

**РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ  
В ОЦЕНКЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫВЕТРИВАНИЯ И  
СКОРОСТИ ПОТЕРИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПОЧВ  
НА ПРИМЕРЕ СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ**

**И.Ю. Кудреватых, П.И. Калинин, А.О. Алексеев**

*ФИЦПНЦБИ РАН Институт физико-химических и биологических проблем  
почвоведения РАН, г. Пушкино, ул. Институтская, д. 2, стр.2, 142290, Россия, email:  
[averkieva25@rambler.ru](mailto:averkieva25@rambler.ru)*

Изучена трансекта протяженностью более 700 км на юго-востоке Русской равнины. Целью исследования была сравнительная характеристика содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) в лессах по сравнению с другими почвообразующими породами, а также возможность использования РЗЭ в качестве индикаторов различных почвенных свойств и процессов в степных ландшафтах. Выявлено, что лёссово-карбонатные суглинки обогащены легкими РЗЭ, а для песчаных отложений выявлено преобладание тяжелых РЗЭ. В верхних горизонтах изученных объектов по распределению РЗЭ хорошо идентифицируется процесс выветривание материала (выше содержание легких и ниже тяжелых РЗЭ), исключением являются почвы, образованные на песчаных отложениях. Отношения La/Nb и Y/Nb показали фракционирование Nb из РЗЭ в лёссово-карбонатных суглинках.

**Ключевые слова:** редкоземельные элементы, лёсс, выветривание, чернозем, каштановая почва

Лессовые отложения Русской равнины являются главной почвообразующей породой степных почв, которые выступают основой продовольственной безопасности не только России, но и мира. Вся сложная цепочка процессов, которые привели к формированию лёссов, начиная от мобилизации вещества, седиментогенеза и заканчивая отложением и преобразованием минеральной пыли, вызывает споры и дискуссии. Концентрация химических элементов показывает различия в минералогии лёссов, характеризует их генезис и изменения состава в ходе литогенеза. Редкоземельные элементы представляют собой совокупность элементов от лантана (La) до лютеция (Lu), которые как целостная группа незначительно обедняются или обогащаются в результате естественного физического и химического воздействия [1, с. 241], они являются устойчивыми в процессе выветривания и малоподвижны при почвообразовании [2, с. 176], поэтому они широко применяются в качестве индикаторов фундаментальных гео-

химических процессов, связанных с химической эволюцией континентальной коры, тектонической обстановкой, химическим выветриванием и поиском источников формирования отложений [3, с. 105855]. Настоящее исследование имело целью характеризовать содержание РЗЭ в лессах по сравнению с другими почвообразующими породами, а также на выявление возможности использования РЗЭ в качестве индикаторов различных почвенных свойств и процессов в степных ландшафтах.

Объектом исследования была территории юго-востока Русской равнины, где изучена почвенная трансекта протяженностью более 700 км. Район исследования представляет собой зону сухих и пустынных степей, который расположен в различных природных зонах Нижнего Поволжья (Приволжская и Ергенинская возвышенности, Прикаспийская низменность). Типы почв изучаемой территории изменялись с севера на юг от Calcic Chernozems к Endosalic Kastanozems до Luvic Calcisols. Почвообразующей породой для большинства исследованных почв были лёссо-карбонатные засоленные суглинки преимущественно эолового генезиса, в то время как более южные почвы развивались на песчаных отложениях позднечетвертичного и голоценового возраста (бугры Бэра, рын-пески),

Для реализации цели исследования в каждой точке опробования ( $n=16$ ) проводили отбор почвенных образцов методом бурения с интервалом 10 см до почвообразующей породы (в трехкратной повторности). В полученных образцах почвы измеряли содержание РЗЭ методом ICP OES. С целью подготовки твердого образца почвы к анализу брали навеску 0,5 гр., добавляли в нее 5 мл плавиковой кислоты и размешивали, через 10 минут еще прибавляли 10 мл азотной кислоты (70%). Полученный таким образом образец подвергали микроволновому разложению под давлением 2500кПа в течение 60 минут, затем переносили в 50 мл колбу и доводили до метки бидистиллированной водой.

Были применены следующие показатели, рассчитанные на основе содержания РЗЭ: 1) отношение содержания РЗЭ в исследуемых почвах и почвообразующих породах по отношению к их содержанию в земной коре, которое указывает на обогащение или истощение их содержания в процессе почвообразования. Данные по содержанию РЗЭ в земной коре использовались из Балашов, 1976 [4, с.216]; 2) соотношения La/Yb – мера обогащения легкими РЗЭ и Gd/Yb – мера истощения тяжелыми РЗЭ. Показано, что при увеличении выветривания материала происходит обогащение легкими и снижение тяжелых РЗЭ [5, с. 97]; 3) отношения La/Nb и Y/Nb в почве позволяют различать происхождение, связанное с различными почвообразующими породами [6, с. 3319]. При расчете отношений La/Yb, Gd/Yb, La/Nb и Y/Nb брали среднее значение ( $\bar{c}_p$ ) для каждого разреза (слоя почв) при  $n = 3$ .

Содержание Ce, Er, Eu, Gd, Lu, Nd, Sc, Y и Yb в изученных породах (аллювиально-морские отложения, лессы, морены) имело сравнительно одинаковые значения и в среднем составило 86,3, 2,4, 0,53, 0,34, 0,24, 49,7, 6,38, 8,27 и 1,0 мг/кг соответственно. Основные различия в содержании РЗЭ между разными типами пород отмечено для элементов Ce, Nd, Y и Yb, так заметное снижение их концентрации отмечается в аллювиально-морских отложениях по сравнению с лессами.

По результатам исследования содержания РЗЭ в верхних горизонтах почв было показано, что самые низкие концентрации всех изученных элементов выявлены для бурой полупустынный почвы, каштановые занимают промежуточное значение, а в черноземах самые высокие концентрации. Для всех изученных разрезов отмечено, что почвы на лессах и лессовидных суглинках не зависимо от типа имеют сходное содержание всех изученных элементов с подстилающей породой. А почвы на моренах и песках показали снижение концентрации всех изученных РЗЭ в верхних горизонтах почв по сравнению с породой. При этом в почвах, расположенных на песках, отмечено обеднение большинства изученных РЗЭ по сравнению с земной корой, а почвы, образованные на лессово-карбонатных суглинках, наоборот, обогащены. Скорее всего данный факт определяется разностью содержания глины в изученных почвообразующих породах, что влияет на состав и содержание РЗЭ в них.

Соотношения La/Yb и Gd/Yb в изученных почвах показали, что в верхнем горизонте (0-20 см) почв большинства изученных разрезов наблюдается обогащение легкими РЗЭ. Это указывает на более высокую степень выветривания материала в верхних горизонтах по сравнению с почвообразующей породой, что согласуется с другими исследованиями данной территории [7, с. 105554]. Исключением являются почвы, образованные на песчаных отложениях, где отмечается преобладание тяжелых РЗЭ, указывающее на ослабление процессов выветривания в верхних горизонтах этих почв или на плохую дифференциацию материала [8, с. 90].

Отношения La/Nb и Y/Nb всех изученных разрезов показало, что в породе эти соотношения всегда выше, чем в верхних горизонтах изученных почв. Так же выявлено, что под черноземами, которые в большинстве своем сформировались на лессово-карбонатных суглинках, эти соотношения выше. Предполагают, что фракционирование Nb из редкоземельных элементов определяет процессы дифференциации при осадконакоплении [6, с. 3323], что в нашем исследовании хорошо проявилось при сравнении разных почвообразующих пород.

Таким образом, наше исследование показало, что распределение РЗЭ в изученном ряду почв хорошо отражает их распределение в зависимости

от почвообразующей породы, степени выветривания и текстурной дифференциации профиля. Для лёссово-карбонатных суглинков характерно обогащение легкими РЗЭ, а для песчаных отложений выявлено преобладание тяжелых РЗЭ. Отношения La/Nb и Y/Nb так же хорошо индицируют разность в составе почвообразующих пород и почв, сформированных на них, отражая явное фракционирование Nb из РЗЭ в лёссово-карбонатных суглинках.

**Благодарности.** Исследование почвообразующих пород (аллювиально-морских отложений, лёссов, морен) выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00145).

### Библиографические ссылки

1. *Taylor S. R., Mclennan S. M.* The geochemical evolution of the continental crust // *Rev. Geophys.* 1995. Vol. 33 (2). P. 241–265.
2. *Lee S. G., Kim J. K., Yang D. Y., Kim J. Y.* Rare earth element geochemistry and Nd isotope composition of stream sediments, south Han River drainage basin, Korea // *Quaternary International*, 2008. Vol. 176–177. P. 121–134.
3. *Andrade G. R. P., Cuadros J., Barbosa J. M. P., Vidal-Torrado P.* Clay minerals control rare earth elements (REE) fractionation in Brazilian mangrove soils // *Catena*, 2022. Vol. 209. P. 105855.
4. *Балашов Ю. А.* Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 268 с.
5. *Hu J., Wang H., Wang M.* Provenance and tectonic setting of siliciclastic rocks associated with the Neoproterozoic Dahongliutan BIF: implications for the Precambrian crustal evolution of the Western Kunlun orogenic belt, NW China // *J. Asian Earth Sci.* 2017. Vol. 147. P. 95–115.
6. *Hao O., Guo Z., Qiao Y., Xu B., Oldfield F.* Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China // *Quaternary Science Reviews*. 2010. Vol. 29. P. 3317–3326.
7. *Kalinin P. I., Kudrevatykh I. Yu., Malyshev V. V., Pilguy L. S., Buhonov A. V., Mitenko G. V., Alekseev A. O.* Chemical weathering in semi-arid soils of the Russian plain // *Catena*, 2021. Vol. 206. P. 105554.
8. *Muhs D. R.* The geochemistry of loess: Asian and North American deposits compared // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. Vol. 155. P. 81–115.