

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Енчилик Полина Романовна

**Формы нахождения и подвижность химических элементов в
южно-таежной почвенно-геохимической катене Центрально-
Лесного заповедника**

1.6.12 – физическая география и биогеография,
география почв и геохимия ландшафтов

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель – *Касимов Николай Сергеевич, академик РАН, доктор географических наук, профессор*

Официальные оппоненты: – *Евсеев Александр Васильевич, доктор географических наук, профессор, МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра рационального природопользования, ведущий научный сотрудник*

Минкина Татьяна Михайловна, доктор биологических наук, профессор, «Южный федеральный университет», заведующий кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов

Кудерина Татьяна Маратовна, кандидат географических наук, Институт географии РАН, отдел физической географии и проблем природопользования, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «16» марта 2023 г. в 17:00 на заседании диссертационного совета МГУ.016.9 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д.1, Главное здание МГУ, географический факультет, 18-й этаж, ауд. 1801.

E-mail: summerija@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте АИС «Диссовет»: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.9/2411>

Автореферат разослан «__» февраля 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат географических наук



М.А. Смирнова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и её разработанность. В международных программах по окружающей среде UNESCO и UNEP особое внимание уделяют оценке фоновых ландшафтов, осуществляемой преимущественно в биосферных резерватах. Анализ связей химического состава компонентов фоновых ландшафтов необходим для решения теоретических и прикладных задач геохимии ландшафта при совершенствовании методов экологического мониторинга (Глазовская, Касимов, 1987; Кошелева и др., 2002). При характеристике условий миграции и аккумуляции химических элементов (ХЭ) кроме валового содержания (Vodyanitskii, 2006; Minkina et al., 2008; Wang et al., 2021) анализируют и формы их нахождения, с которыми тесно связаны представления о подвижности, то есть доли соединений, перешедших из почвы в раствор под действием определенных реагентов (Ладонин, 2002; Минкина и др., 2009; Tessier et al., 1979; Sungur et al., 2021). Подвижные формы ХЭ поступают в растения и накапливаются в их тканях, давая начало биогеохимическому круговороту поллютантов, играя важную роль в биоиндикации (Mandzhieva et al., 2016; Minkina et al., 2014). Изучение распределения форм нахождения ХЭ в почвах получило название F-анализ (Qian et al., 1996). Экстрагируемые соединения ХЭ обычно обозначают как F1, F2, F3 и так далее в порядке снижения подвижности. Водорастворимые и обменные формы (F1) наиболее подвижны, способны к обмену и доступны для растений. Комплексные формы (F2) включают карбонатные и органоминеральные. Сорбированные оксидами Fe и Mn формы (F3) прочно связаны с фазами-носителями. Первые стандартизованные вытяжки для поэлементного анализа предложены в 1950-х гг. Я.В. Пейве и Г.Я. Ринькисом для выделения доступных для растений соединений из бескарбонатных дерново-подзолистых почв. Разработаны схемы фракционирования подвижных форм Mo, V, Cr, Co, Cu, Zn (Зырин, 1973). Суммарная доля подвижных форм характеризует подвижность (M – от англ. «mobility», %) ХЭ в твердой фазе почв, которая в настоящей работе обозначена как M1 и M2, по аналогии с формами, по мере снижения подвижности. Долю F1+F2+F3 форм можно рассматривать как потенциальную подвижность (M2), или потенциально доступный растениям пул ХЭ в твердой фазе почв (Минкина и др., 2009; Volan et al., 2014; Yutong et al., 2016; Minkina et al., 2018; Li et al., 2019). Поскольку F3 форма прочно удерживается почвой, целесообразно выделить биологическую подвижность или биодоступность (M1), то есть долю (F1+F2) форм от валового содержания.

Влиянию физико-химических свойств почв на подвижность ХЭ посвящен ряд работ (Перельман, Касимов, 1999; Violante et al., 2012; Kabata-Pendias, Szteke, 2015 и др.). Дифференцированная по почвенным горизонтам оценка влияния этих свойств на подвижность ХЭ проведена лишь для отдельных почв (Семенков и др., 2016, 2019). Подвижные соединения обычно анализируют для характеристики поглощения ХЭ растениями, многие исследования форм ХЭ приурочены к агроландшафтам (Uprety et al., 2009 и др.). Распределение ХЭ в пахотном горизонте анализируется в рамках европейских проектов GEMAS – Geochemical Mapping of Agricultural Soil – и LUCAS – Land Use/Cover Area frame statistical Survey (Toth et al., 2016; Reimann et al., 2018). В фоновых дерново-подзолистых почвах F1 формы ХЭ наименее прочно удерживаются фазами носителями, поэтому характеризуются широким диапазоном содержаний (Караванова, Малинина, 2009; Мотузова, 2014; Семенков и др., 2016, 2019 и др.). F2 формы ХЭ по сравнению с F1 содержатся в более высоких концентрациях и прочнее связаны с фазами-носителями (Самонова, 1998; Семенков и др., 2016, 2019; Gronflaten, Steinnes, 2005). F3 соединения из трёх исследуемых форм обладают самыми высокими концентрациями и наименьшим диапазоном содержаний (Касимов и др., 2005; Самонова и др., 2011; Толпешта, Соколова, 2010, 2018; Семенков и др., 2016, 2019 и др.).

Субвертикальное и субгоризонтальное распределение веществ в почвах сопряженных элементарных ландшафтах – почвенно-геохимических катенах, определяет соответственно радиальную (R) и латеральную (L) структуру катен, которую в обобщенном виде описывают рядом геохимических коэффициентов (Глазовская, Касимов, 1987). Сопряженный анализ R и L распределения ХЭ в зависимости от свойств и факторов окружающей среды отражает миграционную способность ХЭ (Глазовская, Касимов, 1987; Касимов, Геннадиев, 2005; Sommer, Schlichting, 1997 и др.). Для объяснения распределения и аккумуляции веществ в ландшафтах используют концепцию геохимических барьеров – участков суши, где на коротком расстоянии резко уменьшается интенсивность миграции ХЭ (Перельман, 1966; Перельман, Касимов, 1999).

В фоновых почвах таёжных ландшафтов изучена радиальная (Толпешта, 2010; Попова, 2010; Gronflaten, Steinnes, 2005; Huang, 2007 и др.) и латеральная (Никифорова, Безрукова, 1979; Кошелева и др., 2002; Семенков и др., 2016 и др.) дифференциация подвижных форм Al, As, Cu, Co, Fe, Ni, Mn, Pb, Sr, Zn. Редки сопряженные исследования R и L дифференциации форм ХЭ (Семенков, 2016),

позволяющие охарактеризовать фоновую почвенно-геохимическую структуру катен (Глазовская, Касимов, 1987).

Для фонового геохимического мониторинга также важно понимание пространственной и сезонной изменчивости физико-химических свойств, содержания и распределения подвижных форм ХЭ. Изучена вариабельность физических (плотности, влажности, водопроницаемости) и химических свойств (величины рН, валового состава, содержания обменных катионов) в горизонтах дерново-подзолистых почв (Самсонова, 2008, 2014). Анализ сезонной изменчивости R и L дифференциации содержания и подвижности ХЭ в почвах фоновых ландшафтов ранее не проводили.

Цель настоящего исследования: изучение радиального и латерального распределения форм нахождения и подвижности химических элементов в монолитной суглинистой почвенно-геохимической катене южной части Валдайской возвышенности.

Задачи:

- Определить уровни общего содержания и трех форм нахождения 20 химических элементов и выявить биогеохимические связи между растениями и почвами в модельной почвенно-геохимической катене южно-таежного ландшафта;
- Изучить сезонную изменчивость радиального и латерального распределения форм нахождения химических элементов в почвенно-геохимической катене;
- Оценить потенциальную и биодоступную (биодоступность) подвижность химических элементов в генетических горизонтах почв катены.

Объекты и методы исследования. *Объектом исследования* является фоновая почвенно-геохимическая катена в пределах Центрально-Лесного заповедника длиной 187 метров (рис.1), расположенная на юго-восточном пологом (<math><2^\circ</math>) склоне междуречья. Автономная позиция (А) и выпуклый склон (ТЭ) хорошо дренированного холма заняты хвойно-широколиственным лесом на дерново-палево-подзолистой почве. В трансэлювиальной аккумулятивной позиции (ТЭА) подножия склона находится ельник на торфянисто-перегнойной подзолистой профильно-оглеенной почве. ТЭА ландшафт заболоченной потяжины с временным водотоком занят ельником на торфянистой подзолистой профильно-оглеенной почве.

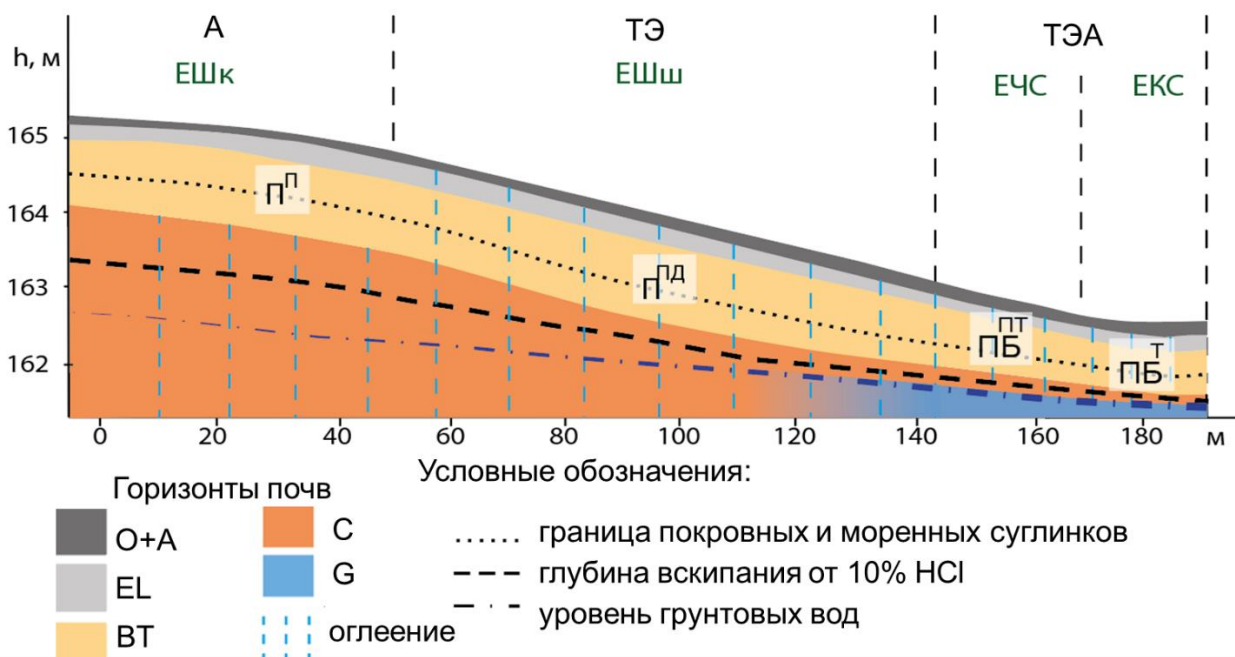


Рисунок 1. Схематический профиль катены: ЕШк – липово–еловое лещиново–кисличное сообщество с кленом остролистным и вязом шершавым (*Tilia cordata* Mill., *Picea abies* L., *Corylus avellana* L., *Oxalis acetosella* L., *Acer platanoides* L., *Ulmus glabra* Mill.) на палево–подзолистой почве (П^П), ЕШш – елово–широколиственное лещиново–широкотравное сообщество на дерново–палево–подзолистой почве (П^{ПД}), ЕЧС – ельник чернично–сфагновый (*Vaccinium myrtillus* L., *Sphagnum palustre* L.) с подростом липы и клена на торфянисто–перегнойной подзолистой профильно–оглеенной почве (ПБ^{ПТ}) и ЕКС – ельник кислично–сфагновый с ивой (*Salix cardiophylla* Trautv., С.А.Мей.), подростом клена и липы на торфянистой подзолистой профильно–оглеенной (ПБ^Т) почве. Здесь и далее на рисунках и в таблицах: А – автономный ландшафт междуречья, ТЭ – трансэлювиальный пологого склона, ТЭА – трансэлювиально аккумулятивный. Горизонты почв: А – гумусовый, О – органогенный, EL – элювиальный, В – иллювиальный, С – почвообразующая порода, G – глеевый

Почвы катены развиваются на двучленных отложениях: покровных суглинках, подстилаемых остаточными карбонатными моренными суглинками московского возраста, обломки карбонатов представлены известняками и доломитами. По гранулометрическому составу почвы суглинистые, содержат более 10% частиц размером менее 10 мкм. Горизонт EL обогащен пылеватыми фракциями. Содержание илистой фракции повышается в горизонте ВТ и максимально в остаточных карбонатных моренных суглинках. рН варьирует от сильнокислой (3,7) в гумусовом и торфяном горизонтах до щелочной (8,2) в почвообразующей породе. Содержание углерода органических веществ в почвах резко падает с глубиной, что типично для таежной зоны (Глазовская, 2009).

Полевые и аналитические методы. В основных элементарных ландшафтах катены из 4 почвенных разрезов отобрано 130 образцов из каждого

генетического горизонта (ао/Т и ВТ в 9-кратной повторности; суммарно 54 пробы), 16–лесной подстилки и 87–растений. В почвах определяли актуальную кислотность (величину рН в водной суспензии, табл.1), гранулометрический состав, содержание углерода органических соединений (Сорг), СО₂ карбонатов, валовое содержание и содержание 3 подвижных форм ХЭ.

Для выделения подвижных форм ХЭ использована параллельная схема экстракции (Соловьев, 1989; Minkina et al., 2018). Непрочно связанные соединения экстрагировали в течение 18 ч тремя параллельными вытяжками: F1 – ацетатно-аммонийным буфером (ААБ) с рН 4,8 (соотношение почва:раствор 1:5), F2 – ААБ с 1% этилендиаминтетрауксусной (ЭДТА) кислотой (1:5) и F3 – 1н ННО₃ (1:10).

Таблица 1

Виды и методы химических анализов

Параметр (число проб)	Метод исследования
Зольность растений и детритовых горизонтов (104)	Сухое озоление, ГОСТ 27784-88
Сорг (80)	Титриметрический (по И. В. Тюрину)
Карбонаты (17)	Газоволюметрический
Лабильное и стабильное органическое вещество (16)	Хемодеструкционное фракционирование (Попов, Русаков, 2016)
Величина рН (143)	Потенциометрический
Гранулометрический состав (152)	Лазерная дифрактометрия (Analysette 22 comfort)
Валовое содержание ХЭ в сухом веществе растений (87)	Масс-спектрометрия и атомно-эмиссионная спектрометрия (ICP-MS, ICP-AES)
Валовое содержание ХЭ в почвах (188)	ICP-MS, ICP-AES
Обменные соединения (164)	В вытяжке ААБ (рН=4,8) с ICP-MS, ICP-AES
Комплексные соединения (164)	В вытяжке ААБ+1% ЭДТА с ICP-MS, ICP-AES
Соединения, сорбированные гидроксидами Fe и Mn (164)	В вытяжке 1н ННО ₃ с ICP-MS, ICP-AES

В растениях определяли зольность и валовой элементный состав. Содержание As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, Ti, U, W, Zn и Zr в почвах, растениях и почвенных вытяжках определено масс-спектрометрическим и атомно-эмиссионным методами с индуктивно связанной плазмой во Всероссийском институте минерального сырья имени Н.М. Федоровского с помощью системы Elan-6100 ICP-MS System (PerkinElmer Inc., США) и Optima-

4300 DV ICP-AES System (PerkinElmer Inc., США). Анализировали холостые растворы и 5% перекрёстных проб.

Методы обработки данных. Для изучения распределения ХЭ использовали ландшафтно-геохимические и математико-статистические методы обработки данных в пакетах Statistica, Excel и среде «R». Региональная геохимическая специализация оценена с использованием кларков концентрации (КК): для почв – сравнение валовых содержаний ХЭ с их кларками верхней части континентальной земной коры (Rudnick, Gao, 2014), для растений – с кларками наземных растений (Перельман, Касимов, 1999; Markert, Franzle, 2015) и коэффициентов концентрации (Кк): сравнения содержания подвижных (F1, F2, F3) форм ХЭ в почвах со средними значениями для А-горизонта дерново-подзолистых почв Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин (Semenkov et al., 2016, 2019; Samonova et al., 2018). Потенциальную подвижность (M2) рассчитывали как отношение содержания непрочно связанных соединений (F1+F2+F3) к валовому содержанию (Tyler, 2004; Volan et al., 2014; Li et al., 2019). Биодоступность (M1) вычислена как отношение содержания доступных для растений форм соединений (F1+F2) к валовому содержанию. Группы ХЭ выделяли с помощью Т-критерия Уилкоксона в программе Statistica по значимым различиям между соседними ХЭ в рядах медианных значений подвижности.

Накопление и рассеяние ХЭ в профиле почв относительно породы диагностировали с помощью коэффициента радиальной дифференциации R, а в горизонтах подчиненных почв относительно автономных – коэффициента латеральной дифференциации L (Касимов, Перельман, 1992). Связь распределения форм ХЭ со свойствами почв подтверждали наличием значимой ($p < 0,05$) прямой корреляции Спирмана r между содержанием формы ХЭ и физико-химическими характеристиками почв. Связь с величиной pH может указывать на щелочной барьер, с содержанием илистой фракции (G1) – сорбционный, содержанием Сорг – биогеохимический (Enchilick, Semenov, 2022). Вариабельность содержания форм ХЭ в гумусовых горизонтах почв оценена с помощью коэффициентов вариации (Cv,%).

Скорость разложения наземных органических остатков оценивали с помощью опадо-подстилочного коэффициента (Коп) – отношения массы абсолютно-сухого веса органического вещества лесной подстилки (горизонты ОН+ОF) к массе свежего опада (OL). Для выявления специфических черт состава растений использовали коэффициент ОСВР (относительное содержание в видах

растений) – отношение содержания ХЭ в золе изучаемого вида к содержанию в золе эталонного (Ковалевский, 1969) – липы сердцевидной (Енчилик и др., 2018, 2020). Перераспределение ХЭ в органах оценено с помощью коэффициента ОСОР (относительное содержание в органах растений) – отношение содержания ХЭ в изучаемом органе к содержанию ХЭ в эталоне (Ковалевский, 1969) – крупных ветках. Для оценки интенсивности извлечения ХЭ из почв растениями рассчитан коэффициент биологического поглощения A_x – отношение количества ХЭ в золе растений к его содержанию в почвообразующей породе. Суммарная интенсивность вовлечения ХЭ в биологический круговорот (БИК) оценена по показателю биогеохимической активности вида (БХА) – сумме $A_x > 1$ (Айвазян, 1974).

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Впервые для почвенно-геохимической катены исследованы валовые концентрации и содержание трех подвижных форм широкого спектра ХЭ в разные сезоны года. В работе решены важные для геохимии ландшафтов задачи: охарактеризованы уровни содержания форм ХЭ в фоновой для Московского региона почвенно-геохимической катене; оценено влияние изменчивости условий миграции на R и L дифференциацию форм нахождения и подвижности ХЭ; элементы классифицированы по потенциальной подвижности и биодоступности. Полученные результаты сопряженного анализа химического состава компонентов фоновых ландшафтов применимы для решения теоретических и прикладных задач геохимии ландшафта. Полевые работы выполнены в рамках проекта РГО-РФФИ №17-05-41036-РГО «Формы миграции металлов в южнотаёжных ландшафтах». Результаты обобщены в рамках проекта РНФ №19-77-30004 «Технология оценки экологического состояния Московского мегаполиса на основе анализа химического состава микрочастиц в системе «атмосфера–снег–дорожная пыль–почвы–поверхностные воды» (Мегаполис)» и госзадания кафедры геохимии ландшафтов и географии почв № I.4. Результаты исследований вошли в отчеты по вышеупомянутым проектам, используются в лекционных и семинарских занятиях по курсам «Геохимия окружающей среды», «Геохимия ландшафта» и «Актуальные проблемы геохимии ландшафтов и географии почв», читаемых на географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова. Полученная информация востребована для эколого-геохимического мониторинга городских территорий.

Достоверность результатов работы обеспечена обширным фактическим материалом, полученным в аккредитованной лаборатории с использованием

современного оборудования, детальным анализом полученных данных и литературы по теме исследования, а также апробацией основных результатов на научных конференциях и публикациями в рецензируемых изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация объемом 154 страницы состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 248 наименований, включает 31 рисунок, 20 таблиц и приложение на 19 страницах. В главе 1 представлены результаты анализа литературных данных по уровням содержания и распределению подвижных форм ХЭ и охарактеризована степень изученности их R и L распределения в почвенных катенах фоновых таёжных ландшафтов. Глава 2 содержит физико-географическую характеристику района исследования. В главе 3 описаны изученная ландшафтно-геохимическая катена Центрально-Лесного заповедника, использованные методы. В главе 4 проанализированы физико-химические свойства почв, уровни содержания подвижных форм ХЭ и определена биогеохимическая структура ландшафтов. Глава 5 посвящена связям и временной изменчивости R и L распределения форм ХЭ в почвах катены. В главе 6 оценена контрастность изменчивости профильного и пространственного распределения подвижности ХЭ и приведены ряды потенциальной подвижности и биодоступности ХЭ в горизонтах почв.

Положения, выносимые на защиту.

1. Палево-подзолистые, дерново-подзолистые и торфянисто-подзолистые почвы Центрально-Лесного заповедника имеют околочларковые уровни валового содержания химических элементов, фоновые уровни комплексных (F2) форм соединений элементов, повышенные содержания обменных (F1) форм соединений и пониженные сорбированных гидроксидами Fe и Mn (F3).

2. Радиальная почвенно-геохимическая структура катены характеризуется слабой сезонной изменчивостью, равномерным распределением валового содержания большинства элементов, преимущественно аккумулятивным – F1 и F2 форм и элювиальным – F3 форм. Латеральная почвенно-геохимическая структура катены выражается в транзитном распределении валовых, F1 и F2 форм элементов с накоплением на биогеохимическом барьере склона и аккумулятивным распределением F3 форм, накапливающихся на сорбционно-кислородном барьере в подчиненном переувлажненном ландшафте. Положение этого латерального барьера меняется в разные сезоны в зависимости от смены окислительно-восстановительных условий. В гумусовом горизонте формам биогеохимически активных элементов свойственно аккумулятивное радиальное

и латеральное распределение. В нижней части профиля контрастность латеральной и радиальной дифференциации постепенно снижается.

3. Потенциальная подвижность элементов снижется в ряду: максимально подвижные Pb Mn Co Cd> сильноподвижные в верхней части профиля La Ni Cu Zn Fe> среднеподвижные Bi Cr U As Sr> слабоподвижные Rb Mo W Sb> минимально подвижный Zr. Для большинства элементов она максимальна в кислых органогенных горизонтах почв катены и уменьшается с глубиной, за счет резкого снижения вклада обменных и комплексных соединений при увеличении непрочно сорбированных гидроксидами Fe и Mn форм соединений. Биодоступность в почвах катены дифференцирована контрастнее, чем потенциальная подвижность. В рядах этих форм подвижности порядок элементов преимущественно сохраняется. В гумусовом, перегнойном и торфяном горизонте наибольшая биодоступность Mn, Pb, Co и Ni обусловлена важной ролью биологической аккумуляции форм этих элементов.

Апробация работы, публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 3 в журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI и из дополнительного списка рецензируемых научных изданий из перечня, рекомендованного Минобрнауки России, в котором могут быть опубликованы основные результаты диссертаций. 4 статьи в сборниках трудов конференции. Сделано 3 доклада на международных конференциях и 5 – на всероссийских. В работах, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Личный вклад соискателя. Автор участвовал в постановке цели и задачи исследования, полевых работах, описал почвы, отбирал пробы, выполнил значительную часть химико-аналитических работ (измерял pH, зольность, содержание органического углерода и CO₂ карбонатов, подготовил все почвенные вытяжки), провел литературный обзор и подготовил иллюстративный материал.

Благодарности. Автор благодарен научному руководителю академику Н.С. Касимову за ценные указания и помощь в работе; И.Н. Семенкову за содействие в полевых и химико-аналитических работах, консультации по статистическому анализу и интерпретации результатов; Е.Н. Асеевой за организацию и проведение экспедиционных исследований, помощь в расчете и анализе биогеохимических показателей; Е.В. Терской, Л.В. Добрыдневой за консультации при выполнении химико-аналитических работ; сотрудникам ВИМС имени Н.М. Федоровского и руководителю АСИЦ ИПТМ РАН

В.К. Карандашеву за определение содержаний ХЭ в растениях, почвах и почвенных вытяжках; А.Д. Иовчевой, участвовавшей в сборе полевых материалов и химико-аналитических работах; М.И. Герасимовой за помощь в диагностике почв; А.Д. Белик за консультации по программному пакету «R». За содействие в сборе полевых материалов и организацию полевых работ автор глубоко признателен Р.Б. Сандлерскому. В процессе выполнения полевых работ автор руководствовался методическими подходами Ю.Г. Пузаченко.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое положение. *Палево-подзолистые, дерново-подзолистые и торфянисто-подзолистые почвы Центрально-Лесного заповедника имеют окодокларковые уровни валового содержания химических элементов, фоновые уровни комплексных (F2) форм соединений элементов, повышенные содержания обменных (F1) форм соединений и пониженные сорбированных гидроксидами Fe и Mn (F3).* (результаты главы 4).

Наиболее биогеохимически активными являются Mn, Zn, Cd, Bi (табл. 2), которые эффективнее поглощаются гумидокатными видами древесных растений (Айвазян, Касимов, 1979): елью обыкновенной и кленом остролистным. Коэффициенты A_x увеличиваются в автономном ландшафте и у подножья склона и снижаются в верхней части склона и заболоченной потяжине. Mn, Zn Cd, Bi поступают на поверхность почв преимущественно в составе листовенного опада и веток хвойных деревьев, Rb, Cu – в составе органов травянистых растений. В ландшафтах верхних звеньев катены с наиболее активным разложением органического вещества из растительного опада высвобождаются подвижные формы Mn, Bi, Cd, Zn. В подчиненных ландшафтах Cd, Zn задерживаются в слаборазложившихся остатках растений, что препятствует их миграции в нижележащие горизонты.

Таблица 2

Ряды ХЭ интенсивного и среднего накопления ($A_x > 10$) в растениях

Орган	A	ТЭ	ТЭА1	ТЭА2
Ель	хвоя $Mn_{109} Bi_{20} Rb_{12}$	Mn_{27}	$Mn_{315} Zn_{22} Rb_{18} Sr_{14} Bi_{13}$	$Mn_{32} Cd_{19} Zn_{13}$
	ветки $Mn_{87} Bi_{39} Cd_{36} Cu_{35}$	$Cd_{24} Bi_{23} Cu_{21} Zn_{19}$	$Mn_{199} Zn_{61} Bi_{42} Cd_{29} Sr_{26}$	$Cd_{92} Zn_{49} Bi_{30} Mn_{22}$
	кора $Zn_{32} Sr_{16} Rb_{15} Ni_{13}$ $Mn Bi_{27} Zn_{24} Cd_{22} Sr_{10}$	$Mn_{17} Sr_{10}$ $Cd_{28} Zn_{23} Bi Cu Mn_{12}$	$Cu_{21} Rb_{18}$ $Mn_{133} Zn_{71} Cd_{33} Bi_{22} Sr_{16} Cu_{11}$	$Cu_{19} Mo_{11}$ $Cd_{69} Zn_{35} Mn_{13}$
Липа	листья $Rb_{43} Mn_{20} Cu_{10}$	$Rb_{20} Sb_{15} Cu_{12}$	$Mn_{243} Rb_{60} Zn_{29} Bi_{20}$ $Cd Sr_{14} Cu_{12}$	$Sb_{32} Mn_{21} Cd_{17}$ $Rb_{12} Cu_{11}$
	ветки $Bi_{37} Sr_{19} Mn_{13} Rb_{12}$	$A_x < 10$	$Mn_{145} Sr_{27} Rb_{23} Cd_{22} Bi_{20} Zn_{16}$	Zn_{11}
	кора $Mn_{29} Sr_{22} Bi_{19} Cu_{10}$	Sr_{11}	$Mn_{154} Sr_{32} Cd_{12} Zn_{10}$	–
Клён	листья $Mn_{42} Rb_{20}$	$Mn_{21} Rb_{19} Cu Cd_{12} Bi_{11}$	$Mn_{172} Rb_{49} Sr_{17} Cu Zn_{12}$	$Mn_{107} Cd_{55} Zn_{17} Mo$
	ветки $Mn_{29} Bi_{22} Sr Cd_{19}$	$Cd_{18} Mn_{13} Bi_{11} Sr_{10}$	–	– Cu_{11}
	кора $Mn_{70} Cd_{43} Cr_{29} Bi Sr_{16} Cu_{11}$	$Mn_{13} Sr_{12}$	–	–
Орляк	$Rb_{42} Mn_{12}$	$Rb_{25} Cu_{12} Cd_{11}$	$A_x < 10$	$Rb_{23} Cd_{17} Mo_{11} Sb_{10}$
Кислица	Rb_{25}	Rb_{27}	$A_x < 10$	$Mn_{21} Rb_{12}$
Сфагнум	–	–	$Cd_{57} Sb_{53} Mo_{36} Mn_{35} Zn_{31}$	

*красный– $A_x > 50$, зеленый– 25-50, синий– 15-25, черный– 10-15, –«– нет данных

По валовому содержанию и содержанию F2 форм соединений As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, Ti, U, W, Zn и Zr почвенно-геохимическая catena слабо отличается от незагрязненных (фоновых) дерново-подзолистых почв (рис. 2), на нижней границе диапазона находятся As, Cr, Cu, Mo, Ni, Sb, Sr, U, W, Zr, обеднение микроэлементами валдайских покровных суглинков отмечали ранее (Авессаломова, 1987). Содержание F1 форм As, Bi, Cd, La, Mn, Ni, Pb, Rb, Sb, Ti, U, W, Zn, Zr повышено в гумусовых горизонтах из-за обильного растительного опада. F3 формами ХЭ обеднен А-горизонт и обогащен горизонт EL из-за накопления их в составе Fe-Mn конкреций.

Наибольшая вариабельность ($C_v > 50\%$) в гумусовом и торфяном горизонтах отмечена для содержания F1 форм As, Co, Cr, Fe, La, U, Zr, Pb, Mn, F2 форм Rb, Sb, Sr, Mn и F3 форм Mn, Rb, Sb, Co, Cr, La, Sr, W, Zr. Дальнейший анализ сезонной изменчивости латеральной дифференциации в гумусовом горизонте не включает эти формы ХЭ из-за их высокой пространственной неоднородности.

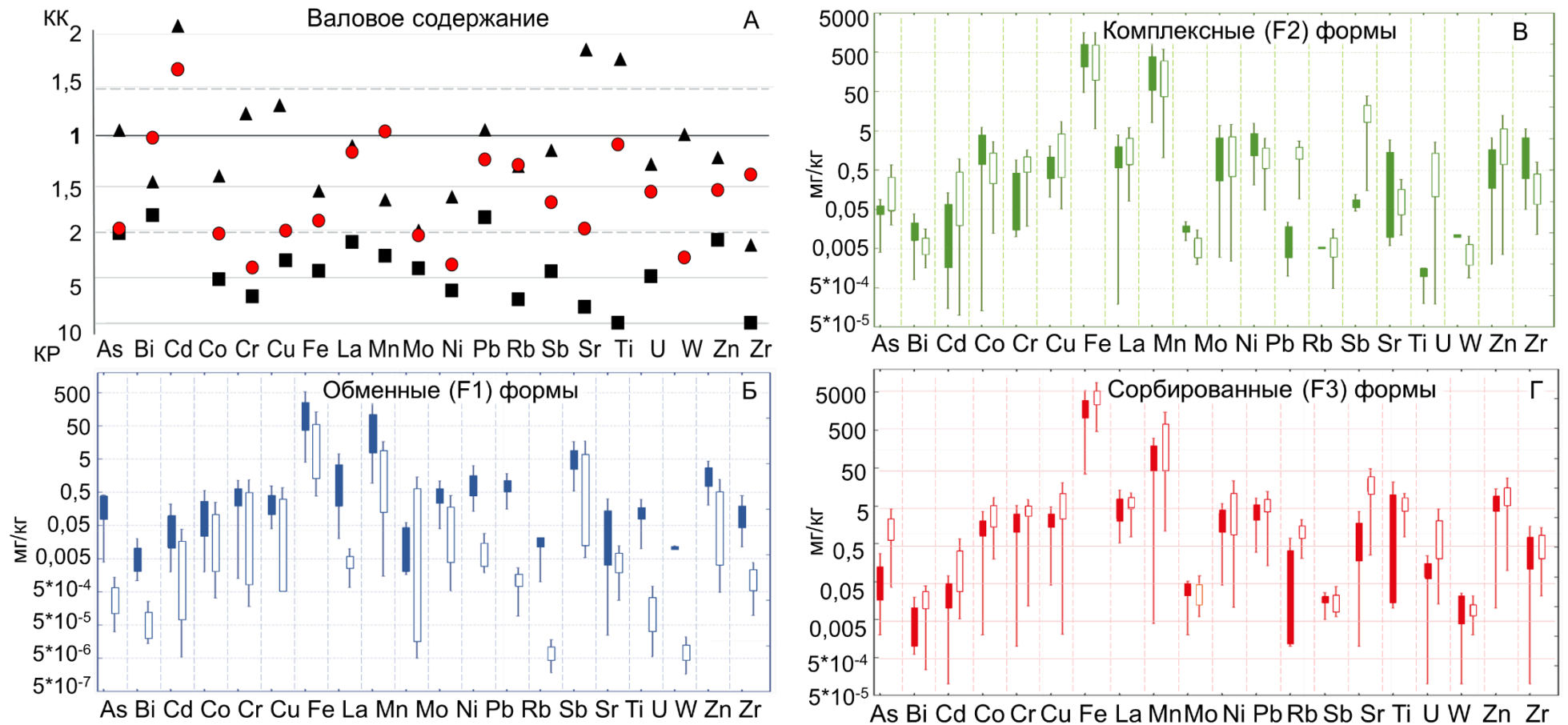


Рисунок 2. Уровни содержания ХЭ в почвах. А – валовые содержания нормированы на кларки (Rudnick, Gao, 2014), красный круг – почвы катены ЦЛЗ (настоящее исследование); квадрат – почвы северной Европы (Reimann et al., 2018); треугольник – почвы южнотаежных ландшафтов России (Касимов и др., 2005; Самонова и др., 2011; Семенков и др., 2016, 2019 и др.). Подвижные формы: сплошная заливка – почвы катены ЦЛЗ (настоящее исследование); контур – литература: Б – F1 – Сосорова и др., 2012; Семенков и др., 2019 и др.; В – F2 – Семенков и др., 2016, 2019 и др.; Г – F3 – Касимов и др., 2005; Самонова и др., 2011; Семенков и др., 2016, 2019 и др.)

Второе защищаемое положение. *Радиальная почвенно-геохимическая структура катены характеризуется слабой сезонной изменчивостью, равномерным распределением валового содержания большинства элементов, преимущественно аккумулятивным – F1 и F2 форм и элювиальным – F3 форм. Латеральная почвенно-геохимическая структура катены выражается в транзитном распределении валовых, F1 и F2 форм элементов с накоплением на биогеохимическом барьере склона и аккумулятивным распределением F3 форм, накапливающихся на сорбционно-кислородном барьере в подчиненном переувлажненном ландшафте. Положение этого латерального барьера меняется в разные сезоны в зависимости от смены окислительно-восстановительных условий. В гумусовом горизонте формам биогеохимически активных элементов свойственно аккумулятивное радиальное и латеральное распределение. В нижней части профиля контрастность латеральной и радиальной дифференциации постепенно снижается. (результаты главы 5).*

В палево-, дерново- и торфянисто-подзолистых почвах Центрально-Лесного заповедника диагностированы радиальные биогеохимический (в А-горизонте), сорбционный (Fe-Mn конкрециями в ЕL-горизонте и илистыми частицами в ВТ-горизонте), глеевый и карбонатный барьеры (в С-горизонте). Положение этих барьеров относительно стабильно в условиях сезонной изменчивости, поэтому формы ХЭ формируют ассоциации, сохраняющие R-распределение в течение года, что показано на примере автономного ландшафта катены (рис. 3).

На биогеохимическом барьере органоминеральных горизонтов аккумулируются Cd, Pb, Sb (рис. 4) и Bi, Mo, Zn. Все они активно вовлекаются в БИК (табл. 2). Большинство ХЭ накапливается в средней и нижней частях профиля (рис. 4): As, Cr, Cu, Fe, La сорбируются илистыми частицами, Ni накапливается на щелочном геохимическом барьере (здесь и далее в скобках коэффициент корреляции $r=0,3$).

Обменные формы (F1) Cd, Rb, Zn, Mn в большинстве случаев имеют аккумулятивный тип распределения за счёт участия в БИКе и сорбции органическим веществом (у всех ХЭ с Сорг $r=0,3-0,7$). Элювиальное распределение свойственно F1 формам Cr, Cu, что для Cr связано с распределением пылеватых фракций (0,2). Грунтово-аккумулятивное распределение характерно для Cu, Ni, Sr, которые осаждаются на щелочном барьере в породе (0,3; 0,5; 0,9).

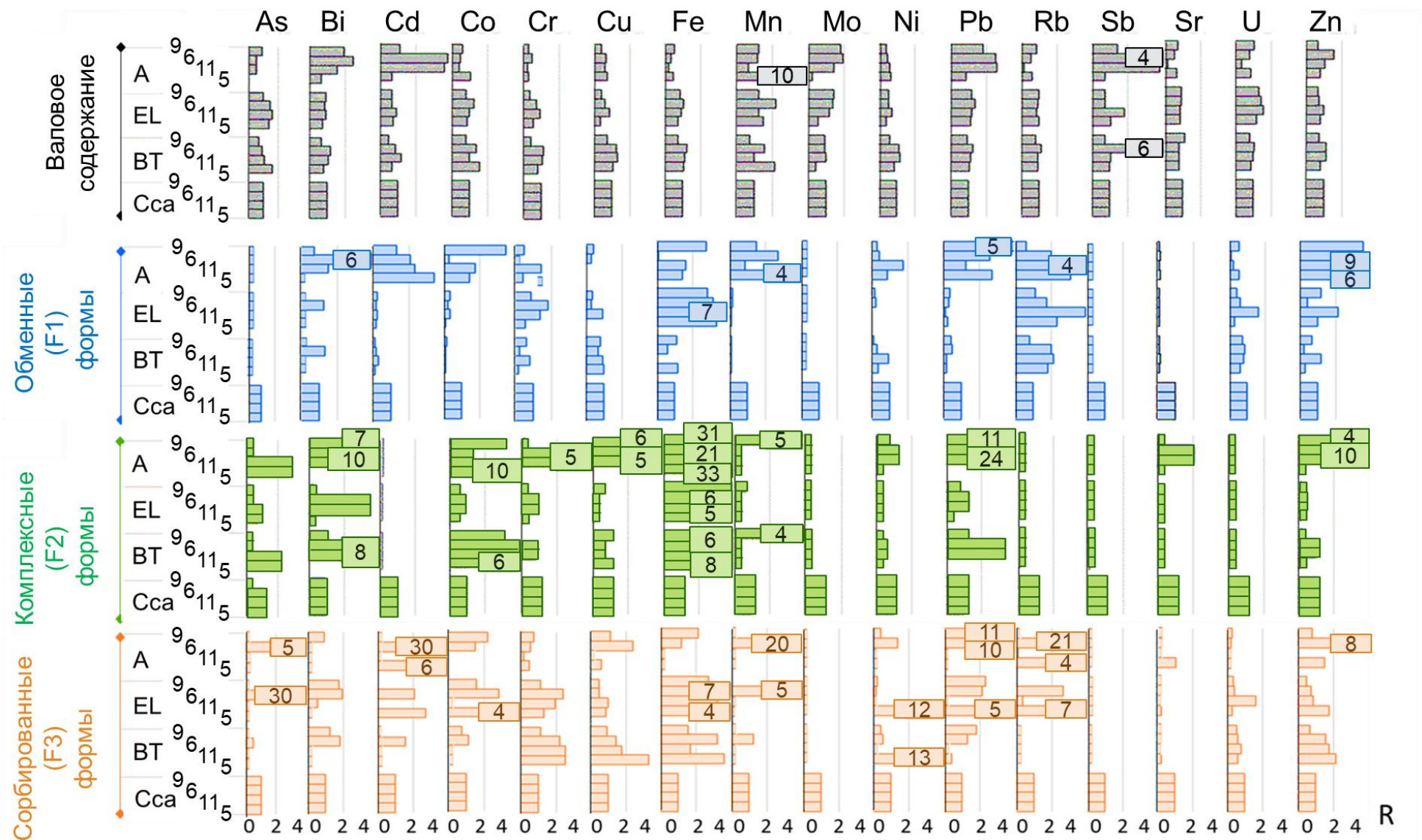


Рисунок 3. Изменчивость радиальной дифференциации (R) валового содержания и подвижных форм (F1, F2, F3) ХЭ в почвах автономного ландшафта катены. Цифры по вертикальной оси: 9–сентябрь, 6–июнь, 11–ноябрь, 5–май

дифференциация *F1* форм ХЭ характеризуется более контрастной временной изменчивостью. В ноябре Zn высвобождается из растительного опада на склоне. В ТЭА1 ландшафте в сентябре и июне усиливается роль комплексного сорбционного барьера для *F1* форм Cd. Накопление *F2* форм Mn в А-горизонтах почв ТЭ ландшафта в наибольшей степени проявляется в ноябре, Zn – в сентябре. Соединения Mn в мае, июне и сентябре выносятся из почв А-ландшафта в ТЭ и рассеиваются в ТЭА.

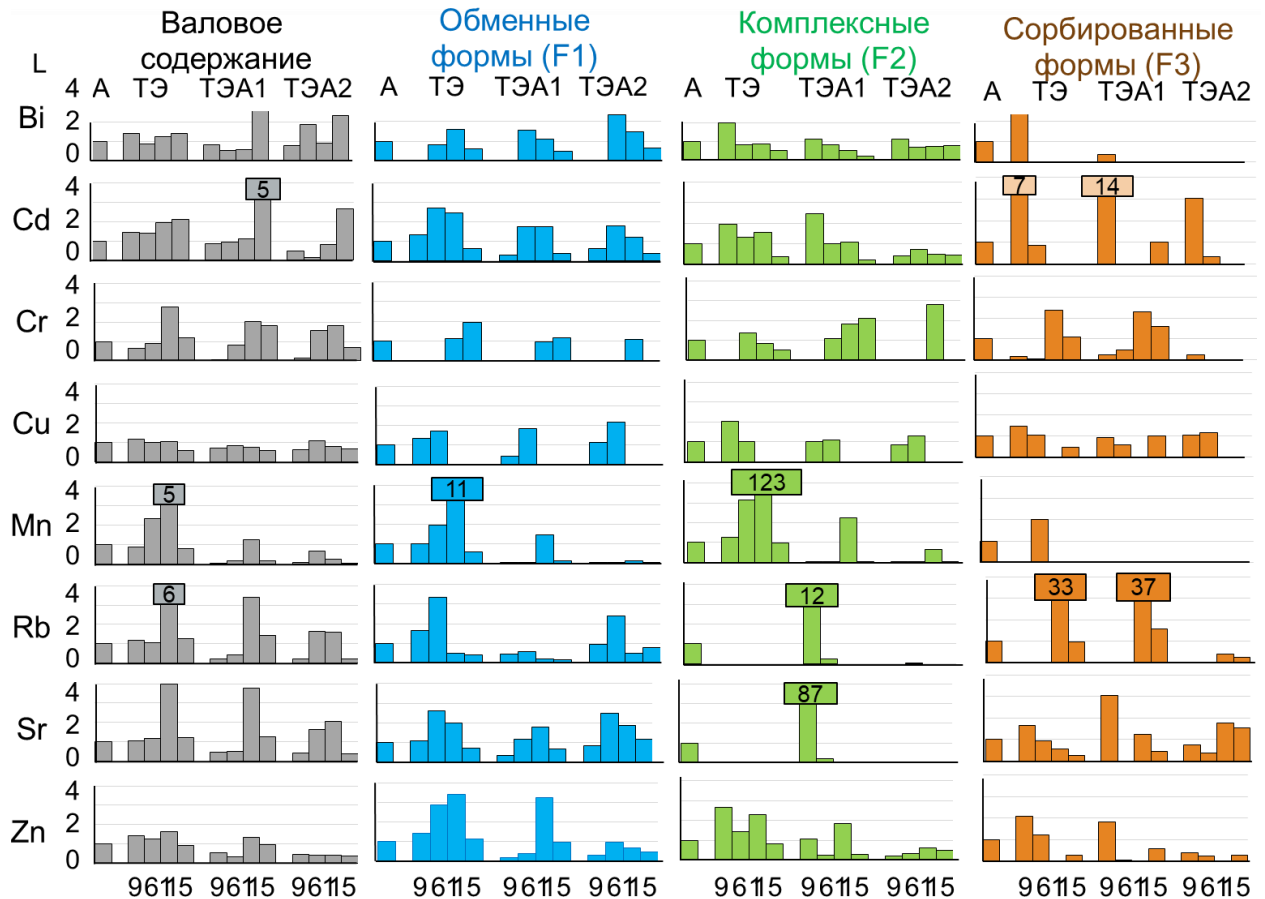


Рисунок 5. Изменчивость латеральной дифференциации (L) валового содержания и подвижных форм (F1, F2, F3) биогеохимически активных ХЭ в гумусовом горизонте. Цифры по горизонтальной оси: 9–сентябрь, 6–июнь, 11–ноябрь, 5–май.

В А-горизонтах, где на миграцию подвижных форм ХЭ в большей степени влияет состав растительного опада и содержание Сорг, L-распределение большинства ХЭ значительно отличается по сезонам года. В ЕL-горизонте контрастность L-дифференциации снижается, на межсезонные отличия влияет смена окислительно-восстановительных условий и миграция растворённого Сорг. В ВТ-горизонте и породе сезонная изменчивость L-распределения ХЭ минимальна, ключевую роль в миграции ХЭ играет гранулометрический состав и наличие щелочного геохимического барьера.

Во все периоды исследований на биогеохимическом барьере А-горизонта склона повышено валовое содержание Cd (табл. 3), F1 формы которого поступают при разложении растительных остатков (табл. 2) и образуют комплексы (F2) с Сорг. В EL-горизонте почв ТЭ ландшафта склона повышено валовое содержание Mn (табл. 3) за счёт миграции с растворённым Сорг.

Таблица 3

Накопление XЭ на латеральных геохимических барьерах почв катены.

Горизонт	Форма	A	ТЭ	ТЭА1	ТЭА2
A	Bulk		Cd	Bi Cd	Fe
	F1		Cd Rb	Cd Cu Zn	Cu Zn
	F2		Cd Zn	Cd Cu	-
	F3		Pb	-	-
EL	Bulk		Mn	-	-
	F1		Fe	Pb Sr	-
	F2		-	As Cr	Cr Fe
	F3		-	Cu	Sr
BT	Bulk		-	Mn Ti	-
	F1		Ni	-	-
	F2		Ni	-	Ni
	F3		Cr Ni	-	-
Cca	Bulk		-	Mn	Co Pb Ni
	F2		Co Mn Ni	Co Mn	-

* в таблице указаны XЭ со значениями коэффициента $L > 2$, полужирным выделены XЭ, для которых накопление на латеральном биогеохимическом барьере в А и EL горизонтах подтверждено прямой корреляционной зависимостью ($p < 0,05$) с Сорг

Транзитный тип L-распределения в А-горизонтах имеют Bi Cd, которые поглощаются растениями в более кислых условиях (табл. 3). F2 формы Cd Cu Zn Fe имеют аккумулятивный тип L-распределения. Они наиболее подвижны в почвах (Thomson et al., 2006; Moiseenko et al., 2013), поэтому выносятся из верхних звеньев катены и накапливаются в подчиненных. Аккумулятивное L-распределение характерно для F3 форм XЭ, поскольку для их образования необходима периодическая смена окислительно-восстановительных условий.

Соотношение коэффициентов R и L (рис. 6) и типов радиального (по Розанову, 2004) и латерального распределения (Геннадиев, Касимов, 2004) в почвенном профиле и разных генетических горизонтах почв отражает комплексное влияние внутрипрофильных и пространственных факторов на потоки веществ в катене. Прямая зависимость между коэффициентами R и L (рис. 6), характеризует аккумулятивное R и L-распределение ($R, L < 2$) или элювиальное R с транзитным L-распределением ($R, L < 0,5$). Так, биогеохимически активные Cd, Mn, Ni, Pb, Rb, Zn имеют аккумулятивное

R и L распределение в почвах катены. В BT-горизонте контрастность R и L дифференциации всех исследуемых XЭ снижается (рис. 6).

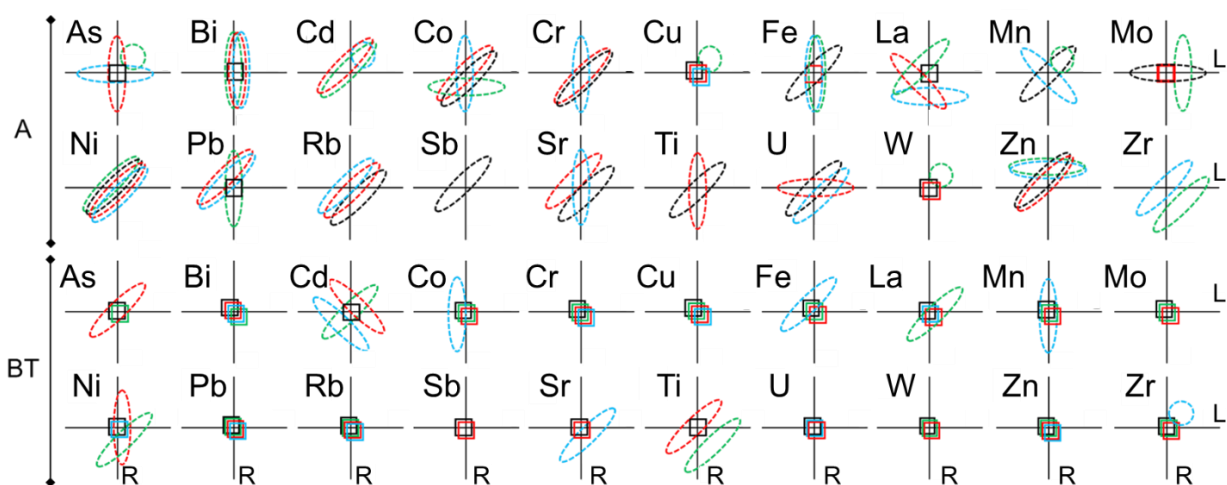


Рисунок 6. Контрастность R и L дифференциации форм соединений XЭ в A и BT горизонтах почв катены; схема построена по полям точек значений коэффициентов R и L; цветом фигуры показаны формы XЭ: черный–валовые, синий–F1, зеленый–F2, красный–F3.

Третье защищаемое положение. *Потенциальная подвижность элементов снижется в ряду: максимально подвижные Pb Mn Co Cd> сильноподвижные в верхней части профиля La Ni Cu Zn Fe> среднеподвижные Bi Cr U As Sr> слабоподвижные Rb Mo W Sb> минимально подвижный Zr. Для большинства элементов она максимальна в кислых органогенных горизонтах почв катены и уменьшается с глубиной, за счет резкого снижения вклада обменных и комплексных соединений при увеличении непрочно сорбированных гидроксидами Fe и Mn форм соединений. Биодоступность в почвах катены дифференцирована контрастнее, чем потенциальная подвижность. В рядах этих форм подвижности порядок элементов преимущественно сохраняется. В гумусовом, перегнойном и торфяном горизонте наибольшая биодоступность Mn, Pb, Co, Ni обусловлена важной ролью биологической аккумуляции форм этих элементов. (результаты главы 6).*

Соотношение подвижных форм XЭ зависит от их свойств в горизонтах почв (рис. 7). В A-горизонте и подстилке повышенная доля F1 форм Cd, Mn, Sr, Zn и As отражает большую роль БИКа в их миграции (Айвазян, Касимов, 1979; Gabarrón et al., 2019 и др.). В A-горизонте среди подвижных соединений Cd, Mn, Co, Zn близкое содержание F2 и F3 форм. F1 формы преобладают у Sr, Cd, Rb, Zn, U. Низкое содержание F2 форм Sr во всем профиле почв согласуется с данными по подзолистым почвам Польши (Jeske, 2013). Доля F3

форм As, Bi, Co, Cr, Cu, Fe, Ti, La, Mn, Pb, Zn возрастает в EL и BT из-за сорбции Fe-Mn конкрециями. В породе повышена доля F2 форм Co, Mn, Mo и Zr за счет образования карбонатных комплексов.

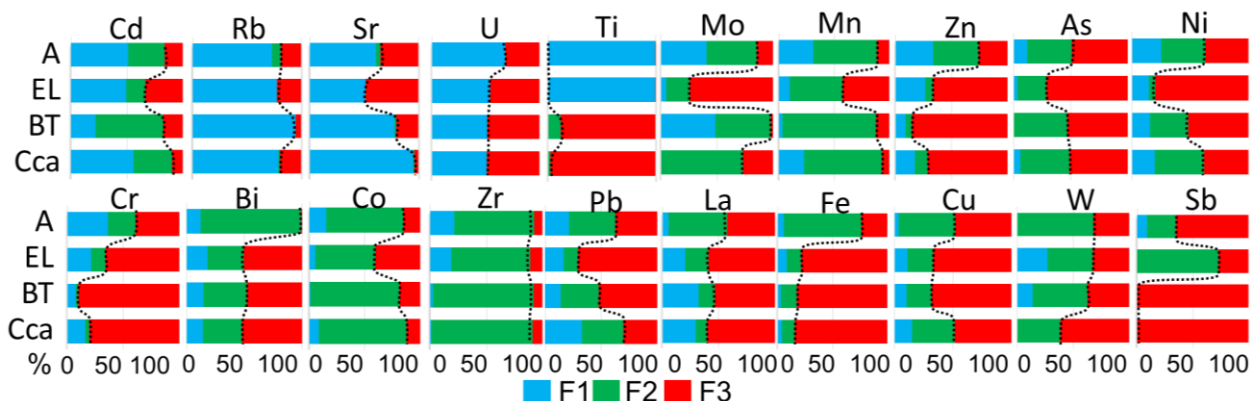


Рисунок 7. Распределение подвижных форм ХЭ в горизонтах почв катены. За 100% принято суммарное содержание непрочно связанных соединений (F1, F2, F3), пунктирной линией отделена биодоступность (F1+F2).

Потенциальная подвижность (M2) ХЭ максимальна в кислых органогенных горизонтах почв и снижается с глубиной (рис. 8). Наибольшие значения M2 у Pb Mn Co Cd, что связано с распределением Сорг ($r=0,7; 0,2; 0,4; 0,5$), как и менее подвижного Ni ($r=0,6$), это обуславливает снижение M2 ХЭ в нижней части профиля. M2 La уменьшается в верхней части профиля из-за связи показателя с величиной pH ($r=0,4$). Cu, Zn, Fe сильноподвижны в верхней части профиля. Подвижность Bi, Cr, U, As, Sr по профилю относительно равномерна. Rb, Mo, W, Sb слабоподвижны в почвах. Zr обладает минимальной подвижностью.

R-дифференциация M2 (рис. 8) определяется накоплением растительных остатков в А-горизонте, сорбцией подвижных форм Fe-Mn конкрециями и G1 в BT-горизонте и аккумуляцией на щелочном барьере в породах. Эти процессы приурочены к определенным генетическим горизонтам почв, поэтому обуславливают слабую временную изменчивость R-распределения подвижности. L-дифференциация M2 в гумусовых горизонтах почв характеризуется контрастной временной изменчивостью.

Общие черты R и L распределения M1 ХЭ схожи с M2. Влияние свойств горизонтов почв на M1 ХЭ ниже, чем на M2 и в большей мере определяется поступлением и распределением Сорг в профиле почв.

Изменение физико-химических свойств почв приводит к дифференциации интенсивности аккумуляции подвижных форм ХЭ. Нами впервые установлены ряды M2 и M1 ХЭ в генетических горизонтах почв (табл. 4). Высокая подвижность в верхней части профиля в большей степени обусловлена

биогеохимическими процессами – комплексообразованием (Violante, 2002, 2008, 2013; Huang, 2002) и сорбцией Сорг. М2 Pb и Cd возрастает из-за сорбции гидроксидами Mn (Cd) и органоминеральными комплексами (Pb) при pH <5,3 (Водяницкий, 2008; Xu, 2013).

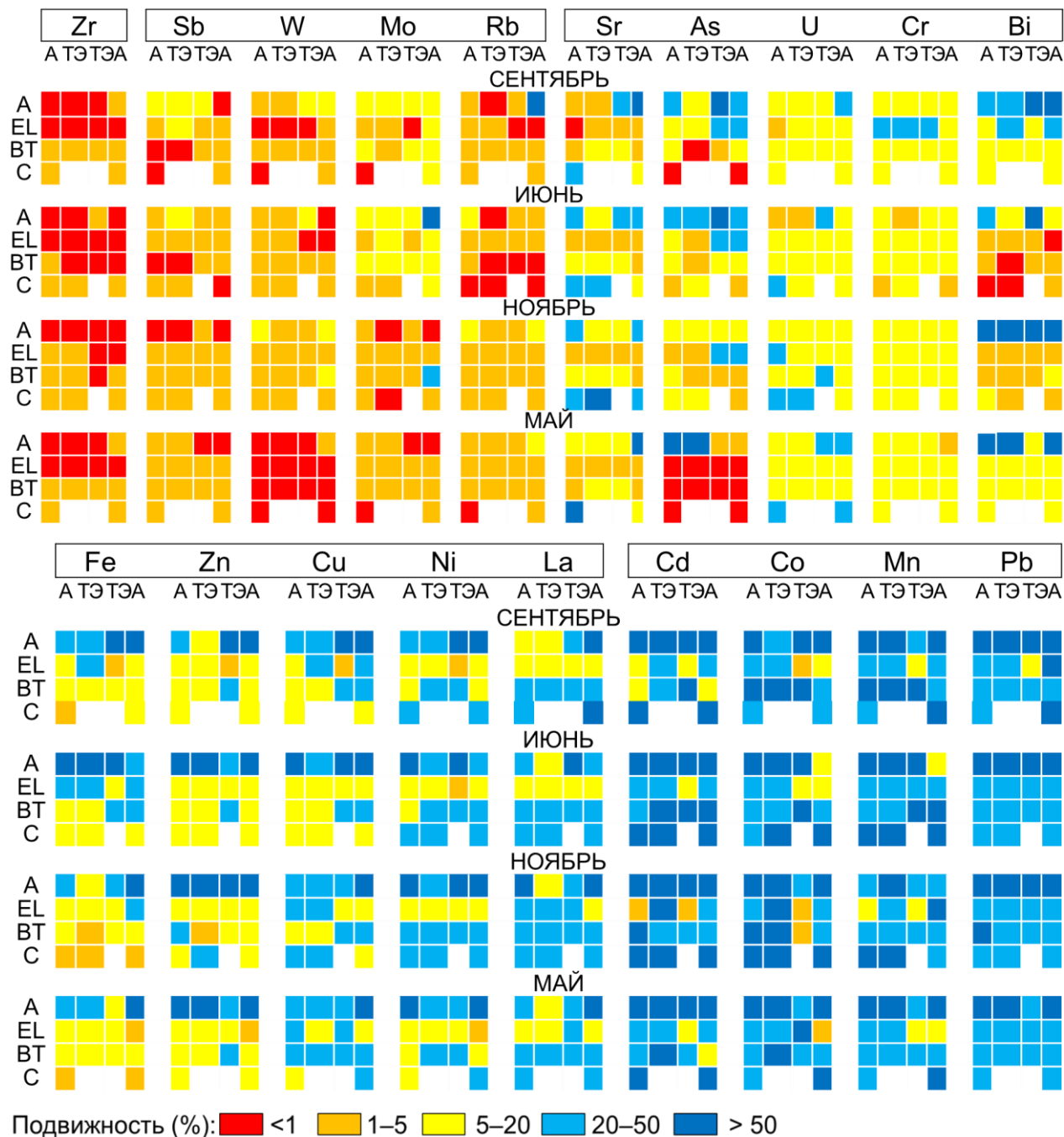


Рисунок 8. Потенциальная подвижность ХЭ в генетических горизонтах почв катены Центрально-Лесного заповедника

Максимальные значения подвижности Cd и Pb характерны для поверхностных горизонтов фоновых дерново-подзолистых почв национального парка «Мещера» (Касимов и др., 2016). Высокая подвижность (>50%) Cd и Zn в гумусовом горизонте согласуется с данными о повышенных коэффициентах их Ах и водной

миграции (Перельман, Касимов, 1999), а также преобладанием растворенной формы в водных потоках бассейна реки Селенги (Kasimov et.al., 2020). Сильноподвижные Mn, Pb, Co, Ni при относительно высоких Ах (Перельман, Касимов, 1999) мигрируют в бедных органическим веществом поверхностных водах преимущественно во взвешенной форме (Kasimov et.al., 2020), что подтверждает важную роль биологической аккумуляции в дифференциации М2 и М1 в ландшафтах заповедника. В EL-горизонте при сохранении ряда ХЭ, их подвижность уменьшается. Наиболее подвижные Pb, Cd, Co, Mn, Zn, Bi выносятся из горизонта в результате кислотного гидролиза, что подтверждает связь М1 этих ХЭ с Сорг. Снижение М1 контрастнее, чем М2 из-за увеличения роли F3 форм и влияния Fe-Mn конкреций на дифференциацию подвижности ХЭ (Borch, 2010; Kabata-Pendias, 2011; Samonova, Aseyeva, 2019 и др.).

Таблица 4

Ряды потенциальной подвижности(М2) и биодоступности(М1) химических элементов

	100	50	20	10	5	1	
A	M2	PbCd ₉₉ Co ₈₆ Mn ₆₄ Zn ₆₃ Ni ₅₆ Bi ₅₅ Cu ₄₇ Fe ₃₈ La ₂₈ As ₂₂ Sr ₁₉ Cr ₁₁ U ₁₀				Mo ₄ RbW ₃ Sb ₁ Zr _{0,2}	
	M1	Cd ₇₄ Pb ₆₄	Zn ₄₀ Mn ₃₈ Co ₃₆ Bi ₂₉	As Ni ₁₇ Fe ₁₃ Sr U ₇ Cr Mo La ₆ Cu ₅	Sb ₄ W ₂ Rb ₁	Zr _{0,1}	
EL	M2	Pb ₃₃ Co ₃₁ Mn ₂₆ Cd ₂₅ Cu ₁₉ Fe ₁₃ Cr ₁₃ Zn ₁₂ La ₁₁ Ni ₁₀ U ₉ As ₈ Bi ₆ MoSr ₂ Sb _{1,7} Zr _{0,2}					
	M1	Cd ₁₈ Pb ₁₂ CoBi ₁₁ Mn ₉ Sb ₈ U ₆ Mo Cu ₅ As CrZn ₄ Ni La ₃ Fe W ₂ Rb Sr ₁ Zr _{0,1}					
BT	M2	Cd ₄₈ Mn ₄₇ Co ₄₅ La ₄₁ Pb ₃₉ Ni ₂₄ Cu ₂₂ Zn ₁₆ U ₁₄ Cr ₁₂ Bi Fe ₁₀ Sr Mo ₆ As ₄ W ₃ Zr _{1,5} Sb Rb _{1,2}					
	M1	Mn ₃₆ Co ₃₄ Cd ₃₁ Pb ₁₉ La ₁₆ Ni ₁₁ Bi ₁₀ Mo ₉ SbU Cu ₇ Sr ₅ As ₄ W ₃ Zn Fe ₂ Zr Cr Rb ₁					
Cca	M2	Cd ₇₅	Mn ₅₉ Co ₅₁ La ₃₈ Pb ₃₅ Ni ₃₄ Sr ₃₂ U ₂₀ CuZn ₁₆	Cr ₆ Fe ₅ As Bi ₄ W Zr ₂ Mo Rb Sb ₁			
	M1	Cd ₅₃	Mn ₄₈ Co ₃₆ Sr ₃₁ Pb ₂₁ Ni ₂₀ La ₁₄ U ₈ BiSb ₇ Cu ₆ As ₅ Mo ₄ ZnW ₃ Cr ₂ Zr ₁ Rb Fe _{0,7}				

*подстрочный индекс – значения подвижности (%)

В горизонте BT возрастает подвижность Cd, La, Pb, U, Sr из-за поступления веществ, непрочно сорбированных G1 и замедления миграции Ni и Zn при увеличении pH почв. Подвижные форм Sr, Zn и U с высокими коэффициентами водной миграции (Перельман, Касимов, 1999) могут поступать с почвенными водами. В остаточной карбонатной морене наибольшую роль играет аккумуляция F1, F2 форм ХЭ на щелочном геохимическом барьере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Палево-подзолистые, дерново-подзолистые и торфянисто-подзолистые почвы катены Центрально-Лесного заповедника имеют околочларковые уровни валового содержания As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, Ti, U, W, Zn, Zr и фоновые уровни F2 форм As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn,

Ni, Pb, Sb, Ti, U, Zn, Zr. А-горизонты почв обогащены F1 формами As, Bi, Cd, La, Mn, Ni, Pb, Rb, Sb, Ti, U, W, Zn, Zr и обеднены F3 формами As, Bi, Rb, Sr, U. В южнотаёжных ландшафтах катены наиболее биогеохимически активные Mn, Zn, Cd, Bi, Rb поглощаются древесными растениями и возвращаются на поверхность почв с опадом. В верхних звеньях катены формы этих ХЭ интенсивно высвобождаются из растительных остатков, а в нижних – консервируются в торфе.

Радиальная почвенно-геохимическая структура фоновой южнотаежной катены слабо подвержена изменениям среды и зависит от элементарных почвообразующих процессов и геохимических барьеров в генетических горизонтах. В R-распределении F1 форм ХЭ большую роль играют биогеохимические процессы и сорбция Сорг, F2 форм – содержание Сорг почв и карбонатность пород, F3 – накопление на биогеохимическом барьере в А-горизонте (As, Cd, Cu, Pb, Zn, Sb), аккумуляция на сорбционном барьере Fe-Mn конкреций в EL и ВТ-горизонтах (As, Bi, Cd, Pb) и миграция с G1(Cr).

Латеральная почвенно-геохимическая структура катены характеризуется изменчивостью, наиболее ярко проявляющейся в сопряженных А-горизонтах, где ведущими процессами дифференциации являются накопление и разложение растительных остатков. В EL и ВТ-горизонтах слабая сезонная дифференциация L-распределения форм ХЭ зависит от изменчивости окислительно-восстановительных условий и миграции растворённого Сорг.

В гумусовом горизонте почв катены Cd, Mn, Ni, Pb, Rb, Zn характеризуются аккумулятивным R и L типом распределения. В EL-горизонте для Cd, Co, Cu, Fe Mn, Mo, Zn аккумулятивное элювиально-иллювиальное R-распределение сопровождается их транзитным L-распределением, из-за высокой степени оглеения в средней части профиля подчиненных ландшафтов. В ВТ-горизонте контрастность R и L дифференциации всех исследуемых ХЭ снижается.

Высокая подвижность ХЭ в органогенных горизонтах почв и снижается в ряду: Pb Mn Co Cd > La Ni Cu Zn Fe > Bi Cr U As Sr > Rb Mo W Sb > Zr. К минеральным горизонтам она значительно падает. В R-дифференциации подвижности ХЭ слабо проявляется сезонная изменчивость. На L-распределение подвижности ХЭ в А-горизонтах почв влияет сезонная смена условий миграции. В верхней части профиля почв подвижность обусловлена накоплением Сорг, в ВТ-горизонте возрастает роль G1. В карбонатных моренных суглинках подвижные формы аккумулируются на щелочном барьере.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ
Статьи в журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI и из дополнительного списка рецензируемых научных изданий из перечня, рекомендованного Минобрнауки России, в котором могут быть опубликованы основные результаты диссертаций:

1. **Enchilik P. R.**, Semenov I. N. Vertical and spatial distribution of major and trace elements in soil catena at the Central Forest State Nature Biosphere Reserve (SE Valdai Hills, Russia) // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2022. – V.3(15) . – P. 99–119. *doi: 10.24057/2071-9388-2022-038*. (IF SJR: 0,32, Cite Score: 2,3)

2. **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. (IF SJR: 0,29)

3. **Енчилик П.Р.**, Асеева Е.Н., Семенов И.Н. Биологическое поглощение и биогеохимическая подвижность микроэлементов в лесных ландшафтах Центрально-Лесного Государственного Природного Биосферного заповедника // *Проблемы региональной экологии*. – 2018. – № 4. – С. 93–98. (IF РИНЦ: 0,299)

Полный список публикаций с учетом работ в сборниках материалов и тезисов российских и международных конференций доступен на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА» (<https://istina.msu.ru/profile/EnchilikPR/>)