном Урале // Доклады АН СССР. 1950. Т. 70. № 2. С. 257–259.
4. Скрылыгина-Уфимцева М.Д., Черняхов В.Б. Некоторые аспекты геохимической экологии растений медноколчеданных месторождений Оренбургского Урала // Биологическая и практическая роль микроэлементов. Рига, 1972. С. 187–191.
5. Черняхов В.Б., Пименов Г.Г. К вопросам по медной биогеохимической провинции в Оренбургском Предуралье // Тезисы докладов VII конференции по химизации сельского хозяйства. Оренбург: ОСХИ, 1966. С. 121–127.
6. Черняхов В.Б., Калинина О.Н., Алексеев М.И. Распределение тяжёлых металлов в растительном покрове Яман-Касинского месторождения // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Оренбург: ОГУ, 2012. С. 844–851.
7. Черняхов В.Б., Щеглова Е.Г. Основные параметры распределения меди в растительном покрове Яман-Касинского медноколчеданного месторождения // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 3 (59). С. 167–171.