

УДК 633.15:633:358

**ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ СОЕДИНЕНИЙ
ЛАНТАНА И ЦЕРИЯ В МИКРОЗОНАХ ПРИКОРНЕВОГО СЛОЯ ПОЧВЫ
ПАСТБИЩНОГО ЦЕНОЗА В ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ
ДЖИДИНСКОГО ВОЛЬФРАМ-МОЛИБДЕНОВОГО КОМБИНАТА**

Н. М. Кожевникова

*Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ
E-mail: nicas@binm.bsnet.ru*

Изучена динамика накопления подвижных соединений лантана и церия в прикорневом слое почвы в зависимости от фазы вегетации растений: осоки стоповидной и полыни холодной.

Ключевые слова: техногенные ландшафты, подвижные формы, лантан, церий, микрозоны прикорневого слоя.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие горнодобывающей и перерабатывающей промышленности на территории Закаменского района Республики Бурятия привело к накоплению большого количества отходов от переработки молибденового и вольфрамового сырья – массивов техногенных песков, запасы которых превышают 40 млн т и являются основными источниками техногенных воздействий, нарушающих эколого-хозяйственный баланс территории.

Анализ материалов экологического мониторинга г. Закаменска показывает, что значительная часть прилегающей к нему территории (500 га) характеризуется аномальными значениями тяжелых металлов (ТМ): Ве, Сd, Zn, Cu, Fe, Мо, W, Pb, Mn, Al, Cr и других токсикантов – соединений F, As, Sb (Ходанович и др., 2002). Сложный природный геохимический фон в совокупности с результатами 60-летней деятельности Джидинского вольфрам-молибденового комбината (ДВМК) обусловили возникновение опасной экологической ситуации на территории района. Концентрации ряда тяжелых металлов в 6–15 раз превышают ПДК в зоне непосредственной близости от отвалов ДВМК (южная и юго-восточная часть городской территории).

Площадь хвостовых отложений ДВМК составляет 50 га, открытые поверхности которых представляют источники значительного запыления и загрязнения окружающих территорий: почв, гидросферы, атмосферы, уровень загрязнения которых ТМ оценивается как высокий и очень высокий.

Современный этап почвообразования в Закаменской горно-лесостепной зоне и Джидинской степной зоне связан с активным воздействием техногенно обусловленных процессов предприятий горнопромышленного комплекса. Они инициируют воздушную миграцию и поступление в наземные экосистемы прежде всего рассеянных элементов и кислотообразующих соединений фтора, мышьяка и сурьмы, следствием чего является преобразование химического состава и свойств почв.

Для почвенного покрова г. Закаменска характерно неуклонное возрастание фонового содержания тяжелых металлов, нарушение природного соотношения между ними и локальное накопление их до стадии загрязнения почв.

Растения также активно воздействуют на среду обитания. Корневая система растений влияет на физико-химические и биологические свойства почвы. В прикорневом слое выделяют две микрозоны: ризосферу (Р) и почвенно-корневую поверхность (ПКП). Почва микрозон отличается от почвы в целом по ряду показателей: рН, количеству доступных элементов питания, количеству микроорганизмов и органического вещества, влажности, что обусловлено поглотительной и выделительной деятельностью корневой системы растений. Многие компоненты корневых выделений – диффузаты, экскреты, секреты, углеводы, органические кислоты локализованы в микроучастках почвы, примыкающей к корням, способствуют повышению подвижности и доступности для растений как элементов питания, так и тяжелых металлов и токсикантов (Gobran, Gleegg, 1996).

Цель работы – изучение динамики содержания подвижных форм лантана и церия в почве прикорневой зоны осоки стоповидной и полыни холодной на естественном пастбище зоны гипергенеза г. Закаменска в период вегетации.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в полевых условиях на делянке площадью 2 м² на естественном пастбище (юго-восточная часть г. Закаменска в 400 м от отвалов – хвостов обогатительной фабрики ДВМК). Повторность опыта 4-кратная. На опытном участке осокоразнотравного пастбища растительный покров разреженный (проективное покрытие 40–60%), видовой состав немногочисленный, по возрастной структуре это многолетники с преобладанием осоки стоповидной (*Carex pediformis*), полыни холодной (*Artemisia frigida*), лапчатки бесстебельной (*Potentilla acanlis*). Почва на опытном участке легкосуглинистая, серая лесная неоподзоленная со следующими исходными характеристиками (слой 0–20 см): рН Н₂O 7,1, содержание гумуса 2,6%, валового азота 0,12%, подвижных (по Мачигину) форм Р₂O₅ и К₂O 2,27 и 14,65 мг/100 г почвы соответственно, емкость катионного обмена 23 мг-экв./100 г почвы. Валовое количество лантана и церия, мг/кг почвы: La – 39, Се – 47. Содержание подвижных форм металлов, мг/кг почвы: La – 7,2, Се – 8,1.

Динамику накопления подвижных форм лантана и церия определяли в почве микрозон прикорневого слоя – ризосфере и почвенно-корневой поверхности осоки стоповидной и полыни холодной, которые доминировали в пастбищном травостое, а также в почве в целом, отобранной на том же участке, свободной от корней растений, в период всходов, кущения и цветения. Отбор почвенных образцов проводили по методике (Gobran, Gleegg, 1996). Корневую систему растений освобождали от почвы, оставляя на корнях тонкий почвенный слой (1–2 мм). Корни отделяли от побега и высушивали, затем почвенный слой стряхивали (ризосфера); частички почвы, прилипшие к поверхности корня, счищали щеточкой (почвенно-корневая поверхность).

Валовое содержание лантана и церия определяли в почвенных образцах, прокаленных в течение 4 ч в муфельной печи при температуре 500–550°C для удаления органического вещества, затем минеральную часть почвы разлагали смесью концентрированных кислот HF, HNO₃ и HCl с последующим атомно-абсорбционным анализом на спектрофотометре AAS SOLAAR M6 (Обухов, Плеханова, 1991). Для атомизации в пламени использовали смесь ацетилен – воздух. Подвижные формы извлекали бидистиллированной водой (водорастворимая форма), ацетатно-аммонийным

буферным раствором рН 4,8 (ионообменная форма) и 1М HCl (необменно связанная с оксидами, гидроксидами железа, органическим веществом – кислоторастворимая форма) по последовательной схеме (Ринькис и др., 1987). Статистическая обработка данных проведена по Б. А. Доспехову (Доспехов, 1985).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования по изучению динамики содержания лантана и церия в почве прикорневой зоны полыни холодной и осоки стоповидной в период вегетации показали, что процессы почвенно-корневого взаимодействия не оказывают существенного влияния на валовое содержание лантана и церия. Оно незначительно изменялось в течение вегетационного периода и было практически одинаково с содержанием элементов в «общей» почве (табл. 1, 2). Вероятно, за короткий период корни растений не оказали значительного влияния на общее количество лантана и церия в почве. Аккумуляция валового церия 47,1–47,8 мг/кг в 1,2 раза превышала уровень накопления валового количества лантана (39,0–39,7 мг/кг почвы).

В зоне контакта корневой системы осоки стоповидной и полыни холодной с почвой отмечено возрастание всех подвижных форм элементов, причем максимум характерен для водорастворимой формы.

Содержание кислоторастворимой, обменной и водорастворимой форм соединений лантана и церия в почве прикорневой зоны осоки стоповидной было выше в 1,2–1,7 раза, чем в обычной почве. В прикорневом слое почвы наблюдается накопление кислоторастворимой формы соединений лантана и церия, концентрация церия была выше концентрации лантана. Кислоторастворимая форма соединений лантана и церия включает ионы, связанные с оксидами железа, алюминия, марганца, глинистыми минералами, гумусовыми соединениями (Сагг и др., 1982; Кожевникова и др., 2008; Uren, Peisenauer, 1988). Ее содержание в почвенных образцах ризосферы и в ПКП растений превышало содержание в обычной почве в 1,1–1,2 раза.

Концентрация ионообменной формы соединений лантана и церия, извлекаемых экстракцией АББ, в почве микрозон увеличилась в 1,2 раза относительно почвы в целом. Подвижная форма исследуемых элементов включает ионы, перешедшие в вытяжку буферного раствора, а также некоторое количество лантана и церия, ранее прочно связанных с почвой и перешедших в более подвижное состояние под влиянием почвенно-корневого взаимодействия, и специфически сорбированные. Содержание подвижных форм церия в периоды всходов, кущения и цветения было в прикорневом слое почвы выше, чем лантана.

Таблица 1. Содержание валового количества и подвижных форм лантана и церия в прикорневой зоне полыни холодной в период вегетации, мг/кг
 Table 1. The total quantity of lanthanum and cerium and their mobile compounds in the *Artemisia frigida* root-inhabited soil layer through the vegetation period, mg/kg

Показатель	Лантан			Церий		
	Ризосфера	Почвенно-корневая поверхность	Почва в целом	Ризосфера	Почвенно-корневая поверхность	Почва в целом
Всходы						
Валовое содержание	39,3±0,24	39,5±0,22	39,3±0,23	47,4±0,37	47,8±0,34	47,2±0,33
Кислоторастворимая форма	4,5±0,13	4,7±0,12	4,2±0,12	5,4±0,13	5,5±0,13	5,2±0,12
Ионообменная форма	2,8±0,11	3,1±0,11	2,6±0,11	3,5±0,12	3,8±0,11	3,3±0,11
Водорастворимая форма	0,7±0,02	0,8±0,02	0,5±0,02	1,4±0,03	1,5±0,03	1,3±0,03
Кущение						
Валовое содержание	39,5±0,25	39,7±0,24	39,1±0,22	47,5±0,34	47,6±0,31	47,1±0,33
Кислоторастворимая форма	4,7±0,13	4,8±0,13	4,4±0,12	5,6±0,13	5,8±0,13	5,3±0,13
Ионообменная форма	3,2±0,09	3,4±0,08	3,0±0,08	3,7±0,08	3,9±0,09	3,5±0,09
Водорастворимая форма	0,8±0,02	0,9±0,02	0,6±0,02	1,5±0,03	1,6±0,03	1,3±0,03
Цветение						
Валовое содержание	39,5±0,24	39,6±0,23	39,2±0,22	47,6±0,32	47,6±0,33	47,2±0,32
Кислоторастворимая форма	4,8±0,12	4,9±0,12	4,5±0,13	5,8±0,13	6,0±0,14	5,4±0,14
Ионообменная форма	3,4±0,09	3,6±0,09	3,2±0,09	3,9±0,09	4,1±0,09	3,7±0,09
Водорастворимая форма	0,9±0,02	1,1±0,02	0,7±0,02	1,8±0,02	1,9±0,02	1,4±0,02

Таблица 2. Содержание валового количества и подвижных форм лантана и церия в прикорневой зоне осоки стоповидной в период вегетации, мг/кг
 Table 2. The total quantity of lanthanum and cerium and their mobile compounds in the *Carex pediformis* root-inhabited soil layer through the vegetation period, mg/kg

Показатель	Лантан			Церий		
	Ризосфера	Почвенно-корневая поверхность	Почва в целом	Ризосфера	Почвенно-корневая поверхность	Почва в целом
Всходы						
Валовое содержание	39,1±0,24	39,3±0,22	39,0±0,22	47,2±0,32	47,5±0,34	47,1±0,31
Кислоторастворимая форма	4,4±0,12	4,6±0,12	4,1±0,12	5,2±0,13	5,4±0,13	5,1±0,11
Ионообменная форма	2,7±0,11	2,9±0,11	2,6±0,11	3,4±0,12	3,6±0,11	3,3±0,11
Водорастворимая форма	0,6±0,02	0,7±0,02	0,5±0,02	1,3±0,03	1,4±0,03	1,3±0,03
Кущение						
Валовое содержание	39,2±0,23	39,6±0,24	39,1±0,22	47,4±0,34	47,5±0,31	47,0±0,32
Кислоторастворимая форма	4,5±0,13	4,6±0,12	4,3±0,12	5,4±0,13	5,6±0,12	5,2±0,13
Ионообменная форма	2,9±0,09	3,2±0,08	2,8±0,08	3,5±0,08	3,7±0,09	3,4±0,09
Водорастворимая форма	0,7±0,02	0,8±0,02	0,6±0,02	1,4±0,03	1,5±0,03	1,3±0,03
Цветение						
Валовое содержание	39,4±0,23	39,5±0,23	39,2±0,22	47,5±0,32	47,6±0,33	47,1±0,32
Кислоторастворимая форма	4,6±0,12	4,8±0,12	4,4±0,13	5,6±0,13	5,8±0,13	5,3±0,14
Ионообменная форма	3,2±0,09	3,4±0,09	3,0±0,09	3,7±0,09	4,1±0,09	3,6±0,09
Водорастворимая форма	0,8±0,02	0,9±0,02	0,6±0,02	1,6±0,02	1,7±0,02	1,4±0,02

Концентрация водорастворимой формы соединений лантана и церия в почве прикорневой зоны растений выросла в 1,2–1,6 раза по сравнению с ее содержанием в обычной почве. Уровень накопления водорастворимой формы в прикорневом слое полыни холодной выше, чем в почве микрозон прикорневого слоя осоки стоповидной. Такая же закономерность в уровнях накопления лантана и церия характерна для кислоторастворимой и ионообменной форм.

Накопление подвижных форм соединений исследуемых элементов в почве микрозон прикорневого слоя почв обусловлено в значительной степени выделяемыми корнями в окружающую среду органическими соединениями: аминокислотами, ароматическими и алифатическими кислотами, углеводами, стиролами, энзимами, клеточными веществами. Корневые выделения создают в прикорневой почве условия, при которых разрушается структура минералов, изменяется состав растворимых соединений, увеличивается емкость катионного обмена, что способствует переходу части валового количества в подвижные формы (Ефимов, 1988). Необходимо отметить вклад в увеличение подвижных форм элементов сосущей силы корня, вызывающей массовый поток вещества к корневой поверхности и способствующей накоплению водорастворимых соединений элементов в почве прикорневой зоны (Бинеев и др., 1985; Прокушкин, Каверзина, 1988). Определенный вклад в накопление подвижных форм лантана и церия в почве микрозон корневой системы растений вносят прикорневые микроорганизмы, количество которых на поверхности корня в сотни раз больше, чем в почве в целом (Емцев, Мишустин, 1993).

Количество всех подвижных форм лантана и церия в почве прикорневой зоны изменялось в зависимости от фазы развития полыни холодной и осоки стоповидной. Максимальное содержание подвижных форм элементов в почве микрозон наблюдается в период цветения. Концентрация кислоторастворимых соединений лантана в период цветения осоки стоповидной повышалась на 4,3–4,5%, полыни холодной – на 4,4–6,7% по сравнению с начальной фазой развития – всходы, церия – на 7,4–7,6% для осоки стоповидной и на 7,4–9,1% – для полыни холодной. Содержание соединений лантана, извлекаемых АББ, в почве микрозон в период цветения возрастало на 17,2–18,5% для осоки стоповидной и на 16,1–21,4% для полыни холодной. Содержание ионообменных соединений церия в почве микрозон возрастало для осоки стоповидной на 8,8–13,9% и для полыни холодной – на 7,9–11,4%.

Количество водорастворимых соединений лантана в почве прикорневой зоны во время цветения осоки стоповидной возрастало на 28,6–33,3%, це-

рия – на 21,4–28,6%, полыни холодной – на 22,2–37,5% (лантан) и 26,7–28,6% (церий). Увеличение содержания растворимых соединений лантана и церия в почве микрозон в период цветения, вероятно, обусловлено тем, что корни растений в фазе цветения выделяют максимальное количество веществ. Вследствие наличия в составе корневых выделений большого количества органических кислот в этот период развития растений и полыни холодной и осоки стоповидной наблюдалось интенсивное накопление водорастворимых форм лантана и церия, поскольку органические кислоты способны образовывать растворимые комплексы с ионами этих элементов (Прокушкин, 1988; Uren, Peisenauer, 1988).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Валовое содержание лантана и церия в почве микрозон прикорневого слоя под растениями полыни холодной и осоки стоповидной изменялось незначительно и не имело существенных различий с «общей» почвой в целом. Количество подвижных соединений элементов в прикорневой зоне было больше, чем в остальной массе почвы, в результате перехода некоторого количества лантана и церия в подвижное состояние. Уровень накопления подвижных соединений лантана и церия в прикорневом слое был выше у полыни холодной, чем у осоки стоповидной. Максимальное накопление подвижных форм соединений отмечено в период цветения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-05-00020а.

ЛИТЕРАТУРА

- Бинеев Р. Г., Григорян Б. Р., Юлметьев Р. М., Казаков Х. Ш. Влияние аминокислот на поступление меди из почвы в растения // Физиология растений. – 1985. – № 8. – С. 85–91.
- Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
- Емцев В. Т., Мишустин Е. Н. Микробиология. – М.: Колос, 1993. – 324 с.
- Ефимов М. В. Физиология растений в криоаридном климате. – Новосибирск: СО, 1988. – 159 с.
- Кожевникова Н. М., Митыпов Б. Б., Абашеева Н. Е., Маладаев А. А. Влияние разных доз лантана на поступление его в растения кукурузы и гороха // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2008. – № 4. – С. 92–95.
- Обухов А. И., Плеханова И. О. Атомно-абсорбционный анализ в почвенно-биологических исследованиях. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 184 с.
- Прокушкин С. П., Каверзина Л. Н. Корневые экзотаболиты и сапролины сосны обыкновенной. – Красноярск: ИП и ДСО АН СССР, 1988. – 130 с.
- Ринькис Г. Я., Рамане Х. К., Куницкая Т. А. Методы анализа почв и растений. – Рига: Зинайтне, 1987. – 174 с.
- Сает Ю. Е., Алексинская Л. Н., Янин Е. П. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами. – М.: Изд-во ИМГРЭ, 1982. – 72 с.

Ходанович П. Ю., Смирнова О. К., Яценко Р. И. Состояние природных сред и экосистем территории, прилегающей к промплощадкам Джидинского ГОКа // Закамна в XXI в. – Улан-Удэ: Вост.-Сиб. гос. технологическая академия, 2002. – С. 122–131.

Gobran G. R. Gleegg S. A conceptual model for nutrient availability in the mineral soil – root system // Can. J. Soil Sci. – 1996. – Vol.76. – P. 125–131.

Uren N., Peisenauer H. M. The role of nutrient exudates in nutrient asquisition // Nutr. – 1988. – No. 5. – P. 79–114.

Поступила в редакцию 06.06.2011 г.

CONTENT DYNAMICS OF MOBILE LANTHANUM AND CERIUM COMPOUNDS IN THE RHIZOSPHERE OF PASTURABLE CENOSIS IN TECHNOGENIC LANDSCAPES OF THE DJIDINSK TUNGSTEN-MOLIBDENIC INDUSTRIAL COMPLEX

N. M. Kozhevnikova

The dynamics of mobile lanthanum and cerium accumulation in the rhizosphere of *Carex pediformis* and *Artemisia frigida* was studied during the vegetation period.

Key words: technogenic landscapes, mobile forms, lanthanum, cerium, rhizosphere of the root inhabited soil layer.