

АНЖЕЛИКА ЮРЬЕВНА ТЕПТИНА

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)
ateptina@gmail.com

АЛЕКСАНДР ГЕННАДЬЕВИЧ ПАУКОВ

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)
alexander_paukov@mail.ru

МАРИЯ ВИТАЛЬЕВНА МОРОЗОВА

кандидат химических наук, доцент кафедры аналитической химии Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)
morphey_usu@mail.ru

АККУМУЛЯЦИЯ NI ПРЕДСТАВИТЕЛЯМИ СЕМЕЙСТВА BRASSICACEAE НА ПОЧВАХ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОД ЮЖНОГО И СРЕДНЕГО УРАЛА*

Обсуждается влияние геохимии ультраосновных почвообразующих пород на содержание химических элементов в почвах и растениях. Отмечено сходство геохимического состава ультраосновных (серпентинитовых) почв Среднего и Южного Урала с ультраосновными почвами других регионов мира. Исследованные почвы содержат относительно высокие концентрации Ni, Mg и других металлов и низкие – Ca; соотношение Mg/Ca всегда выше 1. Рассмотрена способность 13 представителей семейства Brassicaceae накапливать Ni в надземных побегах на естественно обогащенных металлами почвах ультраосновных пород. Девять исследованных видов являются исключениями и не накапливают Ni, три вида (*Alyssum litvinovii* Knjaz., *Noccaea thlaspidioides* (Pall.) F. K. Mey., *Alyssum tortuosum* Waldst. & Kit. ex Willd.) являются гемиаккумуляторами, накапливая менее 0,01 % Ni в надземных побегах, и один вид (*Alyssum obovatum* (C. A. Mey.) Turcz.) отнесен к гипераккумуляторам. Способность *A. obovatum* накапливать значительные концентрации Ni отмечена для всех исследованных ультраосновных массивов Южного и Среднего Урала. Для *A. tortuosum* было обнаружено значительное межпопуляционное варьирование накопления Ni в побегах. Особи популяции Хабаровинского массива накапливают Ni выше 0,01 %, проявляя гипераккумуляционные способности.

Ключевые слова: гипераккумуляция, тяжелые металлы, почвы ультраосновных пород, никель, *Alyssum*, *Noccaea*, Brassicaceae

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий активно обсуждаются проблемы, связанные с особенностями экологии растений, произрастающих на ультраосновных горных породах (серпентинитах) [11], [14], [21]. Почвы ультраосновных пород во всем мире считаются стрессовыми условиями для произрастания растений и характеризуются недостаточным содержанием основных питательных элементов, в том числе Ca, и высоким уровнем тяжелых металлов (Ni, Co, Cr и др.) в концентрациях, потенциально токсичных для растений. Хотя в разных почвенно-климатических условиях концентрации химических элементов в почвах и их подвижность могут несколько варьировать, в целом особенности геохимии серпентинитовых почв остаются постоянными. Кроме неблагоприятного минерального состава, наблюдается постоянный недостаток влаги, ин-

тенсивная инсоляция и значительный перепад температур на поверхности почвы. В результате складываются крайне суровые условия для существования растений, что приводит к формированию так называемого серпентинитового синдрома, обусловленного действием комплекса негативных факторов на ультраосновном субстрате [10], [11], [16].

В процессе эволюции растения выработали ряд стратегий, позволяющих им произрастать в условиях повышенного содержания металлов в почве. А. Baker [5], исследуя содержание никеля в растениях, предложил выделять следующие виды: исключения, индикаторы и аккумуляторы. *Исключения* обладают механизмами, препятствующими поглощению и проведению Ni из корней в надземную массу. Концентрация металла в надземных тканях *индикаторов* может быть повышенной (до 100 мг/кг сухой массы) и

коррелирует с уровнем его содержания в почве. Для *аккумуляторов* характерно повышенное содержание Ni в надземных тканях (> 100 мг/кг). В дальнейшем была выделена группа *гипераккумуляторов* [12] – видов, способных накапливать значительные концентрации Ni (> 1000 мг/кг), а термин *аккумуляторы* [7] или *гемиакумуляторы* [9] было предложено применять для растений, накапливающих от 100 до 999 мг/кг сухой массы. Для других металлов также были установлены градации в их накоплении в надземной массе, так, гипераккумуляторы способны накапливать Cd более 100 мг/кг, Co, Cu, Pb – 1000 мг/кг, Mn, Zn – 10000 мг/кг сухой массы [18].

В мире известно более 500 таксонов, способных накапливать повышенные концентрации тяжелых металлов (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, Zn) в надземной массе [20], [23]. Гипераккумуляторы тяжелых металлов распространены на обогащенных металлами почвах в тропическом и умеренном климате, известны представители из Южной Африки, Новой Каледонии, Латинской и Северной Америки, Европы [6], [18]. Большинство гипераккумуляторов встречаются на почвах ультраосновных пород.

Более 75 % известных гипераккумуляторов тяжелых металлов накапливают Ni, остальные накапливают Zn, Pb, Cd, Co, Cu, Mn или Se [20]. Ряд гипераккумуляторов способны накапливать более одного металла. Около 25 % известных сегодня гипераккумуляторов относятся к семейству Brassicaceae, большинство из них являются представителями родов *Alyssum* и *Noccaea*, в основном они накапливают Ni, реже другие металлы. Значение таких видов для фиторемедиации загрязненных почв трудно переоценить. В условиях умеренного климата растения, накапливающие металлы, встречаются редко, в связи с этим актуальным становятся поиск но-

вых видов и изучение особенностей накопления видами металлов. Исследования накопления Ni в надземной массе растений в России ранее проводились на Полярном Урале [1], Кавказе [2] и Чукотке [3].

Цель нашего исследования – выявление особенностей накопления Ni представителями семейства Brassicaceae на ультраосновных породах Южного и Среднего Урала.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в петрофитно-степных сообществах ультраосновных массивов от 57°50' до 51°00' с. ш. На Среднем Урале были исследованы Алапаевский и Пышминский, на Южном Урале – Сугомакский, Карабашский, Ильменский, Калканский, Миндякский, Кракинский, Ишкининский, Халиловский и Хабарнинский ультраосновные массивы (табл. 1). Исследованные массивы принадлежат к офиолитовой (альпинотипной) формации, первичные породы в них представлены гарцбургитами, дунитами, реже – лерцолитами [13].

Исследовались открытые участки массивов, занятые петрофитно-степной растительностью со слаборазвитыми сильнощелочистыми почвами. Исследования проводились по стандартной методике на пробных площадках 10 м². Все представители семейства Brassicaceae, произрастающие в петрофитно-степных сообществах, в полевых условиях предварительно были проанализированы на повышенное содержание Ni в надземных тканях с использованием полуколичественного диметилглиоксимового теста: фрагмент листовой пластинки раздавливался на фильтровальной бумаге, предварительно смоченной диметилглиоксимом (1% раствор в этаноле). Диметилглиоксим с солями Ni образует красный нерастворимый осадок диметилглиоксимата ни-

Характеристика исследованных ультраосновных массивов

Таблица 1

№	Массив	Координаты	Высота (м)	Горные породы
1	Хабарнинский	51°10.99'N, 58°11.47'E	300–400	серпентинит
2	Халиловский	51°24.74'N, 58°09.07'E	300–400	дунит, гарцбургит
3	Ишкининский	51°27.26'N, 58°17.70'E	300–400	гарцбургит
4	Кракинский	53°50.57'N, 58°40.70'E	750–950	гарцбургит
5	Миндякский	54°01.19'N, 58°46.77'E	500–600	пироксенит
6	Калканский	54°24.18'N, 59°22.93'E	500–600	гарцбургит, дунит
7	Ильменский	55°08.14'N, 60°13.97'E	250–350	серпентинит
8	Карабашский	55°29.16'N, 60°15.22'E	500–600	гарцбургит
9	Сугомакский	55°45.06'N, 60°26.95'E	650–750	серпентинит
10	Пышминский	56°50.05'N, 60°54.61'E	200–250	гарцбургит
11	Алапаевский	57°44.37'N, 61°28.59'E	100–150	гарцбургит, дунит

келя – $(C_4H_7O_2N_2)_2Ni$, являющегося внутрикомплексным соединением. Окрашивание свидетельствует о повышенном содержании Ni в тканях растений [19].

В лаборатории были проведены исследования способности накопления Ni 13 представителями семейства Brassicaceae – 6 многолетних видов (*Alyssum obovatum*, *A. tortuosum*, *A. litvinovii*, *A. lenense*, *Noccaea thlaspidioides*, *Cardaria draba*) и 7 одно- и малолетних видов (*A. turkestanicum*, *Lepidium densiflorum*, *L. ruderales*, *L. perfoliatum*, *Camelina microcarpa*, *Erysimum canescens*, *Thlaspi arvense*).

В пределах исследованных массивов было собрано по 5–10 проб надземных побегов каждого из исследованных видов. Из-под каждого растения были взяты пробы почв из корнеобитаемого слоя на глубине 0–10 см, очищены от остатков органики и камней, высушены до воздушно-сухого состояния, затем просеяны через сито 1 мм. Для собранных образцов была определена актуальная кислотность по стандартной методике. Для дальнейшего анализа пробы почвы просеивались через сито 0,25 мм. Пробы почвы и побеги растений высушивались в сушильном шкафу и взвешивались. Полученные пробы озолялись с 1 мл HF, 5 мл HNO₃, 2 мл HCl и 2 мл воды в системе микроволновой пробоподготовки. После обработки стаканы с содержимым охлаждали до комнатной температуры, добавляли 7 мл 4 % борной кислоты, количественно переносили в мерную колбу вместимостью 25 мл и доводили до метки деионизированной водой. Полученный раствор анализировали на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6500 Thermo Scientific методом градуировочного графика. Оценку результатов проводили методами статистического анализа с использованием программы Statistica 6.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почвенный покров на выходах ультраосновных горных пород значительно отличается от зонального типа почв. Процессы формирования почвы на каменистом субстрате зависят от многих факторов: климата, времени, рельефа, биотического фактора, а также химического состава материнской породы. В результате совместного действия этих факторов на выходах ультраосновных горных пород формируются примитивно-щебнистые, грубоскелетные почвы. По характеру гидротермического режима почвообразования почвы склонов относятся к субаридно-субгумидным (степным, ксеролесым) с содержанием гумуса в горизонте А до 5–7 %. Геохимические особенности почв определяются особенностями

подстилающих пород. На Среднем и Южном Урале формирование ультраосновных почв происходит на магматических интрузивных горных породах – дунитах (состоящих преимущественно из зерен оливина), пироксенитах (состоящих из пироксена), перидотитах (образованных из оливина и пироксена), а также на метаморфических горных породах – серпентинитах (состоящих из серпентина, образующегося из оливинсодержащих магматических горных пород) [13].

В целом для почв исследованных массивов нами было отмечено низкое содержание основных макроэлементов, таких как Ca, высокие концентрации Fe, Mg, Ni, Mn, Cr, Cu и Zn и высокие значения соотношения Mg/Ca (табл. 2). Повышенные концентрации Fe и Mg в пробах почвы обусловлены геохимией пород, основу которых составляет железо-магниевый минерал оливин. В почвах нами отмечено значительное варьирование Mg (0,8–5,7 %). Уровень содержания Ca по сравнению с Mg в большинстве исследованных почв был крайне низок. Ограниченная доступность Ca считается важным фактором, определяющим формирование серпентинитовой флоры во всем мире. Концентрация этого металла в пробах почвы варьировала от 0,06 до 9,9 %, что является вполне типичным для почв ультраосновных пород мира [20]. Соотношение Mg/Ca во всех пробах превышало 1,0, максимальные значения достигли 82,37. Ультраосновные почвы Среднего и Южного Урала обладают нейтральной или слабощелочной реакцией среды, варьирующей в небольших пределах от 6,14 до 8,19, что также соответствует литературным данным [17].

Концентрации отдельных химических элементов в почвах варьируют как внутри массивов, так и между ними. Самые высокие концентрации Mg были отмечены на Южном Урале (Хабарнинский, Халиловский, Ишкининский и Калканский массивы), а также в Пышминском массиве на Среднем Урале. Высокие концентрации Fe зафиксированы для Кракинского, Миндякского и Хабаровинского массивов. Максимальные концентрации Ni в почвах массивов отмечены в Хабаровинском (1454 мг/кг) и Пышминском (4086 мг/кг) массивах, при возможном диапазоне варьирования, известном для почв ультраосновных пород от 500 до 8000 мг/кг [20]. Максимальные концентрации Zn в почве (325 мг/кг) были зафиксированы в Сугомакском массиве. Вдвое меньшие концентрации характерны для Калканского (176 мг/кг) и Ишкининского (154 мг/кг) массивов. Содержание Co достигало 110 мг/кг в Ишкининском и 93 мг/кг в Миндякском массивах, максимальные концентрации Cr были зафиксированы

Таблица 2

Среднее содержание элементов в почвах ультраосновных массивов, мг/кг

№ массива*	Ca	Fe	Mg	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Zn	Mg/Ca
1	5275,97	17306,35	34587,24	0,21	54,88	136,89	39,84	786,51	667,40	46,78	6,64
2	3416,86	19818,10	48701,51	0,46	62,51	473,63	52,99	617,67	706,81	71,33	14,32
3	3312,82	22956,65	50670,05	0,84	86,50	229,73	165,00	1040,61	649,73	101,03	15,52
4	2110,40	29147,22	29039,96	0,01	68,43	260,61	13,64	981,08	777,69	41,56	13,89
5	4865,28	26292,37	15298,86	0,08	72,19	429,98	23,55	1306,51	471,44	49,56	3,35
6	4816,23	17534,08	38251,73	0,69	54,52	329,98	52,21	1387,29	524,45	137,22	8,01
7	3790,50	7986,10	28892,06	0,13	40,81	123,57	33,46	626,13	630,02	96,99	7,72
8	3843,62	51294,17	45803,49	23,17	71,04	—	3634,08	1589,77	863,66	2556,07	11,92
9	4196,73	13025,98	11278,99	1,82	53,04	309,47	53,22	1066,79	473,73	154,47	2,84
10	1137,17	9256,09	45127,74	0,01	42,38	213,13	20,39	1290,09	1027,50	31,18	44,33
11	3455,35	8590,51	10662,34	0,15	36,71	122,18	26,11	977,61	591,79	90,01	3,13
Max	9920,71	30417,13	56763,37	4,6	109,89	582,92	247,23	1871,83	1453,02	324,63	82,37
Min	645,45	5407,33	8200,19	0,01	20,70	41,78	11,55	447,13	150,27	29,18	2,10

Примечание. * – номера массивов в данной и последующих таблицах приведены в соответствии с табл. 1.

в Миндякском и Калканском массивах (583 и 432 мг/кг соответственно). По своему составу почвы Хабарнинского, Миндякского, Алапаевского и Сугомакского массивов наиболее близки типичному составу почв серпентинитов [20]. Значительные концентрации металлов были отмечены в почвах Карабашского ультраосновного массива, находящегося в зоне непосредственного влияния Карабашского медеплавильного комбината, уже более столетия загрязняющего атмосферу выбросами SO_2 и пылью, содержащей тяжелые металлы. В почвах Карабашского массива были отмечены повышенные концентрации Fe, Cu и Zn. Содержание химических элементов в почвах ультраосновных массивов представлено в табл. 2.

Несмотря на то что почвы ультраосновных пород Южного и Среднего Урала демонстрируют сходство химического состава с ультраосновными почвами других регионов мира, уровни содержания металлов (Fe, Mg, Cr, Ni и др.) остаются вблизи или на нижней границе показателей, характерных для ультраосновных почв в мире.

Своеобразие геохимии почв ультраосновных пород определяет состав и потенциальную доступность элементов для растений. Большинство исследованных видов показали низкие уровни накопления Ni в надземных побегах (табл. 3). Девять из тринадцати видов не поглощают избыточного количества металлов из почвы, что позволяет говорить о них, как об *исключителях*. В основном низкие значения были зафиксированы для одно-, двулетних растений. Среди многолетних видов к исключителям относится *Alyssum lenense* из секции *Alyssum* (9,1–54,99 мг/кг).

Остальные виды показали тенденцию к значительному накоплению Ni в надземных побегах. Высокие концентрации Ni были показаны для многолетних представителей рода *Alyssum*, и особенно для *A. obovatum*. Этот вид является *гипераккумулятором* Ni, показывающим высокие уровни накопления во всех исследованных нами ультраосновных массивах. Наибольшие концентрации были отмечены для растений Кракинского массива (6008 мг/кг), немного меньшее количество

Таблица 3

Максимальные концентрации Ni, зафиксированные в надземной массе представителей семейства Brassicaceae на почвах ультраосновных пород

Представитель	Жизненная форма	Содержание Ni, мг/кг
<i>Alyssum obovatum</i> (C. A. Mey.) Turcz.	Многолетник	6008,00
<i>Alyssum tortuosum</i> Waldst. & Kit. ex Willd.	Многолетник	1789,34
<i>Noccaea thlaspidioides</i> (Pall.) F. K. Mey.	Многолетник	232,00
<i>Alyssum litvinovii</i> Knjaz.	Многолетник	160,61
<i>Alyssum lenense</i> Adams	Многолетник	54,99
<i>Cardaria draba</i> (L.) Desv.	Многолетник	19,22
<i>Lepidium densiflorum</i> Schrad.	Одно-, двулетник	15,98
<i>Camelina microcarpa</i> Andr.	Однолетник	11,63
<i>Erysimum canescens</i> Roth	Двулетник	10,96
<i>Alyssum turkestanicum</i> Regel & Schmalh.	Однолетник	5,06
<i>Thlaspi arvense</i> L.	Однолетник	4,38
<i>Lepidium ruderales</i> L.	Однолетник	3,46
<i>Lepidium perfoliatum</i> L.	Однолетник	1,59

во содержится в пробах Пышминского (3038 мг/кг) и Миндякского (2128 мг/кг) массивов. Способность *A. obovatum* накапливать значительные концентрации Ni отмечалась ранее для Полярного Урала, Чукотки и других регионов мира [1], [3], [22].

В целом на Южном Урале содержание Ni у *A. obovatum* достоверно выше, чем значения, полученные нами для массивов Среднего Урала. Более высокие концентрации Ni отмечены в южных районах и не коррелируют с уровнем содержания Ni в почве. Возможно, это связано с большей аридностью климата на Южном Урале и косвенно может служить подтверждением гипотезы, связывающей способность к гипераккумуляции никеля с повышенной засухоустойчивостью вида [8].

Значительное превышение концентрации практически для всех металлов было отмечено для *A. obovatum* в пределах Карабашского ультраосновного массива, что обусловлено значительными концентрациями загрязняющих веществ в почве, однако растения из этой точки существенно не отличались от остальных по уровню накопления никеля (табл. 4).

Повышенный уровень накопления Ni в надземных побегах отмечен для *Alyssum tortuosum* на Южном Урале. В пределах Хабаровинского массива этот вид показывает уровни накопления, близкие к значению видов-гипераккумуляторов, содержание Ni в надземной массе растений варьировало от 354,71 до 1789,34 мг/кг. В большей

части исследованных популяций этот вид продемонстрировал себя как *гемиакумулятор*, показывая, по сравнению с Хабаровинским массивом, в два раза меньшие концентрации – максимум составил для растений Халиловского массива 741,44 мг/кг и 514,86 мг/кг для особей Ишкининского массива. Таким образом, мы можем говорить о наличии межпопуляционной изменчивости в уровнях накопления Ni данным видом.

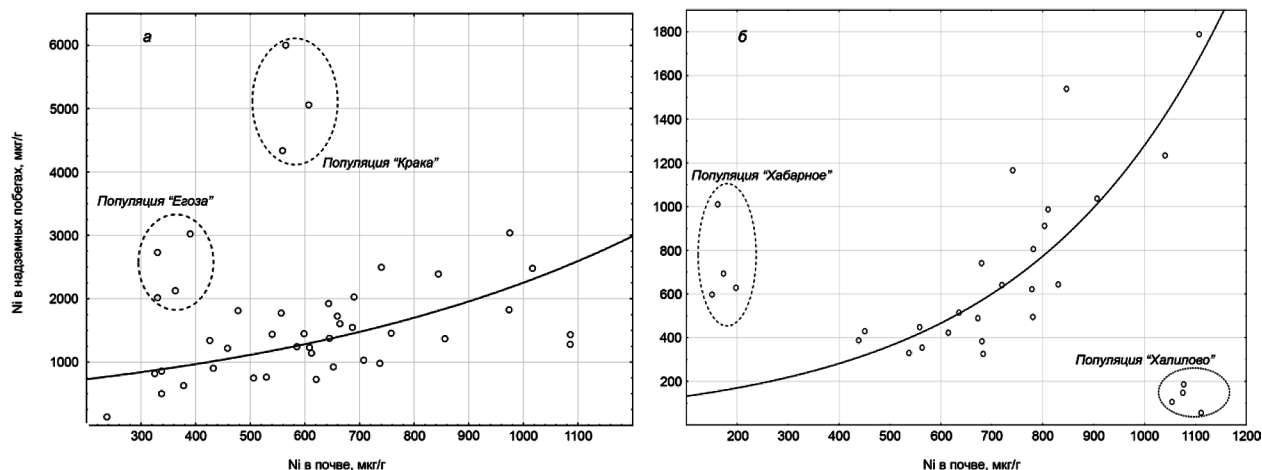
К группе гемиакумуляторов также можно отнести *Alyssum litvinovii* и *Noccaea thlaspidioides*, продемонстрировавших повышенный уровень накопления Ni. Концентрации Ni для *A. litvinovii* варьировали от 131,43 до 160,61 мг/кг, для *N. thlaspidioides* – от 158,86 до 231,64 мг/кг сухой массы. Анализ проб *N. thlaspidioides* также показал повышенное содержание Zn, диапазон значений которого составил 159,04–250,54 мг/кг. Так как для данных видов были изучены популяции только в пределах одного из известных массивов, дальнейшие исследования позволят детальнее проанализировать способность к накоплению Ni.

Alyssum obovatum, *A. tortuosum* и *A. litvinovii*, продемонстрировавшие повышенное накопление Ni в надземных побегах, относятся к секции *Odontarrhena*, для представителей этой секции в мире давно известна способность к гипераккумуляции Ni [18]. Еще один вид – *Noccaea thlaspidioides* (*Thlaspi cochleariforme* DC.) [4], [15], для которого нами были зафиксированы повышенные концентрации Ni, относится к секции *Pterotropis* и также имеет ряд родственных видов, являю-

Таблица 4

Средние концентрации химических элементов в надземных побегах растений почв ультраосновных пород (мг/кг сухой массы)

№ массива	Ca	Fe	Mg	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Zn
<i>Alyssum tortuosum</i>										
1	23638	288	1078	0,07	3,08	40,84	5,31	22,85	850,47	18,39
2	20361	461	1659	0,15	3,01	35,17	5,27	24,12	368,50	14,24
3	27308	339	1245	0,13	7,05	29,53	7,26	30,63	429,18	16,62
<i>Alyssum obovatum</i>										
4	20666	420	1859	0,13	3,59	35,44	4,05	22,73	1948,85	20,99
5	18306	291	1203	0,20	2,45	36,93	4,06	18,63	1583,00	26,48
6	22104	233	1310	0,15	1,20	33,84	5,24	21,73	964,62	33,21
7	22009	290	1982	0,15	1,84	33,68	4,40	29,25	1349,97	25,50
8	34920	903	5145	5,76	6,67	–	188	28,38	934,83	566,75
9	16000	407	1399	0,52	12,90	31,19	5,65	154,25	915,28	83,96
10	17637	929	2654	0,24	3,80	49,41	6,01	108,40	2011,82	27,05
11	12039	358	2416	0,37	1,53	36,42	4,13	37,08	1133,16	47,77
<i>Noccaea thlaspidioides</i>										
9	4758	173	957	1,85	25,45	5,10	17,11	103,25	91,92	1,85
<i>Alyssum litvinovii</i>										
2	26725	2077	2491	0,14	4,94	42,63	11,16	44,22	144,87	14,08



Зависимость содержания Ni в почве и надземной массе растений для а) *Alyssum obovatum* и б) *A. tortuosum*

щихся гипераккумуляторами тяжелых металлов [1], [18].

Проведенный корреляционный анализ показал, что уровни концентрации Ni в целом связаны с содержанием их в почве (рисунок). Для большинства популяций *Alyssum obovatum* и *A. tortuosum* была установлена прямая либо экспоненциальная зависимость содержания Ni в надземной массе и почве. Исключением стали две популяции *A. obovatum* из Сугомакского и Кракинского массивов и две популяции *A. tortuosum* из Хабаровинского и Халиловского массивов, которые характеризовались нетипичным для данных видов уровнем накопления Ni. Особи популяций Сугомакского, Кракинского и Хабаровинского ультраосновных массивов отличаются высоким содержанием Ni в надземной массе, тогда как популяция Халиловского массива – пониженными.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ показал, что геохимические характеристики почв ультраосновных пород Среднего и Южного Урала в целом схожи

с особенностями ультраосновных почв других регионов мира. Исследованные почвы характеризуются типично ультраосновными свойствами, проявляющимися в низком содержании основных макроэлементов (Ca, K, P, Na), высоких концентрациях Fe, Mg, Ni и Mn и повышенных Cr, Mg, Cu и Zn. Низкое содержание в почвах Ca и высокие концентрации Mg проявляются в смещении соотношения Mg/Ca в сторону Mg, что также характерно для почв ультраосновных пород.

2. Способность накопления тяжелых металлов характерна исключительно для многолетних растений. На Южном и Среднем Урале выявлен один гипераккумулятор Ni (*Alyssum obovatum*) и три гемиаккумулятора Ni (*A. tortuosum*, *A. litvinivii*, *Noccaea thlaspidioides*). Остальные виды оказались исключениями.

3. Для *A. tortuosum* было отмечено значительное межпопуляционное варьирование уровней накопления Ni, особенно высокие концентрации были зафиксированы в популяциях Хабаровинского ультраосновного массива, особи которых показали способность к гипераккумуляции Ni в надземных побегах.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-04-13146А и частично программы 211 Правительства Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева-Попова Н. В., Дроздова И. В. Микроэлементный состав растений Полярного Урала в контрастных геохимических условиях // Экология. 2013. Т. 44. № 2. С. 90–98.
2. Алексеева-Попова Н. В., Дроздова И. В., Калимова И. Б., Беляева А. И. Аккумуляция и гипераккумуляция тяжелых металлов видами крестоцветных в природных и экспериментальных условиях // Современная ботаника в России: Труды XIII съезда Русского ботанического общества и конференции «Научные основы охраны и рационального использования растительного покрова Волжского бассейна». Тольятти, 2013. Т. 2. С. 196–197.
3. Юрцев Б. А., Алексеева-Попова Н. В., Катаева Н. В. Видовое разнообразие локальных флор Полярного Урала в контрастных геохимических условиях // Междунар. конф. «Биоразнообразие Европейского Севера»: Тез. докл. Петрозаводск, 2001. С. 204–205.
4. Al-Shehbaz I. A. A synopsis of the genus *Noccaea* (Coluteocarpeae, Brassicaceae) // Harvard Papers in Botany. 2014. Vol. 19. № 1. P. 25–51.
5. Baker A. J. M. Accumulators and excluders: strategies in the response of plants to trace metals // J. Plant Nutr. 1981. Vol. 3. P. 643–654.

6. Baker A. J. M., Brooks R. R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry // *Biorecovery*. 1989. Vol. 1. P. 81–126.
7. Berazain R. Notes on tropical American nickel hyperaccumulating plants // *Ultramafic Rocks: Their Soils, Vegetation, and Fauna*. St. Albans, Science Reviews Ltd, 2004. P. 255–258.
8. Boyd R. S. Ecology of metal hyperaccumulation // *New Phytologist*. 2004. Vol. 162. P. 563–567.
9. Boyd R. S., Jaffré T. Elemental concentrations of eleven New Caledonian plant species from serpentine soils: elemental correlations and leaf age effects // *Northeastern Naturalist*. 2009. Vol. 16. P. 93–110.
10. Brady K. U., Kruckeberg A. R., Bradshaw H. D. Evolutionary ecology of plant adaptation to serpentine soils // *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 2005. Vol. 36. P. 243–266.
11. Brooks R. R. Serpentine and its vegetation. A multidisciplinary approach. Discorides Press, USA, 1987. 332 p.
12. Brooks R. R. Plants that hyperaccumulate heavy metals. Wallingford, CAB International, 1998. 380 p.
13. Fershtater G. B., Montero P., Borodina N. S., Pushkarev E. V., Smirnov V. N., Bea F. Uralian magmatism: an overview // *Tectonophysics*. 1997. Vol. 276. P. 87–102.
14. Kazakou E., Dimitrakopoulos P. G., Baker A. J. M., Reeves R. D., Troumbis F. Y. Hypothesis, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils: from species to ecosystem level // *Biol. Rev.* 2008. Vol. 83. P. 495–508.
15. Koch M., Al-Shehbaz I. A., Mummenhoff K. Molecular systematics, evolution, and population biology in the mustard family (Brassicaceae) // *Ann. Missouri Bot. Gard.* 2003. Vol. 90. P. 151–171.
16. Kruckeberg A. R. California serpentines: flora, vegetations, geology, soils and management problems // *University of California Publications in Botany*. 1984. Vol. 78. P. 1–180.
17. Proctor J. Plant ecology of serpentine II. Plant response to serpentine soils // *J. of Ecology*. 1971. Vol. 59. P. 397–410.
18. Reeves R. D. Hyperaccumulation of trace elements by plants // *Phytoremediation of metal-contaminated soils / Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Třešť Castle, Czech Republic, 18–30 August 2002. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences* 68. Berlin: Springer, 2005. P. 25–52.
19. Reeves R. D., Baker A. J. M., Borhidi A., Berazain R. Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba // *Annals of Botany*. 1999. Vol. 83. P. 29–38.
20. Reeves R. D., Baker A. J. M. Metal-accumulating plants // *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. NY, John Wiley & Sons Inc., 2000. P. 193–229.
21. Roberts B. A., Proctor J. The ecology of areas with serpentinized rocks: a world view. Kluwer Academic Publishers, 1992. 440 p.
22. Tepina A., Paukov A. Nickel accumulation by species of *Alyssum* and *Noccaea* (Brassicaceae) from ultramafic soils in the Urals, Russia // *Australian Journal of Botany*. 2015. Vol. 63. P. 78–84.
23. Van der Ent A., Baker A. J. M., Reeves R. D., Pollard A. J., Schat H. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction // *Plant and Soil*. 2013. Vol. 362. № 1–2. P. 319–334.

Tepina A. Yu., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)

Paukov A. G., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)

Morozova M. V., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)

ACCUMULATION OF NI BY SPECIES OF BRASSICACEAE ON ULTRAMAFIC SOILS IN THE SOUTHERN AND MIDDLE URALS

The study investigates the influence of geochemistry of ultramafic rocks on elemental composition of soils and plants. An ability of 13 species of Brassicaceae family growing on ultramafic soils, naturally contaminated by heavy metals, to accumulate Ni in aboveground shoots was studied. Ultramafic soils in the Middle and Southern Urals contain relatively high concentrations of Ni, Mg and other metals, low concentrations of Ca, as well as high Mg/Ca ratio, which is greater than 1. The soils have shown resemblance in geochemistry with ultramafic soils of other regions in the World. Nine species of Brassicaceae showed low concentrations of Ni in shoots and leaves and were regarded as excluders, three species (*Alyssum litvinovii* Knjaz., *Noccaea thlaspidioides* (Pall.) F. K. Mey., *Alyssum tortuosum* Waldst. & Kit. ex Willd.) were hemi-accumulators, which contained lower than 0,01 % Ni in aboveground shoots, and one species (*Alyssum obovatum* (C. A. Mey.) Turcz.) was a hyperaccumulator. *A. obovatum* showed an ability to accumulate high concentrations of Ni in all ultramafic massifs of the Middle and Southern Urals. In contrast, *A. tortuosum* showed significant interpopulation variation of Ni concentrations in aboveground biomass. The highest concentrations of Ni were found in the population in Chabarninskyi massif, where the ability to hyperaccumulate Ni was established for this species.

Key words: hyperaccumulation, heavy metals, ultramafic soils, nickel, *Alyssum*, *Noccaea*, Brassicaceae

REFERENCES

1. Alekseeva-Popova N. V., Drozdova I. V. Micronutrient Composition of Plants in the Polar Urals under Contrasting Geochemical Conditions [Mikroelementnyy sostav rasteniy Polyarnogo Urala v kontrastnykh geokhimicheskikh usloviyakh]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology]. 2013. Vol. 44. № 2. P. 90–98.
2. Alekseeva-Popova N. V., Drozdova I. V., Kalimova I. B., Belyaeva A. I. Accumulation and hyperaccumulation of heavy metals by species of Brassicaceae in natural and experimental conditions [Akkumulyatsiya i giperakkumulyatsiya tyazhelykh metallov vidami krestotsvetnykh v prirodnykh i eksperimental'nykh usloviyakh]. *Sovremennaya botanika v Rossii: Trudy XIII s'ezda Russkogo botanicheskogo obshchestva i konferentsii "Nauchnye osnovy okhrany i ratsional'nogo ispol'zovaniya rastitel'nogo pokrova Volzhskogo basseyna"*. Vol. 2. Tolyatti, 2013. P. 196–197.

3. Yurtsev B. A., Alekseeva-Popova N. V., Kataeva M. N. Species diversity in local floras under contrasting geochemical conditions in the Polar Urals [Vidovoe raznoobrazie lokal'nykh flor Polyarnogo Urala v kontrastnykh geokhimicheskikh usloviyakh]. *Bioraznoobrazie Evropeyskogo Severa: Tez. dokl. mezhdunar. konf.* Petrozavodsk, 2001. P. 204–205.
4. Al-Shehbaz I. A. A synopsis of the genus *Noccaea* (Coluteocarpeae, Brassicaceae) // *Harvard Papers in Botany*. 2014. Vol. 19. № 1. P. 25–51.
5. Baker A. J. M. Accumulators and excluders: strategies in the response of plants to trace metals // *J. Plant Nutr.* 1981. Vol. 3. P. 643–654.
6. Baker A. J. M., Brooks R. R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry // *Biorecovery*. 1989. Vol. 1. P. 81–126.
7. Berazaín R. Notes on tropical American nickel hyperaccumulating plants // *Ultramafic Rocks: Their Soils, Vegetation, and Fauna*. St. Albans, Science Reviews Ltd, 2004. P. 255–258.
8. Boyd R. S. Ecology of metal hyperaccumulation // *New Phytologist*. 2004. Vol. 162. P. 563–567.
9. Boyd R. S., Jaffré T. Elemental concentrations of eleven New Caledonian plant species from serpentine soils: elemental correlations and leaf age effects // *Northeastern Naturalist*. 2009. Vol. 16. P. 93–110.
10. Brady K. U., Kruckeberg A. R., Bradshaw H. D. Evolutionary ecology of plant adaptation to serpentine soils // *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 2005. Vol. 36. P. 243–266.
11. Brooks R. R. *Serpentine and its vegetation. A multidisciplinary approach*. Discorides Press, USA, 1987. 332 p.
12. Brooks R. R. *Plants that hyperaccumulate heavy metals*. Wallingford, CAB International, 1998. 380 p.
13. Fershtater G. B., Montero P., Borodina N. S., Pushkarev E. V., Smirnov V. N., Bea F. Uralian magmatism: an overview // *Tectonophysics*. 1997. Vol. 276. P. 87–102.
14. Kazakou E., Dimitrakopoulos P. G., Baker A. J. M., Reeves R. D., Troumbis F. Y. Hypothesis, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils: from species to ecosystem level // *Biol. Rev.* 2008. Vol. 83. P. 495–508.
15. Koch M., Al-Shehbaz I. A., Mummenhoff K. Molecular systematics, evolution, and population biology in the mustard family (Brassicaceae) // *Ann. Missouri Bot. Gard.* 2003. Vol. 90. P. 151–171.
16. Kruckeberg A. R. *California serpentes: flora, vegetations, geology, soils and management problems* // *University of California Publications in Botany*. 1984. Vol. 78. P. 1–180.
17. Proctor J. Plant ecology of serpentine II. Plant response to serpentine soils // *J. of Ecology*. 1971. Vol. 59. P. 397–410.
18. Reeves R. D. Hyperaccumulation of trace elements by plants // *Phytoremediation of metal-contaminated soils / Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Třešť Castle, Czech Republic, 18–30 August 2002*. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences 68. Berlin: Springer, 2005. P. 25–52.
19. Reeves R. D., Baker A. J. M., Borhidi A., Berazaín R. Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba // *Annals of Botany*. 1999. Vol. 83. P. 29–38.
20. Reeves R. D., Baker A. J. M. *Metal-accumulating plants // Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. NY, John Wiley & Sons Inc., 2000. P. 193–229.
21. Roberts B. A., Proctor J. *The ecology of areas with serpentinized rocks: a world view*. Kluwer Academic Publishers, 1992. 440 p.
22. Teptina A., Paukov A. Nickel accumulation by species of *Alyssum* and *Noccaea* (Brassicaceae) from ultramafic soils in the Urals, Russia // *Australian Journal of Botany*. 2015. Vol. 63. P. 78–84.
23. Van der Ent A., Baker A. J. M., Reeves R. D., Pollard A. J., Schat H. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction // *Plant and Soil*. 2013. Vol. 362. № 1–2. P. 319–334.

Поступила в редакцию 21.03.2016