

Аккумуляция тяжелых металлов в растениях Южного Дагестана в условиях природной геохимической аномалии

И. В. ДРОЗДОВА, Н. В. АЛЕКСЕЕВА-ПОПОВА, И. Б. КАЛИМОВА

*Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН
196376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 2
E-mail: alyssum7@gmail.com*

Статья поступила 09.12.2014

Принята к печати 17.02.2015

АННОТАЦИЯ

Проведено сравнительное изучение содержания химических элементов (Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Co, Cr, Cd, Pb, Ca, Mg, K) в растениях и почвах Южного Дагестана в двух районах, отличающихся по уровню тяжелых металлов в горных породах. Установлено, что растения и почвы в районе естественной геохимической аномалии (южный сланцевый округ Внутренне-Дагестанской горной провинции) характеризуются повышенным содержанием большинства изученных элементов, за исключением Ca и Cr, по сравнению с таковыми в фоновом районе (северный известняковый округ Внутренне-Дагестанской горной провинции). Высокие содержания Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Co в растениях и почвах, важнейших компонентах экосистем, позволяют рассматривать южный сланцевый округ горного Дагестана как био-геохимическую провинцию с повышенным содержанием вышеперечисленных тяжелых металлов.

Ключевые слова: тяжелые металлы, макроэлементы, естественная геохимическая аномалия, аккумуляция растениями тяжелых металлов, виды растений сем. Brassicaceae.

В ряде исследований показано, что присутствие в окружающей среде тяжелых металлов (ТМ) в концентрациях, превышающих фоновые значения, обусловлено как техногенным загрязнением, так и наличием естественных геохимических аномалий [Dobrovolsky, 1994; Kabata-Pendias, Pendias, 2001; Баргалы, 2005; и др.]. В различных компонентах природных и антропогенных экосистем происходит повышение уровня ТМ. Формирование аномалий объясняется мозаичностью и геохимическим своеобразием почвообразующих комплексов и часто бывает свя-

зано с районами рудопоявлений. Большинство месторождений полиметаллов Южного Дагестана располагается в пределах Хнов-Борчинского рудного поля протяженностью около 30 км и шириной 1,5–3 км [Паливода, 2008]. Металлогенная зона прослеживается здесь от устья р. Гдымчай на юго-востоке и далее в северо-западном направлении по р. Ахтычай через месторождение Кызыл-Дере, селения Хнов, Борч и до горы Цимерцы. В последнее время в этих районах происходят интенсивные геолого-разведочные изыскания, что меняет сложившееся природное

равновесие и ведет к частичному нарушению естественных местообитаний видов растений, в том числе редких и эндемичных.

Известно, что важным моментом в изучении окружающей среды и охране ее от загрязнения является определение природного фонового содержания ТМ в растениях и почвах конкретных географических районов. При этом установление для почв всех природно-климатических зон и различных ландшафтов единого универсального уровня концентрации какого-либо химического элемента, превышение которого будет свидетельствовать о загрязнении, с научной точки зрения несостоятельно [Dobrovolsky, 1994]. Использование для этой цели глобальных показателей (кларки химических элементов в растениях и почвах мира, континентов) может привести к неверным экологическим заключениям. Последние возникают, прежде всего, при работе с почвами, естественно обедненными или обогащенными определенными химическими элементами [Ильин и др., 2007; Ильин, 2012]. В случае существенного отличия регионального фона от глобального можно или не заметить начавшееся техногенное загрязнение почвенного покрова, или, напротив, принять естественный региональный фон за результат техногенного воздействия [Безносиков и др., 2007]. Поэтому большое значение имеет информация о региональном элементном составе почв и дикорастущих видов растений в ненарушенных природных экосистемах.

Хотя рудоносность южных регионов Дагестана весьма велика, природные условия горных районов в ряде случаев сильно затрудняют поиски полезных ископаемых геохимическими методами. В связи с этим возрастает роль фитоиндикационных и биогеохимических методов, применение которых основано на знании закономерностей биогенной аккумуляции элементов в различных геохимических условиях.

Следует отметить, что сведения об уровнях аккумуляции химических элементов в растительности Дагестана ограничены, разные районы исследованы крайне неравномерно, не всегда приводятся сведения о химическом составе почв и типе подстилающих горных пород. В то же время для оценки количества биологически доступных элементов

для конкретной экосистемы нужно отбирать пробы растений и почв в одних и тех же экотопах.

Исследование проведено на видах растений семейства Brassicaceae, которое выбрано нами не случайно. Оно представляет особый интерес для оценки геохимической обстановки как обладающее наибольшим по сравнению с другими семействами числом видов, способных в больших концентрациях накапливать соединения ТМ. Это дает возможность установить фоновые содержания даже тех элементов, которые обычно слабо накапливаются растениями (Co, Ni, Cr).

Цель настоящей работы – сравнительная оценка уровня накопления химических элементов в растениях и почвах ненарушенных природных экосистем горного Дагестана в районе геохимической аномалии и в фоновом районе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В соответствии с почвенно-географическим районированием Дагестана территория исследования относится к Внутренне-Дагестанской горной провинции [Залибеков, 2010]. Работа проведена в районе естественной геохимической аномалии с повышенным содержанием тяжелых металлов, расположенном в окрестностях селения Хнов, долина р. Ахты-чай (рис. 1, а). Этот район входит в южный сланцевый округ Внутренне-Дагестанской горной провинции. В качестве объекта сравнения использовали район, находящийся вблизи селений Цудахар и Гуниб, долина р. Кара-Койсу (см. рис. 1, б). Он входит в северный известняковый округ Внутренне-Дагестанской горной провинции [Залибеков, 2010].

Районы исследования характеризуются сильно расчлененным рельефом с формированием глубоко врезанных долин с крутыми склонами, осложненными коллювиальными отложениями, высотно-экспозиционное положение в пределах 2000–2500 м над ур. м. На склонах преобладают различные виды остепненных лугов. На щебнистых осыпях, отвесных каменистых и скалистых участках формируются петрофитные сообщества, в сложении которых отмечается достаточно большое участие видов сем. Brassicaceae, в том

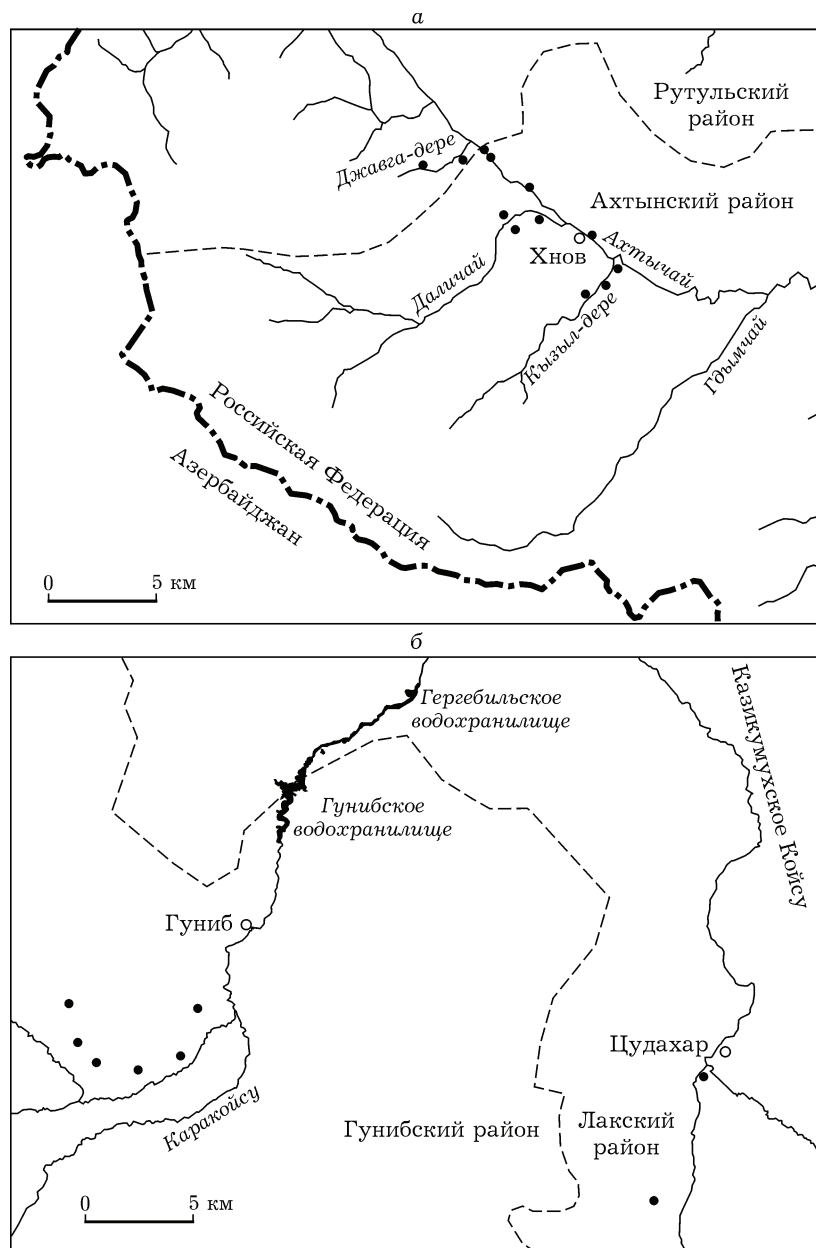


Рис. 1. Район исследования: а – южный округ Внутренне-Дагестанской горной провинции; б – северный округ Внутренне-Дагестанской горной провинции. Точками обозначены места сбора образцов

числе эндемичных для Кавказа видов *Sobolewskia caucasica* (Rupr.) N. Busch, *Sisymbrium erucastriifolium* (Rupr.) Trautv., *Alyssum daghestanicum* Rupr., *Erysimum ibericum* (Adam) DC. Кроме того, на открытых каменистых и мелкоземистых местообитаниях в составе редкотравных сообществ среднего горного пояса встречаются и другие изученные нами представители этого семейства: на сухих склонах – *Alyssum murale* Waldst. et Kit., *Erysimum substrigosum* (Rupr.) N. Busch,

E. meyerianum (Rupr.) N. Busch., *Diplotaxis muralis* (L.) DC., *Cardaria draba* (L.) Desv., *Erucastrum cretaceum* (Kotov), *Euclidium syriacum* (L.) W. T. Aiton; в более влажных условиях – *Cardamine uliginosa* M. Bieb., *Sinapis arvensis* L., *Arabis mollis* Steven; на обочинах дорог – *Lepidium ruderae* L., *Armoracia rusticana* P. G. Gaertn., B. Mey et Scherb.

В основу полевых исследований положен сравнительно-географический метод. Образцы растений и почв в районе природной

биогеохимической аномалии и в фоновом районе отбирали на осыпях в нижних частях горных склонов, на каменистых участках с разреженной травянистой растительностью, на пробных площадках размером 3×3 м. Горно-луговые почвы в районах исследования характеризовались малой мощностью и слабой дифференцированностью толщ. Образцы почв отбирали в типичных местообитаниях в одинаковых позициях ландшафта из корнеобитаемого слоя на глубине 0–10 см. Объединенная проба составлялась из трех точечных проб [ГОСТ, 2008]. Всего собрано 20 образцов. В зависимости от частоты встречаемости собирали от 1 до 6 растений каждого вида. Средний образец составляли из 10–25 особей данного вида. Анализу подвергалась вегетативная надземная часть растений, находящихся в фазе цветения, плодоношения. Для изучения элементного состава собрано 16 видов растений сем. Brassicaceae.

Навеску растительного материала (1,5–2 г) в кварцевой чашке помещали в холодный муфель и проводили озоление, постепенно доводя температуру до $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этой температуре пробы выдерживались 8 ч. Зола растворяли при нагревании в 6 мл смеси кислот ($3,71\text{ M HCl}$ и $1,5\text{ M HNO}_3$) и доводили до конечного объема 25 мл деионизированной водой. В образцах почв определяли актуальную кислотность, уровень обменных форм К, Са и Mg в ацетатно-аммонийном буфере (рН 6,5), а также содержание потенциально подвижных форм ТМ в 1н. азотнокислой вытяжке. Содержание макро- и микроэлементов в растениях и почвах определяли на спектрометре “Квант АФА” фирмы “КОРТЭК”, Россия. Относительные отклонения при измерении на приборе не превышали 5 % для макроэлементов Са, Mg, К и 2 % – для микроэлементов Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Co, Cr, Cd, Pb. Содержание органического вещества в почве определяли по величине потери при прокаливании в муфеле при температуре $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 12 ч. Статистический анализ результатов исследования проводили стандартными методами с использованием ПСП Statistica 7.0. Исходя из характера распределения концентраций элементов в образцах растений и почв, оценку достоверности различий между районами исследования осу-

ществляли по непараметрическому критерию Краскела – Уоллиса.

Коэффициент биологического накопления рассчитывали как отношение содержания элемента в растении к содержанию потенциально подвижных форм элемента в почве.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы исследуемых участков маломощны и развиты часто непосредственно на элювии или элювио-делювии горных пород. Профиль почв не дифференцирован и характеризуется высокой скелетностью, каменистостью и незначительным количеством мелкозема. Материнскими породами для почв южного округа служат нижнеюрские глинистые сланцы [Залибеков, 2010]. В пределах района нашего исследования они пересекаются многочисленными дайками магматических пород, преимущественно диабазов, с наложенной на них сульфидной минерализацией Cu, Zn, Pb. Это обуславливает возникновение в южном сланцевом округе естественной геохимической аномалии, отличительной особенностью которой является наличие в составе горных пород минералов с высокими концентрациями вышеперечисленных элементов, а также Fe, Mn, Ni, Co. Материнские горные породы северного известнякового округа представлены известняками и продуктами их переработки, подстилаемыми массивно-кристаллическими осадочными породами [Залибеков, 2010]. Почвообразующие породы северного округа преимущественно не являются рудоносными.

Известно, что на поступление ТМ в растения оказывают влияние химические и физические свойства почв, кислотно-основные и окислительно-восстановительные условия, уровень микробиологической активности [Kabata-Pendias, Pendias, 2001; Reichman, 2002; Мотузова, Безуглова, 2007]. Поскольку уровень щелочных и особенно щелочно-земельных элементов в почвенном поглощающем комплексе также определяет подвижность и доступность ТМ для растений, определяли содержание К, Са, Mg в почвах и растениях. Исследованные почвы южного округа характеризуются слабощелочной реакцией среды, в почвах северного округа значения рН повышаются до щелочных

Основные характеристики почв двух округов Внутренне-Дагестанской горной провинции, ($M \pm \sigma$), $n = 20$

Округ	рН	Потери при прокаливании, %	Обменные катионы, мг-экв/100 г возд.-сух. почвы		
			К	Mg	Ca
Северный	7,68 ± 0,06	13,9 ± 1,43	0,75 ± 0,10	4,38 ± 0,68	158 ± 5,25
Южный	7,28* ± 0,06	8,01 ± 1,40*	0,90 ± 0,14	3,82 ± 0,41	26,8 ± 3,68**

П р и м е ч а н и е. Уровень значимости различий: * <0,01, ** <0,001.

(табл. 1). Последние, сформированные на известняках, отличаются более высокой степенью гумусированности, о чем свидетельствуют показатели потерь при прокаливании. Наиболее отчетливо почвы двух сравниваемых округов различаются по уровню обменного Ca. Видно, что в почвенном поглощающем комплексе обменные формы Ca играют решающую роль, значительно превышая уровень Mg, особенно в северном округе (см. табл. 1).

Почвы южного округа, сформированные в районе естественной геохимической аномалии, отличаются от почв фонового района более высоким содержанием ТМ (табл. 2). По величине различий доминируют Cu, Zn и Fe – металлы, повышенное количество которых содержится в материнской горной породе. Так, среднее содержание потенциально подвижных форм Cu в почвах южного округа превышает таковое в почвах северного округа в 9,7 раза, Zn – в 4 раза и Fe – в 3,7 раза. Статистическая обработка материалов исследования позволила выявить наличие положительной корреляционной зависимости между содержанием Cu и Zn, Fe, Ni. Коэффициенты корреляции составляют: $r_{Cu-Zn} = 0,81$, $r_{Cu-Fe} = 0,71$, $r_{Cu-Ni} = 0,64$, что отражает сходную направленность биогеохимической миграции этих элементов в процессе почвообразования. Следует отметить, что диапазон концентраций элементов в исследованных почвенных образцах достаточно широк: от 6,43 до 34,0 мг/кг воздушно-сухой почвы – для Cu, от 4,22 до 24,7 – для Zn и от 196 до 702 мг/кг – для Fe. Такая вариабельность содержания ТМ в почвах может объясняться в большой степени локальностью выходов рудоносных пород в районе исследования. Так, например, максимальные концентрации потенциально подвижных форм Cu

(34,0 мг/кг) и Pb (11,8 мг/кг) отмечены в почвах над месторождением медно-пиритовых руд, расположенном в долине р. Кызыл-Дере при впадении ее в р. Ахты-чай. Почвы южного округа характеризовались более высоким уровнем и остальных изученных ТМ, за исключением Cr и Cd, хотя для Co, Mn и Pb различия оказались статистически незначимыми (см. табл. 2).

Исследованные почвы северного района, развитые на известняковых породах, отличаются довольно низким содержанием Cu, Zn и Fe, концентрации этих ТМ не превышали 2,08, 4,79 и 153 мг/кг соответственно. Особенно низкие содержания отмечены для Pb – 0,5 мг/кг, Ni – 0,4 и Co – 0,4 мг/кг. В щелочной среде этих почв данные элементы становятся менее мобильными, что приводит к низкой доступности их для растений. Известно, что карбонаты снижают подвижность и биологическую доступность большинства микроэлементов вследствие сорбции соб-

Т а б л и ц а 2

Среднее содержание потенциально подвижных форм ТМ в почвах двух округов Внутренне-Дагестанской горной провинции, мг/кг воздушно-сухой почвы, ($M \pm \sigma$), $n = 20$

Элемент	Северный округ	Южный округ
Fe	115 ± 50,8	426 ± 61,1**
Zn	3,21 ± 0,67	13,1 ± 1,98**
Mn	161 ± 62,5	391 ± 93,4
Cu	1,52 ± 0,38	14,7 ± 2,86**
Ni	1,87 ± 0,37	3,46 ± 0,49*
Co	3,02 ± 0,66	4,15 ± 0,65
Cr	8,88 ± 1,69	1,20 ± 0,12**
Pb	5,81 ± 1,86	6,86 ± 0,83
Cd	0,12 ± 0,02	0,08 ± 0,01

П р и м е ч а н и е. Уровень значимости различий: * <0,05, ** <0,01, *** <0,001.

ственными высокодисперсными фракциями, а также оксидами железа и марганца, образующимися на поверхности карбонатов [Минкина и др., 2009]. В условиях низкой кислотности среды образуются труднорастворимые соединения: гидроксиды, сульфиды, фосфаты, карбонаты и оксалаты ТМ [Kabata-Pendias, Pendias, 2001]. В то же время повышенное содержание Cr в почвах северного района объясняется, вероятно, резким изменением реакции почвенной среды в сторону подщелачивания и образованием вследствие этого высокоподвижных соединений Cr⁶⁺. Показано, что в аридных ландшафтах со щелочной реакцией среды анионогенные элементы Cr, Mo, Ti, V обладают гораздо большей миграционной способностью, чем катионогенные Mn, Zn, Cu, Pb и др. [Айвазян, 1974], что и проявляется в аккумуляции их растениями.

По нашим данным, между уровнем потенциально подвижного Cr и значением pH почв выявлена положительная значимая связь: $r = 0,62$; $p < 0,05$; $n = 20$. В то же время для Zn, Cu, Fe найдена отрицательная корреляционная зависимость между этими показателями, что соответствует известным явлениям большей подвижности металлов в кислых почвах [Пейве, 1964]. Коэффициенты корреляции составили: $r_{Zn-pH} = -0,59$; $r_{Cu-pH} = -0,60$; $r_{Fe-pH} = -0,56$, при $p < 0,05$.

Известно, что элементный химический состав растений определяется комплексом ландшафтно-геохимических условий. По результатам факторного анализа природных процессов, регулирующих накопление тяжелых металлов в растениях, для большинства металлов на первое место выходит фактор, отражающий минералого-геохимические особенности горных пород [Опекунова, 2013]. Косвенно это подтверждается и результатами нашего исследования. Так, отличительной особенностью элементного состава изученных видов растений в районе природной геохимической аномалии (южный округ) является статистически значимое повышение среднего содержания Cu, Zn, Co, Mn (в 2–2,7 раза) по сравнению с растениями северного округа (табл. 3). По-видимому, это обусловлено повышенной концентрацией вышеперечисленных металлов в подстилающей

Т а б л и ц а 3
Среднее содержание макроэлементов
(% в воздушно-сухой массе)
и тяжелых металлов (мг/кг воздушно-сухой массы)
в растениях двух округов Внутренне-Дагестанской
горной провинции, ($M \pm \sigma$), $n = 49$

Элемент	Северный округ	Южный округ
K	3,61 ± 0,29	2,82 ± 0,41
Ca	8,21 ± 0,99	6,90 ± 0,39***
Mg	1,10 ± 0,12	1,07 ± 0,21
Fe	174 ± 47	440 ± 87,8
Zn	9,95 ± 0,87	27,3 ± 4,05***
Mn	22,2 ± 2,45	55,5 ± 6,25**
Cu	2,56 ± 0,25	5,23 ± 0,62**
Ni	0,48 ± 0,05	5,01 ± 1,52
Co	0,54 ± 0,12	1,05 ± 0,15*
Cr	4,05 ± 0,46	3,69 ± 0,16
Pb	1,99 ± 0,19	2,47 ± 0,27
Cd	0,17 ± 0,03	0,12 ± 0,03

горной породе и в наследующих ее состав почвах южного округа (см. табл. 2). Однако не наблюдается полного соответствия между изменением уровня химических элементов в растениях и почвах. Об этом свидетельствует отсутствие значимой взаимосвязи между средним содержанием изученных химических элементов в растениях и почвах. Это может быть следствием варьирования содержания элементов в растениях, обусловленного различиями в аккумулирующей способности разных видов. Известно, что виды растений отличаются по составу корневых выделений – фитосидерофоров, облегчающих поглощение ряда питательных элементов [Neumann, Romheld, 2002]. На этом основании можно предположить, что количество подвижных форм элементов в почвах не полностью идентично их биодоступности для растений.

Следует отметить, что оценивать влияние субстрата на уровень накопления элементов наиболее корректно на растениях одного и того же вида, способных произрастать на отличающихся по кислотности и химизму субстратах. Сравнительное изучение накопления минеральных элементов видом *Erysimum teyerianum*, встречающимся на разных типах горных пород Южного Дагестана, подтвердило более высокое содержание Cu, Zn,

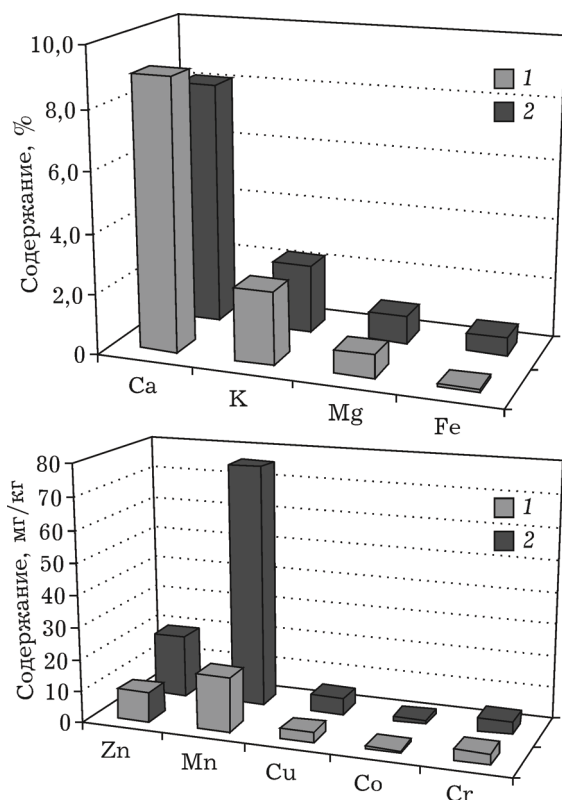


Рис. 2. Содержание макроэлементов и тяжелых металлов в надземных органах *Erysimum cheyrianum*.

1 – северный округ, 2 – южный округ

Fe, Mn в растениях, произрастающих в районе обогащения (рис. 2). Поскольку в данном случае полностью исключается таксономически обусловленная специфика аккумуляции, с большой уверенностью можно утверждать, что главная причина этого явления – различия химизма почв, связанные с геохимическими особенностями материнских горных пород.

Растения, произрастающие на почвах, развитых на известняках, выделяются более высоким средним содержанием Ca (см. табл. 3). Гораздо менее существенно изученные виды различаются по среднему содержанию K и сходны по среднему содержанию Mg (см. табл. 3). Статистически значимых различий в уровнях Cr в растениях не обнаружено, несмотря на вышеупомянутую более высокую концентрацию данного элемента в почвах северного округа. Вероятно, это связано с тем, что Cr активно мигрирует в щелочной среде, но доступность его для растений весьма

ограничена. Низкие темпы усвоения растворимых форм элемента растениями обусловлены особенностями механизма их поглощения корневой системой. По-видимому, клетки корня не обладают способностью стимулировать восстановление Cr^{6+} и Cr^{3+} до легко усвояемого Cr^{2+} , хотя процесс превращения Fe^{3+} в Fe^{2+} является ключевым в абсорбции Fe растениями [Cary et al., 1977; Gardea-Torresdey et al., 2005]. Кроме того, в экспериментальных условиях показано, что до 98 % соединений Cr накапливается в корнях [Shanker et al., 2004]. В нашей работе изучалось накопление Cr в надземной части растений.

Уровень регионального биогеохимического фона определяется наряду с ландшафтно-геохимическими условиями и видовой спецификой аккумуляции химических элементов. Несмотря на то, что мы исследовали аккумуляцию видами, относящимися к одному семейству, внутритаксонная вариабельность минерального состава растений оставалась высокой. Наиболее существенные межвидовые различия обнаружены в содержании Fe и Ni, вероятно, именно этим и объясняется отсутствие статистически значимой разницы между двумя исследованными районами по среднему уровню накопления этих элементов в растениях. Следует отметить, что коэффициент вариации концентраций Fe и Ni в растениях составил 115 и 181 % соответственно, для остальных элементов этот показатель колебался от 26 до 85 %. В южном округе наиболее низкий средний уровень Fe (67,4 мг/кг) обнаружен у *Lepidium ruderale*, наиболее высокий (1870 мг/кг) – у *Erysimum substrictosum*. У последнего вида наблюдалось также максимальное среднее содержание Mn и Cu – 120 и 9,18 мг/кг соответственно (табл. 4). Наиболее высокий уровень Zn (120 мг/кг) отмечен у *Cardamine uliginosa*, более 50 мг/кг цинка накапливали также виды *Sinapis arvensis* и *Lepidium ruderale*. Показательно, что на выходах медно-цинково-колчеданных руд в Карачаево-Черкесии вид *Lepidium campestre* (L.) R. Br. выделялся максимальным содержанием Zn – 177 мг/кг [Дроздова и др., 2013]. В северном округе у изученных видов наиболее существенно варьировало среднее содержание Fe: от 34,5 мг/кг

Содержание макроэлементов (% в воздушно-сухой массе) и тяжелых металлов (мг/кг воздушно-сухой массы) у видов растений двух округов Внутренне-Дагестанской горной провинции ($M \pm \sigma$), $n = 49$

Вид	Округ	n	Ca	K	Mg	Fe	Zn	Mn
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Alyssum daghestanicum</i>	I	2	9,99 ± 0,02	2,24 ± 1,00	1,10 ± 0,29	327 ± 69,6	10,2 ± 2,78	23,6 ± 0,02
<i>A. murale</i>	II	6	7,63 ± 0,81	2,59 ± 0,82	0,86 ± 0,55	254 ± 47,1	18,9 ± 3,31	37,1 ± 3,21
<i>Arabis mollis</i>	II	2	6,53 ± 1,60	5,19 ± 0,13	1,08 ± 0,03	361 ± 59,7	10,6 ± 1,62	61,5 ± 24,6
<i>Armoracia rusticana</i>	II	3	7,07 ± 1,11	5,24 ± 0,17	2,15 ± 0,05	128 ± 25,9	12,2 ± 1,93	28,1 ± 3,19
<i>Cardamine uliginosa</i>	II	3	5,41 ± 0,93	5,91 ± 0,21	1,47 ± 0,10	168 ± 31,0	121 ± 25,3	13,5 ± 1,87
<i>Cardaria draba</i>	II	2	5,96 ± 0,87	4,06 ± 0,30	2,06 ± 0,14	358 ± 37,8	25,5 ± 2,03	28,8 ± 2,89
<i>Diptotaxis muralis</i>	I	2	4,58 ± 0,15	3,75 ± 0,29	0,75 ± 0,05	34,5 ± 11,4	12,4 ± 1,21	23,7 ± 3,99
<i>Erucastrum cretaceum</i>	I	3	11,1 ± 0,27	3,83 ± 0,27	1,95 ± 0,11	171 ± 21,1	8,40 ± 0,97	28,1 ± 2,15
<i>Erysimum ibericum</i>	II	3	6,39 ± 0,16	2,83 ± 0,90	0,75 ± 0,19	326 ± 35,9	24,2 ± 4,99	64,4 ± 16,4
<i>E. meyerianum</i>	I	2	9,01 ± 1,20	2,42 ± 0,26	1,07 ± 0,48	92,5 ± 43,0	9,24 ± 1,86	17,1 ± 8,94
<i>E. meyerianum</i>	II	4	8,11 ± 0,87	2,28 ± 0,29	0,90 ± 0,13	622 ± 148	19,7 ± 1,66	75,9 ± 13,6
<i>E. subserotigosum</i>	II	2	11,3 ± 0,54	2,46 ± 0,51	1,11 ± 0,12	1869 ± 376	26,9 ± 10,3	120 ± 45,7
<i>Euclidium syriacum</i>	II	1	2,97	2,19	0,59	104	17,6	16,0
<i>Lepidium ruderale</i>	II	3	6,75 ± 0,15	4,55 ± 0,23	1,31 ± 0,23	67,4 ± 18,7	52,1 ± 15,3	57,8 ± 11,4
<i>Sisymbrium erucastriifolium</i>	II	6	6,68 ± 0,71	3,35 ± 0,60	1,37 ± 0,09	384 ± 171	30,1 ± 7,51	57,7 ± 16,9
<i>Sobolewskia caucasica</i>	II	3	4,20 ± 0,24	5,11 ± 0,76	0,75 ± 0,08	93,9 ± 29,0	21,4 ± 1,41	41,0 ± 6,34
<i>Sinapis arvensis</i>	II	2	6,30 ± 0,39	2,00 ± 0,21	1,08 ± 0,5	718 ± 247	55,8 ± 9,25	56,7 ± 10,1
Вид	Округ	n	Cu	Ni	Co	Pb	Cd	Cr
<i>Alyssum daghestanicum</i>	I	2	1,84 ± 0,07	0,65 ± 0,09	< 0,40	2,01 ± 0,15	0,16 ± 0,05	4,64 ± 0,005
<i>A. murale</i>	II	6	2,82 ± 0,45	20,0 ± 3,09	1,36 ± 0,17	1,95 ± 0,09	< 0,05	3,20 ± 0,18
<i>Arabis mollis</i>	II	2	3,69 ± 0,90	1,38 ± 0,04	2,64 ± 0,48	1,16 ± 0,66	< 0,05	4,31 ± 0,82
<i>Armoracia rusticana</i>	II	3	2,73 ± 0,39	< 0,40	0,92 ± 0,35	1,94 ± 0,52	0,12 ± 0,05	3,85 ± 0,17
<i>Cardamine uliginosa</i>	II	3	3,51 ± 0,72	0,58 ± 0,07	< 0,40	1,38 ± 0,41	0,64 ± 0,11	2,98 ± 0,15
<i>Cardaria draba</i>	II	2	4,00 ± 0,63	1,27 ± 0,09	< 0,40	6,38 ± 0,21	0,15 ± 0,04	3,51 ± 0,14
<i>Diptotaxis muralis</i>	I	2	3,38 ± 0,51	< 0,40	< 0,40	1,95 ± 0,07	0,25 ± 0,05	2,62 ± 0,11

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Erucastrum cretaceum</i>	I	3	2,22 ± 0,17	< 0,40	< 0,40	2,95 ± 0,14	0,12 ± 0,04	5,60 ± 2,31
<i>Erysimum ibericum</i>	II	3	4,88 ± 0,47	1,42 ± 0,06	0,59 ± 0,19	2,97 ± 0,60	< 0,05	3,64 ± 0,75
<i>E. meyerianum</i>	I	2	3,04 ± 0,37	0,50 ± 0,05	0,83 ± 0,43	1,50 ± 0,09	< 0,05	3,39 ± 1,19
<i>E. meyerianum</i>	II	4	5,13 ± 0,39	1,56 ± 0,40	1,15 ± 0,30	2,76 ± 0,35	< 0,05	4,08 ± 0,38
<i>E. substrigosum</i>	II	2	9,18 ± 3,56	3,70 ± 0,06	2,90 ± 0,09	5,57 ± 0,90	0,20 ± 0,03	5,28 ± 0,36
<i>Euclidium syriacum</i>	II	1	4,12	0,52	< 0,40	1,22	< 0,05	1,98
<i>Lepidium ruderale</i>	II	3	5,53 ± 2,39	< 0,40	< 0,40	1,21 ± 0,03	< 0,05	2,59 ± 0,10
<i>Sisymbrium erucastrifolium</i>	II	6	7,78 ± 2,40	1,13 ± 0,35	0,48 ± 0,08	2,50 ± 0,48	0,24 ± 0,10	4,03 ± 0,37
<i>Sobolewskia caucasica</i>	II	3	3,64 ± 0,17	0,52 ± 0,03	< 0,40	1,21 ± 0,20	0,10 ± 0,02	3,02 ± 0,12
<i>Sinapis arvensis</i>	II	2	8,37 ± 3,24	< 0,40	< 0,40	2,69 ± 0,11	< 0,05	4,33 ± 1,54

П р и м е ч а н и е. n – число образцов. Округ: I – северный, II – южный.

у *Diplotaxis murale* до 327 мг/кг у *Alyssum daghestanicum*.

Среди исследованных видов растений наибольшей концентрацией Ni характеризовался вид *Alyssum murale*, произрастающий в районе геохимической аномалии (см. табл. 4). У остальных видов растений, в том числе из того же района, содержание Ni оказалось на порядок ниже. Коэффициент биологической аккумуляции Ni для данного вида составляет в среднем 7,56, для остальных изученных видов он гораздо ниже – 0,5. Как известно, *Alyssum murale* может произрастать в различных эдафических условиях, в том числе достаточно часто встречается на серпентинитовых почвах, для которых характерен повышенный уровень Ni [Tumi et al., 2012]. В таких местообитаниях он накапливает крайне высокие концентрации Ni, более 10 000 мг/кг [Алексеева-Попова и др., 2015]. Это явление получило название гипераккумуляции и широко распространено среди видов рода *Alyssum*, включающего 48 видов-гипераккумуляторов Ni [Krämer et al., 1996].

Видовая специфика накопления элементов в растениях при равной концентрации их в почве обусловлена биологическими особенностями поглощения корневыми системами, специфичностью фитосидерофоров и метаболическими процессами в тканях. Поэтому различные виды растений обладают избирательностью накопления макро- и микроэлементов даже при произрастании в одинаковых почвенно-геохимических условиях. В то же время в геохимически и экологически контрастных условиях, как показано нами ранее, сохраняется присущий виду тип минерального обмена, определяемый соотношением K/Ca [Дроздова, Алексеева-Попова, 1998]. Так, при значительных межвидовых различиях в уровнях содержания макроэлементов (см. табл. 4) характерной чертой минерального обмена изученных видов является низкое соотношение K/Ca ≤ 1, что позволяет отнести их к растениям с кальциотрофным типом минерального обмена [Horak, Kinzel, 1971]. Данный тип минерального обмена прослеживается у всех исследованных видов, независимо от условий произрастания. Это подтверждают и литературные сведения, согласно которым большин-

ство видов сем. Brassicaceae обладает кальциотрофным типом минерального обмена и сохраняет его даже при произрастании на почвах с низким уровнем обменного Ca [Kinzel, 1982].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с проведенным исследованием концентрация тяжелых металлов Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Co в растениях, обитающих в южном сланцевом округе Внутренне-Дагестанской горной провинции, выше по сравнению с фоновой территорией (северный известняковый округ Внутренне-Дагестанской горной провинции). Например, содержание Ni в изученных растениях в 5, а Fe в 7 раз превосходит уровень этих элементов, который, согласно биогеохимическим критериям оценки территории, соответствует параметрам “относительно удовлетворительной экологической ситуации” [Критерии..., 1992]. Таким образом, южный сланцевый округ горного Дагестана можно рассматривать как биогеохимическую провинцию с повышенным содержанием вышеперечисленных элементов. В результате выветривания рудных тел, в значительном количестве присутствующих в горных породах Южного Дагестана, образуются вторичные ореолы рассеяния вышеперечисленных тяжелых металлов, которые проявляются в компонентах экосистем, включая почвы и растения. Это определяет высокое природное содержание в них Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Co, что необходимо учитывать при разработке основных показателей для растений и почв, использующихся в целях оценки их состояния и нанесенного ущерба. Полученные результаты могут применяться в мониторинговых биоиндикационных исследованиях состояния окружающей среды, связанных с оценкой миграционных потоков ТМ в экосистемах.

Авторы выражают искреннюю благодарность д-ру биол. наук, профессору Санкт-Петербургского государственного университета В. И. Дорофееву за консультации и помощь в сборе материала по видам сем. Brassicaceae, а также канд. геогр. наук, с.н.с. института геологии ДНЦ РАН И. А. Идрисову за консультации по вопросам геологии района исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- Айвазян А. Д. Геохимическая специализация флоры Алтая: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1974. 21 с.
- Алексеева-Попова Н. В., Дроздова И. В., Калимова И. Б. Концентрирование тяжелых металлов видами сем. Stuciferae флоры Северного Кавказа в связи с проблемой фиторемедиации // Геохимия. 2015. № 3. С. 1–9.
- Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений. М.: Изд-во ГЕОС, 2005. 457 с.
- Безносиков В. А., Лодыгин Е. Д., Кондратенко Б. М. Оценка фоновое содержания тяжелых металлов в почвах европейского северо-востока России // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1064–1070.
- ГОСТ 17.4.3.01–83. Сборник стандартов “Охрана природы. Почвы” М.: Стандартиформ, 2008. 4 с.
- Дроздова И. В., Алексеева-Попова Н. В. Типы минерального обмена растений Южной Чукотки // Ботан. журн. 1998. № 7. С. 53–65.
- Дроздова И. В., Алексеева-Попова Н. В., Калимова И. Б. Аккумуляция тяжелых металлов некоторыми видами растений сем. Brassicaceae на Северном Кавказе // Раст. ресурсы. 2013. Вып. 3. С. 370 – 379.
- Залибеков З. Г. Почвы Дагестана. Махачкала: Изд-полиграф. фирма “Наука” ДНЦ РАН, 2010. 241 с.
- Ильин В. Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва – растение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
- Ильин В. Б., Сысо А. И., Конарбаева Г. А., Ермолов Ю. В. О некоторых вопросах биогеохимии на юге Западной Сибири // Сиб. экол. журн. 2007. Т. 14. № 5. С. 753–763 [Ilyin V. B., Syso A. I., Konarbaeva G. A., Ermolov Yu. V. About Some Problems of Biochemistry in the South of Western Siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2007. N 5. P. 753–761].
- Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. Минприроды России. М., 1992. 54 с.
- Минкина Т. М., Мотузова Г. В., Назаренко О. Г. Состав соединений тяжелых металлов в почвах. Ростов-на-Дону: Эверест, 2009. 208 с.
- Мотузова Г. В., Безуглова О. С. Экологический мониторинг почв. М.: Гаудеамус, 2007. 237 с.
- Опекунова М. Г. Диагностика техногенной трансформации ландшафтов на основе биоиндикации: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2013. 36 с.
- Паливода Н. К. Прогнозная оценка запасов полиметаллических руд и кобальтовой минерализации на Борчинском участке Хнов-Борчинского рудного поля (Дагестан) // Тр. ИГ ДНЦ РАН. Махачкала, 2008. Вып. 52. С. 47–54.
- Пейве Я. В. Об основных закономерностях распределения валовых запасов и подвижных форм микроэлементов в почвах СССР // Докл. VIII Междунар. конгр. почвовед. М., 1964. С. 126–135.
- Cary E. E., Allway W. H., Olson O. E. Control of chromium concentrations in food plants. I Absorbtion and translocation of chromium in plants. II Chemistry of chromium in soils and its availability to plants // J. Agric. Food. Chem. 1977. Vol. 25, N 2. P. 300–305.
- Dobrovolsky V. V. Biogeochemistry of the World's land. М.: Mir and CRC Press Boca Raton, Fl., 1994. 362 p.

- Gardea-Torresdey J. L., de la Rosa G., Peralta-Videa J. R., Montes M., Cruz-Jimenez G., Cano-Aguilera I. Differential uptake and transport of trivalent and hexavalent chromium by tumbleweed (*Salsola kali*) // Environ. Contam. Toxicol. 2005. Vol. 48, N 2. P. 225–232.
- Horak O., Kinzel H. Typen des Mineralstoffwechsels bei den höheren Pflanzen // Pflanzen Österr. Bot. Z. 1971. Bd. 119, N 4–5. S. 475–495.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Boca Raton Fl., L.: CRC Press, 2001. 413 p.
- Kinzel H. Pflanzenökologie und Mineralstoffwechsel. Stuttgart: Verlag Ulmer, 1982. 534 S.
- Krämer U., Charnack J. M., Baker A. J. M. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel // Nature. 1996. Vol. 379, N 6566. P. 635–638.
- Neumann G., Romheld V. Root-induced changes in availability of nutrients in the rhizosphere // Plant roots / eds. Y. Waisel, A. Eshel, U. Kafkafi. N.-Y.: Dekker, 2002. P. 617–649.
- Reichman S. M. The responses of plants to metal toxicity: a review focusing on copper, manganese and zinc. Melbourne: Australian minerals and energy environment Foundation, 2002. 54 p.
- Shanker A. K., Djanaguiraman M., Sudhagar R., Chandrashekar C. N., Pathmanabhan G. Differential antioxidative response of ascorbateglutathione pathway enzymes and metabolites to chromium speciation stress in green gram (*Vigna radiate* (L.) R Wilczek, cv CO 4) roots // Plant Sci. 2004. Vol. 166, N 4. P. 1035–1043.
- Tumi A. F., Mihailović N., Gajić B. A., Niketić M., Tomović G. Comparative study of hyperaccumulation of nickel by *Alyssum murale* s.l. populations from the ultramafics of Serbia // Polish Journ. of Environ. Studies. 2012. Vol. 21, N 6. P. 1855–1866.

Accumulation of Heavy Metals by Plants of South Dagestan under the Conditions of Natural Geochemical Anomaly

I. V. DROZDOVA, N. V. ALEXEEVA-POPOVA, I. B. KALIMOVA

*V. L. Komarov Botanical Institute, RAS
196376, Saint-Petersburg, prof. Popova str., 2
E-mail: alyssum7@gmail.com*

The comparative study of the concentrations of chemical elements (Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Co, Cr, Cd, Pb, Ca, Mg, K) in plants and soils of South Dagestan was conducted in two districts distinguished by different level of heavy metals in rock formations. It was established that plants and soils in the area of natural geochemical anomaly (southern schistic region of Inner Dagestan mountain province) were characterized by higher content of the most part of the studied elements, except Ca and Cr, as compared to those in the reference area (northern limestone region of Inner Dagestan mountain province). High content of Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Co in plants and soils - the most important components of any ecosystem - allowed us to consider the south schistic region of Dagestan as a biogeochemical province with high concentration of the above mentioned heavy metals.

Key words: heavy metals, macroelements, natural geochemical anomaly, accumulation of heavy metals by plants, species of the family Brassicaceae.