

УДК 911.1:550.4

**Л. Н. СЕМЁНОВА, Ю. М. СЕМЁНОВ**

Институт географии СО РАН, г. Иркутск

**МИГРАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ  
КАК ИНДИКАТОР ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГЕОСИСТЕМ**

*Приводятся результаты изучения поведения валовых и подвижных форм железа, титана, марганца, хрома, ванадия, никеля, кобальта, меди и свинца в почвах геосистем хр. Хамар-Дабан; рассчитаны их относительные содержания. Рассмотрена роль кислото- и водорастворимых форм элементов в радиальной миграции тяжелых металлов, оценены ее масштабы с использованием сорбционных лизиметров. Показано, что миграционная способность тяжелых металлов может служить индикатором чувствительности геосистем к внешним воздействиям.*

Ключевые слова: геосистемы, почвы, тяжелые металлы, подвижные формы, миграционная способность.

© 2010 Семёнова Л. Н., Семёнов Ю. М. (semenov@irigs.irk.ru)

*Presented are the results from studying the behavior of the total and labile forms of iron, titanium, manganese, chromium, vanadium, nickel, cobalt, copper and lead in the soils of the geosystems of the Khamar-Daban Range; their relative contents have been calculated. The role of acid- and water-soluble forms of the elements in radial migration of the heavy metals is considered, and its magnitude is inferred by means of the sorption lysimeters. It is shown that the migration ability of heavy metals can serve as the sensitivity indicator of geosystems to external impacts.*

Keywords: *geosystems, soils, heavy metals, labile forms, migration ability.*

## ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач регионального развития необходимо адаптировать предполагаемые действия по оптимизации природопользования к конкретным природно-хозяйственным обстановкам через территориальное планирование и эколого-географическое обоснование создания крупных хозяйственных объектов. Реализация проектов природопользования нуждается в пространственно распределенной системной информации о территории, но обычные ландшафтные карты не могут удовлетворить запросов пользователей, поэтому требуется разработка алгоритмов перевода информации в приемлемую для потребителей форму с использованием унифицированных критериев оценки геосистем.

В Институте географии им. В. Б. Сочавы СО РАН начато создание ландшафтно-оценочной карты азиатской части России инновационного назначения на базе синтеза подходов комплексной физической географии и ландшафтного планирования, где сведения о геосистемах интерпретируются с позиций прикладной географии и рационального природопользования [1, 2]. Оценка геосистем проводится в категориях значимости с учетом их доминирующих экологических функций и чувствительности к ведущим процессам трансформации природной среды. К числу индикаторов чувствительности относятся показатели миграции и дифференциации химических элементов в почвах, отражающиеся в разнообразии геосистем [3, 4]. Поэтому авторами была предпринята попытка выявления взаимосвязей структурно-функциональных характеристик геосистем хр. Хамар-Дабан с поведением различных форм тяжелых металлов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В системе физико-географического районирования объекты наших исследований относятся к Байкальскому предгорно-террасовому и горно-долинному таежному району Южно-Байкальского таежного подгорно-равнинного округа подпровинции Байкальской озерной котловины Прибайкальской гольцово-горнотаежной провинции Байкало-Джугджурской горнотаежной области и Быстринскому горно-склоновому таежному светлохвойно-темнохвойному району Зун-Муринского гольцово-горнотаежного округа Джидинско-Хамар-Дабанской горнотаежной и котловинной провинции Южно-Сибирской горной области [5]. Растительность геосистем представлена в основном темнохвойными ассоциациями с присутствием кедра; в почвенном покрове территории преобладают подбуры таежные, бурые лесные грубогумусные (буроземы таежные), дерновые лесные (часто оподзоленные) и подзолистые почвы [6].

С целью оценки роли миграционной способности ряда химических элементов — железа, титана, марганца, хрома, ванадия, никеля, кобальта, меди и свинца — в формировании радиальной дифференциации в почвах определялось содержание их валовых и подвижных форм. Валовое содержание элементов определялось методом количественного спектрального анализа, а подвижных форм (одно-нормальная солянокислая и водная вытяжки) — эмиссионной спектрометрии. Для определения масштабов радиальной миграции вещества использовались колонки (сорбционные лизиметры) И. С. Кауричева — Е. М. Ноздруновой [7–8].

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ

Анализ содержания валовых и подвижных форм тяжелых металлов обнаружил заметные различия почв по характеру процессов латеральной и радиальной дифференциации вещества (см. табл. 1).

**Подбуры таежные.** Радиальная дифференциация химических элементов элементов в подбурях таежных (перегнойных, перегнойных глеевых и оподзоленных) среднегорных геосистем с преобладанием в древостое кедра (кедровых бруснично-чернично-зеленомошной и кашкарово-зеленомошной, кедровых с пихтой бруснично-багульниковой зеленомошной, кашкарово-черничной долгомошно-зеленомошной, пихтово-кедровой кашкарово-черничной долгомошно-зеленомошной) характеризуется накоплением валовых форм Mn, Cu, Pb, Fe, Co, Ni в органических горизонтах. Fe, V, Ni, Co часто имеют и второй максимум — на глеевом барьере в иллювиальном горизонте. Ti аккумулируется в перегнойных горизонтах, хотя последние во всех подбурях имеют слабо выраженные черты элю-

Таблица 1

## Содержание различных форм тяжелых металлов в почвах таежных фаций хр. Хамар-Дабан, мг/кг

Фации	Горизон-ты	Фор-ма*	Химические элементы								
			Fe	Ti	Mn	Cr	V	Ni	Co	Cu	Pb
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Быстринский горно-склоновый таежный светлохвойно-темнохвойный район</i>											
Кедровая с пихтой кашкарово-черничная долгомошно-зеленомошная с подбуром таежным перегнойно-глеевым	Моховая подушка	1	44 600	4273	4661	89	118	95	24	152	160
		2	531	3,6	384	0,12	0,55	1,2	0,45	2,5	10,9
		3	15	0,18	14	—	—	—	0,01	0,10	0,02
	Ап	1	21 600	7073	492	83	124	19	3	20	59
		2	4308	46	11	2,2	5,1	2,1	0,11	1,2	2,3
		3	28	0,72	0,73	0,03	—	—	0,01	0,05	0,02
	АВgf	1	34 400	9379	497	105	166	41	9	16	—
		2	5837	54	16	6	8	0,83	0,66	0,95	—
		3	19	0,02	0,49	0,03	—	—	0,01	0,02	—
ВСg	1	44 600	8763	565	102	167	47	13	19	30	
	2	5098	55	9	8	4	0,06	0,34	1	—	
	3	2,09	—	0,21	—	—	—	—	0,01	—	
Кедровая с пихтой бруснично-багульниковая с черникой, вейником, осокой и пятнами зеленых мхов с подбуром таежным перегнойно-глеевым оподзоленным	А0	1	23 200	4113	2028	62	115	28	5	32	40
		2	578	6	590	0,34	0,58	1,76	0,49	1,2	8,7
		3	18	0,19	16	0,02	—	—	—	0,07	0,04
	Ап	1	20 500	4603	1589	69	77	17	4	31	31
		2	625	8	61	0,15	0,20	1,06	0,30	1,75	1,61
		3	7,7	0,24	2,3	0,02	—	—	—	0,03	—
	А2В	1	14 400	3732	534	58	93	18	6	7	19
		2	1564	27	22	1,0	3,0	0,37	0,21	0,53	3,85
		3	6,3	0,31	0,43	—	—	—	—	0,02	—
	Вg	1	25 100	3485	631	73	109	28	13	11	16
		2	5848	107	118	8,4	14	0,56	1,8	0,23	2,22
		3	2,3	0,01	1,1	—	—	—	—	0,015	—
Кедрово-березово-лиственничная кашкарово-багульниковая зеленомошная с бурой лесной грубогумусной торфянисто-перегнойной глееватой почвой	Моховая подушка	1	36 500	5896	5466	69	116	64	7	104	91
		2	596	7,2	99	0,28	0,39	1,2	0,51	3,2	2,2
		3	21	0,15	9,5	—	—	—	0,02	0,08	0,08
	Т	1	35 900	6744	2418	77	110	59	14	74	63
		2	874	2	99	0,12	0,19	2,9	1,6	3,7	2,2
		3	11	0,20	2,3	—	—	—	0,01	0,05	0,02
	Ап	1	40 500	8492	623	94	141	55	18	59	26
		2	1329	1	44	0,29	0,13	3,2	1,1	3,5	2,7
		3	15	0,29	3,1	0,005	—	—	0,04	0,05	0,01
	Вg	1	21 800	7876	413	106	113	21	6	42	—
		2	2478	12	63	1,3	1,3	1,6	0,45	2,0	—
		3	14	0,33	0,94	0,015	—	—	0,015	0,015	—
Сосново-лиственничная багульниково-брусничная моховая с бурой лесной грубогумусной торфянисто-перегнойной почвой	Моховая подушка	1	35 300	4305	876	76	119	47	11	104	156
		2	998	9	49	0,44	0,83	0,86	0,75	1,55	3,30
		3	17	0,20	2,5	—	—	—	0,01	0,10	0,03
	Т	1	49 900	5358	876	109	134	73	24	56	78
		2	556	3	126	0,07	0,38	1,30	0,74	2,41	5,69
		3	14	0,16	6,3	—	—	—	—	0,09	0,01
	Ап	1	22 100	4738	401	61	89	22	7	17	16
		2	1613	13	21	4,0	6,7	2,1	0,97	2,2	3,12
		3	27	0,53	0,63	0,05	—	—	0,02	0,05	0,005
	Вg	1	36 100	5373	848	71	94	28	12	23	19
		2	3508	16	43	4,9	3,5	0,59	1,7	1,5	2,5
		3	19	0,41	0,47	0,31	—	—	0,01	0,02	0,01
Березово-лиственнично-кедровая бруснично-черничная с подзолистой почвой	А0	1	23 400	5535	2551	73	106	18	3	19	29
		2	205	3	566	0,20	0,03	0,29	0,18	1,96	2,69
		3	15	0,26	17	—	—	—	—	0,05	0,04
	А2	1	12 100	3766	407	51	85	8	4	5	11
		2	361	3	19	0,30	0,12	0,04	0,09	0,15	1,35
		3	2,9	0,41	0,93	—	—	—	—	0,015	—
	С	1	31 400	4769	687	76	161	26	12	13	18
		2	5848	132	73	5,87	19	0,06	0,76	0,02	5,92
		3	4,1	0,20	1,3	—	—	—	0,005	0,005	0,005

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сосново-кедрово-березово-еловая бруснично-травяная зеленомошная с подзолистой почвой	Моховая подушка	1	26 200	3818	2946	71	92	30	7	34	40
		2	1405	34	295	0,60	2,93	0,43	1,14	1,41	5,02
		3	16	0,29	9,7	0,02	—	—	0,02	0,03	0,01
	A1A2	1	15 600	3363	592	50	68	15	9	6	12
		2	1871	34	236	0,91	3,90	0,28	1,31	0,30	4,24
		3	9,7	0,27	8,3	0,01	—	—	0,03	0,01	0,02
	BC	1	26 200	3252	686	60	104	23	11	9	16
		2	3536	54	248	2,13	9,89	0,04	1,67	0,12	3,90
		3	3,3	0,20	5,9	0,01	—	—	—	0,01	0,01
Пихтово-кедровая бруснично-бадановая травяная с дреновой лесной слабооподзоленной почвой	A0	1	21 300	4283	579	58	116	66	3	10	12
		2	1093	16	204	0,39	1,9	0,70	0,71	1,7	5,2
		3	14	0,26	6,9	—	—	—	0,01	0,07	0,03
	A1A2	1	14 100	2606	497	52	75	8	3	8	17
		2	1388	12	34	0,53	3,1	0,45	0,53	1,4	3,8
		3	10	0,21	1,1	0,01	—	—	0,01	0,03	0,02
	BC	1	24 000	3121	573	66	97	25	9	17	18
		2	3908	51	84	3,5	5,4	0,14	0,14	0,13	3,2
		3	3,7	0,11	1,1	—	—	—	0,005	0,01	0,01
Елово-кедрово-березовая хвощево-вейниково-осоково-брусничная зеленомошная с дерновой лесной слабооподзоленной почвой	A0	1	17 400	3680	3052	48	77	23	5	39	36
		2	415	6	544	0,17	0,46	1,06	0,45	2,91	6,14
		3	16	0,28	15	0,02	—	—	0,01	0,52	0,04
	A1A2g	1	17 900	3037	396	39	55	7	7	7	7
		2	1665	31	51	0,62	2,11	0,31	0,76	1,00	3,29
		3	14	0,23	1,4	0,01	—	—	0,01	0,015	0,015
	BC	1	21 200	2964	577	36	62	16	8	7	10
		2	3411	67	244	2,92	7,93	0,06	1,38	0,28	2,61
		3	3,3	0,02	0,96	—	—	—	—	0,01	0,01
<i>Байкальский предгорно-террасовый и горно-долинный таежный район</i>											
Березово-осиновая с подростом темнохвойных папоротниково-крупнотравная с дерновой лесной литогенной почвой	Ad	1	53 100	3367	1096	154	124	88	29	65	19
		2	5716	176	737	8,00	15,48	4,98	6,12	13,29	7,94
		3	10	0,22	7,0	0,02	—	—	0,03	0,15	—
C	1	57 800	3077	615	147	113	75	20	28	—	
Березово-осиновая с подростом темнохвойных чернично-зеленомошная с дерновой лесной слабооподзоленной почвой	Ad	1	41 400	5099	1060	83	88	48	12	60	21
		2	2206	66	218	1,40	5,28	2,41	1,25	5,22	7,02
		3	19	0,76	10	0,02	—	—	0,03	0,11	—
	A2B	1	43 300	5278	476	84	80	34	7	25	—
		2	5254	76	18	5,65	6,02	1,15	0,45	1,61	—
		3	22	0,35	1,2	0,03	—	—	0,01	0,03	—
	B	1	47 800	2669	801	81	98	43	15	19	—
		2	5773	103	11	8,22	5,25	0,16	0,44	1,50	—
		3	5,6	0,035	0,53	—	—	—	—	0,03	—
Березово-осиновая с подростом темнохвойных баданово-зеленомошная с дерновой лесной оподзоленной почвой	Ad	1	48 700	3273	3351	101	121	74	29	109	31
		2	2283	71	295	3,21	6,13	2,20	2,44	5,34	5,61
		3	25	0,49	24	—	—	—	0,04	0,29	0,04
	A2	1	37 800	2700	983	76	99	45	13	29	—
		2	3319	97	290	2,73	6,92	2,0	1,66	4,55	—
		3	12	0,47	14	0,02	—	—	0,01	0,07	—
	B	1	47 800	2669	801	81	98	43	15	19	—
		2	4081	107	190	4,36	4,47	0,24	2,25	1,57	—
		3	1,4	0,02	1,9	—	—	—	0,01	0,03	—
Березовая с сосной осочково-мелкотравная с дерновой лесной слабооподзоленной почвой	A	1	30 800	2687	1,851	84	107	143	39	214	131
		2	3263	83	411	3,21	5,17	0,97	1,44	2,06	3,39
		3	19	0,40	1,3	0,01	—	—	—	0,31	—
	A2B	1	36 600	5250	634	102	87	42	16	34	20
		2	3890	67	119	4,60	6,33	1,72	0,98	3,38	5,02
		3	16	0,27	5,3	0,06	—	—	0,02	0,08	—
	BC	1	49 100	4781	926	121	134	62	66	12	5
		2	2404	65	73	5,53	2,97	0,12	1,58	1,30	0,78
		3	0,27	—	2,0	—	—	—	—	0,02	—

\* 1 — валовая, 2 — кислоторастворимая, 3 — водорастворимая.

вирированности: активному выносу элементов препятствует глеевый барьер, совмещенный с мерзлотным. В оподзоленных подбурях дифференциация практически всех изученных элементов (минимум в подзолистом горизонте и аккумуляция на глеевом барьере) выражена более контрастно.

В подбурях максимальное количество подвижных кислоторастворимых форм Fe, Ti, Cr, V, Co содержится в иллювиальном оглеенном горизонте, где резко выражена смена окислительных условий на восстановительные, а Ni, Cu и Pb — в перегнойном (с окислительной обстановкой) горизонте. При меньшей контрастности окислительно-восстановительных свойств наряду с аккумуляцией в перегнойном горизонте подвижных форм Ni, Cu, Pb в надмерзлотных и мерзлотных горизонтах (на термодинамическом барьере) отмечается накопление Co, Fe и V.

В подбурях наибольшая концентрация водорастворимых форм Mn и Cu приходится на моховую подушку и горизонт лесной подстилки, вниз по профилю почв она снижается. Аккумуляция водорастворимых форм Fe и Ti в этих почвах характерна для надмерзлотных и мерзлотных горизонтов, а максимум отмечен в перегнойных горизонтах с наличием мерзлоты. В подбурях перегнойных глееватых и глеевых отмечается присутствие водорастворимого Co, а незначительные количества водорастворимых Cr и Pb обнаружены только в отдельных горизонтах.

**Буроземы таежные.** В вертикальном профиле среднегорных фаций с бурыми лесными грубогумусными почвами (кедрово-березово-лиственничной с пихтой и подростом кедра кашкарово-багульниково-зеленомошной, сосново-лиственничной с кедром багульниково-брусничной моховой и лиственнично-сосновой бруснично-багульниково-моховой) наибольшее содержание Mn, Cu и Pb приурочено к моховой подушке, а Fe, Ti, Cr, V, Ni, Co — к торфянистым горизонтам. В отдельных фациях V и Ni аккумулируются и в моховой подушке.

Органо-минеральная масса буроземов (перегнойные и минеральные горизонты) по содержанию почти всех элементов слабо дифференцирована. В отдельных геосистемах заметно только повышение концентрации Fe, V, Co в органогенном горизонте, а Ni и Co — в минеральных.

Содержание кислоторастворимых форм Fe, Ti, Cr и V в буроземах изменяется в более узком диапазоне, при этом концентрация их в минеральных горизонтах ниже, чем в подбурях, что, очевидно, связано с наличием окислительных условий. Максимум этих элементов обычно приурочен к мерзлотным горизонтам, а при отсутствии мерзлого слоя в почвенном профиле их распределение неоднозначно. Наибольшее количество подвижных форм Mn, Ni, Cu и Pb отмечается в торфянистых горизонтах, в распределении Co определенных закономерностей не наблюдается.

Содержание водорастворимых форм рассматриваемых элементов в бурых лесных грубогумусных почвах примерно такое же, как в подбурях. Дифференциация их по профилю почв не выражена.

**Подзолистые почвы.** В органогенных горизонтах подзолистых почв среднегорных березово-лиственнично-кедровой бруснично-черничной с пятнами из зеленых мхов и сосново-кедрово-березово-еловой бруснично-травяной зеленомошной фаций наблюдается накопление Ti, Mn, Cr, Cu, Pb, а в моховой подушке последней — также Ni и Fe. Ниже по профилю отмечен вынос почти всех элементов из элювиального горизонта (за исключением Co) с аккумуляцией их в горизонтах С или ВС.

Такой характер радиальной дифференциации изученных элементов связан, по-видимому, с тем, что органические кислоты вымываются из лесных подстилок подзолистых и дерново-подзолистых почв и оказывают оподзоливающее действие на верхнюю часть почвенного профиля. Аккумуляция большинства элементов в органическом веществе на поверхности почв в сочетании с подзолистым процессом ведет к обеднению почвенного профиля многими элементами и распределению их по элювиально-иллювиальному типу.

Распределение кислоторастворимых форм Mn, Pb, Ni и Co в почве березово-лиственнично-кедровой фации имеет элювиально-иллювиальный характер, а количество Fe, Ti, Cr и V резко возрастает только в горизонте С. В сосново-кедрово-березово-еловой бруснично-травяной зеленомошной фации увеличение содержания подвижных форм Fe, Ti, Cr, V, Co вниз по профилю происходит более постепенно, а количество Ni, Cu и Pb к низу уменьшается. Такой характер распределения подвижных форм изучаемых элементов, возможно, связан с экранирующим эффектом мерзлоты, залегающей непосредственно под элювиальным горизонтом и препятствующей проявлению подзолообразования.

Водорастворимые формы Fe, Ti, Mn, Cu и Pb определились в почвах обеих фаций, а в сосново-кедрово-березово-еловой бруснично-травяной зеленомошной фации обнаружены также Cr и Co. Наибольшее содержание большинства элементов приурочено к моховой подушке и подстилке. В почве березово-лиственнично-кедровой фации минимальное содержание водорастворимых форм Fe, Mn и Pb отмечено в подзолистом горизонте, а Cu — в горизонте С.

**Дерновые лесные почвы среднегорий.** Радиальное распределение большинства элементов в среднегорных темнохвойных фациях — пихтово-кедровой бруснично-бадановой травяной с дерновой лесной оподзоленной почвой и елово-кедрово-березовой хвощово-вейниково-осоково-брусничной зеленомошной с дерновой лесной оподзоленной глееватой — несколько различается. В первой оно имеет хорошо выраженный элювиально-иллювиальный характер (слабо дифференцированы лишь содержания Co и Pb), а во второй, вследствие сочетания подзолистого и глеевого процессов, такой тип рас-

предела характерен только для Mn, Ni, V и Pb. Содержание кислоторастворимых форм микроэлементов в дерновых лесных почвах среднегорий близко к их содержанию в бурых лесных, но характер внутрипрофильной дифференциации резко отличается: вниз по профилю концентрация Fe, Ti, Cr, V возрастает, а Ni, Cu, Pb снижается, для Mn и Co в пихтово-кедровой фации характерен элювиально-иллювиальный тип распределения, а в елово-кедрово-березовой количество Co к низу увеличивается.

Максимальное количество водорастворимых соединений Fe, Ti, Mn, Co, Pb, Cu в этих почвах приходится на подстилку, причем в елово-кедрово-березовой фации количество Mn и Cu выше, чем в пихтово-кедровой. В оподзоленных горизонтах почв обеих фаций обнаруживается водорастворимый Cr.

**Дерновые лесные почвы предгорий.** На территории Байкальской предгорно-подгорной группы урочищ изучены дерновые лесные почвы березово-осиновой с подростом темнохвойных чернично-зеленомошной, березово-осиновой с подростом темнохвойных баданово-зеленомошной и березовой с сосной осочково-мелкотравной фаций, а также дерновая лесная литогенная почва березово-осиновой с подростом темнохвойных папоротниково-крупнотравной фации. Для них характерны небольшая мощность (1–3 см) полуразложившегося опада и отсутствие сформированной подстилки, так как мелколиственный древесный ярус и повышенно влажный умеренно теплый климат способствуют разложению растительных остатков.

Максимум концентраций валовых форм Mn, Ni, Co, Cu и Pb приходится на дерновый горизонт, в биогеоценозах с преобладанием березы в нем накапливаются также Fe, Ti, Cr, V. Элювиально-иллювиальный тип распределения элементов в дерновых лесных почвах предгорий Хамар-Дабана выражен слабо: подзолообразование отражается только в выносе Mn, V, Ni и Co из элювиального горизонта в иллювиальный, а содержание Fe, Ti и Cr по профилю почв практически не дифференцировано.

В почвах предгорных березово-осиновых и осиново-березовых фаций максимум кислоторастворимых форм Ti, Mn и Pb приходится на горизонт Ad, а Fe, V — на A2B. В березовых фациях в переходном элювиально-иллювиальном горизонте отмечена также наибольшая концентрация Ni и Cu. Распределение Co, Cr, Ni и Cu по профилю дерновых лесных почв березово-осиновых фаций носит элювиально-иллювиальный характер.

Максимум содержания водорастворимых форм Fe, Ti, Mn, Co, Cu в большинстве дерновых лесных почв мелколиственных фаций приходится на дерновый горизонт, Cr обнаружен только в оподзоленных горизонтах. В березовой фации наибольшее содержание Mn и Co отмечено в горизонте A2B.

**Сравнительная подвижность тяжелых металлов в почвах таежных геосистем.** Степень подвижности химических элементов в почвах оценивалась в процентах содержания кислото- и водорастворимых форм от валовых показателей. По относительному содержанию кислоторастворимых форм Ti, Mn, Cr, V, Ni, Co, Cu, Pb (непрочно сорбируемые гидроксидами Fe и входящие в органо-минеральные комплексы), а также Fe (аморфные, минеральные и органо-минеральные формы), почвы несколько различаются. Высокая потенциальная подвижность Mn, V, Co и Cu характерна для всех дерновых лесных почв, а Ti и Cr — только для предгорных (табл. 2). В подбурях обнаруживается максимальное относительное содержание кислоторастворимых форм Fe, Cr, V и Ni, в бурых лесных почвах — Ni и Cu, а в подзолистых — Mn и Pb. Наименьшей потенциальной подвижностью в буроземах обладают Fe, Ti, Cr, в подзолистых почвах — V, Ni и Cu, в подбурях — Mn и Pb.

Кислоторастворимый Mn в подзолистых и дерновых лесных оподзоленных почвах среднегорий дифференцирован по элювиальному типу, а в профилях почв с наличием глеевых и мерзлотных горизонтов прослеживаются два максимума: первый — на биогеохимическом, второй — на восстанови-

Таблица 2

Относительное содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах, % от валового

Химические элементы	Почвы				
	подбуры таежные	буроземы таежные	подзолистые	дерновые лесные	
				среднегорий	предгорий
Fe	3,05–23,3	1,11–11,4	0,87–18,6	2,39–14,67	4,69–12,1
Ti	0,17–3,07	0,01–0,30	0,08–2,76	0,46–2,22	1,29–5,21
Mn	0,83–29,1	4,09–15,3	4,66–39,9	6,84–42,4	2,22–46,5
Cr	0,22–11,5	0,16–6,90	0,27–7,72	0,67–8,13	1,69–10,2
V	0,28–12,9	0,33–7,53	0,03–7,51	0,59–12,8	0,91–15,5
Ni	0,13–11,05	1,83–9,55	0,17–1,87	0,37–5,62	0,37–6,33
Co	2,57–14,33	3,08–14,2	2,25–15,2	1,55–25,86	2,39–20,52
Cu	2,09–10,5	5,00–12,9	1,33–10,3	0,76–17,5	0,96–21,11
Pb	1,25–21,75*	2,41–19,37*	17,1–47,0	9,27–35,33	2,59–33,43*

\* Кислоторастворимая форма элемента обнаружена не во всех объектах.

Таблица 3

## Относительное содержание водорастворимых форм тяжелых металлов в почвах, % от валового

Химические элементы	Почвы				
	подбурья таежные	буроземы таежные	подзолистые	дерновые лесные	
				среднегорий	предгорий
Fe	0,005–0,13	0,005–0,12	0,01–0,06	0,02–0,09	0,003–0,06
Ti	0,001–0,009	0,003–0,07	0,04–0,08	0,001–0,08	0,001–0,02
Mn	0,01–0,81	0,05–0,72	0,18–1,37	0,17–1,91	0,07–1,39
Cr	0,01–0,03*	0,005–0,44*	0,01–0,02*	0,02–0,09*	0,02–0,06*
Co	0,08–0,33*	0,07–0,29*	0,04–0,33*	0,03–0,33*	0,07–0,21*
Cu	0,03–0,25	0,04–0,29	0,04–0,30	0,06–1,33	0,12–0,27
Pb	0,01–0,10	0,01–0,14*	0,02–0,17*	0,06–0,25	0,007–0,13*

\* Водорастворимая форма элемента обнаружена не во всех объектах.

тельном и термодинамическом барьерах. Наибольшее абсолютное и относительное содержание подвижных форм Fe, Ti, Cr и V экстрагируется из оглеенных горизонтов, а для распределения Ni, Co, Cu и Pb в большинстве почв характерны максимумы в перегнойных и дерновых горизонтах с окислительной обстановкой.

Содержание водорастворимых форм большинства изучаемых элементов очень низкое (табл. 3). Так, концентрация V и Ni ниже предела обнаружения (соответственно 0,015 и 0,03 мг/кг почвы) во всех образцах, а Cr, Co, Pb — в отдельных (их наибольшее относительное содержание составляет  $n \cdot 10^{-1}$  %). Переходящее в водную вытяжку количество Fe и Ti колеблется в пределах  $n \cdot 10^{-3}$ – $n \cdot 10^{-2}$  % от валового (в перегнойных горизонтах подбуров и бурых лесных почв содержание Fe увеличивается до  $n \cdot 10^{-1}$  %). Относительное содержание водорастворимых Mn и Cu изменяется от  $n \cdot 10^{-2}$  до  $n \cdot 10^{-1}$  %, но в отдельных горизонтах подзолистых и дерновых лесных почв может составлять более процента.

## РАДИАЛЬНАЯ МИГРАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Обнаруженные тенденции поведения кислото- и водорастворимых форм элементов подтверждаются непосредственными измерениями интенсивности миграционных процессов с помощью сорбционных лизиметров в почвах естественного залегания — дерновой лесной литогенной березово-осиной

Таблица 4

## Среднегодовой вынос химических элементов при нисходящей миграции почвенных растворов

Горизонты	Глубина заложения колонки, см	Единицы измерения*	Химические элементы						
			Fe	Ti	Mn	Cr	Co	Cu	Pb
<i>Березово-осиновая с подростом темнохвойных папоротниково-крупнотравная с дерновой лесной литогенной почвой</i>									
Ad	4	г/м <sup>2</sup>	0,320	0,013	0,034	0,004	—	0,006	0,007
		%	0,017	0,011	0,086	0,072	—	0,256	0,140
C	30	г/м <sup>2</sup>	0,270	0,028	0,027	0,001	0,002	0,002	—
		%	0,002	0,003	0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	—
<i>Березово-осиновая с подростом темнохвойных чернично-зеленомошная с дерновой лесной слабоподзоленной почвой</i>									
Ad	5	г/м <sup>2</sup>	0,360	0,013	0,056	0,004	0,003	0,004	0,001
		%	0,022	0,006	0,132	0,120	0,625	0,167	0,015
A2B	9	г/м <sup>2</sup>	0,320	0,006	0,045	0,002	0,003	0,005	—
		%	0,015	0,002	0,189	0,048	0,075	0,294	—
B	15	г/м <sup>2</sup>	0,140	0,006	0,052	—	—	0,001	—
		%	0,004	0,004	0,093	—	—	0,033	—
<i>Березово-осиновая с подростом темнохвойных баданово-зеленомошная с дерновой лесной оподзоленной почвой</i>									
Ad	4	г/м <sup>2</sup>	0,090	0,012	0,021	0,009	—	—	0,011
		%	0,005	0,010	0,017	0,248	—	—	0,128
A2	9	г/м <sup>2</sup>	0,130	0,003	0,018	0,003	0,003	0,001	—
		%	0,006	0,002	0,031	0,066	0,050	0,037	—
B	20	г/м <sup>2</sup>	0,170	—	0,019	0,002	0,001	—	—
		%	0,003	—	0,017	0,018	0,007	—	—

\* г/м<sup>2</sup> — фактический вынос элемента из горизонта, % — от запасов элемента в вышележащем горизонте.

вой с подростом темнохвойных папоротниково-крупнотравной, дерновой лесной слабоподзоленной березово-осиновой с подростом темнохвойных чернично-зеленомошной и дерновой лесной оподзоленной березово-осиновой с подростом темнохвойных баданово-зеленомошной фаций Байкальского предгорно-террасового и горно-долинного таежного физико-географического района (табл. 4).

Максимальный годовой вынос (по отношению к содержанию в соответствующем горизонте) из всех изученных объектов характерен для Mn, довольно интенсивно выносятся Cr и Cu, а V и Ni, наоборот, в адсорбенте лизиметров практически не обнаруживаются.

Сравнение содержания водорастворимых форм тяжелых металлов в почвенных генетических горизонтах с количествами этих элементов, вынесенными с нисходящими водными потоками за год экспозиции сорбционных лизиметров, показывает, что вынос Co, Mn и Fe меньше потенциально возможного, Ti, Cu и Pb — близок к таковому, а Cr — превышает однократно определенное содержание водорастворимой формы, что может свидетельствовать об участии его кислоторастворимых форм в миграции.

## ВЫВОДЫ

Изучение взаимосвязей структурно-функциональных характеристик таежных геосистем хр. Хамар-Дабан с поведением различных форм тяжелых металлов показало, что ландшафтное разнообразие, выражающееся в их дифференциации, наряду с такими факторами, как крутизна и экспозиция склонов, минералогический, литологический и химический состав пород, видовой состав и ярусное строение растительных ассоциаций, обусловлено и спецификой миграционных процессов в почвах.

Для подбуров характерна высокая потенциальная подвижность (кислоторастворимые формы) Fe, Cr, V и Ni, для бурых лесных почв — Ni и Cu, для подзолистых — Mn и Pb. Всем дерновым лесным почвам свойственна максимальная мобильность Mn, V, Co, Cu и Pb; в предгорных геосистемах потенциально подвижны также Ti и Cr. По данным, полученным с использованием сорбционных лизиметров, наибольшей миграционной способностью обладают Mn, Cr и Cu, а по результатам анализов водной вытяжки — Mn и Cu.

Таким образом, миграционная способность тяжелых металлов может являться индикатором чувствительности геосистем к внешним воздействиям, при этом выбор конкретных индикативных показателей (элементов или их ассоциаций) зависит от региональной специфики миграционных процессов в почвах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (08–05–00687).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семёнов Ю. М., Суворов Е. Г. Геосистемы и комплексная физическая география // География и природ. ресурсы. — 2007. — № 3. — С. 11–19.
2. Семёнов Ю. М., Суворов Е. Г. Ландшафтная карта Азиатской России как картографическая основа трансрегионального полигона ГКСФ // Кавказ. геогр. журнал. — 2008. — № 9. — С. 85–89.
3. Семёнов Ю. М., Семёнова Л. Н. Оценка и определение целевых функций почв в ландшафтном планировании // Александр фон Гумбольдт и проблемы устойчивого развития Урало-Сибирского региона. — Тюмень, 2004. — С. 240–242.
4. Семёнова Л. Н., Семёнов Ю. М. Дифференциация вещества в геосистемах северного макросклона хребта Хамар-Дабан // География и природ. ресурсы. — 2006. — № 3. — С. 49–54.
5. Суворов Е. Г., Титаев Д. Б. Структура ландшафтов Южного Прибайкалья // География и природ. ресурсы. — 1999. — № 4. — С. 20–30.
6. Экологически ориентированное планирование землепользования в Байкальском регионе. Слюдянский район / Суворов Е. Г., Антипов А. Н., Семёнов Ю. М. и др. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2002. — 141 с.
7. Кауричев И. С., Ноздрунова Е. М. Учет миграции некоторых соединений в почвах с помощью лизиметрических хроматографических колонок // Почвоведение. — 1960. — № 12. — С. 30–35.
8. Кауричев И. С., Яшин И. М., Черников В. А. Теория и практика метода сорбционных лизиметров в экологических исследованиях. — М.: Изд-во МСХА, 1996. — 144 с.

*Поступила в редакцию 21 июля 2009 г.*