УДК 631.41

**ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ
ЭЛЕМЕНТОВ В ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ ФРАКЦИЯХ РМ <1 И
РМ 1-10 ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ
(ЦЕНТРАЛЬНО-ЛЕСНОЙ ЗАПОВЕДНИК, РОССИЯ)**

**П. Р. Енчилик, И. Н. Семенов, Л. А. Безбердая,
Дж. Ю. Васильчук, Н. Е. Кошелева**

*МГУ им. М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, 1, 119234,
г. Москва, Россия, polimail@inbox.ru*

Изучена пространственная вариабельность содержания Al, As, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Rb, Sb, Sn, Sr, Ti, U, V, W, Zn, Zr в микрочастицах РМ1 и РМ1-10 гумусового и иллювиального горизонтов текстурно-дифференцированных почв Центрально-лесного заповедника. Максимальная вариабельность (50-100 %) для фракции РМ<1 обнаружена в гумусовом горизонте склоновых почв. В иллювиальном горизонте она находится в пределах 30-50 %.

Ключевые слова: текстурно-дифференцированные почвы (Retisols); геохимия ландшафтов; южнотаежные ландшафты; catena, илистая фракция (РМ1); физическая глина (РМ10); химические элементы.

**VARIABILITY OF CHEMICAL ELEMENT CONCENTRATIONS
IN PM <1 AND PM 1-10 OF BACKGROUND RETISOLS
IN CENTRAL FOREST RESERVE, RUSSIA**

**P. R. Enchilik, I. N. Semenov, L. A. Bezberdaya,
J. Yu. Vasilchuk, N. E. Kosheleva**

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119234,
Moscow, Russia, polimail@inbox.ru*

The spatial variability of the content of Al, As, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Rb, Sb, Sn, Sr, Ti, U, V, W, Zn, Zr in microparticles PM1 and PM1-10 of the humus and illuvial horizons of background Retisols in the Central Forest Reserve has been studied. The maximum variability (50-100 %) for the PM<1 fraction was found in the humus horizon of slope soils. In the illuvial horizon it is in the range of 30-50 %.

Key words: Retisols; environmental geochemistry; taiga; catena, clay (PM1); silt (PM10); chemical elements.

Оценка вариабельности свойств и элементного состава природных почв востребована при планировании и анализе результатов эколого-

геохимического мониторинга [1, 2], а также при определении степени загрязнения по небольшому числу проб. Вариабельность агрономических показателей в сельскохозяйственных почвах изучена достаточно подробно, однако природным почвам посвящены лишь единичные исследования [3]. Неотъемлемой частью мониторинга является анализ фоновой почвенно-геохимической структуры ландшафтов, включая катенарную, предполагающий изучение распределения химических элементов в компонентах каскадных ландшафтно-геохимических систем [6]. Гранулометрический состав почв играет важную роль в распределении и сорбции химических элементов [4]. Особое внимание уделяется микрочастицам диаметром <10 мкм, как важнейшим компонентам и депозитариям токсичных веществ в твёрдой фазе [5].

Целью настоящего исследования является анализ пространственной вариабельности содержания тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) в гранулометрических фракциях РМ1 и РМ1-10 гумусового и иллювиального горизонтов дерново-подзолистых почв в фоновой ландшафтно-геохимической катене на территории Центрально-Лесного государственного заповедника (ЦЛГЗ). Исследована фоновая для Московского региона катена на вершине хорошо дренированного моренного холма с абсолютной высотой 265 м и его пологом склоне. Автономная позиция и выпуклый склон холма исследуемой катены заняты хвойно-широколиственным лесом, произрастающим на подзолистых глееватых и дерново-подзолистых оглеенных почвах. Супераквальный ландшафт заболоченной потяжины с временным водотоком занят хвойным лесом на торфянистых подзолистых оглеенных почвах.

Для анализа пространственной вариабельности содержания элементов во фракциях РМ <1 и РМ1-10 отобрано 45 образцов из гумусового (ао) и иллювиального (ВТ) горизонтов в девятикратной повторности. Для выделения тонких частиц из подзолистых, дерново-подзолистых и торфянисто-подзолистых почв катены применялась методика гранулометрического фракционирования с использованием центрифуги [7] и ультразвука [8]. Гранулометрические фракции РМ <1 и РМ1-10 выделяли на центрифуге «ОС-6МЦ» (ДАСТАН, Киргизия), расчёт времени и скорости оборотов — в программе «Centriset» [9]. Полученные суспензии с фракциями РМ1 и РМ1-10 фильтровали через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм (EMD Millipore, Берлингтон, США). Элементный состав образцов определяли во ВНИИ минерального сырья им. Н. М. Федоровского методами масс-спектрометрии (ICP-MS) и атомно-эмиссионной спектрометрии (ICP-AES) с индуктивно-связанной плазмой с использованием приборов «Agilent 7500cx» и «Elan-6100» (США) соответственно.

Для анализа пространственной неоднородности содержания Al, As, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Rb, Sb, Sn, Sr, Ti, U, V, W, Zn, Zr в гранулометрических фракциях PM1 и PM 1-10 горизонтов почв в программном пакете STATISTICA были рассчитаны коэффициенты вариации и определена нормальность распределения содержания ТММ для обоснования применения t-критерия Стьюдента при оценке значимости различий в содержании элементов во фракциях гумусовых и иллювиальных горизонтов почв, различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

В гранулометрических фракциях PM<1 и PM1-10 горизонта ао подзолистых и дерново-подзолистых почв ЦЛГЗ среднее для автономной и склоновой позиций содержание Al, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Rb, Ti, U, V, W и Zn выше, чем в валовом образце, а Sn и Zr — ниже. Содержание Sb и Sr ниже только во фракции PM <1, а As и Ni — только в PM1-10. При этом содержание Al, Be, Cr, Cs, Ce, Fe, Rb, Ti, V, Zn во фракции PM <1 более чем в 2 раза превышает содержание в валовом образце. Во фракции PM1-10 только содержание Al, Fe, Mn, Ti и V более чем в 2 раза превышает значения, характерные для валового образца. Содержание Zr во фракциях PM <10 в 2 раза ниже, чем в валовом образце.

В гранулометрических фракциях PM<1 и PM1-10 горизонта ВТ содержание Al, Ba, Be, Bi, Co, Cs, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Ti, U, V, W, Zn выше, чем в валовом образце, а Cd и Zr — ниже. Содержание Sr ниже только во фракции PM<1, а As, Cr и Sn — только в PM1-10. Во фракции PM<1 содержание Al, As, Be, Bi, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, V, W, Zn более чем в 2 раза превышает содержание в валовом образце, во фракции PM1-10 — только Pb. Содержание Sn во фракции PM1-10 в 2 раза ниже, чем в валовом образце. Для всех исследованных элементов различия содержания элементов во фракции PM1 и PM1-10 статистически значимые ($p < 0,05$).

Во фракции PM <1 (таблица 1) содержания большинства элементов подчиняются нормальному закону распределения. Логнормальное распределение отмечено только для As, Cr, Ni в гумусовом горизонте склонового ландшафта. Содержание химических элементов во фракции PM1-10 также в основном подчиняется нормальному закону распределения. Логнормальное распределение в этой фракции у большинства элементов наблюдается в гумусовом горизонте междуречья и иллювиальном горизонте почв склона.

Вариабельность содержания химических элементов во фракции PM <1 (таблица 1) максимальна в гумусовом горизонте склоновых почв (50-100 %).

Таблица 1

Вариабельность и среднее содержание элементов в частицах PM1

Элемент	PM <1									
	А				ТЭ				ТЭА	
	ао		ВТ		ао		ВТ		ВТ	
	μ	Cv	μ	Cv	μ	Cv	μ	Cv	μ	Cv
Al	31490	18	114483	8	29256	54	105776	6	89730*	30
As	2,2	100	5,7	39	0,91*	100	6,4	27	8,0	46
Be	1,2	24	4,4	8	0,98	61	4,1	6	3,6	32
Bi	0,35	31	0,38	15	0,29	51	0,39	13	0,41	34
Cd	1,7	69	0,14	48	1,02	76	0,16	37	0,15	76
Ce	28	15	132	10	27	72	116	17	131	32
Co	6,3	35	20,3*	13	7,9	79	20,7	4	22,5	34
Cr	16	83	111	11	13*	100	113	11	102	35
Cs	2,4	27	8,04	12	2,3	59	7,1	13	6,6	35
Cu	22	28	57	12	16	54	51	8	60	34
Li	12	27	62	10	12	62	66	7	47	33
Lu	0,05	72	0,61	12	0,05	92	0,55	10	0,64	32
Mn	3877	58	698	35	2486	52	799	24	1489	38
Mo	1,5	28	1,01*	38	1,2	57	1,0	13	0,80	41
Na	605	100	1790	55	107*	100	1824	37	3087	50
Ni	5,6	100	62,0	12	3,2*	100	65,3	10	57,3	35
Pb	4490	44	872	14	3478	53	703	17	1039	33
Rb	60	27	171	10	56	62	164	8	134	31
Sb	0,88	29	0,70*	31	0,69	67	0,73	14	0,70	46
Sn	2,1	55	2,1*	28	0,57	100	2,2	40	2,5	53
Sr	47	31	90	8	35	54	84	8	80*	29
Ti	2764	24	5443	9	2454	58	5490	6	4645	31
U	0,93	15	2,9	12	1,1	61	2,8	7	2,5	34
V	51	68	141	11	43	100	146	8	129	33
W	1,5*	100	1,5	9	0,76	55	1,5	9	1,5*	30
Zn	190	25	167	13	180	67	149	12	165	53
Zr	43	36	167	9	28	56	162	7	169	32

μ – среднее содержание элементов (мг/кг); Звездочкой (*) отмечены показатели с логнормальным законом распределения; распределение остальных показателей соответствует нормальному закону; Cv – коэффициент вариации (%).

В горизонте ВТ вариабельность большинства элементов находится в пределах 30-50 %. В горизонте ао автономного ландшафта у большинства элементов вариабельность находится в диапазоне 10-30 %, повышаясь у Bi, Ba, Sr, Zr (30-50 %), Cd, Mn, Sn, V (50-80%) и As, Cr, Ni, Ta, W (80-100 %).

Наименьшая вариабельность отмечается в горизонте ВТ, где для большинства элементов она ниже 30 %.

Во фракции РМ1-10 горизонта ВТ почв автономного и склонового ландшафтов вариабельность содержания химических элементов выше, чем во фракции РМ <1. В горизонте ВТ подчиненного ландшафта во фракции РМ <1 вариабельность (30-50 %) увеличивается относительно РМ1-10 (10-30 %), вероятно, из-за снижения содержания илистой фракции в этом горизонте подчиненного ландшафта. Для фракций РМ <1 и РМ1-10 вариабельность максимальна в гумусовом горизонте склоновых почв и для всех исследуемых элементов превышает 50 %.

Полевые работы выполнены при поддержке проекта № 17-05-41036 РГО а. Обработка и интерпретация данных выполнена при финансовой поддержке проекта РФФ № 19-77-30004-П. Авторы благодарны В. В. Крупской за консультации по методике гранулометрического фракционирования; Д. В. Власову за помощь в интерпретации результатов; Е. В. Терской и Л. В. Добрыдневой за консультации при выполнении химико-аналитических работ.

Библиографические ссылки

1. Spatial Variation and Influencing Factors of Trace Elements in Farmland in a Lateritic Red Soil Region of China / R. Zou [et al.] // *Agronomy*. 2022. № 12. 478.

2. Spatial variability characteristics and impacting factors of soil trace elements in Poyang Lake plain, Jiangxi of China / H. M. Yu [et al.] // *Plant Nutr. Fertil. Sci.* 2020. № 26. P. 172–184.

3. Шапорина Н. А., Чичулин А. В., Чумбаев А. С. Пространственная вариабельность водно-физических свойств темно-серой лесной почвы в условиях Предсалаирья // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018. № 10. С. 144–149.

4. Estimation of hourly PM1 concentration in China and its application in population exposure analysis / L. Huang [et al.] // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 273.

5. Contamination levels and source apportionment of potentially toxic elements in size-fractionated road dust of Moscow / D. V. Vlasov [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. V. 30. P. 38099-38120.

6. Касимов Н. С., Геннадиев А. Н. Геохимия ландшафтов и география почв: основные концепции и подходы // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2005. № 2. С.10–17.

6. Методика выделения гранулометрических фракций почв и пыли методом центрифугирования / Л. А. Безбердая [и др.] // *Инженерная экология*. 2023. С. 178–182.

7. Влияние параметров ультразвукового диспергирования при гранулометрическом фракционировании на содержание элементов в микрочастицах почв и дорожной пыли / П. Р. Енчилик [и др.] // *Инженерная экология*. 2023. С. 206–211.

8. Poppe L. J., Eliason A. E. A BASIC program to calculate gravitational and centrifugal parameters: Geological Society of America. 2009. V. 41. № 3. 21 p.