

УДК 631.481;630*114.351

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОЧВ В КАТЕНЕ ЦЕНТРАЛЬНО-ЛЕСНОГО ЗАПОВЕДНИКА¹

© 2022 г. П. Р. Енчилик^а, И. Н. Семенков^а, *^а МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия*E-mail: semenkov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 13.01.2022 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

В юго-восточной части Валдайской возвышенности исследован сопряженный ряд дерново-подзолистых и торфяно-подзолисто-глеевых почв. В торфяном (Т), органоминеральном (ао) и минеральном (ВТ) горизонтах изучена вариабельность физико-химических свойств (величины рН, содержания гранулометрических фракций и углерода органических веществ – Сор_г) и элементного состава (валовое содержание и обменные, комплексные и специфически сорбированные формы As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, Ti, U, W, Zn и Zr). Для показателей уровня “почва-память” (содержание Сор_г, гранулометрических фракций и валового содержания химических элементов) и величины рН характерны низкие коэффициенты вариации (<30%) за исключением содержания крупного и среднего песка (>50%) и Сор_г (>74%) в гор. ВТ. В гор. Т повышена вариабельность валового содержания Bi, Co, Cr, Fe, La, Mn, Rb, Sr, Ti, U, W и Zr. Содержание подвижных форм элементов – показатели уровня “почва-момент” – имеет высокую вариабельность. При этом, вариабельность содержания обменных и специфически сорбированных соединений всех изученных элементов снижается с глубиной, а комплексных меняется слабее. Подвижность химических элементов имеет низкую вариабельность, поскольку больший вклад в значение этого показателя вносят не подвижные соединения, а валовое содержание.

Ключевые слова: пространственная неоднородность, кислотность, фракционирование, тяжелые металлы и металлоиды, потенциально токсичные элементы, лесные экосистемы.

DOI: 10.31857/S0024114822030068

Пространственная вариабельность химических свойств почв и концентрации форм элементов – результат разномасштабных почвенных процессов. Память почвы (soil record) отражает запись результата этих процессов в различных характеристиках профиля (Соколов, Таргульян, 1976), т.е. соответствие между наблюдаемыми факторами почвообразования и свойствами почв (Таргульян, Бронникова, 2019). К показателям “почва-память” относят гранулометрический состав, валовое содержание химических элементов и органического углерода почв (Сор_г), которые медленно трансформируются или наследуются от материнской породы (Соколов, Таргульян, 1976). К показателям “почва-момент” относят динамические свойства, связанные с существующими в данный момент условиями (Таргульян, Соколов, 1978).

С антропогенным фактором почвообразования связано поступление в почву разнообразных веществ. Если по валовому содержанию элементов часто сложно диагностировать воздействие, то отдельные индикаторные соединения чутко реагируют на изменения. Обменные соединения, которые можно обозначить F1, являются самыми подвижными и легко доступными для растений. Комплексные соединения (F2) представлены в почве прежде всего фульватами и гуматами и отражают интенсивность биологического круговорота веществ и разложения мертвого органического вещества. Сорбированные оксидами Fe и Mn соединения (F3) подвижны лишь в глеевой обстановке, т.к. в кислородной среде входят в состав железомарганцевых конкреций. Все эти три группы соединений принято называть подвижными (Соловьев, 1989, Семенков и др., 2016, 2017, Minkina et al., 2018), т.е. способными участвовать в физико-химической и биогенной миграции в противовес трудно растворимым соединениям многих первичных минералов (F4), находящимся в почве в форме силикатов и оксидов.

¹ Полевые и химико-аналитические работы выполнены при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”. Результаты обобщены в рамках проекта РНФ № 19-77-30004.

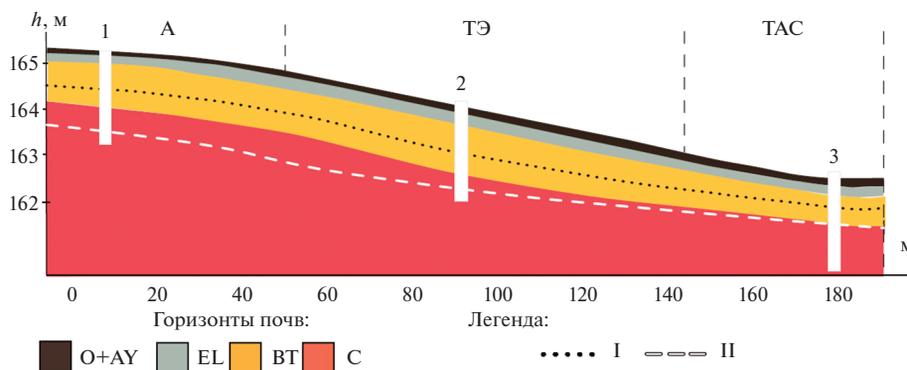


Рис. 1. Схематический профиль катены. Элементарные ландшафты: А – автономный, ТЭ – трансэлювиальный, ТАС – трансаккумулятивно-супераккумулятивный. Горизонты почв: О – органический, АУ – гумусовый, EL – элювиальный, BT – текстурный, С – почвообразующая порода. I – граница между покровными суглинками и моренными отложениями; II – верхняя граница вскипания от 10% HCl.

Оценка вариабельности почвенных свойств востребована при планировании и анализе результатов мониторинга (Авдеева, Фрид, 2000; Fraterrigo, Rusak, 2008; Козлова, 2009), а также характеристики степени загрязнения по небольшому числу проб. Если вариабельность агропочв и агрономических показателей изучена достаточно подробно, то природным почвам посвящены единичные исследования (Шапорина и др., 2018). Ранее исследована вариабельность физических свойств (плотности, влажности, водопроницаемости) и химических (величины pH, валового состава, содержания обменных катионов) в разных генетических горизонтах дерново-подзолистых почв (Самсонова, 2008, 2014). Однако сравнительный анализ вариабельности элементного состава почвенных горизонтов не проводили. Кроме того, до сих пор дискуссионны методы оценки вариабельности почвенных свойств.

Цель работы – характеристика уровня вариабельности физико-химических свойств и элементного состава горизонтов текстурно-дифференцированных почв в юго-восточной части Валдайской возвышенности. В рамках нашего исследования мы проверяли две гипотезы:

1. От гор. Т к гумусовому ао и текстурному BT вариабельность рассматриваемых показателей уменьшается за счет снижения неоднородности материала по мере ослабления педогенного преобразования;

2. Вариабельность показателей уровня “почва-память” ниже вариабельности показателей уровня “почва-момент”.

Настоящее исследование также востребовано в контексте эколого-геохимического мониторинга в Московском регионе, т.к. дает информацию о вариабельности свойств и элементного состава почв фоновых ландшафтов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследование проведено в Центральном-Лесном государственном природном биосферном за-

поведнике (ЦЛЗ), где почвообразующие породы обладают низкой водопроницаемостью (Пузаченко и др., 2007), что приводит к заболачиванию пониженных элементов рельефа и возникновению временных водотоков после сильных дождей даже в условиях слабого расчленения территории.

В южной части заповедной зоны ЦЛЗ исследована катена (рис. 1) от хорошо дренированной вершины холма с елово-липовым (*Picea abies* и *Tilia cordata*) лесом с примесью клена остролистного (*Acer platanoides*) и вяза шершавого (*Ulmus glabra*) (5E + 4Л + 1К, В) на (1) грубогумусированных подзолистых глееватых почвах (**Retisols** по (IUSS Working Group WRB, 2014) со следующим набором генетических горизонтов по классификации 2004 года: O–ao–AYEL–ELf–BEL–BT–2BTca–2BCg,ca–Cca. Выпуклый склон трансэлювиальной позиции также покрыт елово-липовым лесом с примесью клёна остролистного (5Л + 3Е + 1К), произрастающим на (2) дерново-подзолистых оглеенных почвах с горизонтами: O–ao–AYao–AYEL–ELf,g–BEL–BT–2BT(g)–2BC(g)–Cca. Трансаккумулятивно-супераккумулятивный ландшафт заболоченной потяжины с временным водотоком занят ельником с ивой козлей (*Salix caprea*) (8E + 2И, Л, К) на (3) торфянистых подзолистых оглеенных почвах (**Stagnosols**) со следующим набором горизонтов: T–EL–ELg–ELox–BELg–BT–2BTg–2G. Все почвы развиты на двучленных отложениях: покровных суглинках, подстилаемых моренными, местами остаточными карбонатными (Karavanova, Malinina, 2009; Пузаченко и др., 2007). Более детальное описание ландшафтов катены представлено в работе П.Р. Енчилик и др. (2020).

В девятикратной повторности в июне 2017 г. опробованы верхний горизонт (ao в дерново-подзолистых и T в торфяно-подзолисто-глеевых) и нижний (BT) в пределах площадок 10 м² (суммарно 54 пробы).

Величину рН измеряли в суспензии на рН-метре “Эксперт-рН” (Россия) в статических условиях, содержание Сорг – титриметрически по И.В. Тюрину, гранулометрический состав – на лазерном гранулометре “Analysette 22 comfort” (Fritsch, Германия) с выделением 7 гранулометрических фракций G1–G7, обозначенных в порядке увеличения размера частиц (в мкм): G1 – ил (<1); G2, G3 и G4 – мелкая, средняя и крупная пыль (5–1, 10–5 и 50–10 соответственно); G5, G6 и G7 – тонкий, средний и крупный песок (250–50, 500–250 и 1000–500). Подвижные соединения элементов извлечены по методике (Minkina et al., 2018) тремя параллельными вытяжками с инкубацией в течение 18 ч: ацетатно-аммонийный буфер (соотношение почва : раствор 1 : 5, рН 4.8), ацетатно-аммонийный буфер (ААБ) с 1% трилоном Б (соотношение почва : раствор 1 : 5, рН 4.5) и 1 М HNO₃ (соотношение почва : раствор 1 : 10). Раствором ААБ экстрагированы обменные соединения (F1). Разница между содержанием элементов в вытяжке ААБ + 1% трилоном Б и ААБ характеризует долю комплексных соединений (F2). Разница в содержании элементов в 1 М HNO₃ и ААБ соответствует специфически сорбированным (связанным с оксидами Fe и Mn) соединениям (F3). Подвижность рассчитана как отношение суммы содержаний непрочно связанных соединений элемента (F1 + F2 + F3) к валовому. Содержание элементов в почвах и почвенных вытяжках измеряли методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS и ICP-AES) на приборах “Elan-6100” и “Optima-4300 DV” соответственно с двойной повторностью в 5% проб и анализом холостых проб экстрагентов. Для определения валового содержания элементов образцы почв разлагали путем кислотного вскрытия смесью HClO₄, HF и HNO₃ в открытой системе (Карандашев и др., 2016).

Медианные значения показателей и значимость различий между выборками в гор. ао и ВТ рассчитаны с помощью Т-критерия Уилкоксона в программном пакете Statistica. Коэффициенты вариации (Cv, %), посчитанные в программном пакете Statistica, разделены на следующие градации: очень высокие (>80%), высокие (50–80%), средние (30–50%), низкие (10–30%), очень низкие (<10%). Соответствие (лог)нормальному распределению оценено с использованием критерия Уилка-Шапиро в программе “R” с использованием в качестве порогового уровня значимости $p = 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические характеристики и уровни содержания элементов. Дерново-подзолистые и торфяно-подзолисто-глеевые почвы катены по гранулометрическому составу относятся к сугли-

нистым (табл. 1). Во всех почвах с глубиной значения рН увеличиваются, а содержание углерода органических веществ значительно уменьшается (табл. 1), что типично для почв таежной зоны.

В гор. ао изученных почв относительно гор. ВТ повышено валовое содержание Mn и Pb, понижено – Co, Cr, Cu, Fe, La, Mo, Ni, Rb, Sr, Ti, U, Zn, Zr. Гор. ао и Т значимо (табл. 1) обогащены обменными соединениями Pb, Rb, Sr, Zn, только гор. ао – As, Mn, Ti. В горизонте ао увеличивается содержание комплексных соединений Co, Mn, Pb, Zn, в Т-горизонте – содержание Pb и Zn.

В горизонте ВТ снижается содержание Co, Fe и Zr. Повышенные значения сорбированных гидроксидными Fe и Mn соединений обнаружены для Pb и Zn в горизонте ао (табл. 1) и Ti в горизонте ВТ потяжины, а пониженные – для Mn в торфе и Sr в горизонтах ВТ.

Высокая подвижность элементов наблюдается в верхних горизонтах почв. Наибольшей подвижностью (>50%) отличаются Bi, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti, Zn; наименьшей (<10%) – Cr, Mo, Sb, W, Zr. К нижележащему минеральному гор. ВТ подвижность всех элементов, кроме W, уменьшается.

Характер распределения значений изученных показателей. В горизонтах почв междуречья и склонов нормально распределены показатель рН и содержание Сорг, большинства гранулометрических фракций и химических элементов. Их распределение сменяется на логнормальное в торфе за счет увеличения его неоднородности и более интенсивного накопления ряда веществ на латеральном биогеохимическом барьере. При этом в гор. ВТ почв потяжины сохраняется нормальность распределения рассматриваемых показателей.

Содержание обменных соединений большинства элементов в гор. ао и ВТ всех исследуемых ландшафтов имеет логнормальное распределение. Нормальное распределение во всех горизонтах наблюдается только у содержания Rb и Sr, в гор. ао и Т – у Cd и Pb, в гор. ВТ – у Fe и U.

Содержание комплексных соединений большинства элементов в гор. ао и Т по всей совокупности образцов имеет логнормальное распределение. Нормальное распределение свойственно только содержанию Bi и Pb. В гор. ВТ нормально распределено содержание комплексных соединений As, Cu, Fe, La, Mn, Ni, Zn, Zr. Для сорбированных гидроксидами Fe и Mn соединений характерна схожая ситуация.

Нормальное распределение имеют значения подвижности As, Cr, Cu, Ni во всех исследуемых горизонтах, Bi – в органоминеральных горизонтах, As, Cd, Co, Fe, La, Rb, Sr, U, Zn, Zr – в гор. ВТ.

Уровни варибельности. Содержание Сорг в почвах значительно снижается с глубиной вплоть

Таблица 1. Медианные значения и Св (%) химических свойств, содержания химических элементов в горизонтах почв

Позиция	Вся выборка						Автономный вершины холма						Трансэлювиальный склона холма						Трансаккумулятивно-супераккумулятивный потяжины					
	ао (n = 18)			ВТ (n = 27)			ао (n = 9)			ВТ (n = 9)			ао (n = 9)			ВТ (n = 9)			ао (n = 9)			ВТ (n = 9)		
	медиана	Св		медиана	Св		медиана	Св		медиана	Св		медиана	Св		медиана	Св		медиана	Св		медиана	Св	
Гранулометрические фракции, %	0.4*	100		0*	100		0.1*	100		0*	100		0.4*	100		0.4*	100		<0.1	—		<0.1	—	
	6.3*	75		4*	100		6.4	92		4.6	100		6.3	60		6.3	60		12	51		0.1*	100	
	37*	12		26	20		37	8		26	19		37	15		37	15		23	17		28	24	
	38*	18		33*	37		40	13		29	15		38*	22		38*	22		25*	22		55	8	
	7	20		9.7*	32		8	14		10	14		7	24		7	24		10	12		5*	24	
	8*	21		19*	42		8	16		21	16		8	26		8	26		20	13		7	19	
	1.4	24		6.3*	32		1.4	17		6.9	12		1.3	31		1.3	31		6.3	9		3.1*	18	
pH	5.2	9		5.3	9		5.1	9		4.8	8		5.4	8		5.4	8		5.8	5		5.1	5	
Сорг, %	19	27		0.06	100		20	26		0.1	74		18	29		18	29		0.1	74		0.1*	100	
Валовое содержание, мг/кг	2.2	29		2.7	23		2.3	30		2.5	21		2.1	30		2.1	30		3.1	18		2.6	28	
	0.3	37		0.2*	100		0.4	34		0.2*	100		0.3*	39		0.3*	39		0.2*	100		0.1*	100	
	0.9	28		0.2*	25		1	29		0.2*	25		0.9	26		0.9	26		0.2	23		0.1	27	
	6.8	46		8.8	16		6.5	49		8.8	13		6.9	46		6.9	46		9	13		7.3	17	
	21	14		42	20		20	12		43	11		21	14		21	14		45	14		30*	11	
	12*	20		20	14		11.7	25		21	8		12	13		12	13		22	10		17	11	
	5000	25		14800	15		4700	19		16100	9		6800	25		15600	25		3000*	9		12000	10	
	17	18		32	10		15	18		31	8		18	14		31	14		31	7		36	3	
	1400*	45		700*	25		1500	53		600	27		1300	18		800	18		800	25		800	22	
	0.7	25		0.4	26		0.8	22		0.4	12		0.6	17		0.4	17		0.4	18		0.3	23	
	10*	31		21	23		10.2	14		20.4	14		9.7*	42		24	42		24	17		15.1	20	
	38	24		15	7		44	26		16	8		36	14		15	14		15	8		15	4	
	44	20		74	10		44	18		80	5		48	21		77	21		77	7		65*	4	
	0.9	29		0.3*	79		1.1	25		0.3*	98		0.7	26		0.3	26		0.3	14		0.2	10	
	67*	18		99	12		66*	19		90	11		70	17		90	17		90	10		108	4	
	1950	23		3100	8		1700	22		3100*	8		2100*	21		2900	21		2900	9		3100	7	
	1.3	14		1.7*	16		1.2	13		1.6	8		1.4	8		1.6	8		1.6	7		2.2	6	
	0.7	19		0.7	16		0.8	17		0.8	7		0.6	18		0.8	18		0.8	13		0.6	14	
	94*	27		56	26		99	28		66	11		83	21		56	21		56	17		38	10	
	230*	24		267*	27		209	25		260	7		244*	22		225	22		225	10		395	17	

Таблица 1. Продолжение

Позиция горизонт	Вся выборка						Автономный вершины холма						Трансэлювиальный склона холма						Трансаккумулятивно-суперкальвый потяжины							
	ao (n = 18)		VT (n = 27)		ao (n = 9)		VT (n = 9)		ao (n = 9)		VT (n = 9)		ao (n = 9)		VT (n = 9)		ao (n = 9)		VT (n = 9)		ao (n = 9)		VT (n = 9)			
	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv		
Обменные соединения, мг/кг	As	0.07*	100	<0.008	—	0.05	100	<0.008	—	0.08*	100	<0.008	—	0.08*	100	<0.008	—	0.08*	100	<0.008	—	<0.008	—	<0.008	—	
	Bi	0.02*	35	<0.0001	—	0.02	31	<0.0001	—	0.02	39	<0.0001	—	0.02	53	<0.0001	—	0.02	53	<0.0001	—	0.02*	53	<0.0001	—	
	Cd	0.5	34	0.01*	49	0.5	38	0.01*	49	0.5	31	0.01*	36	0.01*	20	0.01*	36	0.01*	20	0.01*	36	0.4	20	0.01	53	
	Co	1.1*	100	0.02*	61	0.8*	100	0.03	50	1.4*	100	0.01*	35	0.01*	37	0.01*	35	0.01*	37	0.6	37	0.6	37	0.02*	33	
	Cr	<0.001	—	0.08*	52	<0.001	—	0.11	55	<0.001	—	<0.001	—	0.05*	60	0.05*	60	0.05*	100	0.06*	100	0.1	24	0.1	24	
	Cu	0.3*	55	0.4*	44	0.3*	70	0.4*	48	0.3*	28	0.3*	24	0.3	24	0.3	24	0.3	24	0.4	45	0.5*	36	0.5*	36	
	Fe	18*	100	47	56	15*	100	49	43	19*	96	19*	24	24	68	24	68	24	55	87	55	67	67	35	35	
	La	0.1*	100	3.3*	41	0.2*	100	5.7	36	0.1*	100	0.1*	26	2.7	26	2.7	26	0.1*	44	0.4	44	3.1	11	3.1	11	
	Mn	2131	45	7.2*	42	2164	53	7	32	2041	35	2041	6	6	24	69*	98	6	98	0.6	31	8	8	0.5*	42	
	Ni	0.7*	52	0.5*	40	0.7	28	0.4*	44	0.4*	75	0.4*	0.6	0.6	40	0.6	40	0.6	31	0.6	31	0.5*	33	0.5*	33	
	Pb	5.4	48	0.4*	38	5.5	52	0.6	29	5.2*	46	5.2*	0.5	0.5	30	0.5	30	0.5	36	8.2	36	0.3	15	0.3	15	
	Rb	2.2	54	0.7	26	2.5	48	0.8	23	1.5	54	1.5	0.7	0.7	20	0.7	20	0.7	37	3.3	37	0.6	20	0.6	20	
	Sr	15	30	4.6	21	15	35	5	9	17	27	17	5	5	14	5	14	5	18	16	18	3*	19	3*	19	
	Ti	0.24*	70	<0.004	—	0.32*	79	<0.004	—	0.23	51	0.23	<0.004	—	<0.004	—	<0.004	—	0.14	87	0.14	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	—
	U	0.04*	97	0.09	20	0.04*	100	0.08*	20	0.04*	88	0.04*	0.1*	0.1*	16	0.08	16	0.1*	70	0.08	70	0.08	25	0.08	25	
	Zn	22	43	0.7	43	27*	49	0.4*	48	19	36	19	1	1	40	9	40	1	37	9	37	1*	25	1*	25	
	Zr	0.02*	89	0.03*	68	0.03*	92	0.02*	47	0.02*	88	0.02*	0.04*	0.04*	63	0.04	63	0.04*	56	0.04	56	0.04	47	0.04	47	
	Комплексные соединения, мг/кг	As	0.2	26	0.09	21	0.2	30	0.1	18	0.2	23	0.1	24	0.1	24	0.1	24	0.1	44	0.3	44	0.1	14	0.1	14
Bi		0.1	35	0.01*	35	0.2	25	0.01*	13	0.1	29	0.01*	48	0.01*	33	0.01*	48	0.01*	33	0.1	33	0.01*	40	0.01*	40	
Cd		0.3	37	0.05*	66	0.3	36	0.03*	100	0.2	35	0.06	0.06	45	0.2	23	0.06	45	0.2	23	0.2	23	0.05	59	0.05	59
Co		3.3	51	3.1	21	4.1	56	3.1	22	3.1	46	3.4	3.4	18	0.7	28	3.4	18	0.7	28	0.7	28	2.7	19	2.7	19
Cr		1.3*	31	0.2*	68	1.3	38	0.1	63	1.3	11	0.2*	0.2*	78	0.3*	43	0.2*	78	0.3*	43	0.3	36	0.3	36	0.3	36
Cu		4*	35	0.8	46	4*	46	0.5	68	4	21	0.9	0.9	20	5	15	0.9	20	5	15	1*	36	1*	36	1*	36
Fe		1558	25	326	31	1587	29	366	18	1439	22	1439	239	239	29	3937	40	239	29	3937	40	385	385	27	385	27
La		1.5*	95	1.6	35	1.6	59	1.4	39	1.3*	96	1.7*	1.7*	35	4	36	1.7*	35	4	36	1.8	20	1.8	20	1.8	20
Mn		1253*	57	280	41	1623	51	222	49	926*	60	926*	323	323	22	15	58	323	22	15	58	347	347	39	347	39
Mo		0.03	37	0.03*	28	0.03	41	0.03*	27	0.03*	32	0.03*	0.03	0.03	24	0.03*	58	0.03*	58	0.03*	58	0.02*	36	0.02*	36	
Ni	2.8	38	2.39	66	3.1	27	1*	100	2.1*	49	3.2	3.2	42	2.4	15	2.4	42	2.4	15	2.8	50	2.8	50	2.8	50	
Pb	2.5	32	2.2*	34	36	31	2	28	23	16	23	3*	3*	25	21	30	3*	25	21	30	2	14	2	14		

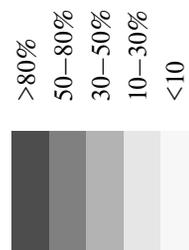
Таблица 1. Продолжение

Позиция горизонт	Вся выборка						Автономный вершины холма						Трансэлювиальный склона холма						Трансаккумулятивно- суперкальвый потяжины					
	ao (n = 18)		BT (n = 27)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		ao (n = 9)		BT (n = 9)	
	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv
Sb	0.01*	100	<0.0005	—	0.01*	85	<0.0005	—	<0.0005	—	<0.0005	—	<0.0005	—	<0.0005	—	<0.0005	—	0.02	86	<0.0005	—	<0.0005	—
Ti	<0.002	—	2*	76	<0.002	—	4.5	76	<0.002	—	1.5	30	<0.002	—	<0.002	—	3.9	35	<0.002	—	3.9	35	<0.002	—
W	0.01*	94	0.01*	57	0.01*	50	0.01*	67	<0.0008	—	0.01*	3	<0.0008	—	<0.001	—	0.01*	38	<0.001	—	0.01*	38	<0.001	—
Zn	29	51	0.7	53	30*	51	0.4	74	28	48	0.1	21	28	42	43	0.7*	26	26	10*	43	0.7*	26	10*	43
Zr	0.1	48	2.6	14	0.1	55	2.6	9	0.1	44	0.1	21	0.1	21	65	2.7	12	12	0.1	65	2.7	12	0.1	65
As	0.4	31	0.06*	100	0.4	27	0.02*	100	0.4	35	0.05*	97	0.4	35	56	0.14*	56	56	0.2	56	0.14*	56	0.2	56
Вi	<0.0001	—	0.01*	44	<0.0001	—	0.02*	24	<0.0001	—	<0.0001	—	<0.0001	—	<0.0001	—	0.01*	38	<0.0001	—	0.01*	38	<0.0001	—
Cd	0.3	45	0.02*	46	0.3	49	0.02*	66	0.3	38	0.3	34	0.3	38	38	0.02*	39	39	0.2	38	0.02*	39	0.2	38
Co	3.1*	61	1.1	24	3.1	69	0.9	18	3	56	1.4	15	3	56	49	1	24	24	0.2	49	1	24	0.2	49
Cr	0.7	68	3	18	0.5	75	2.6	23	0.7	61	3.1	14	0.7	61	14	3.2*	13	13	<0.001	—	3.2*	13	<0.001	—
Fe и Mn	3.8*	43	2.4*	17	3.8*	55	2.4*	26	3.9	26	2.3	8	3.9	26	17	2.8	11	11	4.2	17	2.8	11	4.2	17
соедине- ния, мг/кг	1362	37	2328	19	1205	33	2163	15	1773	34	1911	18	1773	34	1885	2611	14	14	1885	40	2611	14	1885	40
La	2*	97	8.1*	24	1.9	63	7.5	33	2*	100	9.3	17	2*	100	46	6.9*	10	10	3.3	46	6.9*	10	3.3	46
Mn	947	85	79	34	1002	68	48*	26	387	97	90	20	387	97	94	93	28	28	5	94	93	28	5	94
Ni	2.7	39	2.4	45	3.1	29	1.6*	56	2.1	50	3.1	29	2.1	50	21	2.4	29	29	1.9	21	2.4	29	1.9	21
Pb	24*	35	3	23	28	37	3.4	20	23	9	3.1	25	23	9	34	2.5	19	19	16	34	2.5	19	16	34
Rb	0.1*	100	<0.001	—	0.1*	100	<0.0001	—	0.3	83	<0.0001	—	<0.0001	—	<0.0001	—	0.1	53	<0.0001	—	0.1	53	<0.0001	—
Sb	0.01*	100	<0.001	—	0.02	85	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—
Sr	7.9	74	1.1	58	8	75	0.55	52	7	73	1	72	7	73	39	1.5	27	27	8	39	1.5	27	8	39
Ti	<0.002	—	13	47	<0.002	—	12*	40	<0.002	—	<0.002	—	<0.002	—	<0.002	—	23	17	<0.002	—	23	17	<0.002	—
U	0.03	74	0.1	14	0.02	84	0.1	17	0.03	62	0.1	14	0.03	62	45	0.1*	9	9	0.06	45	0.1*	9	0.06	45
W	0.01*	57	0.01*	29	0.01	53	0.01*	30	0.01*	57	0.01*	10	0.01*	57	10	0.01*	38	38	0.01*	10	0.01*	38	0.01*	10
Zn	32	49	8.2	18	34	49	9	17	28	48	8	14	28	48	42	7	14	14	10	42	7	14	10	42
Zr	0.1	53	0.5*	29	0.07	70	0.4	13	0.09	34	0.5	26	0.09	34	100	0.7	22	22	0.01*	100	0.7	22	0.01*	100
Подвиж- ность, %	33	24	5.4	49	33	24	5.3	24	33	24	4.2	41	33	24	90	10	28	28	43	90	10	28	43	90
Вi	59	21	15*	40	62*	19	19*	38	52	21	13	44	52	21	32	15*	40	40	88*	32	15*	40	88*	32
Cd	100*	10	55	35	100*	13	38	47	100*	4	57	24	100*	4	0	67	30	30	100*	0	67	30	100*	0
Co	100*	7	50	15	100*	9	45	13	100*	6	52	13	100*	6	33	52	13	13	92*	33	52	13	92*	33
Cr	10*	25	8	28	10*	23	6.2	20	8.1	26	7.8	15	8.1	26	24	10	6	6	5.7	24	10	6	5.7	24

Таблица 1. Окончание

Позиция горизонт	Вся выборка				Автономный вершины холма				Трансэлювиальный склона холма				Трансаккумулятивно-суперкальвый потяжины				
	ao (n = 18)		BT (n = 27)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		T (n = 9)		BT (n = 9)		
	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	
Cu	69	17	18	25	68	22	16	20	13	70	13	18	12	95*	13	25	8
Fe	53*	26	18	30	54*	28	17	12	26	52*	26	15	23	100*	19	25	16
La	25*	72	43	17	27	52	47	10	89	19*	89	45	10	100*	28	33	8
Mn	100*	0	50*	30	100*	0	46	18	0	100*	0	60	20	56	70	51	38
Mo	4.5	22	8.1*	44	4.5	27	6.8*	62	17	4.5	17	6.8	27	7.9*	100	9.1*	29
Ni	65	33	29	43	69	23	13*	66	42	50	42	30	22	95*	27	35	26
Pb	100*	0	38	18	100	0	39*	12	0	100*	0	43	16	100*	0	31	10
Rb	5.4*	69	1	16	5.6	68	1.1*	20	55	3.5	55	1	14	50	53	1	10
Sb	2*	96	<0.01*	—	2.7	82	<0.01*	—	100	1*	100	<0.01*	—	2.7*	100	<0.01*	—
Sr	36	38	6	24	34	36	6	13	41	38	41	7	18	100*	29	4.4*	23
Ti	100*	24	0.6*	100	100*	23	0.6*	100	27	100*	27	0.4	22	100*	72	0.8	16
U	5.9*	61	13	20	5.3*	73	14	8	50	6.3	50	14	15	39	36	10	13
W	2.5*	80	2.8*	31	2.7*	68	2.7*	43	98	1.7	98	2.7	17	<0.06*	—	3.3	21
Zn	86*	15	18	24	88	12	15	20	19	86	19	18	20	85	21	23	11
Zr	0.1*	67	1.1	22	0.1*	88	1.2*	9	38	0.1	38	1.4	16	1	75	0.9	15

Диапазоны значений Cv



Содержание элементов ниже предела обнаружения во всех проанализированных повторностях

Примечание. Показатели, отличающиеся значением более высоким содержанием в соответствующем горизонте почв по парному T-критерию Уилкоксона, выделены полужирным ($p < 0.05$) и полужирным курсивом ($p < 0.01$). Звездочкой (*) отмечены показатели с логнормальным законом распределения; распределение остальных показателей удовлетворяет нормальному закону. Содержание обменных форм Mo (2), Sb (1), W (1), комплексных Rb (0.4), Sr (6), U (0.1) и сорбированных Mo (2) ниже предела обнаружения во всех пробах (мкг/кг). Содержание обменных форм Mn выше, чем валовых, что можно объяснить природной вариабельностью элементного состава почв.

до нижнего предела обнаружения, поэтому вариабельность этого показателя, низкая в гор. ао (26–29%), увеличивается в гор. ВТ (74–100%; табл. 1). В гор. ао и ВТ содержание пылеватых и илистой фракций варьируют слабо ($C_v = 10–30\%$), а крупного и среднего песка – сильно из-за близости к нижнему пределу обнаружения, что для крупного песка также наблюдали в гор. ВТ агросерых почв Брянского ополья (Кротов, Самсонова, 2009).

Величина рН хоть и относится к показателям уровня “почва-момент” характеризуется низкими значениями C_v во всех исследуемых горизонтах (5–9%; табл. 1), что согласуется с данными по пахотному Р горизонту агро-дерново-подзолистых почв базы “Чашниково” (Московская область), где у величины рН $C_v = 4–11\%$ на участке 200×200 м (Самсонова, Мешалкина, Дмитриев, 1999; Самсонова, Мешалкина, 2014). Низкая пространственная изменчивость показателя рН отмечена и в других работах (Fu et al., 2013; Bogunovic et al., 2014; Reza et al., 2017).

В гор. ао C_v валового содержания большинства элементов ниже 30%. Средняя и высокая вариабельность свойственна только содержанию Вi, Со, Мп, Ni. В гор. ВТ C_v содержания большинства элементов опускается ниже 30% (в том числе $C_v < 10\%$ для содержания Cu, Fe, La, Pb, Rb, Ti, U) за исключением Вi ($C_v > 80\%$) в обеих рассмотренных позициях и Sb (98%) в автономном ландшафте. В гор. Т торфяно-подзолисто-глеевых почв подчиненного ландшафта C_v валового содержания многих элементов существенно увеличивается (табл. 1). Это обусловлено повышенной неоднородностью торфяных почв (Beckwith et al., 2003; Wang et al., 2020), что также подтверждает высокая пространственная изменчивость зольности торфяных олиготрофных глеевых почв северо-востока Сахалина (Липатов и др., 2017).

В гор. ао и Т вариабельность максимальна у содержания обменных соединений As, Со, Cr, Fe, La, U, Zr, Pb и Мп. (табл. 1). Высокая пространственная изменчивость содержания обменного Pb ($C_v = 75\%$) отмечена в дерново-подзолистой почве Ленинградской области (Витковская, 2011). В поверхностных горизонтах исследуемых почв ЦЛЗ низкие C_v обнаружены только у содержания обменного Cd в потяжине, Cu на склоне и Sr во всех ландшафтах. В дерново-подзолистой почве Ленинградской области (Витковская, 2011) пространственная изменчивость содержания Cu и Cd была несколько выше ($C_v = 33\%$). В гор. ВТ всех выборок выявлена средняя и низкая вариабельность содержания обменных форм элементов (табл. 1).

Пространственная неоднородность содержания комплексных соединений слабее отличается по горизонтам почв ЦЛЗ. Она очень высока у комплексных соединений элементов с низким

содержанием (Rb, Sb, Sr). Ее высокие значения прослеживаются в гор. ао у Со, La, W, Zn, Zr, а также у Мп (51–60%) в поверхностных горизонтах всех почв. В гор. ВТ неоднородность содержания комплексных соединений снижается (<30%) у Со, Мо, Sb и Zr. Средней и низкой изменчивостью содержания комплексных соединений во всех исследуемых горизонтах почв характеризуются As, Вi, Fe, Ni, Pb.

Вариабельность соединений фракции F3 контрастно дифференцирована по горизонтам (табл. 1). Так, гор. ао и Т отличаются (очень) высокой вариабельностью содержания сорбированных соединений Мп, Rb, Sb, Со, Cr, La, Sr, W, Zr. Более низкая изменчивость содержания характерна для меньшего числа элементов (Cd, Cu, Ni, Fe, Pb, Zn) во всех позициях рельефа. Снижение вариабельности содержания сорбированных форм в гор. ВТ характерно для Со, Cr, Cu, Fe, La, Pb, U, W, Zn, Zr.

Вариабельность Cu (35%), Ni и Zn (28%) сопоставима с данными по сорбированным формам элементов в пахотных горизонтах агросерых почв Брянского ополья (Карпухина и др., 2012). В гор. ВТ C_v снижаются до низких значений у содержания сорбированных соединений Со, Cr, Cu, Fe, Мп, Pb, U, Zn, Zr. Высокая вариабельность характерна только для содержания As (56–100%).

Таким образом, показатели “почва-момент” имеют более высокую вариабельность, чем показатели “почва-память”. Данную закономерность отмечали ранее (Самсонова, Мешалкина, Дмитриев, 1999; Самсонова, Коротков, Лавринова, 2017; Самсонова, 2008). По значениям коэффициента C_v физико-химические свойства серых лесных и дерново-подзолистых почв Выгоничского района Брянской области выстраивались в ряд: рН (11%) < гумус (33%) < доступные Р и К (44–49%) (Самсонова, Коротков, Лавринова, 2017; Самсонова, 2008).

C_v значений подвижности Cr, Cu, Fe и Zn во всех рассматриваемых горизонтах менее 30% (табл. 1). Значения подвижности Rb, Sb, W, Zr имеют $C_v > 50\%$ в гор. ао и Т; La – в гор. АУ; As, Мп, Мо и Ti – в гор. Т. Высокая пространственная неоднородность значений подвижности в гор. ао и Т объясняется значительным вкладом непрочно связанных (F1, F2, F3) соединений в значениях показателя, что позволяет отнести подвижность в поверхностных горизонтах к уровню “почва-момент”.

В гор. ВТ изменчивость значений подвижности снижается, не превышая 30% у Со, Cr, Cu, Fe, La, Pb, Rb, Sb, Sr, U, Zn и Zr. Высокие и средние значения C_v имеет только значение подвижности Ti и As ($C_v < 100\%$), Мо, Ni, Вi и Cd (<70%). Снижение C_v значений подвижности в гор. ВТ, где

преобладают прочно связанные соединения, позволяет рассматривать ее в минеральных горизонтах в качестве показателя уровня “почва-память”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В гор. Т и ао почв катены Центрально-Лесного заповедника нормальное распределение характерно для показателя рН и содержания Сорг, а также валового содержания большинства изученных элементов в автономном и склоновом ландшафте. Содержание трех подвижных форм соединений и как следствие подвижность большинства элементов соответствуют логнормальному распределению в гор. ао и Т и в меньшей степени в гор. ВТ.

В большинстве случаев для показателей уровня “почва-память” характерны низкие значения коэффициента С_v. Лишь вариабельность содержания Сорг возрастает в гор. ВТ. Для валового содержания Вi, Со, Сг, Fe, La, Mn, Rb, Sr, Ti, U, W и Zg она высока в гор. Т подчиненного ландшафта. В гор. ВТ всех изученных почв катены значения С_v минимальны.

Показатели уровня “почва-момент” обладают повышенной вариабельностью за исключением величины рН. Вариабельность содержания обменных и сорбированных гидроксидов Fe и Mn соединений снижается от поверхностных горизонтов к текстурному, а комплексных соединений остается неизменной.

Значение подвижности химических элементов обладает низкой вариабельностью. При этом, последняя увеличивается в поверхностных горизонтах ао и Т, что позволяет рассматривать ее в качестве показателя уровня “почва-память” в минеральных горизонтах, где преобладают прочно связанные соединения, и уровня “почва-момент” в поверхностных горизонтах, где повышен вклад прочно связанных соединений в значение показателя.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны руководителю исследований – академику Н.С. Касимову за консультации при подготовке текста рукописи. В Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ авторами выполнена пробоподготовка, проанализированы физико-химические свойства (содержание Сорг, гранулометрический состав и величина рН) и приготовлены почвенные вытяжки. Элементный состав почв и почвенных вытяжек определен в ВИМС им. Н.И. Федорова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдеева Т.Н., Фрид А.С. Неоднородность плодородия почвенного покрова и ее учет при проведении полевых опытов // Современные проблемы почвоведения. На-

учные труды Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. М., 2000. С. 337–346.

Витковская С.Е. Пространственная изменчивость параметров плодородия дерново-подзолистой почвы в полевых опытах // Агрофизика. 2011. № 2. С. 19–25.

Енчилик П.Р., Семенов И.Н., Асеева Е.Н., Самонова О.А., Иовчева А.Д., Терская Е.В. Катенарная биогеохимическая дифференциация в южно-таежных ландшафтах (Центрально-Лесной заповедник, Тверская область) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 6. С. 121–133.

Карандашев В.К., Хвостиков В.А., Носенко С.Ю., Бурмий Ж.П. Использование высокообогащенных стабильных изотопов в массовом анализе образцов горных пород, грунтов, почв и донных отложений методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 7. С. 6–15.

Карпухина Н.Ю., Карпунин М.М., Самсонова В.П., Кротов Д.Г. Пространственная изменчивость содержания тяжелых металлов в агросерой почве в масштабе сельскохозяйственного угодья // Агрохимия. 2012. № 8. С. 57–65.

Козлова А.А. Сезонные изменения некоторых свойств почв Южного Предбайкалья, развитых в условиях реликтового микрорельефа // Вестник КрасГАУ. 2009. № 11(38). С. 30–34.

Кротов Д.Г., Самсонова В.П. Пространственная изменчивость гранулометрического состава агросерых почв и агросерых со вторым гумусовым горизонтом // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2009. № 1. С. 19–23.

Липатов Д.Н., Шеглов А.И., Манахов Д.В., Завгородняя Ю.А., Розанова М.С., Брехов П.Т. Пространственное варьирование свойств торфяных почв в нефтегазодобывающем регионе на северо-востоке о. Сахалин // Почвоведение. 2017. № 7. С. 874–885.

Пузаченко Ю.Г., Желтухин А.С., Козлов Д.Н., Кораблев Н.П., Федяева М.В., Пузаченко М.Ю., Сиунова Е.В. Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник. Популярный очерк. М.: Деловой мир, 2007. 84 с.

Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерново-подзолистых почв. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 156 с.

Самсонова В.П., Кротов Д.Г., Лавринова Е.Ю. Пространственная изменчивость агрохимических свойств сельскохозяйственных угодий Брянской области // Агрохимия. 2017. № 7. С. 11–18.

Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л. Оценка роли рельефа в пространственной изменчивости агрохимически важных почвенных свойств для интенсивно обрабатываемого сельскохозяйственного угодья // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2014. № 3. С. 36–44.

Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Дмитриев Е.А. Структуры пространственной вариабельности агрохимических свойств пахотной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1999. № 11. С. 1359–1366.

Семенов И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Латеральное распределение форм металлов в тундровых, таежных и лесостепных катенах Восточно-Европейской равнины // Вестник МГУ. Серия № 5 География. 2016. № 3. С. 29–39.

Семенов И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Поведение форм металлов в зональных почвенно-геохимических катенах // Геохимия ландшафтов. К 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана / Под ред.

- Н.С. Касимова, А.Н. Геннадиева. АПР Москва. 2017. С. 97–144.
- Соколов И.А., Таргульян В.О. Взаимодействие почвы и среды: почва–память и почва–момент // Изучение и освоение природной среды. М.: Наука, 1976. С. 150–164.
- Соловьев А.Г. Использование комплексных вытяжек для определения доступных форм микроэлементов в почвах // Мониторинг фоновое загрязнение природных сред. Л.: Гидрометеоздат, 1989. Вып. 5. С. 216–227.
- Таргульян В.О., Бронникова М.А. Память почв: теоретические основы концепции, современное состояние и перспективы развития // Почвоведение. 2019. № 3. С. 259–275.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X19030110>
- Таргульян В.О., Соколов И.А. Структурный и функциональный подход к почве: почва–память и почва–момент // Математическое моделирование в экологии. М.: Наука, 1978. С. 17–33.
- 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.
- Beckwith C.W., Baird A.J., Heathwaite A.L. Anisotropy and depth related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat: I. Laboratory measurements. *Hydrol. Process.* 2003. № 17. P. 89–101.
[https://doi.org/10.1002/\(ISSN\)1099-108510.1002/hyp.v17:110.1002/hyp.1116](https://doi.org/10.1002/(ISSN)1099-108510.1002/hyp.v17:110.1002/hyp.1116)
- Bogunovic I., Mesic M., Zgorelec Z., Aurisic J., Bilandzija D. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil. *Soil & tillage research.* 2014. V. 144. P. 174–183.
- Fraterrigo J.M., Rusak J.A. Disturbance-driven changes in the variability of ecological patterns and processes. *Ecol Lett.* 2008. V. 11. P. 756–770.
- Fu W., Zhao K., Jiang P., Ye Z., Tunney H., Zhang C. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements. *Soil Res.* 2013. V. 51. P. 503–512.
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports.* № 106. FAO, Rome.
- Karavanova E.I., Malinina M.S. Spatial Differentiation of the Chemical Composition of Solid and Liquid Phases in the Main Soil Types of the Central Forest State Natural Biospheric Reserve. *Eurasian Soil Science.* 2009. V. 42. № 7. P. 725–737.
<https://doi.org/10.1134/S1064229309070035>
- Minkina T., Mandzhieva S., Burachevskaya M., Bauer T., Sushkova S. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil. *MethodsX.* 2018. V. 5. P. 217–226.
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007>
- Reza S.K., Nayak D.C., Mukhopadhyay S., Chattopadhyay T., Singh S.K. Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system. *Arch Agron Soil Sci.* 2017. V. 63(11). P. 1489–1498.
- Wang M., Liu H., Zak D., Lennartz B. Effect of anisotropy on solute transport in degraded fen peat soils. *Hydrol. Process.* 2020. V. 34(9). P. 2128–2138.
<https://doi.org/10.1002/hyp.v34.910.1002/hyp.13717>

Spatial Variability of the Soils' Elemental Composition in the Central Forest Natural Reserve Catena

P. R. Enchilik¹ and I. N. Semenkova¹, *

¹Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

*E-mail: semenkov@geogr.msu.ru

In the south-eastern part of the Valdai hills, a conjugated series of Retisols and Stagnosols was studied. In the peat (H), organic-mineral (O) and mineral (Bw) horizons, the variability of physical and chemical properties (pH value, content of particle size fractions and total organic carbon – TOC) and elemental composition (total content and exchangeable, weakly bound with complexes, nonsilicate Fe and Mn compounds of As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, Ti, U, W, Zn and Zr). Indicators of the “soil-memory” level (contentration of TOC, particle-size fractions and total content of chemical elements) and pH values with the exception of the coarse and medium sand content (>50%) and TOC (>74%) had low (<30%) variation coefficients in the Bw horizon. The variability of the total content of Bi, Co, Cr, Fe, La, Mn, Rb, Sr, Ti, U, W, and Zr increased in the H horizon. The content of mobile fractions of elements - the indicators of the “soil-moment” level - had higher variability. At the same time, the variability of exchangeable and specifically sorbed compounds of all the studied elements decreased with depth, while the changes in the content of fractions weakly bound with complexes, were less apparent. The chemical elements mobility had a low variability, since the greater contribution to the this indicator's value is made not by the mobile compounds, but by the total content.

Keywords: spatial heterogeneity, acidity, fractioning, heavy metals and metalloids, potentially toxic elements, forest ecosystems.

Acknowledgements: The field work and chemical analyses have been performed with a support from Interdisciplinary scientific and educational school of the Moscow State University “Planet's future and the environment's global changes”. The results were summarised within the framework of the RSF project No. 19-77-30004.

REFERENCES

- Avdeeva T.N., Frid A.S., Neodnorodnost' plodorodiya pochvennogo pokrova i ee uchët pri provedenii polevykh opytov (Heterogeneity of soil fertility and its consideration during field experiments), In: *Sovremennye problemy pochvovedeniya* (Modern Issues of Soil Science), Nauchnye trudy Pochvennogo in-ta im. V.V. Dokuchaeva, Moscow, 2000, pp. 337–346.
- Beckwith C.W., Baird A.J., Heathwaite A.L., Anisotropy and depth related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat: I. Laboratory measurements, *Hydrol. Process*, 2003, No. 17, pp. 89–101.
[https://doi.org/10.1002/\(ISSN\)1099-108510.1002/hyp.v17:110.1002/hyp.1116](https://doi.org/10.1002/(ISSN)1099-108510.1002/hyp.v17:110.1002/hyp.1116)
- Bogunovic I., Mesic M., Zgorelec Z., Aurisic J., Bilandzija D., Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil, *Soil & Tillage Research*, 2014, Vol. 144, pp. 174–183.
- Enchilik P.R., Semenov I.N., Aseeva E.N., Samonova O.A., Iovcheva A.D., Terskaya E.V., Katenarnaya biogeokhimicheskaya differentsiatsiya v yuzhno-taevnykh landshaftakh (Tsentral'no-Lesnoi zapovednik, Tverskaya oblast') (Catenary biogeochemical differentiation in the southern taiga landscapes (Central Forest Reserve, Tver oblast)), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, 2020, No. 6, pp. 121–133.
- Fraterrigo J.M., Rusak J.A., Disturbance-driven changes in the variability of ecological patterns and processes, *Ecol Lett*, 2008, Vol. 11, pp. 756–770.
- Fu W., Zhao K., Jiang P., Ye Z., Tunney H., Zhang C., Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements, *Soil Res.*, 2013, Vol. 51, pp. 503–512.
- IUSS Working Group WRB*, World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, *World Soil Resources Reports*, 2015, No. 106, FAO, Rome.
- Karandashev V.K., Khvostikov V.A., Nosenko S.Y., Burmii Z.P., Ispol'zovanie vysokoobogashchennykh stabil'nykh izotopov v massovom analize obraztsov gornyykh porod, gruntov, pochv i donnykh otlozhenii metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoi plazmoi (Highly enriched stable isotopes in large scale analysis of rocks, soils, subsoils and bottom sediments using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)), *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2016, Vol. 82, No. 7, pp. 6–15.
- Karavanova E.I., Malinina M.S., Spatial Differentiation of the Chemical Composition of Solid and Liquid Phases in the Main Soil Types of the Central Forest State Natural Biospheric Reserve, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 7, pp. 725–737.
DOI 10.1134/S1064229309070035
- Karpukhina N.Y., Karpukhin M.M., Samsonova V.P., Krotov D.G., Prostranstvennaya izmenchivost' soderzhaniya tyazhelykh metallov v agroserei pochve v masshtabe sel'skokhozyaystvennogo ugod'ya (Spatial variation of heavy metals in agrogray soil on the agricultural land scale), *Agrokimiya*, 2012, No. 8, pp. 57–65.
- Kozlova A.A., Sezonnaya izmeneniya nekotorykh svoystv pochv Yuzhnogo Predbaikal'ya, razvitykh v usloviyakh reliktoivogo mikrorel'efa (Seasonal changes of certain soils properties of the south prebaikalye formed in the relict microrelief conditions), *Vestnik KrasGAU*, 2009, No. 11(38), pp. 30–34.
- Krotov D.G., Samsonova V.P., Prostranstvennaya izmenchivost' granulometricheskogo sostava agroserykh pochv i agroserykh so vtorym gumusovym gorizontom (Spatial variability of soil composition of arable gray soil and arable gray soil with second humus horizon), *Vestnik MGU. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2009, No. 1, pp. 19–23.
- Lipatov D.N., Shcheglov A.I., Manakhov D.V., Zavgorodnyaya Y.A., Rozanova M.S., Brekhov P.T., Spatial variation of peat soil properties in the oil-producing region of north-eastern Sakhalin, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 7, pp. 850–860.
- Minkina T., Mandzhieva S., Burachevskaya M., Bauer T., Sushkova S., Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil, *MethodsX*, 2018, Vol. 5, pp. 217–226.
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007>
- Puzachenko Y.G., Zheltukhin A.S., Kozlov D.N., Korablev N.P., Fedyayeva M.V., Puzachenko M.Y., Siunova E.V., *Tsentral'no-Lesnoi gosudarstvennyi prirodnyi biosfernyi zapovednik* (Central Forest State Biosphere Reserve), Moscow: Delovoi mir, 2007.
- Reza S.K., Nayak D.C., Mukhopadhyay S., Chattopadhyay T., Singh S.K., Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system, *Arch Agron Soil Sci*, 2017, Vol. 63(11), pp. 1489–1498.
- Samsonova V.P., Krotov D.G., Lavrinova E.Y., Prostranstvennaya izmenchivost' agrokhimicheskikh svoystv sel'skokhozyaystvennykh ugodii Bryanskoi oblasti (Spatial variability of agrochemical parameters of agricultural lands in Bryansk region), *Agrokimiya*, 2017, No. 7, pp. 11–18.
- Samsonova V.P., Meshalkina Y.L., Dmitriev E.A., Struktury prostranstvennoi variabel'nosti agrokhimicheskikh svoystv pakhotnoi dernovo-podzolistoi pochvy (Structures of spatial variability of agrochemical properties of arable soddy-podzolic soil), *Pochvovedenie*, 1999, No. 11, pp. 1359–1366.
- Samsonova V.P., Meshalkina Y.L., Otsenka roli rel'efa v prostranstvennoi izmenchivosti agrokhimicheskikh vazhnykh pochvennykh svoystv dlya intensivno obrabatyvaemogo sel'skokhozyaystvennogo ugod'ya (Study of the relief contribution in the spatial variability of the agrochemically important soil properties for a intensively processed agricultural field), *Vestnik MGU. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2014, No. 3, pp. 36–44.
- Samsonova V.P., *Prostranstvennaya izmenchivost' pochvennykh svoystv: na primere dernovo-podzolistykh pochv* (Spatial variability of soil properties: on the example of soddy-podzolic soils), Moscow: Izd-vo LKI, 2008, 156 p.
- Semenkov I.N., Kasimov N.S., Terskaya E.V., Lateral'noe raspredelenie form metallov v tundroykh, taevnykh i leso-stepnykh katenakh Vostochno-Evropейskoi ravniny (Lateral distribution of metal forms in tundra, taiga and forest steppe catenae of the East European Plain), *Vestnik MGU, Seriya 5, Geografiya*, 2005, No. 3, pp. 29–39.
- Semenkov I.N., Kasimov N.S., Terskaya E.V., Povedenie form metallov v zonal'nykh pochvenno-geokhimicheskikh katenakh (Behavior of metal forms in zonal soil-geochemical catenas), In: *Geokimiya landshaftov* (Landscapes geochemistry), Moscow: APR 2017, pp. 97–144.

Shaporina N.A., Chichulin A.V., Chumbaev A.S., Prostranstvennaya variabel'nost' vodno-fizicheskikh svoystv temno-seroi lesnoi pochvy v usloviyakh Predsalair'ya (Spatial variability of water-physical properties of dark gray forest soil in the conditions Pedaleira), *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2018, No. 10, pp. 144–149.

Sokolov I.A., Targul'yan V.O., Vzaimodeistvie pochvy i sredy: pochva–pamyat' i pochva–moment (Interaction of soil and environment: soil–memory and soil–moment), In: *Izuchenie i osvoenie prirodnoi sredy* (Study and development of the natural environment), Moscow: Nauka, 1976, pp. 150–164.

Solov'ev A.G., Ispol'zovanie kompleksnykh vytyazhek dlya opredeleniya dostupnykh form mikroelementov v pochvakh (The use of complex extracts to determine the available forms of trace elements in soils), In: *Monitoring fonovogo zagryazneniya prirodnykh sred* (Monitoring of background pollution of natural environments), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, Vol. 5, pp. 216–227.

Targulian V.O., Bronnikova M.A., Soil memory: theoretical basics of the concept, its current state, and prospects for development, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 3, pp. 229–243.

Targul'yan V.O., Sokolov I.A., Strukturnyi i funktsional'nyi podkhod k pochve: pochva–pamyat' i pochva–moment (Structural and functional approach to soil: soil–memory and soil–moment), In: *Matematicheskoe modelirovanie v ekologii* (Mathematical modeling in ecology), Moscow: Nauka, 1978, pp. 17–33.

Vitkovskaya S.E., Prostranstvennaya izmenchivost' parametrov plodorodiya dernovo-podzolistoi pochvy v polevykh opytakh (Spatial variability of sod-podzolic soil fertility parameters in field experiments), *Agrofizika*, 2011, No. 2, pp. 19–25.

Wang M., Liu H., Zak D., Lennartz B., Effect of anisotropy on solute transport in degraded fen peat soils, *Hydrol. Process*, 2020, Vol. 34(9), pp. 2128–2138.
<https://doi.org/10.1002/hyp.v34.910.1002/hyp.13717>