

ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ РАСТЕНИЯМИ И АКТИВНОСТЬ ПОЧВЕННЫХ ФЕРМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ РАЙОНОВ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

© 2022 г. В. В. Ермаков^{а, *}, С. Ф. Тютиков^а, А. П. Дегтярев^а, У. А. Гуляева^а, В. Н. Данилова^а

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

*e-mail: vad-ermak@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.02.2021 г.

После доработки 23.02.2021 г.

Принята к публикации 31.03.2021 г.

Биогеохимические исследования выполнены в двух металлогенических районах Северного Кавказа, включая Унальскую котловину в бассейне реки Ардон, обогащенную Zn, Pb, Cu и Cd (республика Северная Осетия–Алания), и профиль по течению р. Баксан с повышенным уровнем W и Mo (Кабардино-Балкарская республика). Изучено аккумулярование металлов как индивидуальными растениями, так и экогруппами по высотному и латеральному профилю в бассейне р. Ардон. Установлено селективное концентрирование Zn в листьях березы *Betula platyphylla* Sukacz., Cd и Zn в листьях различных видов ивы и осины. Проведена оценка связи между активностью почвенных ферментов (дегидрогеназа, инвертаза, пероксидаза, каталаза) и уровнем содержания металлов в почвах полиметаллических и W-Mo биогеохимических провинций. Установлено, что увеличение суммы содержания металлов в почвах обоих районов ингибировало активность дегидрогеназы. По степени ингибирования металлами почвенные ферменты располагаются в ряд: дегидрогеназы > инвертаза > (каталаза и пероксидаза). Изменение активности почвенных ферментов в условиях техногенного загрязнения может служить дополнительным биогеохимическим индикатором при поисковых и экологических исследованиях.

Ключевые слова: биогеохимические аномалии, металлы, мониторинг, почвы, ферменты

DOI: 10.31857/S0016752522070020

ВВЕДЕНИЕ

Металлогенические районы Северного Кавказа характеризуются наличием природно-техногенных геохимических аномалий с широким спектром химических элементов, которые являются результатом воздействия горнорудной промышленности на окружающие ландшафты. Часто они идентичны по составу химических элементов рудогенным (природным), поскольку их источником является один и тот же рудный материал. Комплексное изучение природно-техногенных аномалий и потенциальных биогеохимических (БГХ) провинций представляет собой сложную методическую проблему, так как с одной стороны необходимо оценить химический элементный состав пищевых цепей, а с другой – выявить специфические биологические реакции организмов, принадлежащих к разным уровням пищевой пирамиды и систематическим группам. Особый интерес представляет использование для целей комплексного биогеохимического мониторинга почвы как биокосного тела (Вернадский, 1940). В частности – оценка возможности применения для

этих целей параметров активности почвенных ферментов, таких как дегидрогеназа, каталаза, пероксидаза и инвертаза и другие (Soil microbiology..., 2012; Валова, 2015). В условиях металлогенических горнорудных регионов, где почвы существенно деградируют, подобные исследования приобретают исключительную актуальность (Конышева и др., 2011; Tabatabai et al., 1992; Garcia et al., 2015).

Данное сообщение посвящено комплексной БГХ оценке двух металлогенических районов Северного Кавказа.

МЕТОДИКА

Полевые работы проводились в июле 2020 г. в двух металлогенических районах, включая Унальскую котловину, обогащенную Zn, Pb, Cu и Cd в бассейне р. Ардон (Республика Северная Осетия–Алания), и профиль по течению р. Баксан с повышенным уровнем W и Mo (Кабардино-Балкарская Республика). Основное внимание было сосредоточено на БГХ дифференциации

растений и оценке новых БГХ индикаторов — активности почвенных ферментов. В первом случае источником полиметаллической аномалии являлись дефляция пульпы Мизурского ГОКа и миграция металлов с водами и селевыми потоками, контактирующими с вскрытыми точечными Pb—Zn месторождениями. А во втором случае — вскрытие W—Mo месторождений и Тырнаузский вольфрамowo-молибденовый комбинат (ТБМК). Исследования проводились по отработанной БГХ методике, включающей комплексное исследование и отбор проб почв, природных вод и растений на стационарных точках (площадках). Измерение рН, Eh, минерализации, электропроводности вод и суммарной ($\beta + \gamma$) радиоактивности осуществлялось на месте отбора проб.

В бассейне р. Ардон было опробовано 11, а в бассейне р. Баксан 10 площадок. На всех отбирали верхний почвенный горизонт А (0–15 см). Основные типы почв: аллювиальные, дерново-луговые, горно-степные, дерново-карбонатные, лугово-черноземные. Одновременно на экспериментальных площадках отбирали образцы листьев деревьев и укосов травянистых растений. Для исследования использовали фракцию почв ≤ 1 мм. При определении органического вещества пробы растирали до размера частиц ≤ 200 нм. В почвах оценивали активность внеклеточных почвенных ферментов, используя общепринятые методы (Хазиев, 2005) в авторской модификации. В частности, были разработаны новые способы получения реагентов (соединения титана, формазан, бензофенон). Это позволило выполнить измерение активности дегидрогеназы, пероксидазы и инвертазы. В почвах определяли содержание органического вещества, карбонатов, рН водной фазы.

После минерализации кислотами отобранных проб проводилось определение металлов методом ААС в пламенном варианте с дейтериевым (Квант-2А) и беспламенном варианте (Квант-З.ЭТА) с зеемановским корректором фона. Точность анализа контролировали посредством анализа аттестованных образцов почв и растений (стандартные образцы КНР, Польши и РФ, включая SP-1, SP-2, SP-3 и другие). Нижний предел определения для Cu, Zn, Pb был равен 0.1 мг/кг, Cd — 0.02 мг/кг и As — 0.05 мг/кг.

При статистической обработке результатов исследований использовали программу Ms-Excel 2013.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание металлов в почвах

Концентрации металлов почвах обоих металлогенических районов приведены в табл. 1. Анализ почв показал высокое содержание металлов в урбоземах и техноземах (пульпе) вокруг Уналь-

ского хвостохранилища (УХХ). Содержание металлов в почвах Баксанского профиля оказалось значительно ниже, кроме молибдена.

По сравнению с предыдущими данными (Ермаков et al., 2016), обнаруженные концентрации металлов в некоторых точках Унальской котловины заметно возросли. При этом следует отметить, что практически везде металлы преобладают в верхних горизонтах. По-видимому, это явление связано с дефляцией пульпы УХХ, эоловым рассеянием тонкодисперсной пыли и природными катастрофами (сели, оползни). По уровню содержания Pb, Zn и Cu в пульпе УХХ можно рассматривать как техногенное месторождение.

В результате анализа почв обоих районов получен градиент концентраций металлов и их суммы на обследованных участках, что необходимо для проведения исследований по биогеохимической индикации. При этом сумма металлов в почвах Унальской котловины (Cu, Pb, Zn, Cd, Mo) изменялась от 380 до 5602 мг/кг, а в почвах Баксанского профиля — от 68 до 272 мг/кг.

Металлы в растениях

Флористическое обследование экспериментальных участков в пределах УХХ показало заметное снижение числа обитаемых видов растений на техногенных площадках. Общее количество видов здесь не превышало 30, в то время как на “фоновых” точках составляло 47–56 видов на 100 м². Снижалась также общая биомасса укоса с 1 м².

При оценке аккумуляции металлов индивидуальными растениями и укосами на всем протяжении р. Ардон (80 км) установлены максимальные концентрации металлов в пределах Унальского хвостохранилища. Основной вклад в сумму четырех металлов вносят Zn и Pb. При этом коэффициент биологического поглощения по Zn (K_6) для березы в 6–10 раз выше, чем для укосов с тех же площадок. Но для самых загрязненных площадок это отношение сокращается до 2. Для Pb и Cu отношение (K_6 березы)/(K_6 укосов) колеблется не более, чем в 2 раза, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Установлено, что укосы и береза накапливают Pb и Cu в зависимости от содержания металлов в почвах. Береза же накапливает Zn специфически. Даже в условиях фоновых территорий при низком содержании Zn в почвах его концентрация в листьях березы оказывается весьма высокой. Установлена существенная корреляционная связь ($r = +0.892$) между содержанием Zn цинка в листьях березы и в почвах ($n = 8$, критическое значение для 1% доверительного уровня $r = +0.76$). Связи в парах укос — почва для Zn, и в парах Pb—Cu (как в березе, так и в укосах) — почва — довольно слабые, а

Таблица 1. Содержание металлов в почвах Унальской котловины и бассейна р. Баксан (мг/кг воздушно-сухого вещества)

№ п/п	Место отбора	Тип почвы	Pb	Cu	Zn	Cd	Mo	ΣMe*
Унальская котловина (бассейн р. Ардон)								
1	с. Унал, у выхода штольни	Горно-луговая скелетная	571	81	780	6.6	2.0	1441
2	с. Унал, ниже штольни	Дерново-луговая на аргиллитах	103	27	246	1.0	2.9	380
3	пойма р. Ардон, 100 м от реки	Лугово-аллювиальная	976	114	1143	9.3	2.2	2244
4	с. Унал, 15 м от моста,	Дерново-луговая	1708	242	3636	14.1	1.9	5602
5	в 15 м от устья р. Уналдон	Лугово-аллювиальная	238	41	486	1.4	2.5	768
6	ниже устья р. Уналдон	Лугово-аллювиальная	364	119	1338	7.2	2.3	1830
7	с. Унал, луг за садом	Лугово-аллювиальная	862	89	2223	8.7	3.8	3187
8	с. Унал, в 10 м севернее базы МГУ	Дерново-карбонатная	268	54	369	2.1	2.1	695
9	с. Унал, в 100 м южнее базы МГУ	Дерново-карбонатная	475	81	642	4.0	2.7	1205
10	2-я надпойменная терраса р. Ардон, за базой МГУ	Дерново-карбонатная	703	92	723	5.3	3.1	1526
11	1-я надпойменная терраса р. Ардон, за базой МГУ	Дерново-луговая	670	180	1680	12.6	3.1	2546
Бассейн р. Баксан								
1	левый берег р. Малки	Лугово-черноземная	31.1	13.4	75.6	0.23	2.3	123
2	выше устья р. Баксан	Дерново-луговая	17.9	3.8	42.6	0.17	3.3	68
3	с. Баксан, луг у р. Баксан	Лугово-аллювиальная	23.9	12.8	78.6	0.23	2.5	118
4	водосброс ГЭС, р. Баксан	Дерново-луговая	25.1	8.0	75.6	0.23	2.5	111
5	с. Заюково,	Горный чернозем	29.9	13.4	90.6	0.23	3.6	138
6	с. Жанхотеко	Горно-луговая, мощная	23.9	17.6	108.6	0.20	3.9	154
7	с. Былым, луг	Горно-луговая	19.7	17.6	90.6	0.32	5.2	133
8	г. Тырныауз, 30 м западнее ГОК	Почво-грунт	13.7	17.6	66.6	0.26	4.4	103
9	в устье р. Мукулан	Почво-грунт (сель)	35.9	49.4	153.6	0.98	32.3	272
10	с. Верхний Баксан	Горно-луговая, субальпийская	35.9	13.4	129.6	0.14	3.2	182

Примечание. Сумма металлов – ΣMe (Cu + Zn + Pb + Cd + Mo).

корреляция изменяется в диапазоне от +0.65 до +0.78.

Высокое содержание Zn характерно для листьев осины. K_6 по Zn в 10 раз выше, чем K_6 по Zn для укоса. Концентрации Cu и Pb в почвах и укосах связаны положительной корреляцией от +0.98 до +0.99. Связь между содержанием этих микроэлементов в почвах и листьях березы менее выражена (+0.69 и +0.73 соответственно). По Zn корреляция еще меньше (от +0.46 до +0.47). Специфичность аккумуляции Zn листьями березы нарушает эту взаимосвязь. По-видимому, свойство концентрировать металлы присуще многим видам из семейств Betulaceae и Salicaceae.

Представляют интерес данные об особенностях концентрирования химических элементов не только индивидуальными растениями, но и экогруппами. Это особенно важно при экологической оценке таксонов биосферы при использовании биогеохимических критериев и поисках

месторождений полезных ископаемых. В табл. 2 приведены данные по содержанию металлов в растениях по высотному профилю р. Ардон.

Прослеживается интенсивное аккумулятивное Pb определенными экогруппами растений. За пределами рудных районов в верхней части бассейна реки Ардон наименьшее содержание Pb отмечено в сене луговых трав (<0.1–0.8 мг/кг), его концентрация в ксерофитных колючих травах (*Centaurea iberica*) и древесных живых формах (ива, *Salix* sp.) была на порядок выше (1–2 мг/кг). Максимальное обогащение Pb обнаружено в литофитах, таких как лишайники (72.5 мг/кг). Такая же видовзависимая концентрация Pb была выявлена вблизи Мизурского ГОКа. С почвами, содержащими до 366 мг/кг Pb, сено содержало Pb 7.5 мг/кг, колючие травы (*C. iberica*) – 38.5 мг/кг, деревья (ольха, *Alnus* L.) – около 7 мг/кг, а литофиты (лишайники) – 755 мг/кг.

Таблица 2. Содержание металлов в ландшафтной растительности (укосы) по высотному профилю долины р. Ардон

Высотные пояса, ландшафтная растительность	Содержание металлов в укосах, мг/кг сухого вещества			
	Pb	Cd	Cu	Zn
Альпийский пояс, манжетковые луга, родореты	0.4	0.14	7.3	25
Субальпийский пояс, высокотравные луга	0.4	0.08	5.7	34
Высокогорные леса, сосняки, лесные травы	0.2	0.03	5.3	40
Высокогорные послелесные луга-сенокосы, злаково-разнотравное высокотравье	0.82	0.1	3.5	50
Горно-степной пояс, злаково-полынные лугостепи	5.6	0.11	4.0	20
Нагорно-ксерофитные группировки, трагакантники Унальской котловины	9.1	0.15	8.5	32
Заболоченная пойма р. Ардон рядом с хвостохранилищем п. Унал, полуболотное разнотравье	26	0.8	14	150
Унальское хвостохранилище, склоны дамбы, сорно-рудеральная флора, древесно-кустарниковые насаждения	150	2.1	50	320
Гусыра-Тамиск, заболоченная пойма р. Ардон ниже хвостохранилища, лугово-болотная флора	1.2	0.3	6.3	50
Широколиственные буковые леса Урсдон, луговые поляны, лесное разнотравье, северный макросклон Скалистого хребта вне техногенной области	0.42	0.04	6.8	32
Наклонная равнина Алагир-Рамоново, орошаемые сельскохозяйственные земли, пойменное разнотравье	30	0.5	13.6	60
Наклонная равнина, Ардон-Карджин, пойменные приречные луга низовьев р. Ардон	3.5	0.3	10.7	45

Эфираносы (душица обыкновенная, *Origanum vulgare*) содержит относительно небольшое количество Pb (7.5 мг/кг); даже в небольших количествах Pb был найден в молочае (*Euphorbia virgata*) — 0.25 мг/кг. В окрестностях УХХ (терраса реки Ардон), где концентрация Pb в черноземоподобных выщелоченных почвах достигала 217 мг/кг, степные травы (проба сена) содержали Pb до 12.5 мг/кг, в то время как содержание Pb в отдельных видах значительно варьировало следующим образом: *E. virgata* — 5 мг/кг; *C. iberica* — 3.5 мг/кг и лишайники — 307 мг/кг.

Заслуживает внимания повышенная аккумуляция Pb литофитами (лишайники), мхами не только в местах загрязнения (Мизур), но и в пределах фоновых участков (верховья р. Ардон, с. Н.Зарамаг). Различия по содержанию Pb в литофитах и укосах растений исследуемого бассейна составляют 240 раз, что подтверждает избирательность данной группы организмов по отношению аккумуляции не только радионуклидов, но и ряда металлов и микроэлементов.

Используя большой фактический материал (20 видов растений, более 100 проб), установлены факты поверхностного загрязнения металлами, в особенности Cd, растений, обладающих густым войлочным опушением (мать-мачеха, *Tussilago farfara*), клейким железистым опушением (марь души-

стая, *Tussilago farfara*), а также жестко-щетинистым покровом (василек грузинский, *C. iberica* и др.).

В бассейне р. Баксан в районе бывшего ТБМК, напротив, наблюдался высокий параметр биоразнообразия луговых растений, в особенности бобовых, несмотря на аномальные концентрации Mo и W в почвах и организмах.

Так, на участке в г. Тырныауз у основания карьера на горно-коричневых почвах, сформировавшихся на коллювии продуктов выветривания коренных пород (в основном граниты) и заметно техногенно преобразованных, произрастали: горошек мышиный — *Vicia crassa*, люцерна серповидная — *Medicago falcate*, люцерна хмелевидная — *Medicago lupulina*, лядвенец рогатый — *Lotus corniculatus*, клевер альпийский — *Trifolium alpestre*, клевер гибридный — *Trifolium hybridum*, клевер горный — *Trifolium montanum*, клевер ползучий — *Trifolium repens*, клевер седоватый — *Trifolium canescens*, клевер средний — *Trifolium media*, донник белый — *Melilotus albus*, донник желтый — *Melilotus officinalis*, вязель разноцветный — *Coronilla varia* и язвенник Буасье — *Anthyllus Boissierii*.

Активность почвенных ферментов

Проведена оценка связи между активностью почвенных ферментов (дегидрогеназы, инверта-

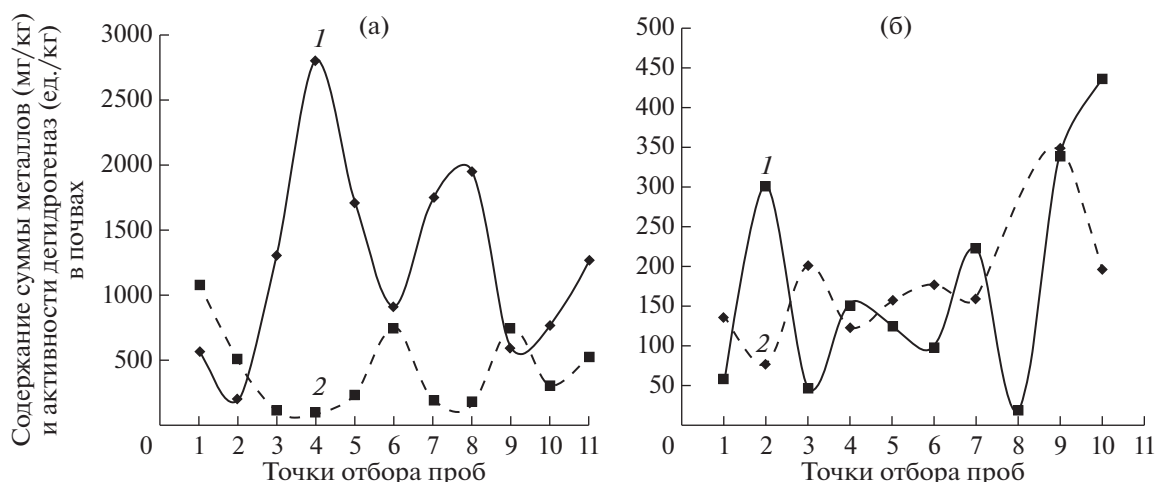


Рис. 1. Изменение содержания суммы металлов (Pb, Cu, Zn, Cd, Mo) и активности дегидрогеназы в почвах. а — Унальский профиль (полиметаллическая аномалия). б — Баксанский профиль (W-Mo аномалия). 1 — сумма металлов (мг/кг). 2 — активность дегидрогеназы (ед./кг).

за, пероксидаза, каталаза) и уровнем содержания металлов в почвах полиметаллических и W-Mo БГХ провинций. Установлено, что увеличение концентрации суммы металлов в почвах обоих районов ингибировало активность дегидрогеназы (рис. 1). На рис. 1 активность фермента выражена в ед./кг — мкг формазана — продукта восстановления 2,3,5-трифенилтетразолия хлорида массой почвы 1 г за 2 ч при 30°C или мкг формазана — массой почвы 1 кг за 2 ч при 30°C. При этом коэффициент корреляции (r) между активностью фермента и уровнем содержания суммы металлов составлял -0.718 . По степени ингибирования металлами почвенные ферменты располагаются в ряд: дегидрогеназа > инвертаза > (каталаза и пероксидаза).

Параметры активности дегидрогеназы, каталазы и инвертазы в почвах бассейна р. Баксан слабо коррелировали между собой. В ряде случаев активность ферментов была стабильной при высоких концентрациях металлов в среде, что указывает на существование адаптивных форм ферментов.

В обоих районах в почвах с повышенным содержанием органического вещества активность дегидрогеназ, инвертазы и каталазы была более высокой, а пероксидазы — низкой (табл. 3). В Унальской котловине отмечалась тенденция связи отдельных металлов (Cu, Zn, Cd, Pb) с органическим веществом, кроме Mo. Для почв Баксанского профиля связь между концентрациями Mo, W, Cu и органическим веществом в ряде случаев была отрицательной, что косвенно указывает на стабильность техногенных форм (в основном оксидов). По степени ингибирования металлами почвенные ферменты располагаются в ряд: дегидрогеназы > инвертаза > (каталаза и пероксидаза). Необходимо отметить, что в ряде случаев

активность ферментов была стабильной при высоких концентрациях металлов в среде, что указывает на адаптивные формы ферментов.

Оценивалась также связь между активностью отдельных ферментов и содержанием органического вещества (табл. 4). Четкой достоверной связи между отдельными ферментами и органическим веществом почв не выявлено. Тем не менее, наблюдалась тенденция увеличения активности всех ферментов, кроме пероксидазы, с ростом содержания органического вещества. Для пероксидазы это явление было обратным.

В Баксанском ущелье между инвертазой и каталазой, а также между дегидрогеназой и каталазой обнаружена положительная связь $r = +0.704$ и $+0.650$ соответственно. Учитывая широкое распространение внеклеточных ферментов в почвах, их селективность, участие в БГХ циклах, жизненно важных процессах и ингибирование под действием токсических уровней металлов, почвенную энзимологию можно рассматривать как одно из эффективных направлений БГХ индикации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Максимальные концентрации металлов установлены в отдельных видах, укосах и листьях древесных растений в пределах УХХ. Основной вклад в сумму четырех металлов вносят Zn и Pb. Прослеживается интенсивное аккумулятивное поведение металлов определенными экогруппами растений. Вне рудной зоны в верховьях р. Ардон зафиксировано наименьшее содержание Pb в укосах луговых трав. Наиболее обогащены металлами (в особенности, Pb) — накипные лишайники. Коэффициент концентрирования у лишайников и мхов, относительно фона в их биомассе наиболее высок

Таблица 3. Связь между уровнем содержания металлов в почвах Баксанского и Унальского профилей, активностью ферментов и количеством органического вещества (ОВ)

Баксанский профиль			
Связь	<i>R</i>	Связь	<i>R</i>
$\Sigma\text{Me}^*-\text{ОВ}$	–0.550	$\text{W}-\text{ОВ}$	–0.495
$\Sigma\text{Me}-\text{Инвертаза}$	–0.481	$\text{W}-\text{Инвертаза}$	–0.255
$\Sigma\text{Me}-\text{Дегидрогеназа}$	–0.724	$\text{W}-\text{Дегидрогеназа}$	–0.250
$\Sigma\text{Me}-\text{Пероксидаза}$	+0.366	$\text{W}-\text{Пероксидаза}$	+0.499
$\Sigma\text{Me}-\text{Каталаза}$	–0.640	$\text{W}-\text{Каталаза}$	–0.198
$\text{Mo}-\text{ОВ}$	–0.634	$\text{Cu}-\text{ОВ}$	–0.408
$\text{Mo}-\text{Инвертаза}$	–0.426	$\text{Cu}-\text{Инвертаза}$	–0.324
$\text{Mo}-\text{Дегидрогеназа}$	–0.460	$\text{Cu}-\text{Дегидрогеназа}$	–0.465
$\text{Mo}-\text{Пероксидаза}$	+0.494	$\text{Cu}-\text{Пероксидаза}$	+0.457
$\text{Mo}-\text{Каталаза}$	–0.578	$\text{Cu}-\text{Каталаза}$	–0.267
Унальский профиль			
$\Sigma\text{Me}-\text{ОВ}$	+0.074	$\text{Zn}-\text{ОВ}$	+0.328
$\Sigma\text{Me}-\text{Инвертаза}$	–0.298	$\text{Zn}-\text{Инвертаза}$	–0.377
$\Sigma\text{Me}-\text{Дегидрогеназа}$	–0.712	$\text{Zn}-\text{Дегидрогеназа}$	–0.430
$\Sigma\text{Me}-\text{Пероксидаза}$	–0.269	$\text{Zn}-\text{Пероксидаза}$	–0.329
$\Sigma\text{Me}-\text{Каталаза}$	+0.004	$\text{Zn}-\text{Каталаза}$	+0.399
$\text{Mo}-\text{ОВ}$	–0.587	$\text{Cu}-\text{ОВ}$	+0.507
$\text{Mo}-\text{Инвертаза}$	–0.506	$\text{Cu}-\text{Инвертаза}$	–0.139
$\text{Mo}-\text{Дегидрогеназа}$	–0.165	$\text{Cu}-\text{Дегидрогеназа}$	–0.268
$\text{Mo}-\text{Пероксидаза}$	+0.288	$\text{Cu}-\text{Пероксидаза}$	–0.224
$\text{Mo}-\text{Каталаза}$	+0.040	$\text{Cu}-\text{Каталаза}$	+0.447
$\text{Pb}-\text{ОВ}$	+0.310	$\text{Cd}-\text{ОВ}$	+0.522
$\text{Pb}-\text{Инвертаза}$	–0.425	$\text{Cd}-\text{Инвертаза}$	–0.074
$\text{Pb}-\text{Дегидрогеназа}$	–0.199	$\text{Cd}-\text{Дегидрогеназа}$	–0.237
$\text{Pb}-\text{Пероксидаза}$	–0.132	$\text{Cd}-\text{Пероксидаза}$	–0.323
$\text{Pb}-\text{Каталаза}$	+0.390	$\text{Cd}-\text{Каталаза}$	+0.481

* ΣMe – сумма концентраций $\text{Cu} + \text{Zn} + \text{Pb} + \text{Cd} + \text{Mo} + \text{W}$.**Таблица 4.** Взаимосвязь между активностью почвенных ферментов и органическим веществом (ОВ)

Связь	Баксанская W-Mo аномалия	Унальская (Pb, Zn, Cu, Cd) аномалия
	<i>r</i>	<i>r</i>
$\text{ОВ}-\text{Инвертаза}$	+0.413	+0.396
$\text{ОВ}-\text{Дегидрогеназа}$	+0.403	+0.521
$\text{ОВ}-\text{Пероксидаза}$	–0.679	–0.510
$\text{ОВ}-\text{Каталаза}$	+0.479	+0.648
$\text{Инвертаза}-\text{Дегидрогеназа}$	+0.508	+0.293
$\text{Инвертаза}-\text{Пероксидаза}$	–0.284	–0.254
$\text{Инвертаза}-\text{Каталаза}$	+0.704	+0.047
$\text{Дегидрогеназа}-\text{Пероксидаза}$	–0.264	–0.076
$\text{Дегидрогеназа}-\text{Каталаза}$	+0.650	+0.267
$\text{Пероксидаза}-\text{Каталаза}$	–0.111	–0.271

по Cd и Pb (10^2). Аккумуляция металлов в Унальской котловине сопровождается обеднением видового состава луговых ландшафтов, а в пределах ТБМК — увеличением биоразнообразия, в особенности бобовых растений.

В целом, БГХ дифференциация фитоценозов обусловлена внешними и внутренними факторами: спецификой химического состава почв и почвообразующих пород (литологическая основа), геоморфологическими и климатическими факторами, особенностями состава и формирования природных вод, атмосферных аэрозолей, процессами техногенеза, спецификой организации и функционирования различных популяций растений, их взаимодействием с другими организмами биогеоценозов. При этом устойчивость последних определяется не только сложенным механизмом внутривидовых взаимодействий, спецификой процессов миграции химических элементов в пределах конкретного таксона биосферы, но и особенностями гомеостаза организмов, включая процессы и механизмы их адаптации к экстремальным геохимическим природно-техногенным факторам, которые необходимо выяснить.

Установлено, что увеличение концентрации суммы металлов в почвах обоих субрегионов биосферы ингибировало активность дегидрогеназ. По степени ингибирования металлами почвенные ферменты располагаются в ряд: дегидрогена-

зы > инвертазы > (каталаза и пероксидаза). Таким образом, изменение активности почвенных ферментов в условиях техногенного загрязнения может служить дополнительным БГХ индикатором при поисковых и экологических исследованиях.

Работа выполнена по Госзаданию ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Валова Е.Э., Цыбенков Ю.Б., Цыбикова Э.В. (2012) Влияние тяжелых металлов на ферментативную активность почв. *Ученые записки ЗабГГПУ* **42** (1). 63-66.
- Вернадский В.И. (1940) Биогеохимические очерки (1922–1932 гг.). М.: Изд. АН СССР. 250.
- Коньшева Е.Н., Коротченко И.С. (2011) Влияние тяжелых металлов и их детоксикантов на ферментативную активность почв. *Вестник КрасГАУ*. (1). 114-119.
- Хазиев Ф.Х. (2005) *Методы почвенной энзимологии*. М.: Наука. 252 с.
- Garcia C., Hernandez T., Costa F. (2015) Potencial use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **28**. 123-134.
- Ermakov V.V., Korobova E.M., Degtyarev A.P., Tyutikov S.F., Karpova E.A., Petrunina N.S. (2016) Impact of natural and man-made factors on migration of heavy metals in the Ardon River basin (North Ossetia). *J. Soils Sediments*, **16**, 1253-1266.
- Soil microbiology. ecology and biochemistry* (4th ed.) (2015) (Eds. Paul A.) N.Y.: Dekker. 582 p.
- Tabatabai M., Fung M. (1992) Extraction of enzymes from soil. *Soil Biochemistry* (Eds. Stotzky G., Bollag J.) **7**. N.Y.: Dekker. 197-227.