

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Географический факультет  
Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

*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

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата географических наук**

Научный руководитель:  
академик РАН, профессор,  
Н.С. Касимов

Москва – 2023

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Подвижные формы элементов в почвах фоновых таежных ландшафтов</b> .....	9
1.1 Уровни содержания .....	10
1.2 Радиальное распределение .....	13
1.3 Латеральное распределение .....	15
<b>Глава 2. Физико-географическая характеристика южной части Валдайской возвышенности</b>	19
2.1 Рельеф и почвообразующие породы .....	19
2.2 Климат .....	21
2.3 Поверхностные и грунтовые воды .....	22
2.4 Растительный покров .....	22
2.5 Почвенный покров .....	25
<b>Глава 3. Объекты и методы исследования</b> .....	27
3.1 Почвенно-геохимическая катена .....	27
3.2 Полевые работы .....	33
3.3 Аналитические методы и статистическая обработка данных .....	34
<b>Глава 4. Свойства и элементный состав почв и растений катены</b> .....	41
4.1 Физико-химические свойства почв .....	41
4.2 Биогеохимическая структура ландшафтов .....	44
4.3 Уровни содержания форм химических элементов в почвах .....	56
<b>Глава 5. Радиальная и латеральная почвенно-геохимическая структура катены: R,L-анализ распределения подвижных форм элементов</b> .....	63
5.1 Изменчивость радиальной дифференциации .....	63
5.2 Динамика латеральной дифференциации .....	73
5.3 Общие черты радиальной и латеральной дифференциации .....	81
5.4 Контрастность радиальной и латеральной почвенно-геохимической структуры катены ..	87
<b>Глава 6. Подвижность химических элементов в почвах катены</b> .....	98
6.1 Вклад форм нахождения химических элементов в общую подвижность .....	98
6.2 Группирование и изменчивость радиального распределения потенциальной подвижности элементов .....	100
6.3 Потенциальная подвижность химических элементов .....	104
6.4 Биодоступность химических элементов .....	108
6.5 Ряды подвижности химических элементов в почвах .....	110
<b>Заключение</b> .....	119
<b>Литература</b> .....	121
<b>Приложения</b> .....	135
<i>Приложение А. Описание участка исследования</i> .....	135
<i>Приложение Б. Морфологическое описание почв катены</i> .....	136
<i>Приложение В. Зольность и содержание элементов в растениях катены</i> .....	138
<i>Приложение Д. Корреляционные матрицы между свойствами почв, содержанием форм и подвижностью элементов</i> .....	142
<i>Приложение Е. Сезонная динамика радиального распределения элементов в текстурно-дифференцированных почвах катены</i> .....	147
<i>Приложение Ж. Сезонная динамика латерального распределения элементов в почвах катены Центрально-Лесного заповедника</i> .....	151

## Введение

**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. Сопряженный анализ химического состава компонентов фоновых ландшафтов в экологическом мониторинге необходим для решения теоретических и прикладных задач геохимии ландшафта (Лукашев, 1985; Глазовская, Касимов, 1987; Глазовская и др., 1989; Кошелева и др., 2002). При характеристике условий миграции и аккумуляции химических элементов (ХЭ) кроме валового содержания (Водяницкий, 2006; Minkina et al., 2008; Karim et al., 2014; 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 (Fujikawa et al., 2000; Takeda et al., 2006; Sipos, 2009; Shaheen, Rinklebe, 2018; Xiao et al., 2019; Burachevskaya et al., 2020; Sungur et al., 2021). Подвижные формы элементов поступают в растения и накапливаются в их тканях, давая начало биогеохимическому круговороту и играя важную роль в биоиндикации (Минкина и др., 2014; Данджиева и др., 2016). Изучение распределения форм нахождения химических элементов в почвах получило название F-анализ. Экстрагируемые соединения химических элементов обычно обозначают как F1, F2, F3 и так далее в порядке снижения подвижности (Qian et al., 1996). Водорастворимые и обменные формы (F1) наиболее подвижны, способны к обмену и доступны для растений. Комплексные соединения (F2), включая карбонатные и органоминеральные, потенциально доступны для растений. Сорбированные оксидами Fe и Mn соединения (F3) прочно связаны с фазами-носителями и вместе с остаточной фракцией (F4) малодоступны для растений, перемещаясь лишь в результате механической миграции. Суммарная доля обменных (F1), комплексных (F2) и сорбированных гидроксидами Fe и Mn (F3) форм от валового содержания элемента характеризует потенциальную подвижность химических элементов в почвах (Tyler, 2004; Bolan et al., 2014; Palleiro et al., 2016; Yutong et al., 2016, Li et al., 2019). Поскольку F3 форма прочно удерживается почвой, можно выделить биологическую подвижность или биодоступность, то есть долю (F1+F2) форм соединений от валового содержания, отражающую участие элементов в биологическом круговороте. Влиянию физико-химических свойств почв на подвижность элементов посвящен ряд работ (Перельман, Касимов, 1999; Borda, Sparks, 2002; Mikutta, Kretzschmar, 2011; Violante et al., 2012; Caporale, Violante, 2015; Kabata-Pendias, Szteke, 2015 и др.). Дифференцированная (по почвенным горизонтам) оценка влияния этих свойств на подвижность элементов проведена лишь для отдельных почв (Семенков и др., 2016; 2019; Jeske, 2013).

Подвижные соединения элементов обычно используют для характеристики доступности для растений, поэтому многие исследования форм нахождения ХЭ приурочены к агроландшафтам

(Qian et al., 1996; Wu et al., 2006; Uprety et al., 2009). Пахотный горизонт анализируют в рамках европейских проектов GEMAS – GEOchemical Mapping of Agricultural Soil – и LUCAS – Land Use/Cover Area frame statistical Survey (Reimann et al., 2014; Toth et al., 2016; Clemens Reimann et al., 2018). В природных почвах формы нахождения ХЭ изучали существенно реже, особенно в каскадных почвенно-геохимических системах.

Субвертикальное и субгоризонтальное распределение веществ в почвах сопряженных элементарных ландшафтах – почвенно-геохимических катенах, определяет соответственно радиальную (R-анализ) и латеральную (L-анализ) структуру катен, которую в обобщенном виде описывают рядом геохимических коэффициентов (Глазовская, Касимов, 1987). Сопряженный RL-анализ радиального и латерального распределения ХЭ в зависимости от свойств и факторов окружающей среды отражает миграционную способность элементов (Глазовская, Касимов, 1987; Кошелева и др., 2002; Касимов, Геннадиев, 2005; Минкина и др., 2009; Sommer, Schlichting, 1997). Для объяснения перемещения и аккумуляции веществ в ландшафтах используют концепцию геохимических барьеров – участков суши, на которых на коротком расстоянии резко уменьшается интенсивность миграции химических элементов, сопровождающаяся накоплением их соединений в различных формах (Перельман, 1966; Касимов, Перельман, 1999).

В фоновых почвах таёжных ландшафтов детально изучена радиальная (Самонова 1998; Толпешта, 2010; Попова, 2010; Сосорова, 2012; Wenzel et al., 2001; Gronflaten, Steinnes, 2005; Huang, 2007) и латеральная (Никифорова, Безрукова, 1979; Кошелева и др., 2002; Семенков и др., 2016; Сосорова, 2012) дифференциация подвижных соединений Al, As, Cu, Co, Fe, Ni, Mn, Pb, Sr, Zn. Редки сопряженные исследования радиальной (RF-анализ) и латеральной (LF-анализ) дифференциации форм химических элементов (Семенков, 2016), позволяющие охарактеризовать фоновую ландшафтно-геохимическую структуру катен (Глазовская, Касимов, 1987).

Для фонового ландшафтно-геохимического мониторинга также важно понимание пространственной и сезонной изменчивости физико-химических свойств, содержания и распределения подвижных форм химических элементов. 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). Анализ сезонной изменчивости радиальной и латеральной дифференциации элементного состава почв 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.

**Материалы и методы исследования.** Объектом исследования является типичная для центральной части Восточно-Европейской равнины ландшафтно-геохимическая катена в фоновых южнотаежных ландшафтах южной части Валдайской возвышенности в пределах Центрально-Лесного заповедника. Катена располагается на юго-восточном пологом ( $<2^\circ$ ) склоне междуречья, имеет длину 187 метров, начинается на вершине холма с абсолютной высотой 265 м, пересекает склон и заканчивается в небольшой потяжине плоской террасовидной поверхности. Автономная позиция и выпуклый склон хорошо дренированного холма заняты хвойно-широколиственным лесом на дерново-палево-подзолистой почве. В трансэлювиальной аккумулятивной позиции подножия склона также находится хвойно-широколиственный лес на торфянисто-перегнойной подзолистой профильно-оглеенной почве. Аккумулятивный ландшафт заболоченной потяжины с временным водотоком занят хвойным лесом на торфянистой подзолистой профильно-оглеенной почве. На 4 точках в разных ландшафтных позициях катены отобрано 130 образцов почв из каждого генетического горизонта из разрезов, в том числе горизонт ао/Т и ВТ девятикратной повторности (суммарно 54 пробы), 16 – лесной подстилки и 87 – растений. В почвах определяли актуальную кислотность (величину рН), гранулометрический состав, содержание углерода органических веществ (Сорг) и CO<sub>2</sub> карбонатов, валовое содержание As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, Ti, U, W, Zn, Zr. Для выделения обменных (F1), комплексных (F2), сорбированных гидроксидами Fe и Mn форм элементов использована параллельная схема экстракции (Соловьев, 1989, Minkina, 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 HNO<sub>3</sub> (1:10). Потенциальную подвижность (M2, M – от англ. «mobility») рассчитывали как отношение содержания непрочно связанных соединений (F1+F2+F3) к валовому содержанию (Tyler, 2004;

Bolan et al., 2014; Li et al., 2019; Palleiro et al., 2016). Биологическую подвижность или биодоступность (M1) рассчитывали как отношение содержания потенциально доступных для растений форм соединений (F1+F2) к валовому содержанию. 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, Zr в почвах, растениях и почвенных вытяжках определено масс-спектрометрическим и атомно-эмиссионным методами с индуктивно связанной плазмой во Всероссийском институте анализа 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). Также анализировали холостые растворы и 5% переэкстранных проб.

**Научная новизна и практическая значимость работы.** Впервые для почвенно-геохимической катены исследованы валовые концентрации и содержание трех подвижных форм широкого спектра элементов в разные сезоны года. В работе решены важные для геохимии ландшафтов задачи: охарактеризованы уровни содержания форм элементов в фоновой для Московского региона почвенно-геохимической катене; оценено влияние изменчивости условий миграции на радиальную и латеральную дифференциацию форм нахождения и подвижности элементов; 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 имени 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.

**Личный вклад соискателя.** Автор участвовал в постановке цели и задачи исследования, полевых работах, описал почвы, отбирал пробы, выполнил значительную часть химико-

аналитических работ (измерял рН, зольность, содержание органического углерода и CO<sub>2</sub> карбонатов, подготовил все почвенные вытяжки), провел литературный обзор и подготовил иллюстративный материал.

#### **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, входящих в перечень ВАК, 4 статьи в сборниках трудов конференции. Сделано 3 доклада на международных конференциях и 5 – на всероссийских.

**Благодарности.** Автор благодарен научному руководителю академику Н.С. Касимову за ценные указания и помощь в работе; И.Н. Семенкову за содействие в сборе полевых материалов, помощь при выполнении химико-аналитических работ, 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 и Л.В. Добрыдневой за консультации при выполнении химико-аналитических работ; сотрудникам Всероссийского института минерального сырья имени Н.М. Федоровского за определение содержаний элементов 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.

## Глава 1. Подвижные формы элементов в почвах фоновых таежных ландшафтов

Форма нахождения, или фракция химических элементов в почвах – это совокупность атомов или ионов химических элементов, обладающих в почве близкой степенью подвижности. Их изучают, переводя ионы элементов в раствор с использованием реагентов, которые преимущественно воздействуют на определенный почвенный компонент (Зырин, 1976, 1979, Ладонин, 2002).

В твердой фазе почв (рисунок 1.1) присутствуют две группы соединений химических элементов: *непрочно связанные*, то есть удерживаемые на поверхности почвенных частиц органическими и минеральными компонентами в обменном и специфически сорбированном состоянии, и *прочно связанные* – закрепленные в структурах первичных и вторичных минералов, в составе трудно растворимых солей и устойчивых органических и органо-минеральных соединений. Первая группа включает водорастворимые, обменные и специфически сорбированные соединения, условно называемые «подвижными». Прочно удерживаемые фазами носителями соединения включают органо-минеральные, связанные с (гидр)оксидами Fe и Mn, входящие в кристаллические решетки устойчивых минералов (Минкина и др., 2008). Формы элементов, с трудом переходящие в раствор, практически не участвуют в физико-химической миграции, а только в механической, поэтому в геохимии ландшафтов наиболее часто исследуют подвижные соединения. Именно эти непрочно связанные соединения элементов в основном изучены в настоящем исследовании.

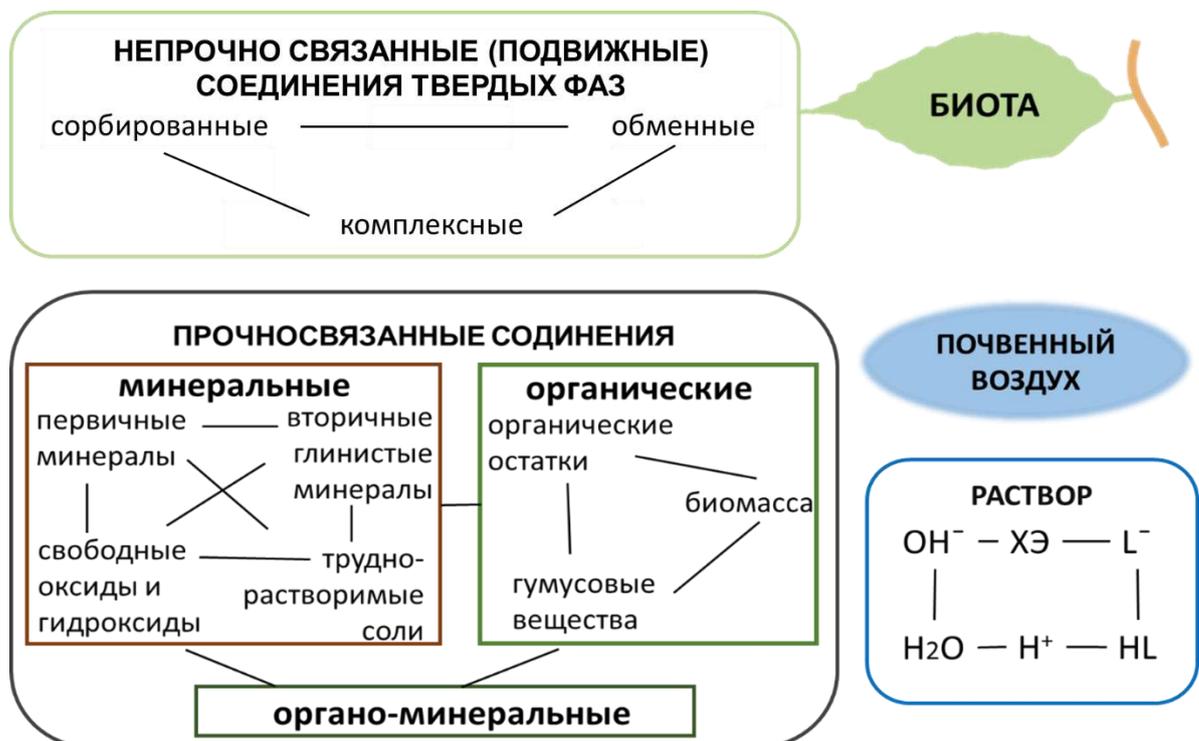


Рисунок 1.1. Система химических элементов почвы по Г.В. Мотузовой (2009)

Наиболее доступные для растений соединения (F1) – способные к обмену ионы почвенного поглощающего комплекса, рыхлосвязанные соединения легко- и среднерастворимых солей, входят в состав непрочных фракций и комплексов, представлены в почвах водорастворимыми и обменными формами (Ладонин, 2006). Обменными называют катионы, которые удерживаются почвой за счёт электростатических сил и могут быть замещены эквивалентным количеством катионов из растворов нейтральных солей. Это наименее прочно удерживаемые почвой ионы ХЭ (Пляскина, Ладонин, 2005).

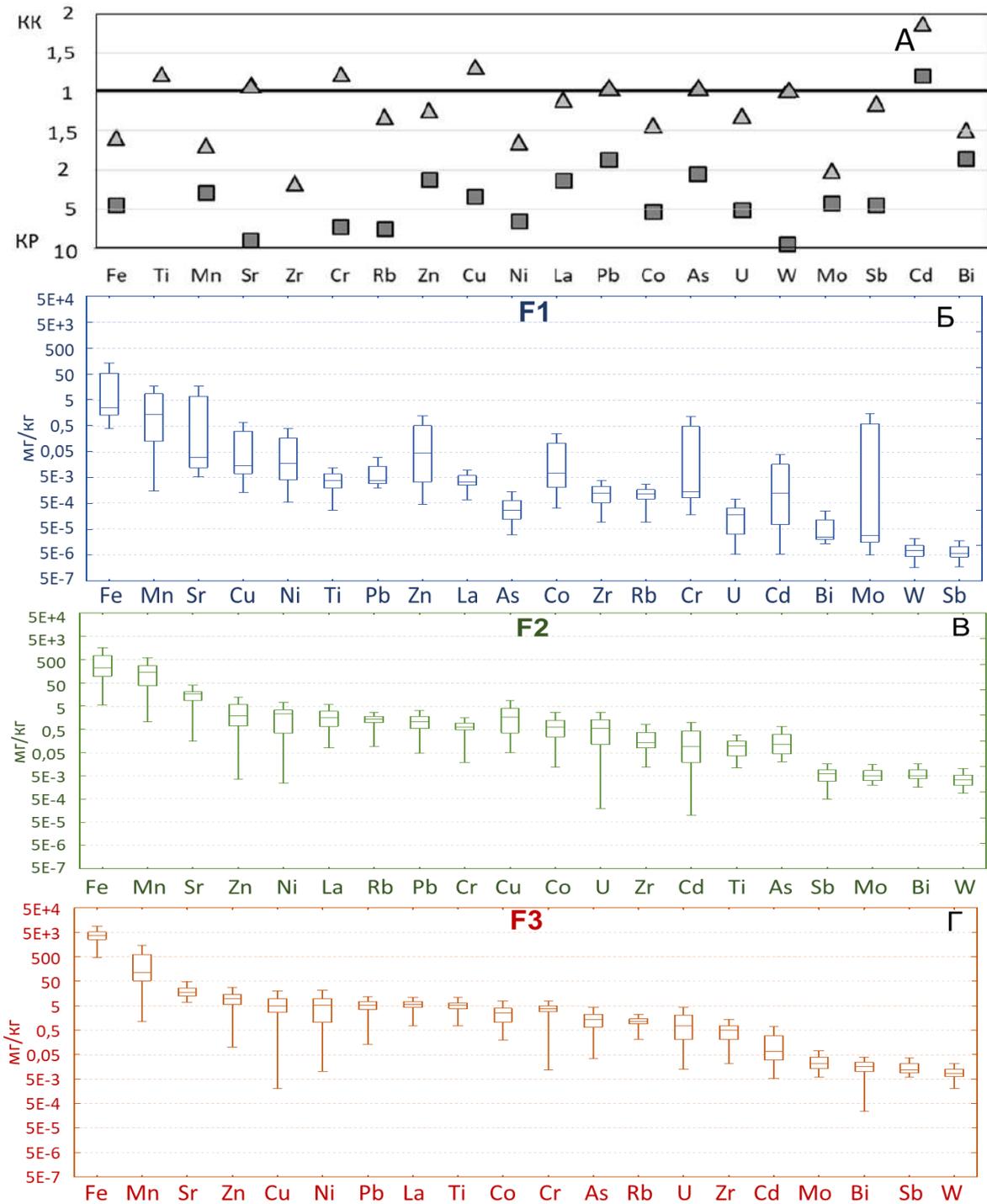
Комплексные соединения (F2) элементов образуют в почвах гумусовые и дикарбоновые кислоты. Эти соединения не преодолевают клеточную мембрану корневой системы (Хентов, Семченко, Шачнева, 2017), поэтому представляют запас потенциально доступных для растений элементов. Биота усваивает их лишь после частичного или полного разрушения.

Сорбированные оксидами/гидроксидами Fe и Mn формы соединений элементов (F3) прочно связаны с фазами-носителями и также участвуют в миграции и биологическом поглощении только после разрушения (Пляскина, Ладонин, 2005). Наиболее легко восстанавливаемую часть связанных с Fe и Mn элементов составляют соединения, покрывающие плёнкой минеральные частицы (Глазовская, 1983). Среди них доминируют специфически сорбированные формы (70–90% от количества непрочных соединений), которые можно рассматривать как промежуточные, переходные к прочносвязанным соединениям (Минкина, 2008).

### **1.1 Уровни содержания**

Текстурно-дифференцированные почвы таежных ландшафтов Восточно-Европейской равнины в верхней части профиля имеют кислую реакцию среды, для них характерно резкое снижение органического углерода с глубиной и элювиально-иллювиальное распределение илистой фракции. Биологический круговорот в этой зоне характеризуется слабым биологическим поглощением и обуславливает кислотное выщелачивание. Развитие ландшафтов на карбонатной морене приводит к увеличению видоразнообразия и биологической продуктивности (Перельман, Касимов, 1999). Влияние этих факторов отражается на микролементном составе почв.

*Валовое содержание* Cd, Cu, Cr, Ti, Sr, Pb, As, W, La, Sb, Zn, U, Rb, Co, Bi, Fe, Ni, Mn, Mo в таёжных почвах России соответствует околочларковому уровню ( $2 > \text{КК} > 0,5$ , где КК – это кларк концентрации, КР – кларк рассеяния), только для Zr  $\text{КР} > 2$ . В сельскохозяйственных почвах северной Европы (Reimann et al., 2018) кларковым уровням соответствуют концентрации Cd, Bi, Pb, As, а содержание большинства элементов (Zn, La, Mn, Cu, Mo, Fe, Sb, U, Co, Ni, Cr, Rb, Sr, W) ниже кларкового уровня (рисунок 1.2А), поскольку в работе проводилась определение псевдоваловых форм элементов.



**Рисунок 1.2.** Диапазоны содержаний форм химических элементов в почвах таёжной зоны; элементы расположены по уменьшению медианного значения содержания их форм в таёжных почвах России; цвет – формы элементов; **А** – валовое содержание в дерново-подзолистых и подзолистых почвах южнотаежных ландшафтов России (Маданов, 1972; Касимов, Самонова, Кошелева, 2005; Дьяченко, Матасова, 2009; Григорьев, 2009; Самонова и др., 2011; Семенков и др., 2016; 2019), сельскохозяйственные почвы северной Европы (Reimann et al., 2018); Валовые содержания нормированы на кларки верхней части континентальной земной коры (Rudnick, Gao, 2014); **Б** – F1 формы (Журавлева, 1978; Белицына, Черепова, 1980; Решетникова, 1990; Huang, 2007; Караванова, Малинина, 2009; Сосорова и др., 2012; Motuzova, 2014; Семенков, Касимов, Терская, 2016; 2019); **В** – F2 (Самонова, 1998; Решетников, 1990; Семенков, и др., 2016; 2019; Gronflaten, Steinnes, 2005); **Г** – F3 формы (Маданов, 1972; Степанова, 1976; Белицына, Черепова, 1980; Решетникова, 1990; Мажайский, 2003; Касимов и др., 2005; Самонова и др., 2011; Толпешта, Соколова, 2010; 2018; Семенков и др., 2016; 2019); Линия – медиана, ящик – интерквартильный размах (25–75%), усы – диапазон значений после исключения выбросов

По медианному значению валового содержания в таежных почвах России рассматриваемые элементы образуют ряд, соответствующий кларковому ряду концентраций для верхней части континентальной земной коры (рисунок 1.2А). По вариабельности валового содержания в гумусовых горизонтах дерново-подзолистых почв Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин (Samonova et al., 2018, Семенков и др., 2016, 2019) элементы образуют следующий ряд (подстрочный индекс – коэффициент вариации, %): Mn<sub>162</sub> W<sub>131</sub> Zn<sub>116</sub>, Pb<sub>115</sub> Co<sub>87</sub> Ni<sub>72</sub> As<sub>66</sub> Cu<sub>57</sub>, U<sub>52</sub>, La<sub>49</sub>, Fe<sub>47</sub> Ti<sub>42</sub>, Cr<sub>41</sub>, Sb<sub>38</sub>, Rb Sr<sub>34</sub> Cd<sub>28</sub>, Zr<sub>25</sub> Mo<sub>20</sub> Bi<sub>9</sub>. Вариабельность валового содержания элементов, в целом, ниже, чем их подвижных форм.

*Обменные соединения* химических элементов (F1) наименее прочно удерживаются фазами носителями (методики экстракции подвижных форм элементов описаны в главе 3), поэтому характеризуются широким диапазоном содержаний (рисунок 1.2Б). Ряд элементов, ранжированный по медианному значению концентрации F1 формы соединений элементов в гумусовом горизонте дерново-подзолистых почв Тобольского материка (Семенков, Касимов, Терская, 2019), отличается от ряда валовых форм (рисунок 1.2А) повышенным содержанием Sr, Cu и Ni и пониженным – Ti и Zr, доля которых максимальна в прочносвязанных соединениях. По сравнению с дерново-подзолистыми и подзолистыми почвам на покровных и моренных суглинках (Семенков и др., 2016), в глееземах и дерновых почвах запада Тобольского материка из-за глеевой обстановки, благоприятной для выноса подвижных соединений, и формирования на перемытых древнеаллювиальных суглинках с высокой долей физического песка, содержится в 10–30 раз меньше обменных соединений Co, Cu, Mn, Ni, Pb и Zn.

Интенсивная миграция обменных соединений элементов в почвах таёжных ландшафтов объясняет высокую вариабельность их содержания в почвах. Для всех исследуемых элементов вариабельность содержания F1 выше 50%, превышая у большинства из них 100% (подстрочный индекс – коэффициент вариации, %): Cu<sub>369</sub> Pb<sub>364</sub> Cd<sub>350</sub> Mn<sub>326</sub> Zn<sub>325</sub> Co<sub>183</sub> Fe<sub>177</sub> Mo<sub>176</sub> Sr<sub>163</sub> Cr<sub>157</sub> Ni<sub>149</sub> Bi<sub>131</sub> U<sub>125</sub> Sb<sub>106</sub> As<sub>98</sub> Zr Ti<sub>70</sub> W<sub>62</sub> Rb<sub>60</sub> La<sub>5</sub>. Низкое содержание этой формы элементов в почвах (Журавлева, 1978; Белицына, Черепова, 1980; Решетникова, 1990; Караванова, Малинина, 2009; Сосорова и др., 2012; Motuzova, 2014; Семенков и др., 2016, 2019; Huang, 2007) также обуславливает их высокую вариабельность в почвах.

*Содержание комплексных соединений элементов (F2)* по сравнению с обменными в почвах таёжных ландшафтов значительно выше (рисунок 1.2В). Комплексные соединения играют высокую роль в миграции Zn и Rb. В этой форме, по сравнению с рядом обменных форм элементов, в почвах ещё в меньшем количестве присутствует Ti и Zr. По вариабельности содержания в почвах таёжных ландшафтов органоминеральные соединения образуют следующий ряд (подстрочный индекс – коэффициенты вариации, %): Zn<sub>236</sub> Fe<sub>178</sub> Mn<sub>166</sub> Cd<sub>151</sub>

Cu<sub>141</sub> U<sub>137</sub> Pb<sub>127</sub> As<sub>121</sub> Zr<sub>95</sub> Co<sub>93</sub> Bi<sub>90</sub> La<sub>86</sub> Ni<sub>83</sub> Sr<sub>82</sub> Ti<sub>81</sub> Sb<sub>80</sub> W<sub>68</sub> Mo<sub>57</sub> Rb<sub>54</sub> Cr<sub>51</sub>. Несмотря на высокую вариабельность (>50%) содержания F2 форм соединений всех исследуемых элементов, в целом, их C<sub>v</sub> ниже, чем у F1, что связано с более прочным удерживанием твердой фазой и меньшей зависимостью от быстро меняющихся свойств почв. Как и для обменных соединений наибольшая вариабельность характерна для катионогенных элементов (Zn, Fe, Mn, Cd, Cu), в наибольшей степени доступных для растений тайги, что подтверждает важную роль биологического круговорота в их миграции.

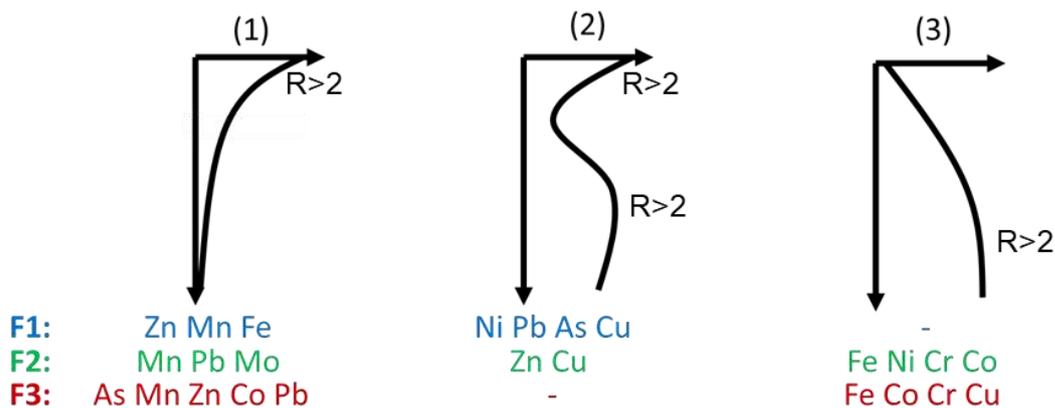
*Сорбированные формы* (F3) из трёх изученных обладают наименьшим размахом содержаний (рисунок 1.2Г). Ряд F3 форм отличается от ряда валовых форм (рисунок 1.2А) повышенным содержанием соединений Zn, Cu, Ni и Pb. Вариабельность содержания F3 форм элементов снижается в ряду (подстрочный индекс – коэффициенты вариации, %): Mn<sub>214</sub> Zn<sub>208</sub> Cd<sub>179</sub> U<sub>149</sub> Co<sub>147</sub> Ni<sub>109</sub> Pb Sb<sub>94</sub> Cu<sub>92</sub> Mo As<sub>80</sub> Sr<sub>79</sub> Fe<sub>70</sub> Zr<sub>68</sub> Rb W<sub>60</sub> Bi<sub>53</sub> Cr<sub>48</sub> Ti<sub>45</sub> La<sub>43</sub>. Высокая вариабельность содержания многих элементов связана с тем, что основная их часть в почвах входит не в решетки минералов, а в поверхностные пленки (Водяницкий, 2008), что приводит к их интенсивному вымыванию из профиля в условиях гумидного климата. Например, концентрация обладающего наибольшей вариабельностью F3 форм Mn в составе кутан таёжных почв превышает концентрацию элемента в самих минералах в 4–15 раз. Доля Cu в оксидных железистых пленках почти вдвое выше, чем в решетках минералов (Караева, 1970; Глазовская, 1983; Водяницкий 2008, 2010).

### 1.2 Радиальное распределение

Распределение форм химических элементов в горизонтах почв, выраженное с помощью коэффициентов радиальной дифференциации отражает радиальную почвенно-геохимическую структуру. Нами рассмотрены следующие типы распределения форм химических элементов (приняты по Б.Г. Розанову, 2004): 1 – *аккумулятивный* – с максимальной концентрацией элемента в гумусовом горизонте; 2 – *аккумулятивно-элювиально-иллювиальный* – с выносом из элювиального горизонта и аккумуляцией в гумусовом и иллювиальном горизонтах; 3 – *элювиальный* – вынос из верхней части профиля с монотонным увеличением концентрации в средней и нижней частях профиля; 4 – *грунтово-аккумулятивный* – с остаточным накоплением в почвообразующей породе. Типы радиального распределения элементов в профиле в значительной мере определяют геохимические барьеры, формирующиеся в генетических горизонтах почв. В лесных почвах тайги это биогеохимический барьер в органоминеральном (А) горизонте, сорбционный в элювиальном (ЕL) и иллювиальном (ВТ) горизонтах, глеевый и реже карбонатный барьеры в почвообразующей породе С (Касимов, Перельман, 1999).

**Аккумулятивный** тип радиального распределения в дерновых почвах Архангельской области (Попова, 2010) и дерново-подзолистых почвах Валдайской (Белицына, 1980), Смоленско-Московской возвышенности (Самонова, 1998), Тобольского материка (Семенков и др., 2019), Западного Забайкалья (Сосорова, 2012) и Полистовского заповедника (Motuzova, 2014) имеют *F1 формы* Zn, Mn, Fe (рисунок 1.3). Такое распределение Zn в дерновой почве природных ландшафтов Архангельской области обусловлено внутрипрофильной миграцией (Попова, 2010). В подстилке ельника кисличного высокое содержание подвижных соединений Zn (50 мг/кг) свидетельствует о биологической аккумуляции элемента растительностью (Белицына, 1980).

*F2 формы* соединений Mn, Pb, Mo также накапливаются в верхней части профиля дерново-подзолистых почв южной Норвегии (Gronflaten, Steinnes, 2005), тайги Салаира (Степанова, 1976), Тобольского материка (Семенков, 2016) и Смоленско-Московской возвышенности (Самонова, 1998). Распределение Mn и Pb связано с элементным составом растений, что в лесных ландшафтах южной Норвегии подтверждает прямая корреляционная связь элементного состава подстилки и органов растений (Gronflaten, Steinnes, 2005), а также аккумуляция элементов на биогеохимическом барьере дерново-подзолистых почв (Самонова, 1998, Семенков и др., 2016). Закрепление в верхней части почв органоминеральных соединений Mo в дерново-подзолистых почвах Салаира объясняется высокой подвижностью гумусовых веществ, поскольку при разложении растительных остатков в кислой среде главным образом образуются фульваты (Степанова, 1976).



**Рисунок 1.3.** Типы радиального распределения элементов в дерново-подзолистых почвах: (1) аккумулятивное, (2) аккумулятивное элювиально-иллювиальное, (3) элювиальное по литературным данным (Шарова, 1970; Степанова, 1976; Журавлева, 1978а; Белицына, 1980; Зонн, 1982; Самонова, 1998; Скляр, Тонконогов, 1999; Кошелева и др., 2002; Толпешта, Соколова, 2010; Попова, 2010; Сосорова, 2012; Motuzova, 2014; Семенков, 2016; Семенков и др., 2019; Adriano, 2001; Wenzel et al., 2001; Gronflaten, Steinnes, 2005; Huang, 2007)

*F3 формы* соединений As, Mn, Zn, Co, Pb имеют аккумулятивное распределение в дерново-подзолистых почвах Тобольского материка (Семенков и др., 2016), поскольку сорбированный

Pb накапливается на биогеохимическом барьере в гумусовом горизонте, рассеиваясь в средней и нижней частях профиля (Семенков и др., 2016).

*Аккумулятивный элювиально-иллювиальный* тип радиального распределения в дерново-подзолистых почвах свойственен *F1 формам* соединений Ni, Pb, As и Cu (Сосорова, 2012; Motuzova, 2014; Huang, 2007). Концентрация обменной формы Cu в дерново-подзолистых почвах возрастает с глубиной, так как в иллювиальном горизонте повышено содержание тонкодисперсных частиц, с которыми у обменных соединений Cu наблюдается тесная корреляция (Журавлева, 1978а).

*F2 формы* соединений Zn и Cu (Степанова, 1976; Попова, 2010) имеют близкий к аккумулятивному элювиально-иллювиальному тип распределения за счет закрепления органоминеральных форм Cu на биогеохимическом барьере в верхней высокогумусированной части профиля (Степанова, 1976).

Для *F3 форм* соединений элементов в дерново-подзолистых почвах аккумулятивный элювиально-иллювиальный тип распределения не выявлен, так как их накопление в средней части профиля обусловлено наличием в элювиальном горизонте Fe-Mn конкреций.

*Элювиальный* тип радиального распределения *F1 форм* соединений элементов не характерен дерново-подзолистым почвам, так как такие вещества доступны для растений и накапливаются в составе органоминеральных комплексов в верхней части профиля.

Содержание *F2 форм* соединений Fe, Ni, Cr, Co (Самонова, 1998) и *F3 форм* Fe, Co, Cr, Cu (Зонн, 1982; Скляр, Шарова, 1970; Тонконогов, 1999; Кошелева и др., 2002; Толпешта, Соколова, 2010; Семенков и др., 2019) увеличивается в нижней части профиля почв. Концентрация оксидов и гидроксидов Fe в ризосфере уменьшается за счет более активных процессов растворения и мобилизации в условиях более кислой среды и большего количества органических лигандов (Соколова и др., 2018). Накопление подвижного Fe в иллювиальном горизонте также отмечено для дерново-сильноподзолистых почв Иркутско-Черемховской равнины (Кузьмин, 1968). Легкоподвижные соединения Cr с растворённым органическим веществом выносятся из верхней части профиля (Кошелева и др., 2002). Увеличение в нижней части профиля почв содержания *F3 форм* соединений Cu связано с её сорбцией оксидами Fe и Mn и глинистыми минералами (Журавлева, 1978; Adriano, 2001).

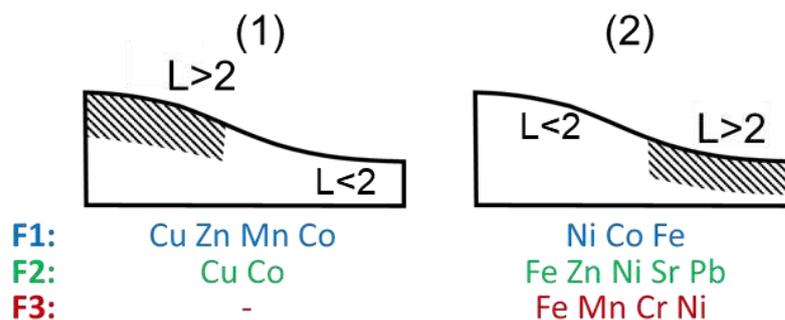
### 1.3 Латеральное распределение

В процессах почвообразования важную роль играет латеральная (горизонтальная) миграция веществ в катенах, что необходимо учитывать при изучении влияния свойств почв на распределение элементов при так называемом L-анализе (Геннадиев, Касимов, 2004). Почвенно-геохимические катены (ПГК) разнообразны, и их дифференциация тесно связана со всей совокупностью физико-географических условий. М.А. Глазовская (1973) связала

основные типы катен с почвенно-геохимическими полями, располагающимися в соответствии с зонами увлажнения. В монолитных лесоболотных катенах южнотаёжных ландшафтов Полесья с почвенно-грунтовым типом геохимических сопряжений по М.А. Глазовской (2002) от элювиальных ландшафтов Н-класса к аккумулятивным Н-Fe-класса последовательно ослабляется гуматогенез, снижается скорость БИК и усиливается детритогенез (Авессаломова, 2012). Рост продуктивности при поступлении биологически важных элементов в нижние звенья катен увеличивает самоорганизацию геосистемы, а ослабление разложения и незамкнутость БИКа – уменьшают (Перельмана, 1995). В аккумулятивных ландшафтах нижних частей склонов формируется барьерная зона, на накопление элементов в которой из-за колебания уровня грунтовых вод влияют как восходящие, так и нисходящие потоки веществ (Sommer, Schlichting, 1997). На биогеохимических барьерах в органогенных горизонтах при накоплении мортмассы происходит биогенная аккумуляция элементов (Авессаломова, 2007). В таёжных катенах наиболее часто описан латеральный сорбционно-биогеохимический барьер (Авессаломова, Микляева, 1997; Самонова и др., 2011; Семенков и др., 2016, 2019). Таким образом, латеральная геохимическая структура таёжных ландшафтов зависит от контрастности смены условий субгоризонтальной миграции веществ в каскадных системах (Касимов и др., 2012), определяемой наличием сорбционного, биогеохимического и глеевого барьеров. В монолитных почвенно-геохимических катенах в зависимости от распределения химических элементов в сопряженных элювиальных и подчиненных позициях выделены следующие варианты латеральной дифференциации (Геннадиев, Касимов, 2004): 1 – *транзитный* – с обеднением подчиненных почв относительно элювиальных; 2 – *аккумулятивный* – с накоплением элемента в почвах подчиненных ландшафтов; 3 – *монотонный* – с равномерным распределением в ландшафтах.

**Транзитная** латеральная дифференциация (рисунок 1.4) в почвах Мезенско-Вычегодской равнины и Тобольского материка характерна для *F1 форм* соединений Cu, Zn, Mn, Co и *F2 форм* Cu и Co (Семенков и др., 2016, 2019). Такое распределение F1 форм Mn в подзолистых остаточных карбонатных почвах объясняется повышенной гумусированностью.

**Аккумулятивная** латеральная дифференциация характерна для *F1 формы* соединений Ni, Co, Fe из-за накопления на биогеохимическом барьере (Семенков и др., 2019). Участки накопления Fe расположены на окраинах депрессий или переувлажненных подножиях склонов, поскольку на распределение соединений элемента влияют как восходящие, так и нисходящие потоки веществ (Sommer, Schlichting, 1997).



**Рисунок 1.4.** Латеральная дифференциация элементов в дерново-подзолистых почвах (Геннадиев, Касимов, 2004): (1) транзитная и (2) аккумулятивная (по данным Ковда, 1985; Касимов и др., 2002; Семенков и др., 2019; Sommer, Schlichting, 1997)

По немногочисленным данным, на биогеохимическом барьере подчиненных ландшафтов накапливаются *F2 формы* соединений Fe, Zn, Ni, Sr и Pb (Ковда, 1985; Семенков и др., 2019). Соединения Fe, способные образовывать растворимые комплексы с гумусовыми кислотами, выносятся из автономных ландшафтов и накапливаются в подчиненных (Ковда, 1985). В таёжных катенах юго-западной части Мезенско-Вычегодской равнины и западной части Тобольского материка подвижные соединения Zn аккумулируются на латеральном биогеохимическом барьере в почвах подчиненных ландшафтов за счет захвата растениями или консервации в мортмассе (Семенков и др., 2016).

*F3 формы* соединений Sr и Ni имеют аккумулятивное латеральное распределение в ландшафтах тайги (Касимов и др., 2003; Семенков и др., 2019), что объясняется способностью Fe и Mn в этих позициях сорбировать подвижные соединения многих элементов (Касимов и др., 2002), в то время как сорбционно-биогеохимический барьер в подчинённых почвах препятствует выносу. Кроме того, накоплению Mn и Sr способствует переувлажнение почв (Касимов и др., 2003).

Большинство исследований *подвижности* химических элементов направлено на определение связей этого показателя с химическими свойствами почв (Перельман, Касимов, 1999; Mikutta, Kretschmar, 2011; Violante et al., 2012; Caporale, Violante, 2015; Kabata-Pendias, Szteke, 2015 и др.) и сорбционно-десорбционными процессами (Sparks, 2003; Borda, Sparks, 2008).

Радиальное и латеральное распределение подвижности рассматривалось в единичных исследованиях (Семенков и др., 2016; 2019), которые показали, что подвижность Pb, Mn, Co, Cu, Zn, Fe, Sr, Zn максимальна в органогенных горизонтах текстурно-дифференцированных почв таежных катен на Мезенско-Вычегодской равнине (Семенков и др., 2016) и серогумусовых оподзоленных почвах Тобольского материка (Семенков и др., 2019). Подвижный Sr выносятся из лювиальных горизонтов почв юго-западной Польши (Jeske, 2013).

В латеральном распределении подвижность Fe, Pb, Cr, Mn, Zn, Co, Cu снижается в глееземах подчиненных ландшафтов Тобольского материка, что авторы связывают с выносом подвижных соединений в глеевой среде (Семенков и др., 2019). А подвижность Fe, Mn, Pb, Ni возрастает в горизонте G глееземов из-за внутрпочвенной миграции веществ из дерновых и (дерново-) подзолистых почв междуречья и склонов (Семенков и др., 2016, 2019).

Таким образом, распределение подвижных форм соединений ХЭ в таёжных ландшафтах в большей степени связано с кислотностью почв, увлажненностью, количеством органического вещества и приуроченности к определенному ландшафту. Кислая среда почв приводит к увеличению содержания подвижных форм соединений Zn и Cr. Подвижные Mn, Co, Sr, Zn накапливаются в органогенных горизонтах переувлажненных почв подчиненной позиции. Преимущественно поверхностно-аккумулятивный тип распределения характерен для обменных форм соединений Zn, Co, Cr, Ni, элювиально-иллювиальный тип – Cu. С глубиной содержание органоминеральных соединений Zn увеличивается, а Cu – незначительно уменьшается. Сорбированные гидроксидами Fe и Mn соединения Co накапливаются в горизонтах В и С, а As – в верхних горизонтах почв. В дерново-подзолистых почвах все изучаемые подвижные формы соединений Cu характеризуются относительно равномерным распределением.

## Глава 2. Физико-географическая характеристика южной части Валдайской возвышенности

Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник площадью 705 км<sup>2</sup> расположен в западной части Европейской России, в Тверской области (рисунок 2.1). Для обеспечения функций биосферного резервата его зонирование произведено на основе рекомендаций Севильской стратегии 1995 г. Ядро заповедника составляет 2,4 км<sup>2</sup> и окаймлено по периметру охранной зоной (зона рационального природопользования и хозяйствования).

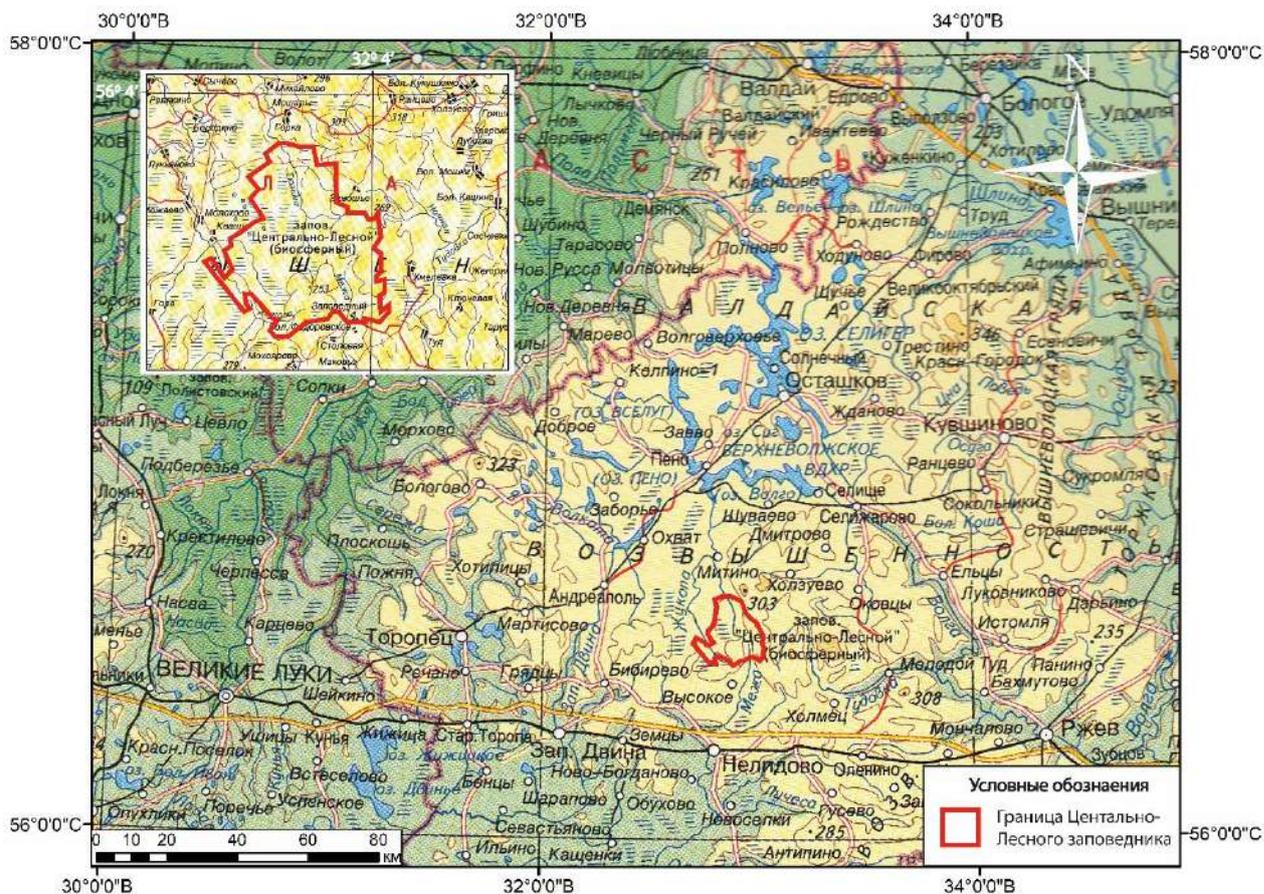


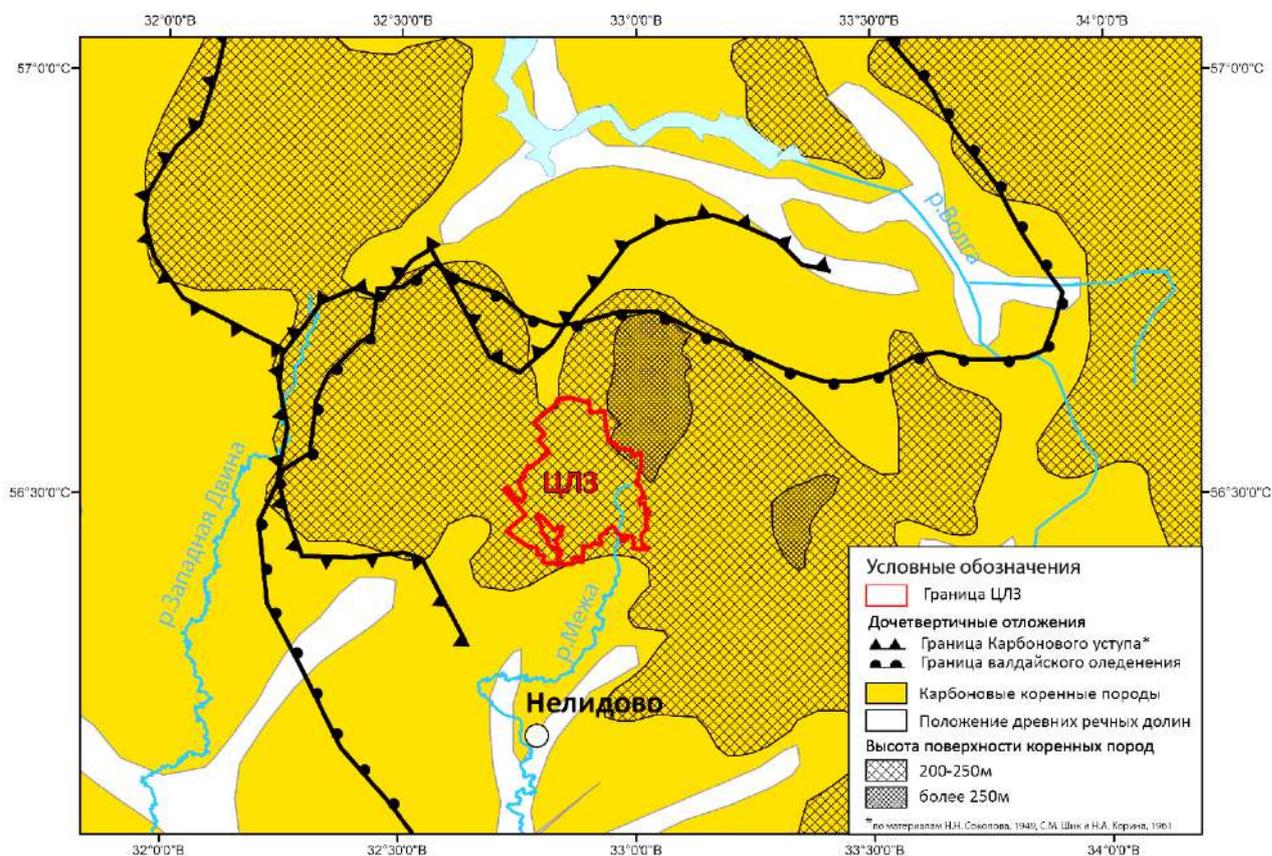
Рисунок 2.1 Схема расположения Центрально-Лесного заповедника.

### 2.1 Рельеф и почвообразующие породы

В тектоническом отношении южная часть Валдайской возвышенности расположена в пределах западного крыла Московской синеклизы. Доломиты, известняки и мергели серпуховского яруса верхнего карбона мощностью до 80 м (Лехт, Гудкова, 1986) сменяются породами фаменского яруса верхнего девона (Миняев, Конечная, 1973). Центрально-Лесной заповедник расположен в пределах Нелидово-Оршанского мегаблока, начавшего подниматься (суммарно на 100–200 м) с позднего палеогена (Бабак и др., 1984).

В геоморфологическом отношении территория заповедника располагается в слабо расчлененной области ледниково-аккумулятивного рельефа центральной части Восточно-Европейской равнины и относится к южной части Валдайской возвышенности (рисунок 2.2) –

крупнохолмистой гряды с абсолютными высотами 250–300 м. Широко развиты моренные гряды, гляциодепрессии и иные ледниковые комплексы (озы, ложбины стока). В наиболее возвышенных северо-восточной и восточной частях заповедника абсолютная высота достигает 270 м, в пониженной северо-западной – 220 м (Пузаченко и др., 2008). Центральная часть заповедника представляет собой плоскую равнину с слабовыраженным водоразделом.



**Рисунок 2.2.** Структура поверхности дочетвертичных отложений в районе Центрально-Лесного заповедника. Карта оцифрована по материалам (Пузаченко, Козлов, 2007). \*Граница карбонового уступа (Соколова, 1949; Шик, Корина, 1961)

В верховьях Волги продвижение четвертичных оледенений зависело от существовавшего в соответствующую эпоху рельефа. Карбоновое плато (верхняя структурная ступень Нелидово-Оршанского блока) подвергалось экзарационному воздействию днепровского, московского и окского оледенений, поэтому на нем мощность четвертичных отложений не более 15–20 м (Соколов, 1949) и превышает 50 м в областях развития крупных ледниковых массивов и гряд стадийных конечных морен (Пузаченко и др., 2008).

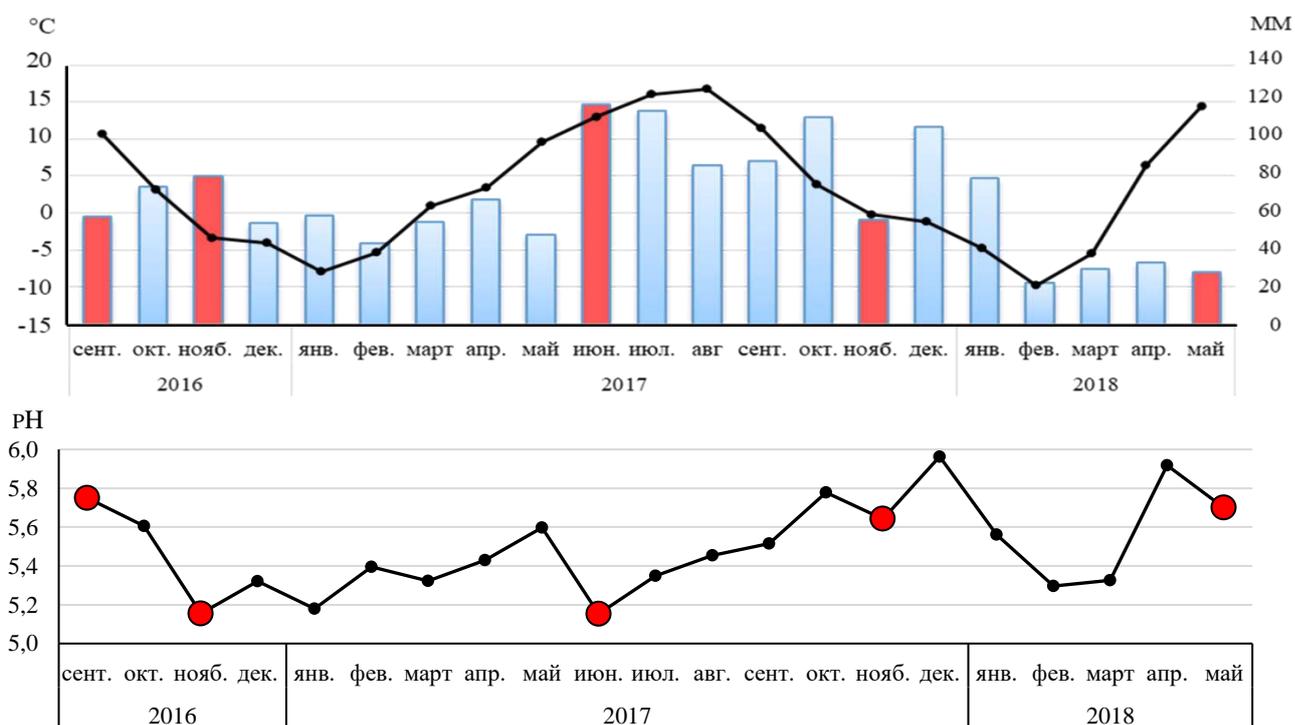
Территория заповедника покрывалась оледенениями в среднем (днепровское и московское) и позднем (валдайское) плейстоцене. Верхнюю часть осадочного чехла составляют моренные и водно-ледниковые отложения, покровные суглинки. На большей площади заповедника валдайская морена перекрыта водно-ледниковыми и покровными суглинками. В понижениях рельефа их замещают озерные глины. Иногда нижняя часть покровных суглинков имеет более

тяжелый состав и горизонтальную слоистость, что является признаками отложения в водной среде (Рельеф и стратиграфия, 1961; Пузаченко и др., 2008).

Наиболее распространенными почвообразующими породами являются легкие пылеватые покровные суглинки, подстилаемые средними или тяжелыми карбонатными моренными суглинками. Глубина кровли карбонатной морены может варьировать от 50 до 350 см (Карта..., 2013).

## 2.2 Климат

Район исследования находится в атлантико-континентальной области умеренного климата (Мячкова, 1983). В течение всего года преобладает западный перенос. Среднегодовая температура воздуха  $+3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Абсолютный максимум и минимум за последние 70 лет составил  $+34,4$  и  $-43,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно (официальный сайт Центрально-Лесного заповедника<sup>1</sup>). Безморозный период длится 114 дней. В начале третьей декады ноября образуется устойчивый снежный покров, который исчезает только в середине апреля. В конце февраля максимальная высота снежного покрова составляет 60 см.



**Рисунок 2.3.** Среднемесячные температуры воздуха и количество осадков (вверху) и значения величины рН атмосферных осадков (внизу) в период исследований выделены красным (составлено по данным ФГБУ "Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля")

Среднемесячные показатели температур и количества осадков, относительно среднемноголетних, характеризовались следующими особенностями в период выполнения полевых работ автором (рисунок 2.3): сентябрь 2016 г. отличался повышенными значениями

<sup>1</sup> URL: <https://www.clgz.ru/>

температур и обильными осадками; июнь 2017 г. – рекордно низкими температурами и большим количеством атмосферных осадков; ноябрь 2017 г. и май 2018 г. с высокими температурами и низким количеством осадков.

Среднее количество осадков (714 мм) значительно отличается год от года, понижаясь до 350 мм, в результате чего отдельные летние месяцы могут быть засушливы, или достигая 1200 мм. В результате, значительны колебания уровня грунтовых и поверхностных вод. Атмосферные осадки в Центрально-Лесном заповеднике в основном слабокислые. Наиболее часты осадки с рН в диапазоне от 5 до 6.

Среднее значение гидротермического коэффициента Селянинова, представляющий собой отношение суммы осадков (мм) за период с температурами выше +10°C, помноженную на 10, к сумме температур (°C) за то же время, составляет 1,62, что соответствует оптимуму для еловых лесов (Центрально-Лесной ..., 2007). В настоящее время большая часть территории заповедника заболачивается и образуются в основном верховые и мезотрофные болота.

### **2.3 Поверхностные и грунтовые воды**

Территория заповедника находится на Каспийско-Балтийском водоразделе Восточно-Европейской равнины, границе водосборов двух крупных рек – Волги и Западной Двины: Тудовка, Жукопа, Тюдма впадают в Волгу, а Межа относится к бассейну Западной Двины. Реки слабо врезаны, поэтому большая часть территории плохо дренирована (рисунок 2.4).

Почвенно-грунтовые воды на территории заповедника залегают близко к поверхности и даже в засушливые годы находятся не глубже 3,0–3,5 метров. На хорошо дренированных участках уровень грунтовых вод понижается до 10 м и более. Для плохо дренированных участков средний уровень грунтовых вод составляет 1.5 – 2 м, достигая 0 – 30 см на болотах. На гидрологический режим рек заповедника значительно влияют верховые болота, особенно наиболее крупные – Катин мох (3970 га) и Старосельский мох (617 га).

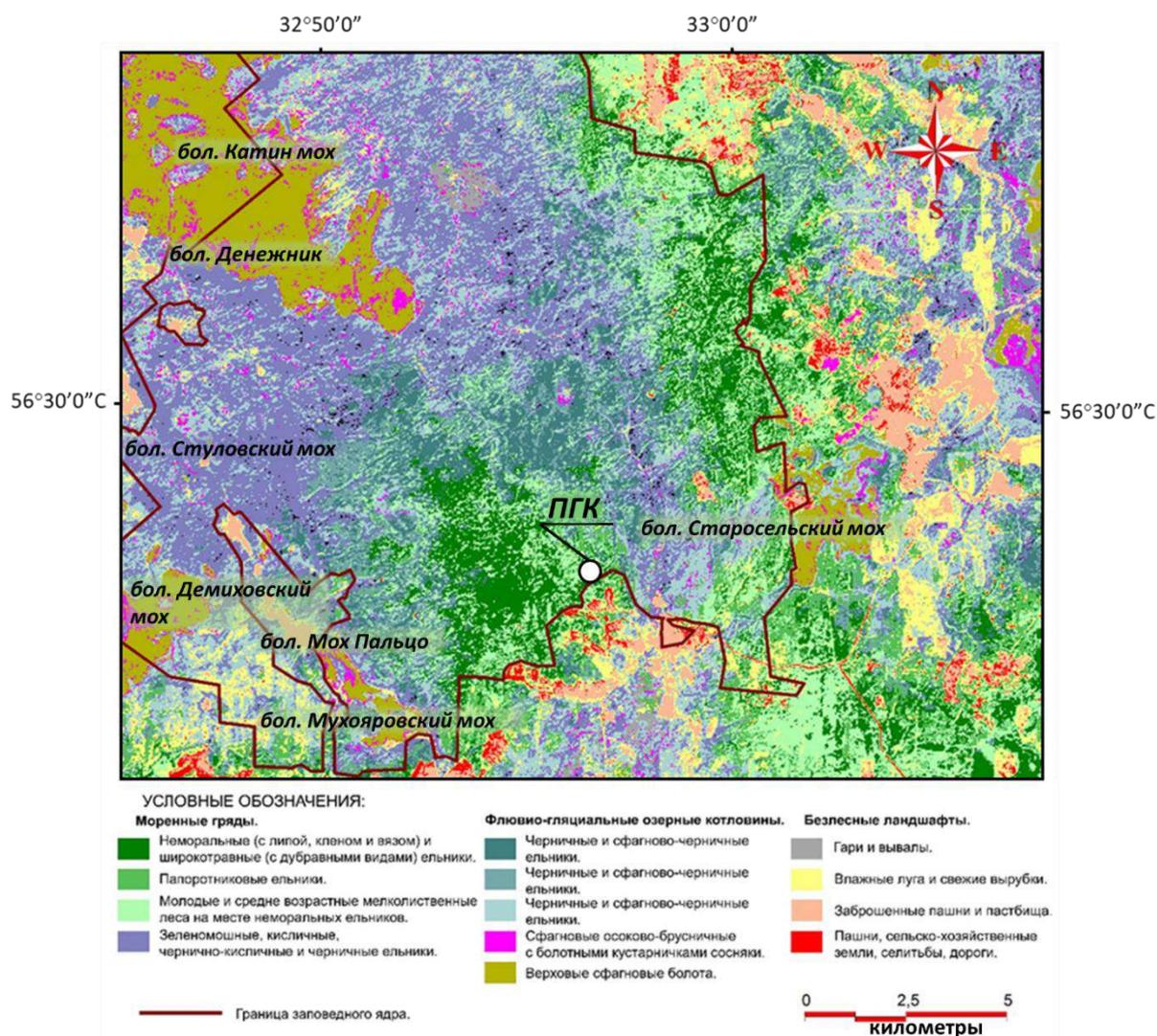
В зависимости от характера водного питания, хода минерализации и разложения органического вещества значительно колеблется и химический состав почвенно-грунтовых вод. Большое содержание растворенного Са (20 – 100 мг/л) наблюдается в верхних горизонтах вод южной части заповедника. Воды реки Межи имеют гидрокарбонатный состав, кислую или нейтральную реакцию среды (рН = 5,2–6,8) и обогащены Fe и Mn, особенно в марте, когда в результате снеготаяния промывается почвенная толща (Липград и др., 2008).

### **2.4 Растительный покров**

Растительность заповедника представляет собой крупный, мало нарушенный массив южнотаежных лесов, типичный для водораздельных пространств обширной области моренных ландшафтов Восточно-Европейской равнины. Е.С. Шапошников (1982) относит территорию Центрально-Лесного заповедника к особой переходной полосе между южной тайгой и

смешанными лесами на севере подзоны широколиственно-хвойных лесов (рисунок 2.4). В условиях слабой водопроницаемости почвообразующих пород и периодически избыточного атмосферного увлажнения на территории заповедника господствуют ненарушенные еловые леса южно-таёжного типа (47%). Зональные хвойно-широколиственные леса занимают 17% территории заповедника. Кроме еловых, коренными формациями являются сосновые сфагновые леса (10%), а также черноольшаники (1%) приуроченные к логам, долинам ручьёв и рек. Олиготрофные и осоково-мезотрофные болота занимают 4% площади заповедника (Кураева и др., 1999). Долины рек и ручьёв, а также ложбины временных водотоков заняты лесами травяно-болотной группы ассоциаций (ельники хвощёво-папоротниковые, папоротниково-таволговые, черноольхово-таволговые и страусниковые).

На юге заповедника с более расчлененным рельефом шире распространены еловые леса с заметным участием широколиственных пород, кустарников и неморальных трав. На плоских и слаборасчлененных участках междуречий еловые леса представлены типичными бореальными (чернично-)кисличными ельниками. Лучше дренированные позиции характеризуются значительным присутствием неморальных элементов в наземном и древесном ярусах и приобретают черты хвойно-широколиственных лесов. Слабо развитый подлесок составляют отдельные особи рябины обыкновенной *Sorbus aucuparia*, иногда встречаются шиповник иглистый *Rósa aciculáris* и волчье лыко *Dáphne mezéreum*. В травяно-кустарничковом ярусе преобладают кислица *Oxalis acetosella* и черника *Vaccinium myrtillus*, а также таежное мелкотравье (майник двулистный *Maianthemum bifolium*, ожика волосистая *Luzula pilosa* и бореальные кустарнички – линнея северная *Linnaea borealis*, брусника *Vaccinium vitis-idaea*). Зеленые мхи с небольшими включениями сфагновых мхов по понижениям мелких западин господствуют в напочвенном покрове (Лехт, Гудкова, 1986).



**Рисунок 2.4.** Схема ландшафтов ЦЛЗ (Архивные материалы заповедника). ПГК – почвенно-геохимическая катена

Для средних и нижних частей пологих склонов моренных гряд и холмов характерны ельники черничники, чернично-сфагновые, в депрессиях и слабопроточных понижениях замещаемые сообщества сфагново-осоковых и сфагновых ельников. 30–130-сантиметровая толща покровных суглинков, перекрывая песчаные отложения, создает благоприятные условия для произрастания ели и менее благоприятные – для сосны. Если покровные суглинки подстилаются сильно опесчаненными отложениями, то в травяном ярусе исчезают неморальные виды (Пузаченко, Козлов, 2007).

Для слабо дренированных плоских и слабонаклонных возвышенностей характерны массовые ветровалы, происходящие с периодичностью 20–30 лет, поэтому возраст коренных сообществ редко превышает 150–200 лет.

Растительный покров некоторых участков значительно преобразован человеком. В 60–70-ых годах прошлого века на территориях, прилегающих к заповеднику, и частично на его южной части производили рубки, на месте которых в настоящее время распространены в основном

средневозрастные елово-мелколиственные леса с преобладанием осины *Pópulus trémula*, березы бородавчатой *Betula verrucósa* и серой ольхи *Álnus incána*, занимающие примерно 40% площади заповедника (Васенев, Таргульян, 1995; Пузаченко, 2007).

## 2.5 Почвенный покров

В системе почвенно-экологического районирования Российской Федерации заповедник относится к Валдайскому округу Прибалтийской провинции. На его территории распространены дерново-мелко- и неглубоко-подзолистые почвы легко- и среднесуглинистые, а также дерново-подзолы иллювиально-железистые песчаные почвы на моренных, флювиогляциальных и озерно-ледниковых отложениях (Карта., 2013).

В пространственном распределении почв наблюдается значительная пестрота и строгая связь с комплексом условий: рельефа, почвообразующих пород и растительности (Карпачевский и др., 1998; Гончарук, 2007). Связанное с рельефом пространственное распределение почв отражает, прежде всего, особенности перераспределения влаги между элементами рельефа. При совершенно незначительном уклоне местности (менее 1°) рельеф значительно влияет на характер почвообразовательного процесса и пространственное распределение почв (Васенев, Таргульян, 1995; Карпачевский, Строганова, 1987). Почвы выпуклой и вогнутой частей склонов различаются выраженностью признаков гидроморфизма (Карпачевский, Строганова, 1987). Основные поверхности бассейнов 1-го порядка покрывают торфяно-серо- и подзолистые глееватые почвы, пологие склоны и бассейнов 2-го порядка – подзолистые. На покатых и крутых дренированных склонах находятся дерново-подзолистые почвы, буроземы гумусированные оподзоленные и контактно осветленные; в нижних частях дренированных склонов – дерново-подзолистые грунтово-оглеенные, перегнойно-подзолисто-грунтово-глеевые или торфяно-подзолисто-грунтово-глеевые. В долинах рек и ручьев образуются дерново-глеевые и аллювиальные дерново-луговые почвы.

На западе заповедника развиты болотные торфяные почвы различной мощности. В северной части преобладают (палево-) подзолистые потечно-гумусовые грунтово-оглеенные, поверхностно- или контактно-осветленные почвы. Северо-восточный участок покрывают различные варианты дерново-подзолистых почв. Центр заповедника занимают болотно-подзолистые почвы, реже – палево-подзолистые при участии болотных верховых и переходных торфяных. В южной и юго-восточной частях преобладают (дерново-) подзолистые почвы при значительном участии оторфованных среднеподзолистых потечно гумусовых грунтово-оглеенных, торфяно-среднеподзолистых поверхностно- и грунтово-глееватых.

Почвы заповедника имеют кислую реакцию среды с заметным уменьшением кислотности книзу, что связано с влиянием карбонатной морены. Плоский рельеф территории способствует развитию процессов гидроморфизма и торфонакопления, что приводит к формированию

подзолистых потечно-гумусовых поверхностно глееватых почв, отличающихся от других болотно-подзолистых почв нейтральной реакцией среды и отсутствием признаков оглеения в средней и нижней частях профиля. Если морена перекрыта 1–2 метровым слоем супеси, формируются иллювиально-железистые и иллювиально-гумусово-железистые почвы. Озы и камы, сложенные 3–6-метровой супесчано-песчаной толщей, подстилаемой суглинками, способствуют образованию кислых грубогумусовых бурозёмов (Гончарук, 2007).

Наличие развитого гумусового горизонта в почвах исследуемой территории, вероятно, является не только следствием дернового процесса, но объясняется переувлажнением, которое также приводит к накоплению органического вещества.

В минералогическом составе тонких фракций почв заповедника преобладают каолинит, иллит и лабильные минералы (Ишкова и др, 2010). Существенное влияние на свойства и структуру почвенного покрова заповедника оказывает глубина залегания обломков карбонатных пород в составе моренных отложений. В засушливые периоды восходящие движения насыщенных кальцием почвенных растворов из почвообразующих и подстилающих пород могут приводить к повышению рН в горизонте ЕL до значений 6–7, что не свойственно подзолистым горизонтам (Маряхина и др., 2009), и увеличению количества катионогенных элементов, вовлекаемых в биологический круговорот.

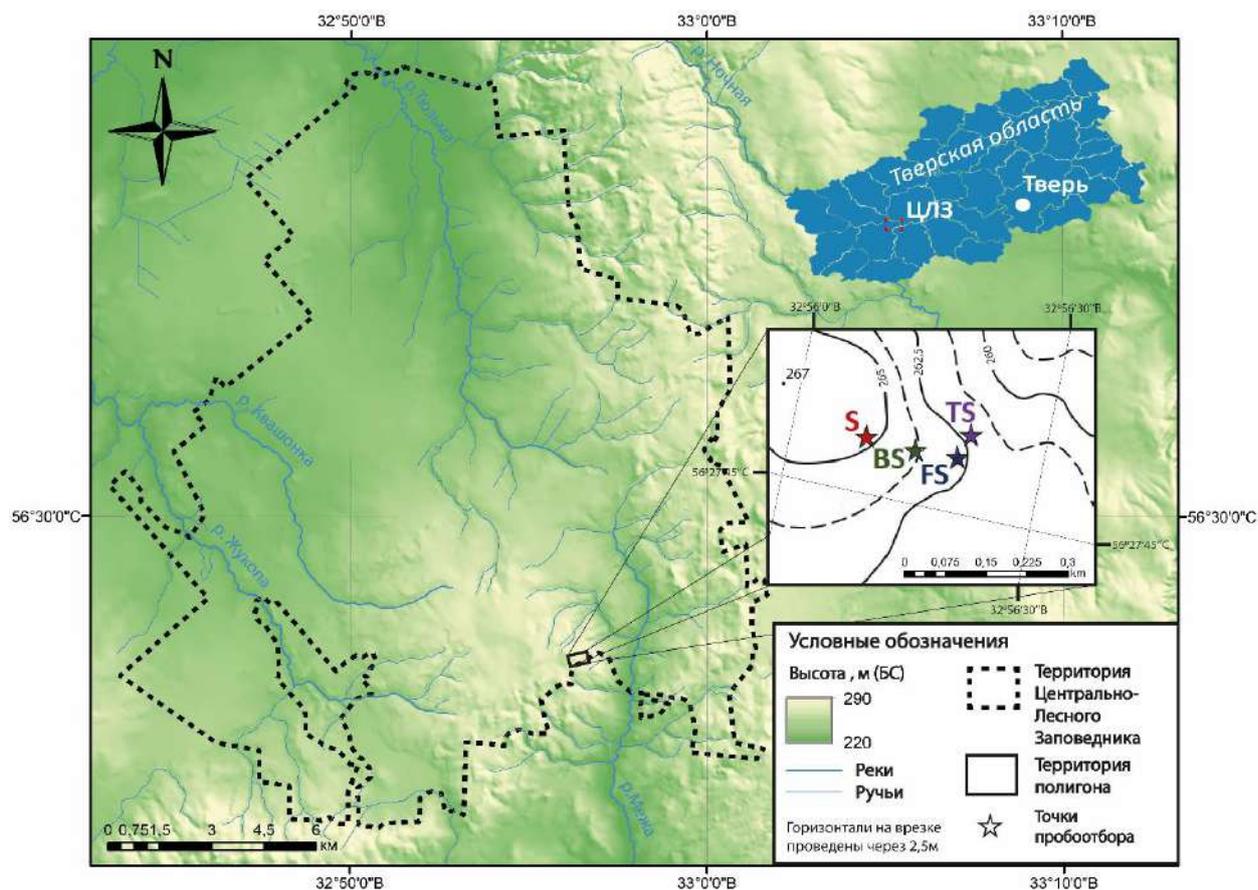
### **Глава 3. Объекты и методы исследования**

В южно-таёжных ландшафтах Центрально-Лесного заповедника проводят мониторинг структуры, динамики и функционирования эталонных экосистем южной тайги, в том числе за динамикой почв и растительности (Пузаченко и др., 2007, 2013), что позволяет детальнее изучить фоновую почвенно-геохимическую структуру катен региона. Здесь можно проследить миграцию ХЭ между компонентами ландшафта в естественных условиях. В ходе рекогносцировки проводилось бурение почв вдоль западного отрезка южной трансекты 91/92 и выбран участок на двучленных отложениях (рисунок 3.1) – покровных суглинках легкого гранулометрического состава, подстилаемых суглинистой мореной (местами остаточной карбонатной). Мощность покровных суглинков варьирует от 60 до 90 см.

#### ***3.1 Почвенно-геохимическая катена***

Почвенно-геохимическая катена (рисунок 3.2) ориентирована вдоль линий стока, имеет СЗ-ЮВ направление и длину 187 м. Она начинается в автономной позиции, на вершине холма с высотой 265 м, пересекает юго-восточный пологий ( $<2^\circ$ ) склон и заканчивается в небольшой ложбине на его плоской террасовидной поверхности. Несмотря на небольшие уклоны и малую протяженность, вдоль склона хорошо выражены изменения ландшафта. В выделенных элементарных ландшафтах (автономном вершины холма – А, трансэлювиальном склонов холма – ТЭ, трансэлювиальном нижней части склона и потяжины – ТЭА) заложено четыре почвенных разреза (приложение А, Б).

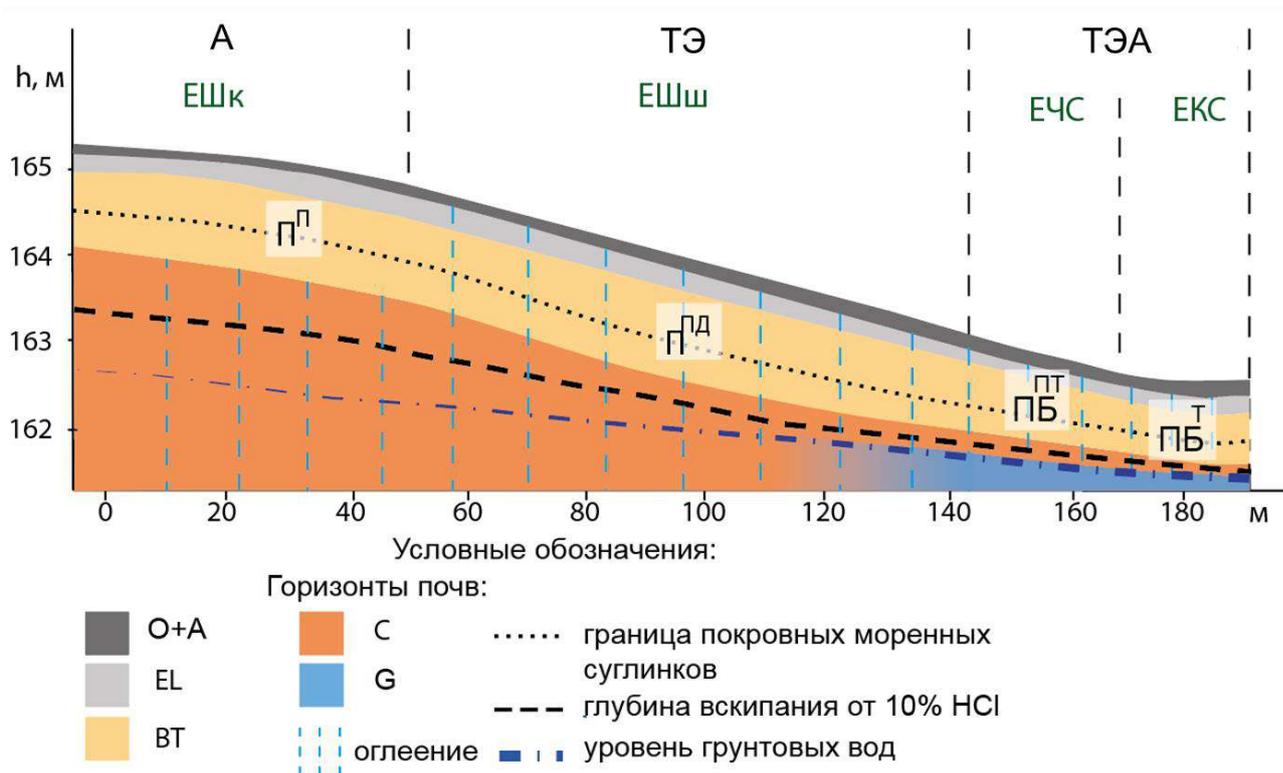
Растительный покров в пределах катены представлен зональным хвойно-широколиственным лесом в автономном и трансэлювиальном ландшафтах и хвойными лесами южнотаежного типа – в трансэлювиальном аккумулятивном (рис.3.3).



★ ★ ★ ★ места заложения разрезов в пределах катены и точек мониторинговых наблюдений (трансект 91/92) лаборатории биогеоценологии им. В.Н. Сукачева Института проблем экологии и эволюции РАН

**Рисунок 3.1.** Положение южнотаежной катены. Здесь и далее на рисунках и в таблицах элементарные ландшафты почвенно-геохимической: А – автономный ландшафт междуречья; ТЭ – трансэлювиальный пологого склона; ТЭА – трансэлювиально-аккумулятивный

**Автономный ландшафт**  $\frac{H^+}{H^+ - Ca^{2+}}$  – класса хорошо дренирован. Грубогумусированные палево–подзолистые почвы имеют следующую систему горизонтов по (Классификация, 2004; Zanella et al., 2018) OL–OF–OH–ao–AYEL–ELf,y–BEL–BT–ПВТса–ПСg,ca. В автономном ландшафте (рисунок 3.2) произрастает высокостебельное липово-еловое растительное сообщество с кленом остролистным *Ácer platanoides* и вязом шершавым *Ulmus glábra* (5E+4Л+1К,В) лещиново-кисличное. В древесном ярусе доминирует липа сердцевидная *Tilia cordáta* и ель обыкновенная *Picea ábies* (35 – 37 м, возрастом 100 лет). Сомкнутость крон древесного яруса составляет 0,6. Подлесок представлен лещиной обыкновенной *Corylus avellana*. В напочвенном покрове наряду с доминирующей кислицей *Oxalis acetosella* заметно участие орляка обыкновенного *Pteridium aquilinum*. Также присутствуют неморальные виды: звездчатка ланцетолистная *Stellaria holostea*, ветреница дубравная *Anémone nemorósa*, яснотка зеленчуковая *Lámium galeóbdolon*.



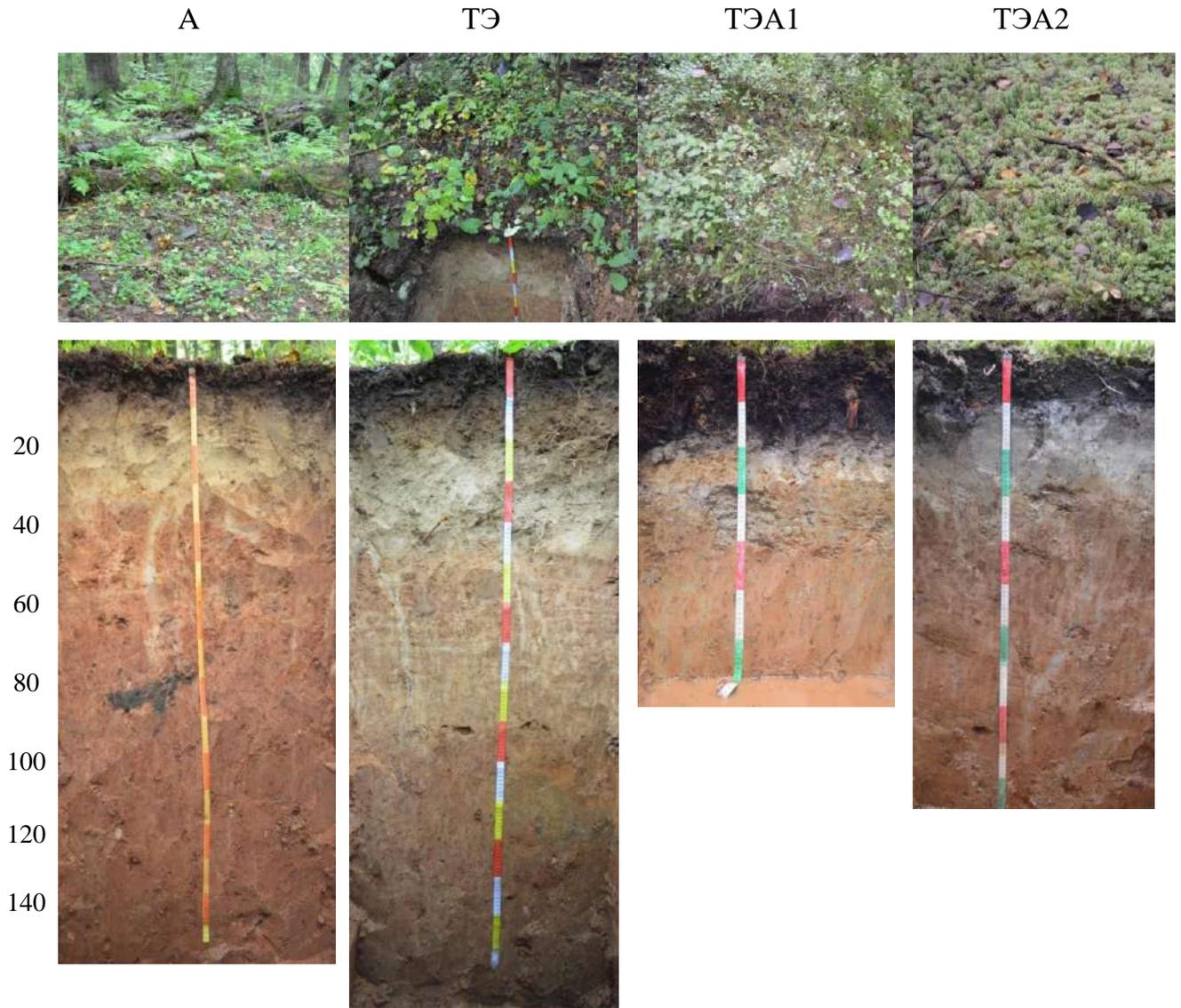
**Рисунок 3.2.** Схематический профиль катены: ЕШк – липово-еловое лещиново-кисличное сообщество с кленом остролистным и вязом шершавым на палево-подзолистой почве (П<sup>П</sup>); ЕШш – елово-широколиственное лещиново-широкотравное сообщество на дерново-палево-подзолистой почве (П<sup>ПД</sup>); ЕЧС – ельник чернично-сфагновый с подростом липы и клена на торфянисто-перегнойной подзолистой профильно-оглеенной почве (ПБ<sup>ПТ</sup>); ЕКС – ельник кислично-сфагновый с ивой, подростом клена и липы на торфянистой подзолистой профильно-оглеенной (ПБ<sup>Т</sup>) 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 (лесная подстилка в автономном и трансэлювиальном ландшафтах и перегнойный и торфяной – в трансаккумулятивном), EL – элювиальный, В – иллювиальный, С – почвообразующая порода, G – глеевый

В верхней части почв автономного ландшафта подстилка из среднеразложившегося опада переходит в коричнево-темно-серый, густо переплетенный живыми и мертвыми корнями растений горизонт ao (рисунок 3.3, приложение Б). Фрагментарно выделяется горизонт АУЕL палево-светло-серого цвета с единичными Fe-Mn конкрециями. Ниже горизонта ao ясно отличим элювиальный белесовато-палевый горизонт ELf с гумусовыми потеками по корням растений листоватой структуры, с Fe-Mn примазками и конкрециями. Белесые языки горизонта ELf пересекают BEL и проникают в иллювиальный горизонт и далее, до глубины 1 м. Иллювиальный горизонт ПВТса красновато-бурого цвета призматической структуры включает крупные каменистые обломки гранитов, гнейсов, кварцитов и выветрелых сланцев, а также обломки карбонатных пород, которые вскипают от 10% раствора HCl, что отличает его от вышележащих легкосуглинистых горизонтов, сформировавшихся в толще покровных суглинков.

**Трансэлювиальный ландшафт** верхней части выпуклого склона (рисунок 3.3) покрыт елово-широколиственным кустарниково-разнотравным лесом (5Л+3Е+1К). Это наиболее богатая видами из изучаемых растительных ассоциаций. В древесном ярусе преобладает липа сердцевидная с примесью ели обыкновенной, высотой 30–40 м, и диаметром ствола – 50 см, присутствует клен остролистный. Сомкнутость крон составляет 0,8. В подлеске доминирует лещина обыкновенная, единично встречается жимолость лесная *Lonicera xylosteum*. Напочвенный покров мозаичен, в основном, представлен неморальными видами, среди которых: печёночница благородная *Hepatica nobilis*, подмаренник душистый *Galium odoratum*, яснотка зеленчуковая *Lámiúm galeóbdolon*, копытень европейский *Ásarum europaéúm*, медуница неясная *Pulmonária obscura*, ветреница дубравная, звездчатка ланцетолистная. Также в травяно-кустарничковом ярусе произрастают орляк обыкновенный, хвощ лесной *Equisétum sylváticum* и кислица обыкновенная, единично встречается черника *Vaccínium myrtillus*.

В ТЭ ландшафте  $\frac{H^+}{H^+-Ca^{2+}}$  – класса сформировались дерново-палево-подзолистые почвы (рисунок 3.3, приложение Б) с набором горизонтов OL–OF–OH–ao–AY–AYEL–ELf,g,y–BELg–BT–ПBT(g)–ПC(g). Гумусоаккумулятивный процесс выражен лучше, чем в автономном ландшафте: под средне- и сильно разложившейся подстилкой из листьев, веток и хвои, располагается грубогумусовый горизонт ao, который переходит в серогумусовый AY. Уплотненный языковатый горизонт ELf,g,y непрочной листоватой структуры содержит больше оформленных (сухих) конкреций, но сизовато-белесые языки клиновидной формы менее выражены. На склоне наблюдается большая мощность покровных суглинков, а в горизонтах ПBT(g) и ПBC(g) содержится меньше обломков горных пород.

В почвах автономного и трансэлювиального ландшафтов (приложение Б) детрит представлен лесной подстилкой из трех горизонтов. Верхний горизонт OL по классификациям (Решетникова, 2011; Zanella et al., 2018) представляет собой свежие листовые и древесные остатки, сохранившие морфологическое строение. Нижележащий горизонт OF образован главным образом, листовыми остатками, измельченными, но узнаваемыми невооруженным глазом, в различной степени смешанными с тонкодисперсным органическим веществом. Горизонт OH состоит в основном из тонкодисперсного органического вещества.



**Рисунок 3.3.** Травянистый покров и почвы катены: А – автономный ландшафт: разреженный и мозаичный травянистый покров на палево-глубокоподзолистых легкосуглинистых почвах на двучленных отложениях (покровных легких суглинках, подстилаемых каменной мореной) местами остаточного карбонатного; ТЭ – трансэлювиальный ландшафт: в травянистом покрове доминируют неморальные виды на маломощных дерново-палево-глубокоподзолистых легкосуглинистых почвах на двучленных отложениях (покровных легких суглинках, подстилаемых мореной); ТЭА1 – переходный трансэлювиально-аккумулятивный ландшафт: в напочвенном покрове появляются сфагновые мхи на мелкоперегнойно-торфяной глубокоподзолистой легкосуглинистой почве на покровных суглинках; ТЭА2 – трансэлювиально-аккумулятивный ландшафт: в потяжине, в напочвенном покрове доминируют сфагновые мхи на мелкоперегнойно-торфяной глубокоподзолистой легкосуглинистой почве на двучленных отложениях (покровных суглинках, подстилаемых мореной)

**Трансэлювиально-аккумулятивный ландшафт нижней части склона** (рисунок 3.3) покрыт ельником чернично-сфагновым (9Е+1Л+1К) с подростом липы сердцевидной и клена остролистного и подлеском из рябины обыкновенной *Sorbus aucuparia*. Древесный ярус представлен елью обыкновенной высотой 15–20 м, единично липой сердцевидной. Сомкнутость крон растительного сообщества – 0,2. Подрост представлен елью обыкновенной, липой сердцевидной и кленом остролистным, в подлеске произрастает рябина обыкновенная

*Sorbus aucuparia*. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует черника обыкновенная. В месте заложения профиля мозаичный моховой покров из сфагнома *Sphagnum Sp.*

У подножья склона (ТЭА1 ландшафт  $\frac{H^+ - Fe^{2+}}{Fe^{2+} - Ca^{2+}}$  класса) в торфянисто-перегнойных подзолистых профильно-оглеенных почвах (рисунок 3.3, приложение Б) с набором горизонтов OL-OF-H-EL<sub>hi,g</sub>-EL<sub>nn,ox</sub>-BT<sub>g</sub>-2BT<sub>g</sub>-2C<sub>g,ca</sub> хорошо выражены торфянистый и перегнойный горизонты. Далее выделяется глеевый серовато-белесый, супесчаный, заиленный горизонт с признаками горизонтальной делимости EL<sub>g</sub>. Ниже в нем отмечаются ржавые и охристые пятна. На границе с иллювиальным горизонтом сочится вода.

**Трансэлювиально-аккумулятивный ландшафт потяжины** представлен (рисунок 3.3) ельником кислично-сфагновым с ивой козьей *Salix caprea*, подростом ели обыкновенной и липы сердцевидной (8E+2И, Б, Л, К). Доминирует ель обыкновенная высотой 25–30 м с примесью ивы козьей, липы сердцевидной и клена остролистного. Сомкнутость древостоя – 0,5. Обилен подрост ели обыкновенной и липы сердцевидной и редок подрост клена остролистного. Подлесок представлен рябиной обыкновенной. Доминантным видом травяно-кустарничкового яруса на прикорневых и приствольных повышениях является кислица обыкновенная, присутствует черника обыкновенная и орляк обыкновенный. Моховой ярус в микропонижениях представлен сфагнумом. В более увлажненных условиях (ТЭА ландшафт  $\frac{H^+ - Fe^{2+}}{Fe^{2+} - Ca^{2+}}$  класса) сформировались торфянистые подзолистые профильно-оглеенные почвы (рисунок 3.2, приложение Б) с системой горизонтов OL-OF-T-EL<sub>ox,nn</sub>-BEL<sub>g,y,nn</sub>-BT<sub>g</sub>-ПBT<sub>g</sub>-ПГ. Торфянистый горизонт состоит из двух слоев: более светлого, состоящего, преимущественно, из слаборазложившегося сфагнома, а также листовенного опада, и полуразложившегося более темного и плотного (рисунок 3.3, приложение Б). Вся торфяная масса пронизана корнями деревьев. Далее сразу начинается оглеенный горизонт EL. На глубине 12 см присутствуют Fe-Mn конкреции, которых становится больше в окисленной зоне на глубине 25 см. В горизонте 2BT<sub>g</sub> присутствуют обломки плотных валунов. С глубины 110 см сочится вода.

Таким образом, все обследованные почвы формируются на двучленных отложениях: супесчаные и легкосуглинистые отложения залегают на среднесуглинистой моренной толще. В моренных отложениях встречаются обломки горных пород, в том числе карбонатных. От автономного ландшафта вершины холма к подчиненным ландшафтам днища потяжины усиливается оглеение. В дерново-подзолистых почвах трансэлювиального ландшафта оно выражается в появлении сизоватых пятен на 90 см глубине в горизонте BT. В трансэлювиально-аккумулятивной позиции сизоватый оттенок почв появляется в элювиальном горизонте (приложение Б). Наиболее мощный гумусовый горизонт выявлен в дерново-подзолистых

почвах выпуклой части склона из-за большей биомассы древесных и травянистых видов (приложение В).

Исследуемая ландшафтно-геохимическая катена по классификации И.С. Урусевской (1990), выделившей 11 вариантов катен в южной тайге Нечернозёмных областей России, является подчиненно-гидроморфной дерново-подзолисто-болотной. Главный фактор дифференциации почв в катене – перераспределение поверхностных вод. По Н.С. Касимову и др. (2012) она является типичной монолитной водораздельно-болотной, протягиваясь от автономного ландшафта междуречья к аккумулятивному в днище временного водотока с однородным составом почвообразующих пород (двучлен: покровные суглинки на моренных).

### 3.2 Полевые работы

Полевые работы проводили в пять периодов (таблица 3.1). *Пробы почв* отбирали из 4-х разрезов. Для оценки уровня variability свойств почв и элементного состава горизонтов почв в девятикратной повторности в июне 2017 г. опробованы верхний горизонт (ао в подзолистых почвах и Т – в торфяно-подзолисто-глеевых) и нижний (ВТ) в пределах площадок 10 м<sup>2</sup> (суммарно 54 пробы). Всего отобрано 176 образцов почв.

Таблица 3.1

Даты и условия отбора проб

Год	Период опробования	Температура, °С		Относительная влажность воздуха, %	Образцы	Число проб
		воздух	поверхность почвы			
2016	сентябрь	8,6	8	99	почвы	37
	октябрь	2,4	5	86	лесная подстилка свежий опад	24 12
2017	июнь	18,9	22	57	почвы	78
	ноябрь	0,6	0	93	растения почвы	87 30
2018	май	23,4	15	71	почвы	31

*Лесная подстилка* опробована осенью до начала листопада, представлена в основном средне и сильно разложившимися остатками листьев и хвои, и также включала трудно разлагаемую фракцию из шишек и тонких ветвей деревьев. В радиусе 5 м от разрезов в автономной и трансэлювиальной позиции подстилка опробована в пятикратной повторности с участков 50×50 см и в трансэлювиально-аккумулятивной позиции – в двукратной с участков 20×20 см. Лесная подстилка в автономном и трансэлювиальном ландшафтах разделена на две фракции: ОН – фракция медленного разложения, состоящая из измельченных растительных остатков, где преобладает перегнойная составляющая, и слабо различимы органы растений; и ОФ – слабоферментированный опад прошлых лет (листья или хвоя и ветки), где невооруженным глазом можно определить части растений (Решетникова, 2011; Zanella et al., 2018). На переувлажненных частях катены опробован живой мох с включением свежего опада и верхний

органогенный (Н–перегнойный и Т–торфянистый) горизонт (Почвенный справочник, 2000). Для определения массы поступившего на поверхность почвы органического вещества со сбрасываемой листвой и другими частями древесного и кустарникового яруса со всех пробных площадок в начале ноября 2016 г. собран свежий опад (OL), когда по данным (Шихова, Зубкова, 2011) общие запасы почвенного углерода увеличиваются.

**Образцы растений** собраны в конце активной вегетации (28 и 29 июня 2017 г.), когда в фотосинтезирующих органах накапливается максимальное количество элементов, по истечении двухдневного периода без осадков, согласно методическим указаниям (Терехина, 2010). Опробовано 19 видов растений всех ярусов сообщества, включая разные органы доминирующих древесных и кустарниковых видов (приложение В). У растений древесного яруса отдельно отбирали листья, тонкие и крупные ветки (пороговое значение – 1 см) и кору в 5 повторностях с нескольких деревьев в пределах площадки или с разных румбов одного дерева, с целью нивелировать влияние индивидуальных особенностей. После отбора равного количества индивидуальных образцов формировали средние (общие) пробы. Кору срезали ножом на высоте 1,0 – 1,5 м по окружности стволов. У представителей подлеска собраны отдельно листья и ветки. Травянистые растения состригали ножницами с фиксированной площади не далее 7 м от разрезов. Всего отобрано 78 образцов органов растений.

### **3.3 Аналитические методы и статистическая обработка данных**

#### **Физико-химические свойства почв**

Все образцы высушены до воздушно сухого состояния и взвешены. В Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ определяли величину рН в водной суспензии на рН-метре «Эксперт-рН» (погрешность  $\pm 0,07$  ед. рН; таблица 3.2), содержание углерода органических веществ (Сорг) – методом И.В. Тюрина (ГОСТ-26213-91),  $\text{CaCO}_3$  – газовольюметрически (Кречетов, Дианова, 2009). Гранулометрический состав проанализирован на лазерном гранулометре «Analysette 22 comfort» (Fritsch, Германия) с выделением 7 гранулометрических фракций (Качинский, 1958) G1–G7, обозначенных в порядке увеличения размера частиц (в мкм): G1 – ил (<1); G2, G3 и G4 – мелкая, средняя и крупная пыль (1–5, 5–10 и 10–50 соответственно); G5, G6 и G7 – тонкий, средний и крупный песок (50–250, 250–500 и 500–1000).

Содержание лабильных и стабильных частей почвенного органического вещества оценено в 16 образцах верхних горизонтов (до E1 включительно) с использованием метода хемодеструкционного фракционирования (Попов, Русаков, 2016), основанного на выявлении компонентов, различающихся по устойчивости к действию окислителя (0,8 н раствор  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) в 30, 60 и 98% растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Виды и методы химических анализов, использованные в настоящей работе

Определяемый параметр (число проб)	Метод исследования
Зольность растений и детритовых горизонтов (104)	Сухое озоление, ГОСТ 27784-88
Углерод органических соединений (80)	Титриметрический (по И. В. Тюрину)
Лабильное и стабильное органическое вещество (16)	Хемодеструкционное фракционирование (Попов, Русаков, 2016)
Величина pH (143)	Потенциометрический
Гранулометрический состав (152)	Лазерная дифрактометрия (Analysette 22 comfort)
Валовое содержание элементов в почвах (188) и растениях (87)	Масс-спектрометрия и атомно-эмиссионная спектрометрия (ICP-MS, ICP-AES)
Обменные соединения (164)	В вытяжке ААБ (pH=4,8) с ICP-MS и ICP-AES окончанием
Комплексные соединения (164)	В вытяжке ААБ+1% ЭДТА с ICP-MS и ICP-AES окончанием
Соединения, сорбированные гидроксидами Fe и Mn (164)	В вытяжке 1n HNO <sub>3</sub> с ICP-MS и ICP-AES окончанием
Карбонаты (17)	Газовольнометрический

### *Элементный состав почв*

Подвижные формы химических элементов, в основном, изучают в почвах сельскохозяйственного назначения, поэтому наиболее изучены соединения, доступные культурным растениям. Для экстракции таких соединений предложены методы, имитирующие воздействие корней на почву (Прянишников, 1936). Первые стандартизованные вытяжки для поэлементного анализа предложены в 1950-х гг. Я.В. Пейве и Г.Я. Ринькисом для бескарбонатных дерново-подзолистых почв. Для извлечения подвижных форм Cu использовали 1М HCl, Co – 1М HNO<sub>3</sub>, Zn – 1М KCl, Mn – 0,05М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Добрицкая, 1958), Mo – оксалатный раствор с pH=3,3 (Grigg, 1953). В 1973 году были разработаны схемы фракционирования подвижных соединений Mo, V, Cr, Co, Cu, Zn, B (Зырин, 1973).

В российских работах часто применяют групповой экстрагент (1n. CH<sub>3</sub>COO NH<sub>4</sub>) для извлечения большего числа ХЭ из карбонатных и некарбонатных почв (Ладонин, 2003; Минкина, 2008). Эта вытяжка, совместно с 1% ЭДТА в растворе CH<sub>3</sub>COO NH<sub>4</sub> и 1n HNO<sub>3</sub> используется в схеме Соловьева (1989).

В зарубежных публикациях по геохимии активно применяют схему последовательного фракционирования (McLaren, Crawford, 1973), изначально предназначенную для извлечения подвижных форм соединений Cu из почв Англии и учитывающую особенности взаимодействия

металла с почвенными компонентами. Наиболее же часто используют схемы A. Tessier et al. (1979) и Европейского бюро по стандартизации (BCR – Bureau Community of Reference). Схема Тессьера (Tessier et al., 1979), обоснованная для карбонатных осадков сточных вод, успешно применяется и для изучения фракционирования тяжелых металлов и металлоидов в почвах. На ее основе разработаны трехстадийные последовательные схемы экстракции BCR-1 и BCR-2, предназначенные для Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn (Ure et al., 1993; Rauret et al., 1999).

*Фракция F1* экстрагируется из почвы деионизированной водой (Svete, 2000) с последующим центрифугированием (Linehan et al. 1985), фильтрацией (Brummer, 1986), ультрафильтрацией (Wang, Benoit 1996) или диализом и т.д. (Lee, Zheng 1994; Ure, Davidson, 2001). Обменные соединения (таблица 3.3) извлекают разнообразными экстрагентами, в том числе 0,1М Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (Попова, 2010; Boruvka, 1997), 0,1М CaCl<sub>2</sub> (Schramel, 2000), 1М NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (Gryshko, 2005) и 1М Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (Oomen, 2002), 0,05 М (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> с pH=5,6 (Huang, 2007). Также широкое распространение получил раствор CH<sub>3</sub>COOH (Зырин, 1973; 1979; Ладонин, 2003; Ure et al., 1993; Rauret et al., 1999) и CH<sub>3</sub>COONa (Никифорова, 2009, Самойлова, 1969, Tessier et al., 1979). В отечественных работах ацетатно-аммонийный буфер (ААБ) с pH 4,8 (Зырин, 1976, Аринушкина, 1962, Крупский, Александрова, 1964; Круглова, 1972; Соловьев, 1989, Полпова, 2010) чаще всего используют для извлечения обменных соединений микроэлементов (Соловьев, 1989 и др.; Ладонин, 2002; Минкина, 2008,).

*Фракция F2* извлекается с помощью NaOH (Степанова, 1976), а также его смесью с 0,01М этилендиаминтетрауксусной кислотой – ЭДТА (Grimme, 1967). Широко используют 0,05 М ЭДТА (Зырин, 1979) и смесь 1% ЭДТА в ацетатно-аммонийном буферном растворе (ААБ) (Минкина, 2008; Манджиева, 2014). Однократная экстракция ЭДТА использовалась для оценки биодоступности Zn в почвах Беловежской пуши. Однако этот показатель нужно тестировать индивидуально для каждого типа почв (Stegmann, 2001). Сопоставление количества Mn, экстрагируемого чистым ААБ и буфером с добавлением ЭДТА показывает, что с повышением кислотности количество органоминеральных соединений Mn снижается, а обменных – увеличивается (Соловьев, 1989).

*Фракция F3* выделяется растворами оксалатного буфера Тамма при облучении суспензии ультрафиолетом (Мотузова, 1971) и цитрат-дитианитного раствора Мера-Джексона (1963). 1н H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> извлекает вторичные аморфные и слабокристаллизованные соединения Fe и сохраняет соотношение между его закисными и окисными соединениями (Веригина, 1965). По методу Мера-Джексона извлекают все несиликатные формы, а реактив Тамма экстрагирует преимущественно аморфные органоминеральные и минеральные соединения Fe (Горбунов и др., 1961; Ананко, Соколов, 1978), а также по данным Ю.Н. Водяницкого (2003; 2008) – различные слабокристаллизованные гидроксиды железа. Растворимость гетита и гематита

возрастает в присутствии магнетита как источника Fe(II). В то же время магнетит растворяется вытяжкой Тамма. Вытяжка Мера-Джексона частично разрушает Fe содержащие алюмосиликаты (Водяницкий, 2003; 2008; Соколова и др., 2018). Для извлечения F1+F3 также используют 1M HNO<sub>3</sub> (Минкина, 2008; Самонова, Касимов, Асеева, 2011; Семенков, Касимов, Терская; 2019), 1n HCl (Касимов, Самонова, Кошелева, 2002). Поскольку F1 составляет маленькую долю от подвижных соединений, эту фракцию можно не учитывать при анализе содержания сорбированных форм.

Таблица 3.3

## Существующие методы параллельной экстракции F1, F2 и F3 форм химических элементов

Форма соединений	Раствор	Авторы
обменная – F1	0,1M Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Boruvka, 1997 Попова, 2010
	0,1M CaCl <sub>2</sub>	Schramel, 2000
	1M NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	Gryschko, 2005
	1M Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Oomen, 2002
	0,05 M (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> с pH=5,6	Huang, 2007
	CH <sub>3</sub> COOH	Зырин, 1973, 1979 Ладонин, 2003 Ure et.al., 1993 Rauret et.al., 1999
	<i>Ацетатно-аммонийный буфер (ААБ)</i>	Соловьев, 1989 Минкина, 2008 Манджиева, 2014
комплексы с органическим веществом и карбонатами – F2	NaOH	Степанова, 1976
	NaOH+0,01M ЭДТА	Grimme, 1967
	0,05 M ЭДТА	Зырин, 1979
	<i>ААБ+1% ЭДТА</i>	Соловьев, 1989 Минкина, 2008 Манджиева, 2014
соединения, сорбированные гидроксидами Fe и Mn – F3	1n H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Веригина, 1965
	растворы оксалатного буфера Тамма	Келлерман, Цюрупа, 1965
	цитрат-дитианитный раствор Мера-Джексона	Зонн, 1982
	<i>1M HNO<sub>3</sub></i>	Соловьев, 1989 Минкина, 2008 Манджиева, 2014
	1n HCl	Добрицкая, 1958

\* курсивом выделены экстрагенты, используемые в настоящей работе

В настоящей работе для выделения F1, F2 и F3 форм элементов использована параллельная схема экстракции подвижных форм по А.Г. Соловьеву (1989), опробованная на дерново-подзолистых почвах России и подходящая для выделения обменных форм для почв со значениями pH~5. Выбранная методика используется в России при нормировании содержания подвижных форм соединений тяжелых металлов, в т.ч. рассматриваемых и в настоящей работе Co, Cu, Ni, Pb, Cr и Zn (СанПиН 1.2.3685-21). Непрочно связанные соединения экстрагировали в течение 18 ч тремя параллельными вытяжками: ААБ с pH 4,8 (соотношение почва:раствор 1:5), ААБ с 1% ЭДТА (1:5) и 1н HNO<sub>3</sub> (1:10).

Комплексные (органоминеральные) соединения (F2) рассчитаны по разнице концентрации металлов в вытяжке ААБ с 1% ЭДТА и ААБ; сорбированные гидроксидами Fe и Mn (F3) – по разнице содержания в азотнокислой и ацетатно-аммонийной вытяжках. Остаточную фракцию (F4) определяли по разнице между валовым содержанием элементов (F5) и содержанием подвижных форм (F1 + F2 + F3). Содержание элементов в почвах, растениях и почвенных вытяжках определено масс-спектрометрическим методом во Всероссийском институте анализа минерального сырья имени Н.М. Федоровского с помощью системы Elan-6100 ICP-MS System (масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой PerkinElmer Inc., США) и Optima-4300 DV ICP-AES System (атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой PerkinElmer Inc., США). Также анализировали холостые растворы и 5% перекрестных проб.

### ***Обработка данных***

Для изучения геохимической дифференциации элементов использовали ландшафтно-геохимические коэффициенты и математико-статистические методы обработки материалов в пакетах Statistica и Excel. Схема катены визуализирована в программе «Illustrator».

Региональная геохимическая специализация оценена с использованием кларков концентрации (КК) и кларков рассеяния (КР): для почв – сравнение валовых содержаний ХЭ в почвах с кларками верхней части континентальной земной коры (Rudnick, Gao, 2014), для растений – сравнение валовых содержаний ХЭ в растениях с кларками наземных растений (Перельман, Касимов, 1999; Markert, Franzle, 2015) и коэффициентов концентрации (Кк): сравнения содержаний подвижных (F1, F2, F3) соединений ХЭ в почвах с средними значениями для гумусового горизонта дерново-подзолистых почв Восточно-Европейской равнины и дерново-подзолистых почв Западной Сибири (Samonova et al., 2018, Semenov et al., 2019; Semenov et al., 2016). Если КК или Кк находятся в пределах от 0,5 до 2,0, то содержание элемента считали сопоставимыми с эталонами сравнения. Суммарная доля подвижных форм характеризует подвижность (М – от англ. «mobility», %) химических элементов в твердой фазе почв, которая в настоящей работе обозначена как М1 и М2, по аналогии с формами, по мере снижения подвижности. Потенциальная подвижность (М2), как совокупность непрочно связанных

форм, представляет собой суммарную долю обменных (F1), комплексных (F2) и сорбированных гидроксидами Fe и Mn (F3) соединений от валового содержания элемента (Манджиева и др., 2014; Tyler, 2004; Bolan et al., 2014; Palleiro et al.; 2016, Li et al., 2019). Биодоступность (биологическая доступность, M1) представляет собой суммарную долю доступных для растений форм соединений химических элементов (F1+F2) от валового содержания. По подвижности (%) ХЭ разделены на слабоподвижные <5, среднеподвижные 5–25, подвижные 25–50 и сильноподвижные > 50 (Enchilik, Semenov, 2022).

Накопление и рассеяние ХЭ в горизонтах почв относительно породы диагностировали с помощью коэффициента радиальной (R) дифференциации, а в горизонтах подчиненных почв относительно автономных – коэффициента латеральной (L) дифференциации (Касимов, Перельман, 1992). При коэффициентах больше 2,0 элемент считали концентрирующимся, меньше 0,5 – рассеивающимся.

Корреляционный анализ между содержанием элементов и физико-химическими свойствами почв выполнен в программе STATISTICA. Накопление ХЭ на геохимических барьерах подтверждали наличием значимой ( $p < 0.05$ ) прямой корреляции Спирмана  $r$  между содержанием формы ТММ и физико-химическими характеристиками почв, рассчитанной по всей совокупности имеющихся данных. Связь с величиной рН указывает на наличие щелочного барьера, с содержанием илистой фракции (G1) – сорбционного барьера и с содержанием Сор<sub>г</sub> – биогеохимического (Enchilik, Semenov, 2022). Вариабельность содержания форм химических элементов в гумусовых горизонтах почв оценена с помощью коэффициента вариации (Cv), рассчитанного по гумусовым горизонтам всех разрезов катены. Для выявления ведущих физико-химических свойств горизонтов почв в распределении подвижных форм соединений и подвижности элементов по профилю использован метод главных компонент (PCA).

Для оценки вариабельности показателей в программе Statistica с помощью Т-критерия Уилкоксона рассчитывали значимость различий между выборками в горизонтах ао и ВТ, а также выделялись группы элементов в рядах потенциальной подвижности и биодоступности элементов в генетических горизонтах почв. Коэффициенты вариации (Cv), определенные в программе Statistica, сгруппированы по градациям: очень высокие (>80%), высокие (50–80), средние (30–50), низкие (10–30), очень низкие (<10). Соответствие (лог)нормальному распределению оценено по критерию Уилка-Шапиро в программе «R» с использованием в качестве порогового уровня значимости  $p = 0,05$ .

Скорость разложения наземных органических остатков оценивали с помощью опадо-подстилочного коэффициента (Родин, Базилевич, 1968) – отношения массы абсолютно-сухого веса органического вещества горизонтов лесной подстилки разной степени разложенности (ОН+ОФ) к массе свежего опада (ОЛ).

Для выявления специфических черт состава растений вычислен коэффициент ОСВР (относительное содержание в видах растений) – отношение содержания ТММ в золе изучаемого вида к содержанию в золе эталонного (Ковалевский, 1969) – листьях липы в нашем случае. Перераспределение элементов по органам оценено с помощью коэффициента ОСОР (относительное содержание в органах растений) – отношение содержания ТМ в золе изучаемого органа к содержанию элемента в эталоне (Ковалевский, 1969) – в крупных ветвях. Для оценки характера извлечения ТММ из почв растениями рассчитан коэффициент биологического поглощения  $A_x$  – отношение содержания элемента в золе растений к его содержанию в почвообразующей породе (Перельман, Касимов, 1999). Суммарная интенсивность вовлечения ТМ в бик оценена по показателю биогеохимической активности вида (БХА) – сумме  $A_x > 1$  (Айвазян, 1974).

## Глава 4. Свойства и элементный состав почв и растений катены

Почвы катены формируются на типичных для Восточно-Европейской равнины и Валдайской возвышенности лессовидных суглинках, подстилаемых известковыми моренными отложениями (Чеботарева, 1972; Пузаченко и др., 2006; Караванова, Малинина, 2007; 2009). Покровный суглинок мощностью 30-130 сантиметров сглаживает проявления механического состава перекрытых им песчаных пород и создаёт благоприятные условия для произрастания ели (Смирнова и др., 1999; Пузаченко, Козлов, 2007). Для территории характерна низкая водопроницаемость подстилающих материнских пород (Пузаченко и др., 2006; 2013), это приводит к заболачиванию участков в понижениях и подножья склонов, а также возникновению временных водотоков после сильных дождей. В результате, увеличение увлажненности почв вниз по склону сопровождается изменениями растительных сообществ, а также потоками веществ от верхних уровней рельефа к нижним и образованию катен (Sommer, Schlichting, 1997). Совокупность этих факторов влияет на химические свойства элементный состав почв и интенсивность биогеохимического круговорота в ландшафтах катены.

### 4.1 Физико-химические свойства почв

Палево-подзолистые, дерново-подзолистые и торфянисто-подзолистые почвы катены развиваются на остаточных карбонатных породах, включающих обломки известняка и доломита. По гранулометрическому составу почвы суглинистые, содержат более 10% частиц размером менее 10 мкм. Горизонт ЕL обогащен пылеватыми фракциями (таблица 4.1).

Таблица 4.1

Среднее содержание гранулометрических фракций, величины рН, углерода органических веществ (%) и углекислоты карбонатов в горизонтах почв южнотаежной катены по всем сезонам опробования

Горизонт	Гранулометрические фракции, %							рН	Сорг, %	CaCO <sub>3</sub> , %
	G7	G6	G5	G4	G3	G2	G1			
Грубогумусированная палево-подзолистая почва автономного ландшафта вершины холма										
ao	$\frac{1,5}{135}$ (4)	$\frac{12}{85}$ (4)	$\frac{30}{38}$ (4)	$\frac{40}{32}$ (4)	$\frac{7,6}{49}$ (4)	$\frac{7,6}{48}$ (4)	$\frac{1,3}{32}$ (4)	$\frac{4,6}{4}$ (4)	$\frac{20}{57}$ (4)	0
AYEL	$\frac{0}{0}$ (2)	$\frac{0}{0}$ (2)	$\frac{8,7}{120}$ (2)	$\frac{60}{0}$ (2)	$\frac{13}{38}$ (2)	$\frac{15}{32}$ (2)	$\frac{3,2}{33}$ (2)	$\frac{4,8}{4}$ (2)	$\frac{1,6}{114}$ (2)	0
EL	$\frac{3,0}{173}$ (3)	$\frac{0}{0}$ (3)	$\frac{10}{91}$ (3)	$\frac{49}{32}$ (3)	$\frac{14}{62}$ (3)	$\frac{18}{48}$ (3)	$\frac{5,2}{51}$ (3)	$\frac{5,0}{3}$ (3)	$\frac{0,4}{62}$ (3)	0
BEL	$\frac{0,8}{200}$ (4)	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{15}{65}$ (4)	$\frac{56}{6}$ (4)	$\frac{8,6}{53}$ (4)	$\frac{14}{33}$ (4)	$\frac{5,8}{38}$ (4)	$\frac{5,2}{8}$ (4)	$\frac{0,4}{126}$ (4)	0
BT	$\frac{0,04}{200}$ (4)	$\frac{4,3}{132}$ (4)	$\frac{17}{61}$ (4)	$\frac{36}{29}$ (4)	$\frac{12}{11}$ (4)	$\frac{23}{10}$ (4)	$\frac{7,1}{28}$ (4)	$\frac{5,8}{10}$ (4)	$\frac{0,1}{21}$ (4)	0
BCca	$\frac{0,1}{283}$ (8)	$\frac{1,9}{172}$ (8)	$\frac{17}{44}$ (8)	$\frac{33}{14}$ (8)	$\frac{14}{18}$ (8)	$\frac{26}{12}$ (8)	$\frac{7,9}{18}$ (8)	$\frac{7,4}{8}$ (8)	$\frac{0,1}{55}$ (8)	$\frac{7,9}{14}$ (4)
Cca	$\frac{0}{0}$ (3)	$\frac{1,6}{155}$ (3)	$\frac{13}{90}$ (3)	$\frac{33}{13}$ (3)	$\frac{15}{28}$ (3)	$\frac{27}{15}$ (3)	$\frac{10}{25}$ (3)	$\frac{7,7}{4}$ (3)	$\frac{0,1}{20}$ (3)	$\frac{9,7}{26}$ (3)
Дерново-палево-подзолистая почва трансэлювиального ландшафта средней части склона холма										
ao	$\frac{5,5}{8}$ (8)	$\frac{8,6}{8}$ (8)	$\frac{21}{8}$ (8)	$\frac{45}{8}$ (8)	$\frac{8,5}{8}$ (8)	$\frac{9,1}{8}$ (8)	$\frac{1,8}{8}$ (8)	$\frac{4,8}{8}$ (8)	$\frac{8,2}{8}$ (8)	0

Горизонт	Гранулометрические фракции, %							pH	Сорг, %	CaCO <sub>3</sub> , %
	G7	G6	G5	G4	G3	G2	G1			
	214	135	57	40	43	44	49	7	56	
AEL	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{0,7}{200}$ (4)	$\frac{15}{80}$ (4)	$\frac{56}{7}$ (4)	$\frac{12}{30}$ (4)	$\frac{13}{36}$ (4)	$\frac{2,7}{39}$ (4)	$\frac{4,5}{9}$ (4)	$\frac{2,2}{42}$ (4)	0
EL	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{11}{61}$ (4)	$\frac{59}{4}$ (4)	$\frac{10}{27}$ (4)	$\frac{16}{13}$ (4)	$\frac{4,1}{22}$ (4)	$\frac{5,3}{19}$ (4)	$\frac{0,5}{56}$ (4)	0
BEL	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{11}{61}$ (4)	$\frac{59}{4}$ (4)	$\frac{10}{27}$ (4)	$\frac{16}{13}$ (4)	$\frac{4,1}{22}$ (4)	$\frac{5,3}{19}$ (4)	$\frac{0,5}{56}$ (4)	0
BT	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{0,8}{200}$ (4)	$\frac{12}{75}$ (4)	$\frac{37}{4}$ (4)	$\frac{13}{14}$ (4)	$\frac{28}{14}$ (4)	$\frac{8,7}{32}$ (4)	$\frac{6,6}{14}$ (4)	$\frac{0,1}{115}$ (4)	0,1 (1)
BCca	$\frac{0,4}{200}$ (4)	$\frac{1,2}{167}$ (4)	$\frac{22}{20}$ (4)	$\frac{34}{5}$ (4)	$\frac{12}{15}$ (4)	$\frac{24}{16}$ (4)	$\frac{7,3}{18}$ (4)	$\frac{7,0}{6}$ (4)	$\frac{0,1}{102}$ (4)	0,5 (1)
Cca	$\frac{0,9}{173}$ (3)	$\frac{3,7}{139}$ (3)	$\frac{23}{14}$ (3)	$\frac{33}{10}$ (3)	$\frac{11}{18}$ (3)	$\frac{21}{17}$ (3)	$\frac{7,2}{10}$ (3)	$\frac{7,7}{5}$ (3)	$\frac{0,1}{33}$ (3)	$\frac{6,0}{46}$ (3)

Перегонная подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта

H	$\frac{0}{0}$ (2)	$\frac{0}{0}$ (2)	$\frac{24}{30}$ (2)	$\frac{53}{12}$ (2)	$\frac{9,5}{9}$ (2)	$\frac{11}{2}$ (2)	$\frac{2,0}{4}$ (2)	$\frac{5,0}{10}$ (3)	$\frac{16}{56}$ (4)	0
AEL	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{0,6}{200}$ (4)	$\frac{20}{65}$ (4)	$\frac{55}{13}$ (4)	$\frac{9,9}{33}$ (4)	$\frac{12}{31}$ (4)	$\frac{2,6}{30}$ (4)	$\frac{4,6}{19}$ (4)	$\frac{4,2}{73}$ (4)	0
EL	$\frac{1,8}{200}$ (4)	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{11}{64}$ (4)	$\frac{55}{15}$ (4)	$\frac{11}{36}$ (4)	$\frac{16}{34}$ (4)	$\frac{4,8}{49}$ (4)	$\frac{5,4}{16}$ (4)	$\frac{0,6}{74}$ (4)	0
BT	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{20}{61}$ (4)	$\frac{55}{9}$ (4)	$\frac{8,0}{39}$ (4)	$\frac{13}{36}$ (4)	$\frac{4,0}{33}$ (4)	$\frac{6,4}{4}$ (4)	$\frac{0,2}{31}$ (4)	0
BCca	$\frac{0}{0}$ (3)	$\frac{0}{0}$ (3)	$\frac{12}{79}$ (3)	$\frac{60}{13}$ (3)	$\frac{8,4}{61}$ (3)	$\frac{14}{63}$ (3)	$\frac{5,3}{55}$ (3)	$\frac{6,9}{7,3}$ (3)	$\frac{0,1}{42}$ (3)	3,9 (1)

Торфянистая подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта

T	не определяли							$\frac{4,3}{10}$ (4)	$\frac{23}{60}$ (4)	0
AEL	$\frac{0,7}{200}$ (4)	$\frac{5,8}{157}$ (4)	$\frac{23}{68}$ (4)	$\frac{47}{15}$ (4)	$\frac{8,9}{43}$ (4)	$\frac{12}{68}$ (4)	$\frac{2,6}{86}$ (4)	$\frac{4,3}{11}$ (3)	$\frac{6,6}{82}$ (4)	0
EL	$\frac{0}{0}$ (8)	$\frac{0}{0}$ (8)	$\frac{15}{36}$ (8)	$\frac{59}{4}$ (8)	$\frac{9,1}{20}$ (8)	$\frac{13}{16}$ (8)	$\frac{3,5}{17}$ (8)	$\frac{4,9}{10}$ (8)	$\frac{0,7}{45}$ (8)	0
BEL	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{21}{34}$ (4)	$\frac{55}{7}$ (4)	$\frac{7,2}{18}$ (4)	$\frac{13}{14}$ (4)	$\frac{4,6}{28}$ (4)	$\frac{5,4}{7}$ (4)	$\frac{0,2}{68}$ (4)	0
BT	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{0}{0}$ (4)	$\frac{28}{21}$ (4)	$\frac{55}{9}$ (4)	$\frac{4,9}{16}$ (4)	$\frac{8,5}{11}$ (4)	$\frac{3,6}{18}$ (4)	$\frac{5,9}{7}$ (4)	$\frac{0,1}{51}$ (4)	0
BC	$\frac{0}{0}$ (5)	$\frac{0,1}{224}$ (5)	$\frac{25}{21}$ (5)	$\frac{46}{24}$ (5)	$\frac{8,0}{22}$ (5)	$\frac{16}{37}$ (5)	$\frac{5,0}{41}$ (5)	$\frac{6,2}{9}$ (5)	$\frac{0,1}{57}$ (5)	0
Cca	$\frac{1,0}{245}$ (6)	$\frac{1,2}{238}$ (6)	$\frac{14}{78}$ (6)	$\frac{31}{17}$ (6)	$\frac{15}{26}$ (6)	$\frac{29}{19}$ (6)	$\frac{8,5}{29}$ (6)	$\frac{7,1}{14}$ (6)	$\frac{0,1}{34}$ (6)	$\frac{5,5}{64}$ (4)

Примечание. В числителе – среднее, в знаменателе – коэффициент вариации, %; В скобках – число проб; \*H-горизонт для ТЭА1 и T-горизонт для ТАС2;

Гранулометрические фракции: G7 – крупнопесчаная (1000–500 мкм), G6 – среднеспесчаная (500–250), G5 – мелкочесчаная (250–50), G4 – крупнопылевая (50–10), G3 – среднepyлевая (10–5), G2 – мелкопылевая (5–1), G1 – илстая (<1); Сорг - содержание углерода органических соединений

Почвы катены контрастно дифференцированы по содержанию илстой фракции, что обусловлено не только кислотным гидролизом, но и развитием на двучленных отложениях: покровных суглинках, подстилаемых моренными карбонатными суглинками. Содержание илстой фракции повышается в горизонте BT и максимально в остаточных карбонатных почвообразующих породах (таблица 4.1), что также типично для карельской тайги (Lukina et al., 2019). В горизонтах ао и BT содержание пылевых и илстых фракций варьирует слабо (Cv=10-

30%, приложение Г), а крупного и среднего песка – сильно из-за близости к нижнему пределу обнаружения, что для крупного песка также наблюдали в горизонте ВТ агросерых почв Брянского ополья (Кротов, Самсонова, 2009).

В палево-, дерново- и торфянисто-позолистых почвах величина рН варьирует от сильноокислой (3,7 – в скобках здесь и далее значения рН) в гумусовом и торфяном горизонтах до щелочной (8,2) в породе, что соответствует разбросу значений в почвах Центрально-Лесного заповедника (Маряхина и др., 2009). рН характеризуется низкими значениями пространственной variability в горизонтах ао и ВТ (5–9%; приложение Г), 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, 2014). Низкая пространственная изменчивость показателя рН отмечена и в других работах (Fu et al., 2013; Vogunovic et al., 2014; Reza et al., 2017).

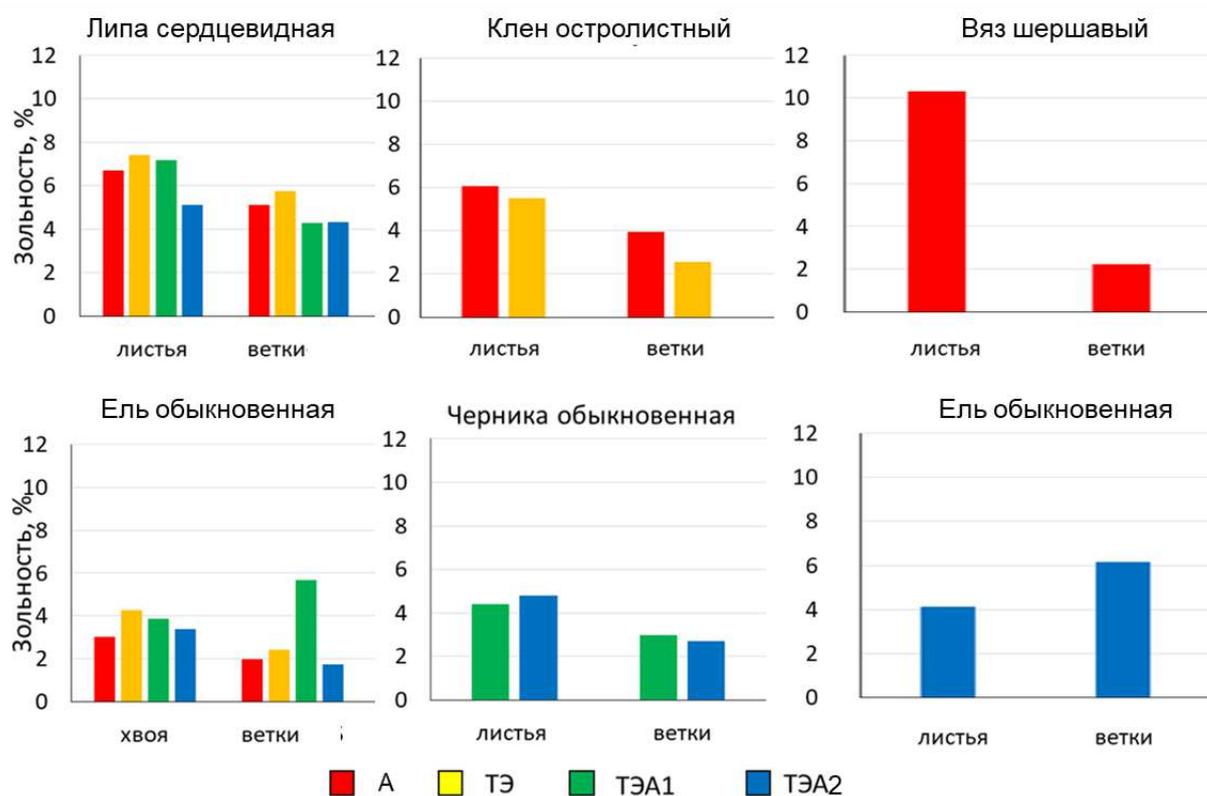
Содержание углерода органических веществ в резко падает с глубиной, что типично для почв таежной зоны (Глазовская, 2009), поэтому variability этого показателя, низкая в горизонте ао (26–29%), увеличивается в ВТ (74–100%; приложение Г). Высокая variability Сорг. ( $C_v>100\%$ ) в горизонте ВЕЛ (таблица 4.1) может быть обусловлена усилением интенсивности внутривертикальной миграции гумуса в переувлажненной подчиненной позиции, что также отражается в морфологических характеристиках почв (приложение Б). Высокие значения пространственной variability величины рН, содержания Сорг. и доступных форм элементов отмечали ранее (Самсонова и др., 1999, 2008, 2017). 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 и др., 1999, 2008, 2017).

## 4.2 Биогеохимическая структура ландшафтов

Источником органического вещества в почвах лесных биогеоценозов служат остатки растений. При накоплении и разложении органического материала продукты его распада, включающие подвижные формы химических элементов, взаимодействуют с минеральной частью почвы и влияют на миграцию, накопление и распределение ХЭ.

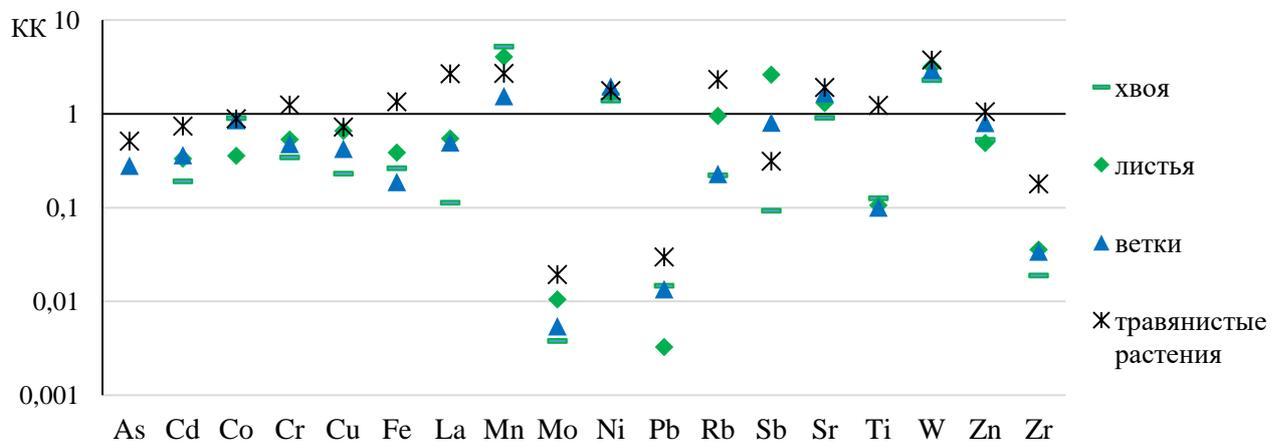
### Зольность и элементный состав растений

Среди древесных видов зольность (рисунок 4.2, приложение В) максимальна в листьях вяза шершавого (10%) в автономном ландшафте, минимальна – в хвое ели обыкновенной (3–4%). Зольность листьев липы сердцевидной увеличивается от автономной к трансэлювиальной позиции, уменьшаясь с увеличением увлажненности, что согласуется с данными по зольности хвойных и лиственных деревьев, которая колеблется в пределах 1–4 и 1–8% соответственно (Добровольский, Урусевская, 2006). Среди трав и кустарничков зольность максимальна у хвоща лесного (23%) в трансэлювиальном ландшафте и минимальна – орляка обыкновенного (7%) и сфагнома (4%), что сопоставимо с другими данными (Александрова, Люжин, 1970). Зольность доминирующего вида травяно-кустарничкового яруса – кислицы обыкновенной – варьирует в диапазоне 9–13%, что сопоставимо с данными по наземной части травянистой растительности – 3–12% (Ершов, 2015).



**Рисунок 4.2.** Зольность органов доминантных видов растений. Ландшафты катены: А – автономный ландшафт; ТЭ – трансэлювиальный пологого склона; ТЭА – трансэлювиально аккумулятивный

Фотосинтетические органы древесных растений относительно кларков (Перельман, Касимов, 1999; Markert, Franzle, 2015) обеднены большинством химических элементов (рисунок 4.3). Только содержание Mn, Ni, W и Sb повышено в листьях древесных видов (приложение В). Ветки содержат околосларковые количества Co, Cr, La, Mn, Sb, Sr, Zn, Zr. Cu, Zn и Ni (Енчилик и др., 2018). Обеднение Fe всех органов древесных растений может объясняться снижением его поглощения в сильно увлажненных кислых почвах из-за высокой активности Mn (Kabata-Pendias, Szteke, 2015). Пониженное содержание Mo в растениях катены может быть следствием осаждения доступных форм элемента на кислом барьере изучаемых почв (Перельман, Касимов, Сотникова, 1999). Для растений травяно-кустарничкового яруса характерно околосларковое содержание As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Sr, Ti, Zn, концентрирование La, Mn, Rb и W и рассеяние – Pb, Sb и Zr.



**Рисунок 4.3.** Геохимические спектры среднего элементного состава растений катены (КК) относительно кларков растений As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Rb, Sb, W, Zn (по Markert, Franzle, 2015), для La, Mo, Pb, Ni, Sr, Ti, Zr (по Перельман, Касимов, 1999)

Растения катены умеренно дифференцированы по содержанию элементов (ОСВР=0,04–25, таблица 4.4) за исключением сфагнума – сильного концентратора Pb<sub>55</sub> (подстрочный индекс – значения ОСВР). В листьях растения-эталона (липы сердцевидной) концентрация Cr, Fe, Mn, Zn минимальна в полугидроморфных ландшафтах нижней части склона. Относительно эталона в древесном ярусе наибольшее число элементов с ОСВР>2,4 содержится в хвое ели обыкновенной, которая в автономном и трансэлювиальном ландшафтах обогащена Pb и Mn и листьях клена остролистного – Pb<sub>3-8</sub> (таблица 4.4).

По сравнению с широколиственными породами, фотосинтезирующие органы ели обыкновенной слабее накапливают Cu<sub>0,4-0,7</sub>. Большинство видов растений нижних ярусов, за исключением сфагнума, слабо накапливают Ni, Cu, Sr, W (ОСВР=0,02–0,4). Травянистые растения (особенно орляк обыкновенный) концентрируют Fe<sub>1-6</sub> и Cr<sub><19</sub> (таблица 4.4). Хвои лесной в трансэлювиальном ландшафте характеризуется самыми низкими концентрациями наибольшего числа микроэлементов, что хорошо согласуется с данными Л.Б. Исаченковой и

М.В. Тарзаевой (2006). Сфагнум выделяется аккумуляцией элементов с низкой биофильностью ( $Pb_{55} Zr_{33} Ti_{26} Cr_{19} Fe_6 Cd_3 Ni_2$ ), что является его типичной особенностью благодаря большому количеству пор и водозапасающих клеток (Markert, 1992; Авессаломова, 2007).

Таблица 4.4

Значение коэффициентов ОСВР для листьев растений относительно листьев липы сердцевидной

Ландшафт	Вид	As	Bi	Cd	Cu	Co	Cr	Fe	La	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sr	Ti	W	Zn	Zr
Древесный ярус																				
А	Клен остролистный	1	0,7	4,7	0,7	0,8	0,3	0,7	1,0	2,1	0,8	0,9	0,8	0,4	0,01	0,9	0,2	1,1	2,1	0,3
	Вяз шершавый	1	1,1	0,1	0,4	0,4	0,1	0,4	3,0	0,1	1,1	0,5	0,7	0,3	0,04	0,7	0,2	1,2	0,3	0,3
	Ель обыкновенная	1	0,7	1,6	0,7	6,4	0,9	1,5	0,2	5,4	0,3	1,8	8	0,1	0,02	0,9	1,8	0,9	1,6	0,5
	Лещина обыкновенная	1	1,4	0,3	1,6	1,2	0,5	0,8	0,6	2,1	0,5	0,9	1,4	0,6	0,3	1,3	0,8	0,8	1,3	0,4
ТЭ	Клен остролистный	1	3,8	6,9	1	1	1,6	1,3	0,2	3,3	0,9	0,9	5,1	0,7	0,02	1,1	0,4	1,2	2,6	0,8
	Ель обыкновенная	1	1,9	3,1	0,5	4,6	-	1,1	0,2	4,4	0,3	1,4	3,3	0,2	0,02	1,1	0,9	0,7	2	1,1
	Лещина обыкновенная	1	1,6	0,4	1	1,6	-	1,2	1,1	2,4	0,5	1,2	1,5	0,8	0,2	1,3	0,4	0,7	1,1	0,5
	Рябина обыкновенная	1	1,4	3,3	0,8	2,6	0,2	1	0,2	2,3	0,9	0,6	1,3	1,0	0,02	1,1	0,5	0,7	1,3	0,7
ТЭА	Ива козья	7	1	4,6	1,4	1,9	-	0,7	1,6	0,2	0,9	1	0,9	0,9	0,02	1,6	0,6	1,8	6,9	0,9
	Клен остролистный	1	1,1	3,2	0,9	0,5	0,8	0,8	1,6	5,1	0,8	1,3	1,3	0,4	0,02	0,9	3,3	1,3	3,2	1,9
	Ель обыкновенная	1	2,2	1,1	0,4	1,6	0,9	0,7	0,6	1,6	0,4	1	4	0,2	0,02	0,8	2,3	0,9	2,4	1,3
	Рябина обыкновенная	1	0,9	0,7	0,7	0,3	0,8	0,4	1,1	1,7	0,6	0,5	0,9	1,1	0,5	0,9	0,6	0,8	1,1	0,8
Мохово-травяно-кустарничковый ярус																				
А	Звездчатка ланцетолистная	1	3	11	0,3	1,1	0,4	1,3	1,1	1,1	1,5	0,2	1,3	1,6	0,02	0,4	2,9	1,4	2,9	1
	Ветреница дубравная	13	6	2,2	0,4	2,8	0,8	5,7	7,4	0,4	0,8	0,4	2,7	0,8	0,02	1,1	12	1,5	1,9	4,1
	Яснотка зеленчуковая	4	3	0,3	0,4	1	0,2	1,6	2,3	0,2	1,6	0,3	1,1	1,6	0,02	0,6	3,3	1,2	1,9	0,9
	Кислица обыкновенная	16	3	0,2	0,5	1,2	0,3	1,6	1,3	0,4	1,0	0,3	1,6	1,0	0,02	0,5	3,8	1,1	0,7	1,5
	Орляк обыкновенный	6	4	2,7	0,8	2,7	3,5	4,7	20,6	0,6	2,8	1,3	2,9	1,3	0,2	0,4	12	1,4	1,1	3,8
ТЭ	Печёночница благородная	1	2	4,5	0,6	1,2	0,4	0,7	0,3	0,5	1,3	0,6	1,9	2,0	0,01	1,03	0,5	0,9	1,3	1,2
	Подмаренник душистый	4	2	1,2	0,2	0,6	0,2	0,9	1,1	0,2	1,5	0,3	0,9	1,4	0,03	0,7	1,2	1,6	1,1	1,4
	Орляк обыкновенный	1	2	5,5	0,8	1	1,7	2,7	5,3	0,9	1,3	1,1	1,4	1,2	0,2	0,4	4,3	1,4	1,9	8,6
	Яснотка зеленчуковая	1	2	0,2	0,5	0,6	0,3	1,1	0,5	0,2	1,5	0,4	1,2	2,2	0,02	0,8	1,4	1,0	1,2	2
	Копытень европейский	1	1	1,1	0,4	0,6	0,4	1	0,6	0,3	3,0	0,3	0,6	1,5	0,02	0,9	2,3	2,3	1,1	1,8
	Хвощ лесной	1	1	0,8	0,3	0,7	0,1	0,3	4,0	0,04	1,4	0,3	0,3	1,8	0,01	0,4	0,2	1,1	0,4	0,3
	Медуница неясная	1	1	2,2	0,7	0,5	0,2	0,7	0,5	0,1	2,3	0,3	0,4	2,3	0,02	0,6	0,8	1,2	0,9	1,1
	Ветреница дубравная	6	3	2,2	0,4	1,5	0,9	3,5	3,7	0,3	1,4	0,4	1,7	1,0	0,02	1,2	6,8	1,1	1,8	9,6
	Звездчатка ланцетолистная	1	1	9,7	0,5	1,2	0,2	1,4	0,3	1	1,9	0,4	0,8	2,3	0,01	0,7	1,3	1,1	3,8	1,4
	Кислица обыкновенная	1	2	0,2	0,6	1,8	0,3	1,2	0,4	0,6	1,8	0,5	1,2	2,4	0,02	0,4	0,8	1,2	0,8	1,5
ТЭА	Сфагнум	14	0	2,5	0,02	3,3	19	6	9,7	1,7	2,7	2,4	>25	0,3	1,1	1,3	>25	3,1	5,8	>25
	Орляк обыкновенный	1	1	1	0,7	0,8	4,3	1,2	>25	0,5	1,4	1,2	1,4	2,0	0,4	0,4	11	0,8	1,6	8,9
	Кислица обыкновенная	1	1	0,2	0,4	0,4	0,7	0,5	3,4	1,02	1,5	0,5	1,3	1,5	0,03	0,8	2,8	0,7	1,1	3,2
	Черника обыкновенная	1	1	0,6	0,9	0,5	-	1	2,0	3,9	0,6	0,9	1	0,9	0,02	0,2	5	0,9	1,1	3,4

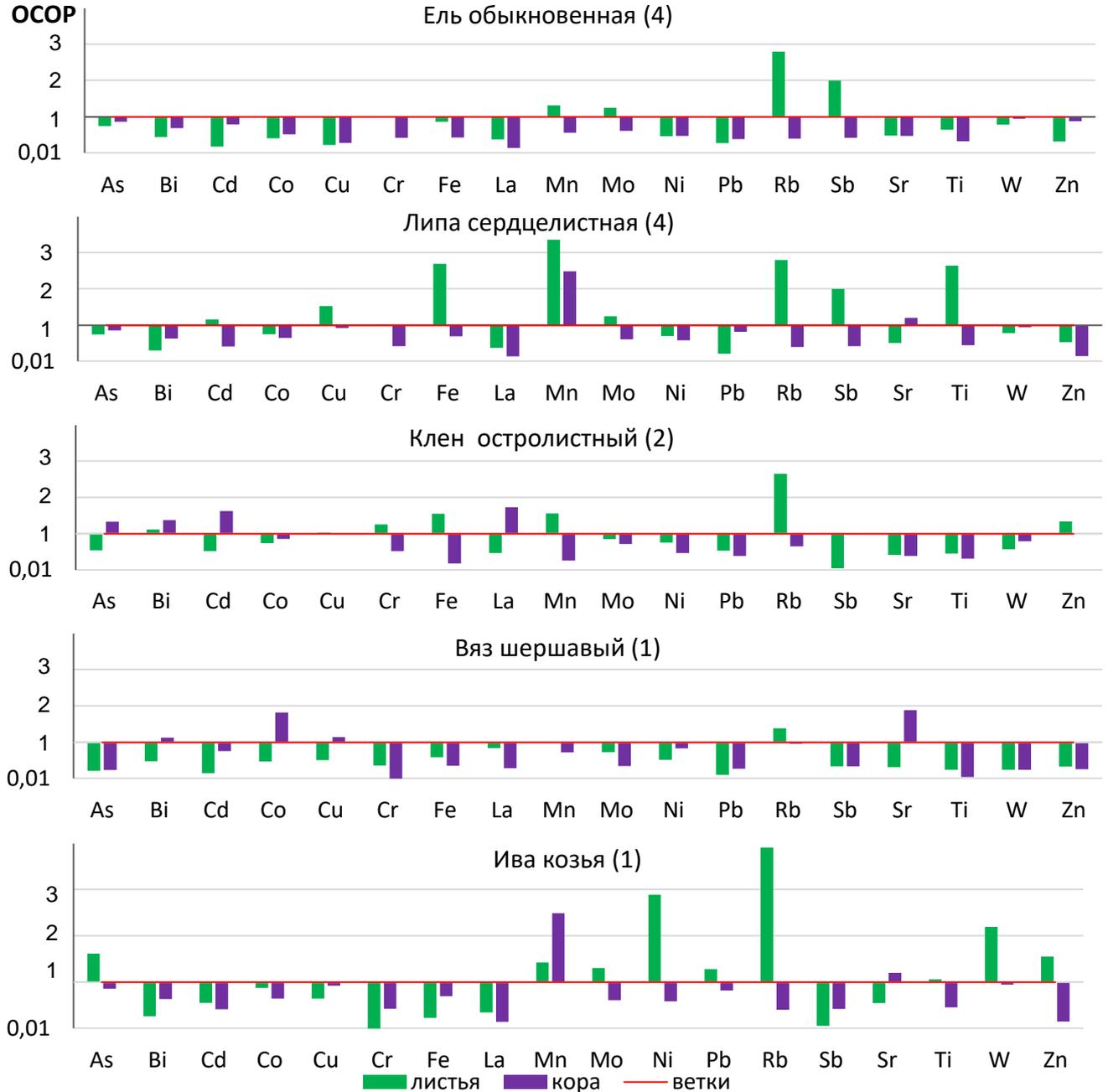
Примечание. Полужирным выделены умеренные концентраторы химических элементов. Градации даны по Ковальскому (1969):

- умеренные концентраторы (4-25)
- слабые концентраторы (2,4-4)
- сходное с эталоном сравнения содержание (0,4-2,4)
- слабые деконцентраторы (0,4-0,25)
- умеренные деконцентраторы (0,25-0,04)



Распределение элементов по органам растений (рисунок 4.3) определяется биологической активностью и ролью в живых организмах и количественно оценено с помощью коэффициента ОСОР (Ковалевский, 1969). Эталонным органом выбраны ветки, из-за околосклеротических содержаний в них многих элементов (рисунок 4.3). В старых, малоактивных крупных ветках и коре концентрируются Zn, Cu, Pb (ОСОР=0,8–1,5), что отмечали ранее для Zn в ели обыкновенной и связано с малой подвижностью Pb в растениях и сродством Cu к материалу

клеточных стенок древесины (Авессаломова, 2007; Kabata-Pendias, 2011; Gandois, Probst, 2012; Железнова, 2017). Вегетативные органы растений (хвоя и листья) накапливают активно участвующий в фотосинтезе Mn (Kabata-Pendias, 2011) и доступный растениям в кислых почвах Rb (Kabata-Pendias, Szteke, 2015).

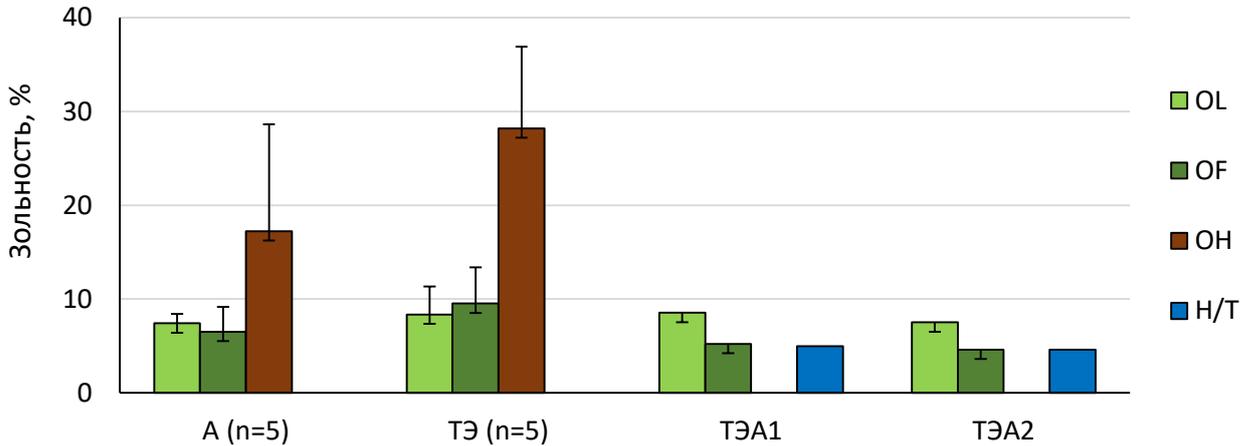


**Рисунок 4.3.** Распределение элементов по органам растений древесного яруса катены в Центрально-Лесном заповеднике, в скобках число проб

#### *Качественный состав органического вещества почв*

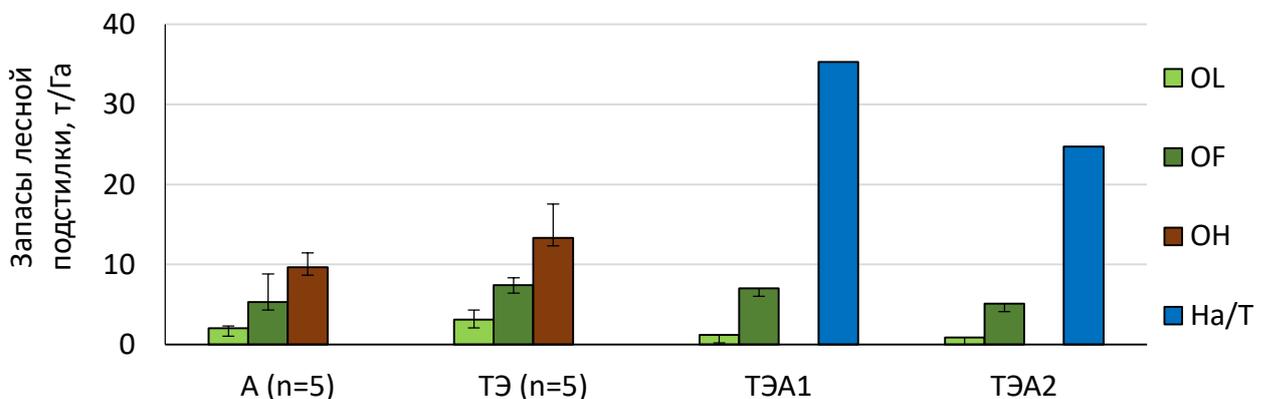
Важной характеристикой почвенного органического вещества является соотношение его стабильных и лабильных частей, поскольку трудноразлагаемые (стабильные) и легкоразлагаемые (лабильные) органические соединения выполняют разную роль в почвах, в том числе и в депонировании ХЭ.

В автономном и трансэлювиальном ландшафтах зольность органических остатков выше (20 – 40%), чем в подчиненных (4,5%; рисунок 4.4), поскольку в подчиненных ландшафтах большая часть подстилки включает хвойный опад, который беднее зольными веществами, чем лиственный. Нижние горизонты ферментированной лесной подстилки в автономном и трансэлювиальном ландшафтах обладают высокой зольностью, частично из-за примеси минеральной составляющей.



**Рисунок 4.4.** Зольность органогенных горизонтов почв в элементарных ландшафтах катены: OL – свежий опад, OF – слабоферментированная подстилка, OH – сильноферментированная подстилка, H/T – перегнойный, T – торфяной; Усы – стандартное отклонение; n – количество образцов

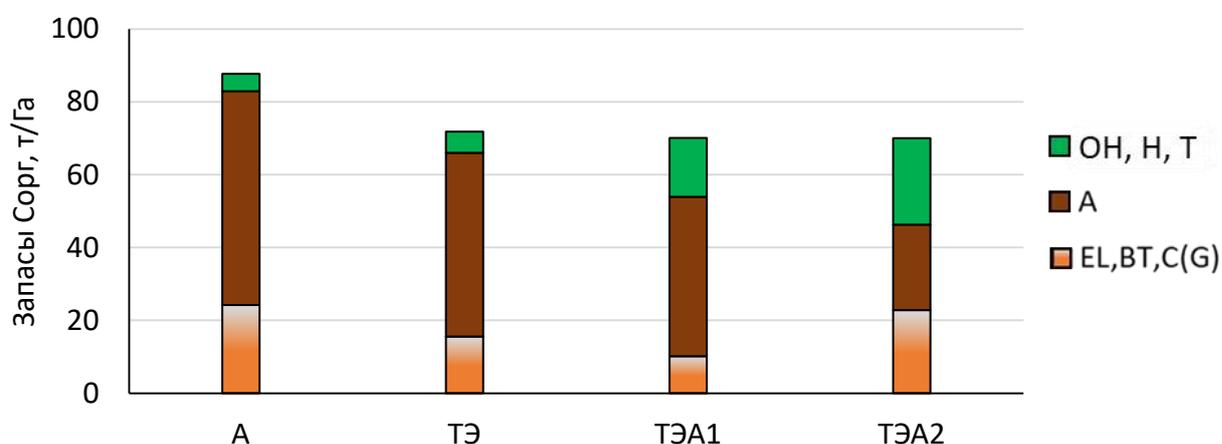
Торфяно-подзолистые почвы подчиненных ландшафтов катены характеризуются максимальным запасом лесной подстилки (рисунок 4.5), что типично для бореальных таежных экосистем (Перельман, Касимов, 1999) и особенно – южнотаежных ельников (Базилевич, Титлянова, 2008). Большая часть растительных остатков, накапливающихся на поверхности почвы (горизонты OL, OF и T) в заболоченном ландшафте катены, представлена отмершими древесными частями кустарниковой растительности и хвоей, которая разлагается медленнее, чем лиственный опад. В автономном и трансэлювиальном ландшафте, где опад в основном состоит из листьев, богатых органическим углеродом, создаются более благоприятные условия разложения из-за деятельности микроорганизмов (Vesterdal et al, 2013).



**Рисунок 4.5.** Запасы горизонтов лесной подстилки в элементарных ландшафтах катены; n – количество образцов

Запасы органического углерода (рисунок 4.6) в лесной подстилке увеличиваются вниз по катене: от 4,8 т/га в автономной позиции до 23,7 т/га в верхнем торфяном горизонте переувлажненных почв в нижней части катены. Запас углерода в переувлажненном ТЭА ландшафте находится на нижней границе диапазона 60–130 т/га для торфяных почв (Tarnocai et al., 2008).

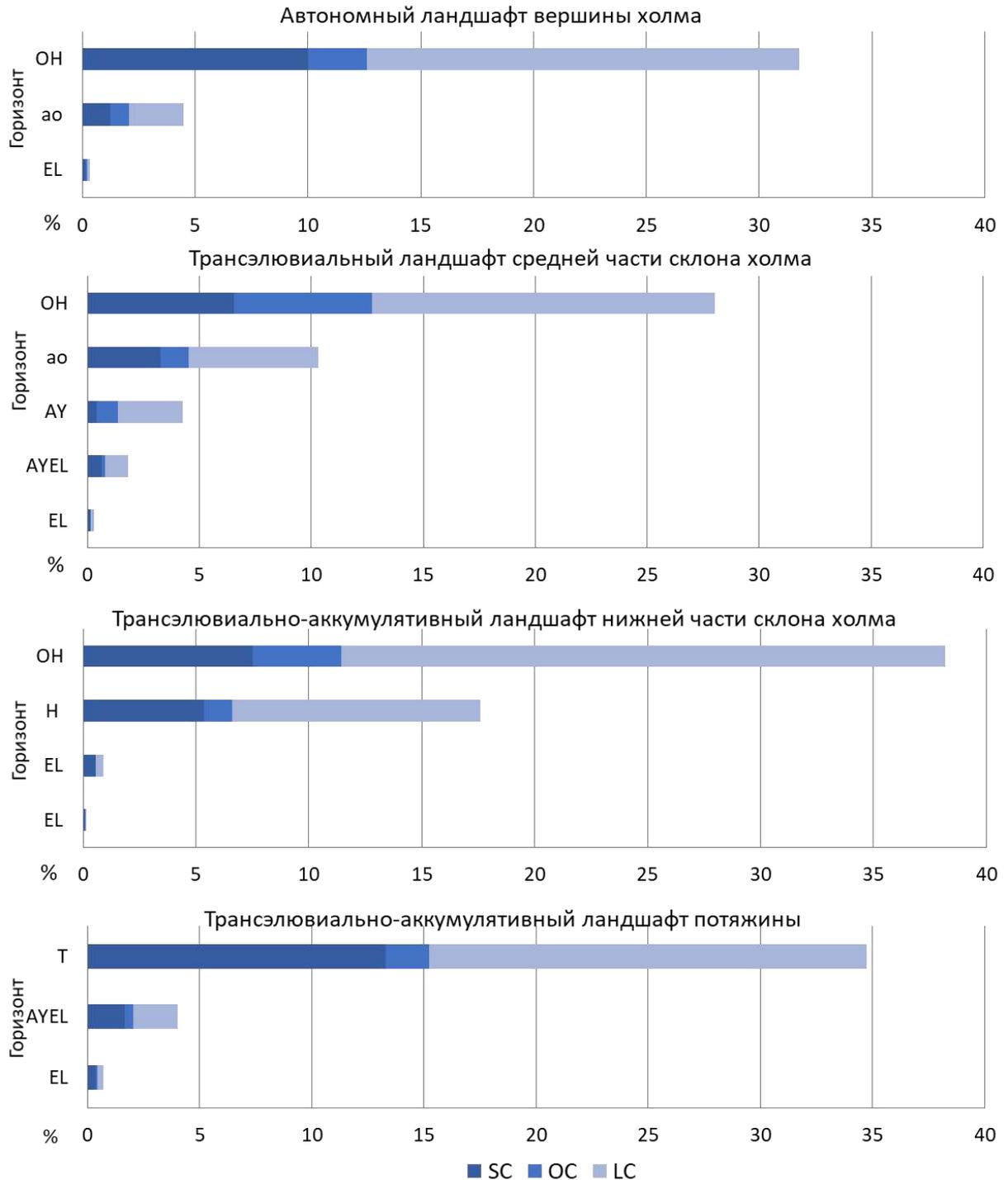
При большей дренированности почв в автономном трансэлювиальном ландшафте с хвойно-широколиственной растительностью опадо-подстилочный коэффициент составляет 7,4 и 6,7, что по данным Л.Е. Родина и Н.И. Базилевич (1968) соответствует умеренному биогеохимическому круговороту, свойственному таежно-лесным экосистемам по данным В.Н. Башкина и Н.С. Касимова (2004). В переувлажненных почвах подчиненных позиций с депрессивным типом биогеохимического круговорота (Башкин, Касимов, 2004) это соотношение увеличивается до 36.



**Рисунок 4.6.** Средние запасы органического углерода в горизонтах почв: Н – перегнойный, ОН – ферментированная подстилка, А – серогумусовый, EL – элювиальный, BT – иллювиальный, С – материнская порода, G – глеевый

Вертикальная дифференциация почв по фракционному составу почвенного органического вещества слабо отличается в разных ландшафтах катены. В верхних горизонтах почв (особенно в подстилке), в основном, сосредоточены лабильные (легко окисляемые) соединения (рисунок 4.7). Гумусовые горизонты также характеризуются большей долей лабильных фракций углерода (2–11%). Наибольшая доля стабильных фракций углерода сосредоточена в трансэлювиальном ландшафте склона (3,3%), наименьшая – в автономном (1,2%). В элювиальном горизонте преобладают средне-окисляемые и стабильные фракции углерода.

В подстилке содержание легкоразлагаемых фракций превышает содержание устойчивых фракций в 1,3–3,6 раза, в то время как в минеральных горизонтах их содержание одинаково (рисунок 4.7), что согласуется с данными по лесным почвам Чехии (Kolář, 2009). В торфе при увеличении валового содержания углерода, выравнивается соотношение легко и трудно окисляемой фракции органического углерода.



**Рисунок 4.7.** Фракции органического углерода почвы по устойчивости к окислению: LC – легко окисляемая; OC – средне-окисляемая; SC – слабоокисляемая (стабильная)

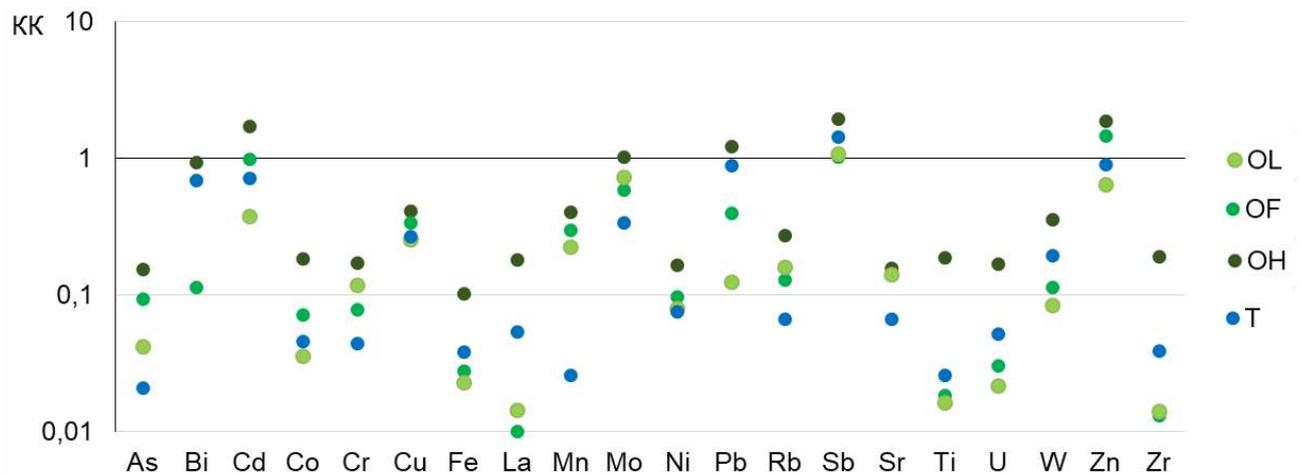
В лесной подстилке высокая доля легкоокисляемой фракции органического вещества указывает на возможную мобилизацию элементов в составе этой фракции и участие в ландшафтно-геохимической миграции в системе «почва – растения». Поступающие с растительным опадом легко доступные органо-минеральные соединения и образующиеся при разложении органические кислоты могут повышать подвижность металлов в почве: в ельниках разложение опада обогащает почву питательными веществами вблизи деревьев больше, чем на удалении (Bade, 2015). В элювиальном горизонте повышена доля средне окисляемой и

стабильной фракции органического углерода, поскольку они задерживаются в почве в виде стойких комплексов на длительный период (Lehmann, 2008).

В ферментированной подстилке ТЭА ландшафта значительно растет содержание легкоокисляемой фракции по сравнению с верхними звеньями катены, вероятно, за счет увеличения гидроморфности (Prescott, 2010). Высокая доля легкоокисляемой фракции органического углерода также подтверждает данные Н.И. Базилевич и А.А. Титляновой (2007) о специфике состава разлагающихся мхов и может свидетельствовать не только о консервации органического углерода, но и о более длительном удержании части доступных для растений соединений химических элементов в пределах этого горизонта. В таёжных катенах контрастность латерального распределения химических элементов определяют гидротермические условия (Авессаломова, 2012) и неоднородность соотношения тепла и влаги на локальном уровне приводит к соседству ландшафтов, различающихся по типу БИК. Благодаря латеральной миграции и консервации легкоокисляемых соединений органического углерода в составе слаборазложившихся органов растений, в заболоченных почвах подчиненных ландшафтов формируется латеральный сорбционно-биогеохимический барьер, приводящий к накоплению подвижных форм соединений ХЭ.

#### *Элементный состав органического вещества почв*

Содержание большинства ХЭ в горизонтах лесной подстилки, в целом, ниже кларка верхней части континентальной земной коры (рисунок 4.8) и зависит от степени разложения органического вещества. Так, концентрации Bi, Cd, Mo, Pb, Sb, Zn в наиболее ферментированной лесной подстилке сопоставимы с кларками или незначительно выше (Cd, Sb, Zn). В торфяном горизонте и свежем опаде содержания многих элементов близки к кларковым значениям.



**Рисунок 4.8.** Геохимические спектры элементного состава лесной подстилки (КК) относительно кларков верхней части земной коры (Rudnick, Gao, 2014); Горизонты почв: OL–свежий опад, OF–слабоферментированная лесная подстилка, OH – сильноферментированная лесная подстилка, Т – торф

Таким образом, в ландшафтах верхних звеньев катены более активное разложение органического вещества приводит к высвобождению из растительного опада подвижных форм Cd, Mn, Pb, Zn, концентрирующихся в листьях растений. В подчиненных переувлажненных позициях, напротив, эти элементы накапливаются в слаборазложившихся растительных остатках на более длительный период и менее активно мигрируют в нижележащие горизонты.

#### *Поглощение элементов растениями из почв*

С помощью коэффициента  $A_x$ , рассчитанного для отдельных видов древесного яруса и всей совокупности травянистых растений, определены ХЭ, наиболее активно вовлеченные в бик и выявлены главные растения концентраторы и деконцентраторы.

В южнотаежной катене древесные растения интенсивнее травянистых концентрируют Mn, Zn и Cd (таблица 4.5), которые в таежных ландшафтах относятся к элементам интенсивного накопления (Авессаломова, 2007), а также Vi, который в большей степени поглощается растениями пассивно – без энергозатрат, то есть за счет диффузии (Kabata-Pendias, Szteke, 2015). Слабое накопление Zn, Mn, Cd также отмечалось на юго-востоке Валдайской возвышенности в хвое сосны в бассейне озера Селигер (Сулова и др., 2012). Из перечисленных элементов только Mn и Zn являются эссенциальными, то есть оказывающими непосредственное влияние на метаболизм растений (Баргальи, 2005). Высокое содержание Mn свойственно широколиственным породам (Железнова и др., 2017). Zn подвижен в почвах и активно поглощается растениями (Jen-How, Huang, 2011, Kabata-Pendias, 2011). В рядах биологического поглощения металлов большинством растений трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта первым стоит Mn, который при пониженном содержании в почве может задерживаться в старых органах растений (Watmough et al. 2007). Кроме того, в кислых почвах с высоким содержанием органического вещества повышается его фитодоступность (Kabata-Pendias, Szteke, 2015). Максимальные  $A_x$  наблюдаются в вегетативных органах древесных растений: хвое ели обыкновенной Mn и сфагнуме (Енчилик и др., 2020). В хвое ели обыкновенной содержится много Mn, поскольку он не связывается с нерастворимыми органическими соединениями и легко переносится в растениях (Peng et al., 2008). На междуречье и в нижней части склона растения интенсивнее извлекают из почв Vi. Также для этого элемента отмечено пониженное содержание в сфагнуме, что согласуется с данными по элементному составу мхов Норвегии (Berg, Steinnes, 1997). Все органы ивы козьей интенсивно накапливают подвижный Cd и Zn, вероятно, благодаря видовым особенностям, что отмечали ранее на пойме Иртыша в Омской области (Макарова, 2009). Cd интенсивнее извлекается из растениями в трансэлювиально-аккумулятивном ландшафте потяжины, в автономном и склоновом ландшафте элемент задерживается в ветках и коре древесных видов (таблица 4.5).

Таблица 4.5

Ряды биологического поглощения элементов растениями Центрально-Лесного заповедника по значениям коэффициента Ах

Ландшафт	Ярус	Вид	Орган	Интенсивное и среднее накопление		Слабое накопление и сильный захват		Средний и (очень) слабый захват		БХА
				30	10	1	0,1	0,01		
Автономный	Д	Ель обыкновенная	хвоя	<b>Mn<sub>109</sub></b>	<b>Bi<sub>20</sub></b> Rb <sub>12</sub>	Ni Cu <sub>7</sub> Sr Zn <sub>6</sub> Mo <sub>3</sub> Cd <sub>3</sub> Co <sub>3</sub> W <sub>2</sub>	Cr <sub>0,8</sub> Fe <sub>0,4</sub> U <sub>0,3</sub> Sb <sub>0,2</sub>	La <sub>0,05</sub> Ti <sub>0,04</sub>	Zr <sub>0,01</sub> Pb <sub>0,004</sub> As <sub>0</sub>	<b>178</b>
			ветки	<b>Mn<sub>87</sub> Bi<sub>39</sub> Cd<sub>36</sub></b> <b>Cu<sub>35</sub> Zn<sub>32</sub></b>	Sr <sub>16</sub> Rb <sub>15</sub> Ni <sub>13</sub>	Co <sub>9</sub> Mo <sub>8</sub> W <sub>5</sub> Cr <sub>1,2</sub>	Sb <sub>0,5</sub> U <sub>0,4</sub> Fe Zr <sub>0,3</sub> La <sub>0,1</sub>	-	Ti <sub>0,04</sub> Pb <sub>0,008</sub> As <sub>0</sub>	<b>294</b>
			кора	-	<b>Mn Bi<sub>27</sub> Zn<sub>24</sub></b> <b>Cd<sub>22</sub> Sr<sub>10</sub></b>	Cu <sub>9</sub> Rb <sub>5</sub> Ni <sub>4</sub> Co Mo Sb <sub>3</sub> W <sub>2</sub>	Cr <sub>0,3</sub> Fe <sub>0,2</sub> U <sub>0,1</sub>	La <sub>0,05</sub> Pb <sub>0,03</sub> Ti <sub>0,02</sub>	Zr <sub>0,01</sub> As <sub>0</sub>	<b>139</b>
		Липа сердцевидная	листья	<b>Rb<sub>43</sub></b>	Mn <sub>20</sub> Cu <sub>10</sub>	Sr Sb <sub>7</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>4</sub> Zn <sub>3</sub> Bi Cd <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	Cr <sub>0,8</sub> Co <sub>0,4</sub> La U Fe <sub>0,2</sub>	Zr <sub>0,03</sub> Ti <sub>0,02</sub>	As Pb <sub>0</sub>	<b>104</b>
			ветки	<b>Bi<sub>37</sub></b>	Sr <sub>19</sub> Mn <sub>13</sub> Rb <sub>12</sub>	Cu <sub>9</sub> Ni Zn <sub>8</sub> Sb Mo <sub>5</sub> Cd <sub>3</sub> Co W <sub>1</sub>	Cr <sub>0,8</sub> La <sub>0,6</sub> Fe U <sub>0,2</sub>	Ti <sub>0,02</sub>	Zr <sub>0,01</sub> Pb <sub>0,005</sub> As <sub>0</sub>	<b>121</b>
			кора	-	<b>Mn<sub>29</sub> Sr<sub>22</sub></b> <b>Bi<sub>19</sub> Cu<sub>10</sub></b>	Rb <sub>6</sub> Ni <sub>5</sub> Mo <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	Cd Zn <sub>1</sub> Co <sub>0,7</sub> Cr <sub>0,2</sub> U <sub>0,1</sub>	Fe La <sub>0,05</sub>	Ti <sub>0,01</sub> Zr Pb <sub>0,004</sub> As <sub>0</sub>	97
		Клен остролистный	листья	<b>Mn<sub>42</sub></b>	Rb <sub>20</sub>	Cd Zn Cu Sr <sub>7</sub> Mo <sub>4</sub> Ni <sub>3</sub> Bi <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	Co La <sub>0,3</sub> Cr U Fe <sub>0,2</sub>	Sb <sub>0,05</sub> Zr <sub>0,01</sub>	Ti <sub>0,01</sub> As Pb <sub>0</sub>	<b>101</b>
			ветки	-	<b>Mn<sub>29</sub> Bi<sub>22</sub> Sr</b> <b>Cd<sub>19</sub></b>	Cu <sub>9</sub> Zn Rb <sub>8</sub> Mo Ni <sub>4</sub> Sb <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	La <sub>0,6</sub> Co <sub>0,5</sub> U <sub>0,3</sub> Cr <sub>0,2</sub> Fe <sub>0,1</sub>	Ti Zr <sub>0,01</sub>	Pb <sub>0,003</sub> As <sub>0</sub>	<b>125</b>
			кора	<b>Mn<sub>70</sub> Cd<sub>43</sub></b>	<b>Cr<sub>29</sub> Bi Sr<sub>16</sub></b> Cu <sub>11</sub>	Zn <sub>8</sub> Rb <sub>4</sub> Sb Ni <sub>3</sub> Mo <sub>2</sub>	W <sub>1</sub> Co <sub>0,8</sub> As <sub>0,2</sub> U Fe <sub>0,1</sub>	La <sub>0,05</sub> Pb <sub>0,02</sub>	Ti <sub>0,01</sub> Zr <sub>0,005</sub>	<b>205</b>
	Вяз шершавый	листья	-	-	Rb <sub>9</sub> Sr <sub>5</sub> Cu <sub>4</sub> Mo <sub>3</sub> Ni Mn Bi <sub>2</sub>	Zn W <sub>1</sub> La <sub>0,5</sub> Co Sb <sub>0,2</sub> Cd U Cr <sub>0,1</sub>	Fe <sub>0,05</sub> Zr <sub>0,01</sub>	Ti <sub>0,005</sub> As Pb <sub>0</sub>	28	
		ветки	-	<b>Bi<sub>17</sub> Sr<sub>16</sub></b>	Cu <sub>9</sub> Rb <sub>6</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>4</sub> W Zn <sub>3</sub> Mn <sub>2</sub> Cd <sub>1</sub>	La <sub>0,6</sub> Sb U <sub>0,5</sub> Co <sub>0,4</sub> Cr <sub>0,3</sub> Fe <sub>0,2</sub>	Ti <sub>0,02</sub> Zr <sub>0,01</sub>	As Pb <sub>0</sub>	66	
		кора	<b>Sr<sub>30</sub></b>	Cu <sub>10</sub>	Rb <sub>6</sub> Bi <sub>5</sub> Ni <sub>3</sub> Mo <sub>2</sub> Mn <sub>1</sub>	Cd W Zn <sub>1</sub> Co <sub>0,7</sub> Sb La <sub>0,2</sub>	U Fe <sub>0,1</sub> Pb <sub>0,004</sub> Zr <sub>0,002</sub>	Ti <sub>0,001</sub> As Cr <sub>0</sub>	57	
	Т-к	Кислица обыкновенная	-	<b>Rb<sub>25</sub></b>	Mn <sub>9</sub> Cu <sub>5</sub> Bi Sr <sub>4</sub> Mo <sub>3</sub> Zn <sub>2</sub>	Ni <sub>1</sub> As <sub>0,7</sub> U <sub>0,6</sub> W Co Cd <sub>0,5</sub> Fe <sub>0,4</sub> Cr <sub>0,3</sub> La <sub>0,2</sub>	Ti <sub>0,09</sub> Sb <sub>0,06</sub> Zr <sub>0,04</sub>	Pb <sub>0,01</sub>	51	
		Орляк обыкновенный	<b>Rb<sub>42</sub></b>	Mn <sub>12</sub>	Mo <sub>10</sub> Cu <sub>8</sub> Bi <sub>7</sub> Ni <sub>5</sub> Cd La Zn <sub>4</sub> Cr Sr <sub>3</sub> U <sub>2</sub> W Fe Co Sb <sub>1</sub>	As Ti <sub>0,3</sub> Zr <sub>0,1</sub>	Pb <sub>0,01</sub>	-	<b>108</b>	
	Трансэволюционный	Ель обыкновенная	хвоя	-	<b>Mn<sub>27</sub></b>	Zn Bi <sub>7</sub> Rb Cd Cu <sub>6</sub> Sr <sub>5</sub> Mo Ni <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	Co Sb <sub>1</sub> U <sub>0,14</sub> Fe <sub>0,12</sub>	La <sub>0,05</sub> Pb <sub>0,02</sub> Ti <sub>0,01</sub>	Zr <sub>0,003</sub> As Cr <sub>0</sub>	68
			ветки	-	<b>Cd<sub>24</sub> Bi<sub>23</sub></b> <b>Cu<sub>21</sub> Zn<sub>19</sub></b> Mn <sub>17</sub> Sr <sub>10</sub>	Rb <sub>6</sub> Mo Ni <sub>4</sub> Co W <sub>3</sub> Sb <sub>1</sub>	U Fe <sub>0,2</sub>	La <sub>0,09</sub> Pb <sub>0,08</sub> Ti <sub>0,02</sub> Zr <sub>0,01</sub>	As Cr <sub>0</sub>	<b>136</b>
			кора	-	<b>Cd<sub>28</sub> Zn<sub>23</sub> Bi</b> Cu Mn <sub>12</sub>	Sr <sub>6</sub> Rb <sub>3</sub> Mo Ni Co W <sub>2</sub>	Sb <sub>1</sub> U <sub>0,15</sub>	Fe <sub>0,06</sub> La <sub>0,05</sub> Pb Ti <sub>0,01</sub>	Zr <sub>0,002</sub> As Cr <sub>0</sub>	<b>101</b>
		Липа сердцевидная	листья	-	Rb <sub>20</sub> Sb <sub>15</sub> Cu <sub>12</sub>	Mn <sub>6</sub> Sr <sub>5</sub> Mo Zn <sub>4</sub> Bi Cd <sub>2</sub> Ni W <sub>1</sub>	Cr <sub>0,3</sub> Co La <sub>0,2</sub> Fe <sub>0,1</sub>	U <sub>0,05</sub> Ti <sub>0,01</sub>	Zr <sub>0,003</sub> As Pb <sub>0</sub>	72
ветки			-	-	Bi Sr Zn <sub>8</sub> Cu <sub>6</sub> Rb <sub>5</sub> Ni Mo <sub>3</sub> Mn Cd <sub>2</sub> W Sb <sub>1</sub>	Co <sub>0,4</sub> La <sub>0,3</sub> Cr <sub>0,2</sub>	U <sub>0,1</sub> Fe <sub>0,03</sub>	Pb Ti <sub>0,002</sub> Zr <sub>0,001</sub> As <sub>0</sub>	47	
кора			-	Sr <sub>11</sub>	Mn <sub>7</sub> Cu <sub>6</sub> Rb Bi <sub>3</sub> Sb Mo W <sub>2</sub> Ni <sub>1</sub>	Cd Zn <sub>0,4</sub> Co <sub>0,3</sub>	U <sub>0,05</sub> Fe <sub>0,03</sub> La <sub>0,02</sub>	Pb <sub>0,003</sub> Zr Ti <sub>0,001</sub> As Cr <sub>0</sub>	36	
Клен остролистный		листья	-	<b>Mn<sub>21</sub> Rb<sub>19</sub></b> Cu Cd <sub>12</sub> Bi <sub>11</sub>	Zn <sub>9</sub> Sr Mo <sub>5</sub> W <sub>2</sub> Ni <sub>1</sub>	Cr Sb <sub>0,4</sub> Co <sub>0,2</sub> Fe U <sub>0,1</sub>	La <sub>0,04</sub>	Ti <sub>0,004</sub> Zr Pb <sub>0,002</sub> As <sub>0</sub>	97	
		ветки	-	<b>Cd<sub>18</sub> Mn<sub>13</sub></b> Bi <sub>11</sub> Sr <sub>10</sub>	Cu <sub>10</sub> Rb <sub>7</sub> Mo <sub>6</sub> Sb Zn <sub>5</sub> W <sub>4</sub> Ni <sub>2</sub>	Cr Co <sub>0,3</sub> U <sub>0,13</sub>	Fe La <sub>0,05</sub> Ti <sub>0,01</sub>	Pb <sub>0,004</sub> Zr <sub>0,003</sub> As <sub>0</sub>	91	
		кора	-	Mn <sub>13</sub> Sr <sub>12</sub>	Cd <sub>10</sub> Cu <sub>5</sub> Zn <sub>3</sub> Bi Rb <sub>2</sub> Ni <sub>1</sub>	Mo <sub>0,9</sub> W <sub>0,6</sub> Sb Co <sub>0,4</sub>	La <sub>0,04</sub> Fe U <sub>0,02</sub>	Pb <sub>0,004</sub> Zr <sub>0,0004</sub> As Cr Ti <sub>0</sub>	50	
Т-к		Орляк обыкновенный	-	<b>Rb<sub>25</sub> Cu<sub>12</sub></b> Cd <sub>11</sub>	Zn <sub>8</sub> Mn <sub>7</sub> Mo <sub>6</sub> Sb Bi <sub>3</sub> Sr Ni <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	La <sub>0,9</sub> U <sub>0,6</sub> Cr <sub>0,5</sub> Fe <sub>0,4</sub> Co <sub>0,2</sub>	Ti <sub>0,06</sub> Zr <sub>0,03</sub>	Pb <sub>0,002</sub> As <sub>0</sub>	81	
	Кислица обыкновенная	-	<b>Rb<sub>27</sub></b>	Cu <sub>7</sub> Mo Mn <sub>4</sub> Zn Bi <sub>3</sub> Sr <sub>2</sub>	W Ni <sub>1</sub> Co <sub>0,4</sub> Cd <sub>0,3</sub> Sb <sub>0,2</sub> Fe <sub>0,1</sub>	U Cr <sub>0,1</sub> La <sub>0,04</sub> Ti Pb <sub>0,01</sub>	Zr <sub>0,004</sub> As <sub>0</sub>	50		

Трансэлювиально-аккумулятивный подножья склона	Д	хвоя	<b>Mn<sub>315</sub></b> <b>Zn<sub>22</sub></b> Rb <sub>18</sub> Sr <sub>14</sub> Bi <sub>13</sub>	Cd <sub>7</sub> Cu <sub>5</sub> Ni <sub>4</sub> W Mo <sub>2</sub> Co <sub>1,4</sub>	Sb <sub>1</sub> U <sub>0,2</sub>	La Fe <sub>0,05</sub> Ti <sub>0,04</sub> Pb <sub>0,02</sub> Zr <sub>0,01</sub>	As Cr <sub>0</sub>	<b>403</b>		
		Ель обыкновенная	ветки	<b>Mn<sub>199</sub></b> <b>Zn<sub>61</sub></b> <b>Bi<sub>42</sub></b> <b>Cd<sub>29</sub></b> <b>Sr<sub>26</sub></b> <b>Cu<sub>21</sub></b> Rb <sub>18</sub>	Ni <sub>8</sub> W <sub>6</sub> Co Mo <sub>4</sub> Sb <sub>1</sub>	U <sub>0,3</sub> La Fe <sub>0,1</sub>	Pb <sub>0,08</sub> Ti <sub>0,07</sub> Zr <sub>0,02</sub>	As Cr <sub>0</sub>	<b>419</b>	
		кора	<b>Mn<sub>133</sub></b> <b>Zn<sub>71</sub></b> <b>Cd<sub>33</sub></b> <b>Bi<sub>22</sub></b> Sr <sub>16</sub> Cu <sub>11</sub>	Rb <sub>8</sub> Ni <sub>4</sub> W <sub>3</sub> Co Mo <sub>2</sub>	Sb <sub>1</sub> U <sub>0,2</sub>	La Fe <sub>0,05</sub> Ti <sub>0,03</sub> Zr Pb <sub>0,01</sub>	As Cr <sub>0</sub>	<b>305</b>		
	Д	Липа сердцевидная	листья	<b>Mn<sub>243</sub></b> <b>Rb<sub>60</sub></b> <b>Zn<sub>29</sub></b> <b>Bi<sub>20</sub></b> <b>Cd</b> Sr <sub>14</sub> Cu <sub>12</sub>	Mo <sub>5</sub> W Ni <sub>3</sub>	Cr <sub>0,6</sub> Sb <sub>0,4</sub> Co <sub>0,3</sub> U <sub>0,1</sub>	Fe La <sub>0,1</sub> Ti Zr <sub>0,01</sub>	Pb <sub>0,002</sub> As <sub>0</sub>	<b>403</b>	
		ветки	<b>Mn<sub>145</sub></b> <b>Sr<sub>27</sub></b> <b>Rb<sub>23</sub></b> <b>Cd<sub>22</sub></b> <b>Bi<sub>20</sub></b> <b>Zn<sub>16</sub></b>	Cu <sub>9</sub> W <sub>7</sub> Mo <sub>6</sub> Sb <sub>5</sub> Ni <sub>4</sub>	Cr <sub>0,5</sub> Co <sub>0,4</sub> U <sub>0,2</sub>	La <sub>0,1</sub> Fe <sub>0,05</sub> Ti <sub>0,03</sub> Zr <sub>0,01</sub>	Pb <sub>0,005</sub> As <sub>0</sub>	<b>284</b>		
		кора	<b>Mn<sub>154</sub></b> <b>Sr<sub>32</sub></b> Cd <sub>12</sub> Zn <sub>10</sub>	Rb <sub>7</sub> Cu Bi <sub>5</sub> Ni <sub>3</sub> W <sub>1</sub>	Mo <sub>1</sub> Co <sub>0,5</sub> Sb <sub>0,4</sub>	La <sub>0,1</sub> U Fe <sub>0,02</sub>	Pb <sub>0,004</sub> Zr <sub>0,002</sub> As Cr Ti <sub>0</sub>	<b>228</b>		
	Трансэлювиально-аккумулятивный потяжны	Д	хвоя	<b>Mn<sub>32</sub></b> <b>Cd<sub>19</sub></b> Zn <sub>13</sub>	Mo <sub>7</sub> Bi <sub>6</sub> Cu Rb <sub>4</sub> W Sr <sub>3</sub> Ni Sb <sub>1</sub>	Co <sub>0,7</sub> U Cr Fe <sub>0,1</sub>	La <sub>0,03</sub> Ti Pb <sub>0,02</sub>	Zr <sub>0,004</sub> As <sub>0</sub>	94	
			Ель обыкновенная	ветки	<b>Cd<sub>92</sub></b> <b>Zn<sub>49</sub></b> <b>Bi<sub>30</sub></b> <b>Mn<sub>22</sub></b> Cu <sub>19</sub> Mo <sub>11</sub>	Rb <sub>7</sub> W <sub>6</sub> Sr <sub>5</sub> Ni <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> Co <sub>1</sub>	Cr U <sub>0,3</sub> Fe Pb <sub>0,1</sub>	La <sub>0,05</sub> Ti <sub>0,03</sub> Zr <sub>0,01</sub>	As <sub>0</sub>	<b>247</b>
			кора	<b>Cd<sub>69</sub></b> <b>Zn<sub>35</sub></b> Mn <sub>13</sub>	Bi Mo Cu <sub>3</sub> Rb W <sub>2</sub> Sr Ni <sub>1</sub>	Sb <sub>1</sub> Co <sub>0,6</sub> Cr Pb <sub>0,1</sub>	U <sub>0,05</sub> Fe <sub>0,03</sub> La Ti <sub>0,01</sub>	Zr <sub>0,002</sub> As <sub>0</sub>	<b>133</b>	
		Д	Липа сердцевидная	листья	<b>Sb<sub>32</sub></b> <b>Mn<sub>21</sub></b> <b>Cd<sub>17</sub></b> Rb <sub>12</sub> Cu <sub>11</sub>	Mo <sub>9</sub> Zn <sub>5</sub> Sr <sub>3</sub> W <sub>2</sub> Ni Bi <sub>1</sub>	Co <sub>0,5</sub> Fe <sub>0,2</sub> Cr U <sub>0,1</sub>	La <sub>0,03</sub> Ti <sub>0,01</sub>	Pb <sub>0,004</sub> Zr <sub>0,003</sub> As <sub>0</sub>	<b>115</b>
			ветки	- Zn <sub>11</sub>	Cd <sub>8</sub> Cu Sb <sub>6</sub> Mo <sub>5</sub> Sr <sub>4</sub> Bi Mn Rb <sub>3</sub> W Ni <sub>1</sub>	Co <sub>0,2</sub> Cr <sub>0,1</sub>	U <sub>0,1</sub> Fe La <sub>0,03</sub> Ti <sub>0,01</sub>	Pb <sub>0,003</sub> Zr <sub>0,002</sub> As <sub>0</sub>	50	
			Клен остролистный	листья	<b>Mn<sub>107</sub></b> <b>Cd<sub>55</sub></b> <b>Zn<sub>17</sub></b> Mo Cu <sub>11</sub>	Rb <sub>7</sub> W <sub>4</sub> Sr <sub>3</sub> Ni Bi <sub>2</sub>	Sb <sub>1</sub> U <sub>0,3</sub> Co <sub>0,2</sub> Fe <sub>0,1</sub>	Cr <sub>0,1</sub> La <sub>0,03</sub> Ti Zr <sub>0,01</sub>	As Pb <sub>0</sub>	<b>218</b>
Ива козья		листья	<b>Cd<sub>78</sub></b> <b>Zn<sub>37</sub></b> Cu <sub>16</sub> Rb <sub>13</sub> Mo <sub>10</sub>	Sr <sub>5</sub> W Mn <sub>4</sub> Ni <sub>2</sub> Bi <sub>1</sub>	Sb <sub>1</sub> Co <sub>0,9</sub> As <sub>0,5</sub> Fe <sub>0,1</sub>	U <sub>0,05</sub> La <sub>0,03</sub> Ti <sub>0,01</sub>	Zr <sub>0,003</sub> Cr Pb <sub>0</sub>	<b>171</b>		
		ветки	<b>Cd<sub>74</sub></b> <b>Zn<sub>46</sub></b> Sb <sub>13</sub>	Mo <sub>8</sub> Cu <sub>6</sub> Bi Sr <sub>5</sub> Rb Mn <sub>3</sub> W Ni <sub>2</sub>	Co <sub>0,6</sub> As Cr <sub>0,3</sub> U <sub>0,1</sub>	La <sub>0,03</sub> Fe Pb Ti <sub>0,01</sub>	Zr <sub>0,004</sub>	<b>166</b>		
		кора	<b>Cd<sub>92</sub></b> <b>Zn<sub>75</sub></b> Bi <sub>12</sub>	Sr <sub>7</sub> Cu <sub>6</sub> Mo <sub>5</sub> Rb Mn <sub>3</sub> W Sb Ni <sub>2</sub> Co <sub>1</sub>	Cr <sub>0,1</sub>	La Fe <sub>0,04</sub> Pb <sub>0,03</sub> Ti <sub>0,01</sub>	Zr <sub>0,002</sub> As U <sub>0</sub>	<b>211</b>		
Т-к		Сфагнум	<b>Cd<sub>57</sub></b> <b>Sb<sub>53</sub></b> <b>Mo<sub>36</sub></b> <b>Mn<sub>35</sub></b> <b>Zn<sub>31</sub></b>	-	Cu W <sub>9</sub> Pb <sub>7</sub> Rb <sub>5</sub> Sr <sub>4</sub> Ni <sub>3</sub> Cr Co <sub>2</sub> As <sub>1</sub>	Fe <sub>0,9</sub> Zr <sub>0,1</sub>	La <sub>0,03</sub> Ti <sub>0,01</sub>	Bi U <sub>0</sub>	<b>255</b>	
		Орляк обыкновенный	-	<b>Rb<sub>23</sub></b> <b>Cd<sub>17</sub></b> Mo <sub>11</sub> Sb <sub>10</sub>	Mn <sub>10</sub> Zn Cu <sub>8</sub> Bi Ni <sub>2</sub> La <sub>1,5</sub> Sr W <sub>1</sub>	U <sub>0,6</sub> Cr <sub>0,5</sub> Co <sub>0,3</sub>	La <sub>0,03</sub> Zr <sub>0,03</sub> Pb <sub>0,02</sub> Ti <sub>0,01</sub>	As <sub>0</sub>	95	
		Кислица обыкновенная	-	<b>Mn<sub>21</sub></b> Rb <sub>12</sub>	Mo <sub>9</sub> Zn <sub>6</sub> Cu <sub>4</sub> Cd <sub>3</sub> Sr Bi <sub>2</sub>	W Ni Sb <sub>1</sub> U Co <sub>0,2</sub> Pb <sub>0,11</sub>	Fe <sub>0,05</sub> La <sub>0,03</sub> Cr <sub>0,02</sub> Ti Zr <sub>0,01</sub>	As <sub>0</sub>	60	

Примечание - Д – древесный ярус, Т-к – травяно-кустарничковый; полужирным выделены элементы с  $Ax > 20$ , красный - Mn с  $Ax > 25$ , синий - Bi с  $Ax > 15$ , зеленый - Cd и Zn с  $Ax > 15$ ; полужирный курсив – значения БХА > 100

Элементами среднего накопления во всех изученных ландшафтах катены являются Sr, Cu и Rb. В подчиненном ландшафте Ni активнее извлекается из почв, поскольку увеличение значений рН в автономном и трансэлювиальном ландшафтах ингибирует поглощение металла (Kabata-Pendias, Szteke, 2015). В ветках и коре деревьев концентрируется  $Sr_{>30}$ , а  $Cu_{6-46}$  – в листьях липы сердцевидной и травянистых растениях, что ранее описано для таежных ландшафтов центра Восточно-Европейской равнины (Железнова и др., 2017) и канадской тайги (Watmough, 2014). В ветках ели обыкновенной наблюдается большой разброс значений  $A_x$  для  $Cu_{19-46}$ , вероятно, из-за различного возраста деревьев (Kabata-Pendias, Szteke, 2015). В листьях деревьев (липы сердцевидной, клена остролистного) автономного и трансэлювиального ландшафта интенсивнее всего накапливается участвующая во многих физиологических процессах  $Cu_{5-12}$ . Фитодоступность Rb увеличивается в кислых почвах катены (Kabata-Pendias, Szteke, 2015).

Растения травяно-кустарничкового яруса в автономном и трансэлювиальном ландшафтах активно поглощают  $Cu_{6-19}$ , играющую важную роль в дыхании, фотосинтезе, метаболизме белков и ферментов, участвующих в окислительно-восстановительных реакциях. Высокое поглощение Cu растениями объясняется синергизмом с Mn (Kabata-Pendias, Szteke, 2015). В ветках и коре задерживается выполняющий скелетные функции  $Sr_{16-21}$  (таблица 4.5). Листья деревьев и трав легко усваивают Rb из кислых почв. В подчиненных ландшафтах в биологическом поглощении увеличивается роль Mo и Sb, соединения которых поступают в растения в более щелочных условиях благодаря близкому залеганию грунтовых вод (приложение Б).

Слабее всего в БИК вовлекаются  $Sr_{0-0,7}$  и  $Fe_{0,01-0,7}$  при высокой межвидовой вариабельности показателя. Fe активнее поглощается травянистыми растениями, чем древесными.

В изученных растениях БХА варьирует в пределах 14–186 с наибольшим вкладом Mn, Cd, Bi и Zn в автономном ландшафте и в нижней части склона и Mn, Cd и Zn – в заболоченной потяжине. В фотосинтетически активных органах БХА максимальна у ели (68–403), липы (72–403) и сфагнума (255), минимальна – у вяза (28). Ландшафтно-геохимические условия влияют минимально на БХА клена (97–277) с минимальной вариабельностью химического состава зеленой фитомассы. В растениях автономного ландшафта и подножия склона значения коэффициента БХА выше (таблица 4.5), чем в верхней части склона и заболоченной потяжине, поскольку в потяжине замедление преобразования растительных остатков приводит к консервации элементов в неразложившихся органах растений.

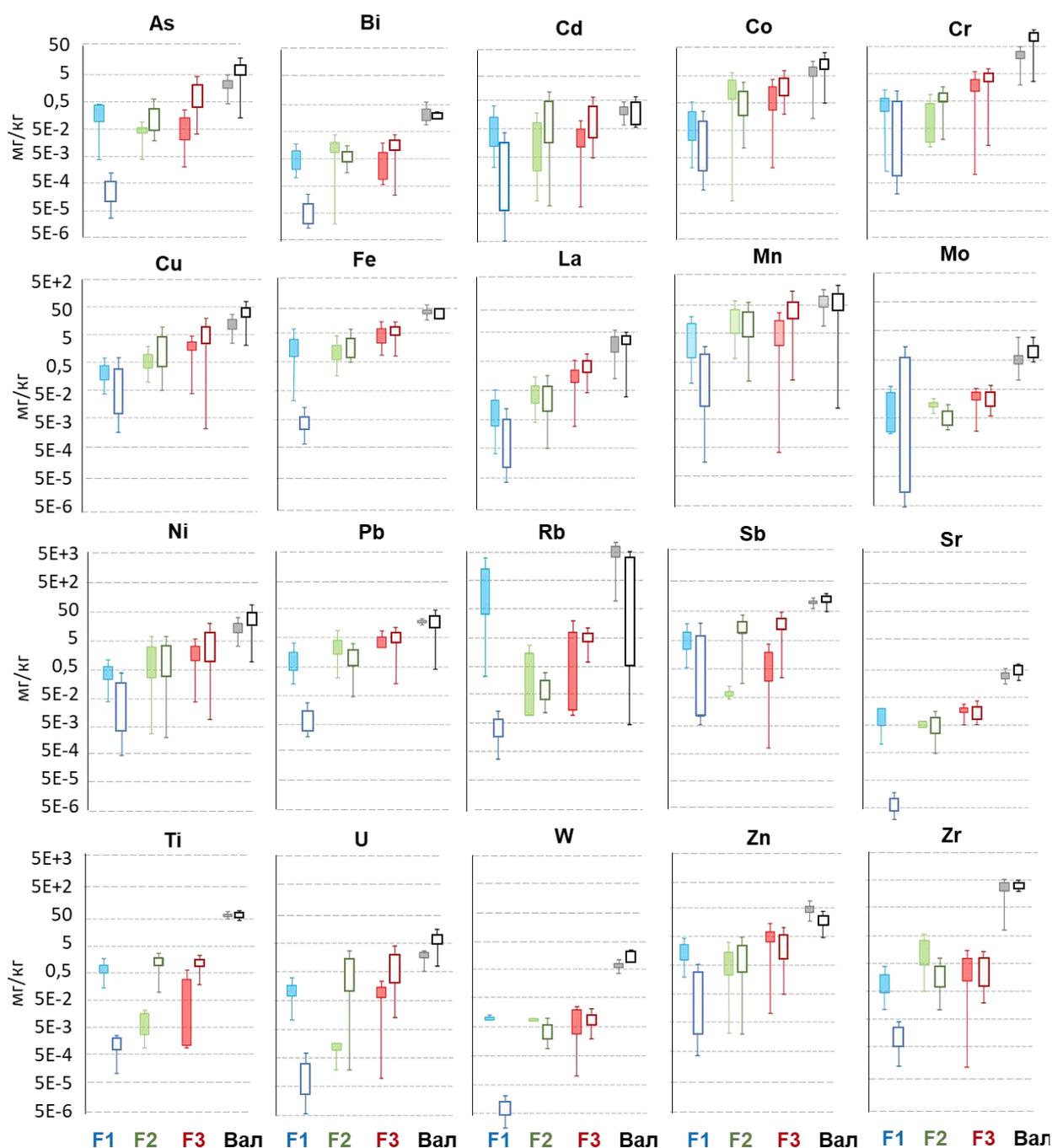
В исследуемых ландшафтах катены наиболее биогеохимически активными элементами являются Mn, Zn, Cd, Bi и Cu, которые эффективнее поглощаются древесными растениями, а также возвращаются на поверхность почв с обильным хвойным и лиственным опадом. Высокое содержание биофильных элементов в листьях древесных растений – преобладающей части опада (Родин и др., 1968, Базилевич, Титлянова, 2007) – определяет поверхностно-аккумулятивное распределение в почвах.

#### **4.3 Уровни содержания форм химических элементов в почвах**

Микроэлементный состав подзолистых, дерново-подзолистых и торфянисто-подзолистых почв южно-таежной катены определяется их физико-химическими характеристиками, свойственными текстурно-дифференцированным почвам южно-таежных ландшафтов на покровных суглинках. Почвы катены имеют суглинистый состав, хорошо различимые горизонты EL и BT с элювиально-иллювиальным типом распределения илистой фракции и аккумулятивным распределением Сорг. Отличительной особенностью почв катены является их развитие на покровных суглинках, подстилаемых карбонатной мореной, что обуславливает изменение среды с сильноокислой в верхних горизонтах до слабощелочной в нижней части профлей почв.

*Валовое содержание* Bi, Mn, Cd, Zn, Mo, Rb, Co, Fe, La, Pb в почвах заповедника находится в пределах уровней, описанных в литературе (рисунок 4.9). На нижней границе диапазона находится содержание As, Cr, Cu, Mo, Ni, Sb, Sr, U, W, Zr. Обеднение микроэлементами валдайских покровных суглинков также отмечали ранее (Авессаломова, 1987).

В гумусовом горизонте почв (таблица 4.6) повышенное валовое содержание Cd, Mn, Bi<sub>2</sub> (подстрочный индекс – *KK*) может объясняться их поглощением древесными растениями (*Tilia cordata*, *Acer platanoides*, *Ulmus glabra*) с последующим возвращением на поверхность почв (Енчилик и др., 2020). Высокие коэффициенты аэрозольной концентрации (115) и аккумуляции (196) Cd в фоновых лесных ландшафтах Осташковского района Тверской области указывает на вероятное поступление элемента в биологический круговорот из приземного слоя воздуха (Суслова и др., 2016.). Sb интенсивно поступает в ландшафты катены с растительным опадом и задерживается в горизонте АУ в составе гуминовых кислот (Kabata-Pendias, Szteke, 2015), нерастворимых в кислых почвах заповедника.



**Рисунок 4.9.** Уровни содержания химических элементов в почвах. Сплошная заливка – содержание в дерново-подзолистых и торфяно-подзолистых почвах катены (настоящее исследование). Контур – диапазон содержания ХЭ в почвах по литературным данным: дерново-подзолистые почвы Смоленско-Московской возвышенности (Касимов, Самонова, Кошелева, 2005; Самонова, Касимов, Асеева, 2011), равнинной части юга России (Дьяченко, Матасова, 2016), Центрально-Лесного заповедника (Караванова, Малинина, 2009), Мезенско-Вычегодской равнины (Семенков и др., 2016), Тобольского материка (Семенков и др., 2019), сельскохозяйственные почвы Европы – GEMAS (Reimann et al., 2018); F1 – дерново-подзолистые почвы (Решетников, 1990; Сосорова и др., 2012; Семенков, 2016, 2019), F2 – преимущественно по двум массивам данных (Семенков, Касимов, Терская, 2016, 2019), с учетом информации по Cu из работы (Решетников, 1990), F3 – Маданов, 1972; Белицына, Черепова, 1980; Решетников, 1990; Мажайский, 2003; Касимов, Самонова, Кошелева, 2005; Самонова, Касимов, Асеева, 2011; Семенков, Касимов, Терская, 2016, 2019)

В минеральных горизонтах (EL, BT и BCca) валовое содержание большинства элементов близко к кларковым значениям. Повышенное содержание Zr в горизонте EL объясняется остаточным обогащением за счет крупнопылевой фракции – основного носителя первичных трудно разрушаемых минералов, в том числе и циркона в дерново-подзолистых почвах Восточно-Европейской равнины (Samonova et al., 2018; Samonova, Aseyeva, 2020). В горизонтах EL и BC повышено содержание  $Bi_{2-3}$ . Он может фиксироваться растворимым органическим веществом (Hou et al., 2005), приносимым в верхнюю часть горизонта BT. В нижележащем карбонатном горизонте слабо аккумулируется  $Cd_4$ , что может быть связано с распределением пылевой фракции и замедлением миграции при нарастании щелочности среды. Соответствие валового содержания большинства элементов околочларковому уровню позволяет считать данную катену модельной для фонового эколого-геохимического мониторинга.

В горизонте ао C<sub>v</sub> валового содержания большинства элементов ниже 30% (приложение Г). Средняя и высокая вариабельность свойственна только содержанию Bi, Co, Mn, Ni. В горизонте BT C<sub>v</sub> содержания большинства элементов опускается ниже 30% (в том числе C<sub>v</sub><10% для содержания Cu, Fe, La, Pb, Rb, Ti, U) за исключением Bi (C<sub>v</sub>>80%) рассмотренных позиций и Sb (98%) в автономном ландшафте. В горизонте T торфяно-подзолисто-глеевых почв подчиненного ландшафта C<sub>v</sub> валового содержания многих элементов существенно увеличивается (приложение Г). 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).

Содержание *обменных форм (F1)* соединений Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Sr не выходит за пределы разброса литературных данных для фоновых таежных ландшафтов, но находятся близко к его верхней границе (рисунок 4.9). Концентрации As, Bi, Cd, La, Mn, Ni, Pb, Rb, Sb, Ti, U, W, Zn, Zr выше, чем в дерново-подзолистых почвах Тобольского материка (Семенков и др., 2019).

В гумусовом горизонте содержание F1 форм  $Zn_{17} Mn_9 Pb_5 Cd_4$  (таблица 4.6) превышает значения для почв Мезенско-Вычегодской равнины (Семенков и др., 2016). Участвующий в синтезе хлорофилла Zn (Kabata-Pendias, Szteke, 2015; Boyd, 2020) с опадом фотосинтетически активных органов растений (Енчилик и др., 2020) накапливается в кислом гумусовом горизонте за счет иммобилизации почвенными микроорганизмами (Perelomov, Chulin, 2014) и сорбции органическим веществом. Биофильный Mn, а также Pb и Cd фиксируются органическим веществом на биогеохимическом барьере (приложение Д.1).

Таблица 4.6

Ряды кларков концентрации КК валового содержания и коэффициентов концентрации Кк подвижных (F1, F2 и F3) форм соединений химических элементов в горизонтах всех почв катены по всем сезонам опробования

Горизонт	Форма	10	5	1	0,5	
ao	Вал		Cd <sub>5</sub>	Mn Bi Pb <sub>2</sub> Sb Zr Ti <sub>1</sub>	Zn <sub>0.9</sub> Mo La <sub>0.6</sub> U Rb <sub>0.5</sub>	Fe As <sub>0.4</sub> Cu Co W <sub>0.3</sub> Ni Sr Cr <sub>0.2</sub>
	F1	Zn <sub>17</sub>	Mn <sub>9</sub> Pb <sub>5</sub>	Cd <sub>4</sub> Fe Co <sub>2</sub> Ni <sub>1</sub>		
	F2	Zn <sub>17</sub> Pb <sub>13</sub>	Ni <sub>8</sub>	Mn <sub>4</sub> Sr Cr Co <sub>2</sub> Fe <sub>1</sub>	Cu <sub>0.5</sub>	
	F3	Cd <sub>11</sub> Ni <sub>10</sub>		Mn Pb Zn <sub>3</sub> Cu Cd <sub>1</sub>	Co <sub>0.8</sub>	Fe <sub>0.4</sub> Cr <sub>0.1</sub>
EL	Вал			Bi Zr Ti <sub>2</sub> La <sub>1</sub>	Mn Cd Rb <sub>0.9</sub> U Pb <sub>0.8</sub> W <sub>0.6</sub> Zn Sb Fe <sub>0.5</sub>	As Mo <sub>0.4</sub> Co Sr Cu <sub>0.3</sub> Cr Ni <sub>0.2</sub>
	F1			Zn Fe Mn <sub>2</sub> Pb <sub>1</sub>		
	F2			Co <sub>3</sub> Pb Ni <sub>2</sub>	Mn <sub>0.9</sub> Zn <sub>0.7</sub>	Cd <sub>0.4</sub> Fe <sub>0.3</sub> Cu <sub>0.1</sub> Sr <sub>0.01</sub>
	F3	Sr <sub>23</sub>		Mn <sub>3</sub> Pb Zn Co <sub>1</sub>	Fe <sub>0.8</sub> Cu <sub>0.7</sub> Ni Cr <sub>0.6</sub>	Cd <sub>0.3</sub>
BC	Вал			Bi <sub>3</sub> Cd <sub>2</sub> Zr Ti Mn La <sub>1</sub>	Pb Rb <sub>0.9</sub> Zn Sb Fe <sub>0.8</sub> Cu <sub>0.7</sub> U <sub>0.6</sub> As Co <sub>0.5</sub>	Ni Mo W Cr <sub>0.4</sub> Sr <sub>0.3</sub>
	F1		Zn <sub>5</sub>	Ni Cd Mn Fe <sub>2</sub>	Pb <sub>0.9</sub> Cu <sub>0.8</sub> Co <sub>0.7</sub> Cr Sr <sub>0.5</sub>	
	F2	Cd <sub>42</sub>	Cr <sub>5</sub>	Ni Pb <sub>4</sub> Zn Co <sub>3</sub> Mn <sub>2</sub> Fe <sub>1</sub>		Cu Sr <sub>0.4</sub>
	F3		Ni <sub>8</sub>	Mn Zn Cu <sub>1</sub>	Pb Cd <sub>0.9</sub> Fe Co <sub>0.8</sub> Cr <sub>0.5</sub>	
BCca	Вал			Cd <sub>4</sub> Bi Sb Ti Pb <sub>2</sub> Mn Zr Fe <sub>1</sub>	Rb Zn La <sub>0.9</sub> Mo Cu <sub>0.7</sub> Co As U <sub>0.6</sub> Ni <sub>0.5</sub> Cr W <sub>0.4</sub> Sr <sub>0.3</sub>	
	F1	Fe <sub>12</sub>	Mn <sub>7</sub>	Zn Co <sub>4</sub> Cd <sub>3</sub> Sr Ni <sub>2</sub> Pb Cr <sub>1</sub>	Cu <sub>0.5</sub>	
	F2			Ni <sub>4</sub> Pb <sub>3</sub> Co <sub>2</sub> Mn Zn <sub>1</sub>	Sr <sub>0.9</sub> Cd Fe <sub>0.5</sub> Cu <sub>0.4</sub>	
	F3			Ni <sub>3</sub> Mn Zn <sub>2</sub>	Pb <sub>0.8</sub> Co Cu <sub>0.7</sub> Fe <sub>0.6</sub>	Cd Cr <sub>0.4</sub>
Cca	Вал			Bi <sub>3</sub> Cd Ti <sub>2</sub> Mn Zr <sub>1</sub>	Rb Zn Fe La <sub>0.9</sub> Pb <sub>0.8</sub> Sb Cu Mo <sub>0.7</sub> U <sub>0.6</sub> As Co <sub>0.5</sub>	Ni Cr W <sub>0.4</sub> Sr <sub>0.3</sub>
	F1	Fe <sub>17</sub> Mn <sub>14</sub> Co <sub>12</sub>	Zn Cd <sub>5</sub>	Sr Ni <sub>3</sub> Pb <sub>2</sub> Cr <sub>1</sub>	Cu <sub>0.8</sub>	
	F2			Ni <sub>3</sub> Pb <sub>2</sub> Co Sr <sub>1</sub>	Zn <sub>0.9</sub> Mn <sub>0.8</sub>	Fe <sub>0.4</sub> Cd Cu <sub>0.3</sub>
	F3			Ni <sub>2</sub> Zn Mn <sub>1</sub>	Cu Pb <sub>0.7</sub> Co <sub>0.6</sub>	Fe Cd <sub>0.4</sub> Cr <sub>0.3</sub>

Примечание. Подстрочный индекс – КК, рассчитанные относительно кларков в верхней части континентальной земной коры (Rudnick and Gao, 2014), и Кк, рассчитанные относительно содержания в дерново-подзолистых почвах Мезенско-Вычегодской равнины (Семенков и др., 2016); цветом выделены элементы с КК, Кк > 2 и < 0,5: красным – Mn, зеленым - Zn и Cd, голубым - Ni

В исследуемых почвах относительно почв Мезенско-Вычегодской равнины повышено содержание Zn Fe Mn<sub>2</sub> в горизонте EL и Zn<sub>5</sub> Ni Cd Mn Fe<sub>2</sub> – в горизонте BC, чему может способствовать смена окислительно-восстановительных условий и формирование комплексного окислительного и восстановительного барьера в этих горизонтах при слабой водопроницаемости почвообразующих пород и близком залегании грунтовых вод в подчиненных ландшафтах. В карбонатных горизонтах выше содержание Fe<sub>12-17</sub> Mn<sub>7-14</sub> Co<sub>4</sub>.

$^{12}\text{Zn Cd}_{4.5}\text{ Sr Ni}_3$ , поскольку элементы осаждаются на более контрастном карбонатном барьере (таблица 4.6), чем в почвах Мезенско-Вычегодской равнины (Семенков и др., 2016). Накопление обменных форм Co, Ni и Sr на карбонатном барьере подтверждается положительной корреляционной связью с содержанием  $\text{CaCO}_3$  (приложение Д.1).

Пространственная вариабельность максимальна у содержания обменных форм As, Co, Cr, Fe, La, U, Zr, Pb и Mn в горизонтах ao и T (приложение Г). Высокая неоднородность содержания подвижного Pb ( $C_v=75\%$ ) отмечена в дерново-подзолистой почве Ленинградской области (Витковская, 2011). В поверхностных горизонтах низкие  $C_v$  обнаружены только у 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 горизонте BT всех выборок выявлена средняя и низкая вариабельность содержания F1 форм соединений элементов (приложение Г).

Содержание комплексных форм (F2) соединений As, Cd, Cr, Cu, La, Mn, Ni, Ti, U и Zn находятся в диапазоне литературных данных (рисунок 4.9). Почвы заповедника обеднены F2 формами соединений Rb и Sr, вероятно, благодаря вымыванию в кислых условиях (Kabata-Pendias, Szteke, 2015).

В гумусовом горизонте содержание F2 формы (подстрочный индекс – значения Kк)  $\text{Zn}_{17}\text{ Pb}_{13}\text{ Cd Ni}_8\text{ Mn}_4$  превосходит (таблица 4.6) имеющиеся в литературе данные (Семенков и др., 2016) из-за региональной биогеохимической специализации растений Валдайской возвышенности, накапливающих в своих органах эти элементы (Енчилик и др., 2020). F2 соединения могут мигрировать в составе растворенного органического вещества (Hou et al., 2006; Mboringong, 2013) и органических комплексов (Basta et al., 2005; Moiseenko et al., 2013). В горизонте EL содержание  $\text{Cd}_{0.4}\text{ Fe}_{0.3}\text{ Cu}_{0.1}$  понижено относительно почв Мезенско-Вычегодской равнины, вероятно, из-за меньшей доли илистой фракции в этих горизонтах исследуемых почв и повышено – только Co (таблица 4.6). В горизонте BC концентрации  $\text{Cd}_{42}\text{ Cr}_5\text{ Ni Pb}_4\text{ Zn Co}_3$  выше, чем в более кислых иллювиальных горизонтах Мезенско-Вычегодской равнины, Sr  $\text{Cu}_{0.4}$  – ниже, вероятно, из-за меньшего содержания илистой фракции в исследуемых почвах, с которыми у Sr наблюдается положительная корреляция (приложение Д.1). В карбонатных горизонтах выше содержание только F2 форм  $\text{Ni}_3$ , который осаждается на карбонатном барьере (приложение Д.1).

Пространственная вариабельность содержания комплексных форм слабее отличается по горизонтам почв (приложение Г). Она очень высока у элементов с низким содержанием (Rb, Sb, Sr). Высокие значения  $C_v$  для F2 форм прослеживаются в горизонте ao у соединений Co, La, W, Zn, Zr, а также Mn (51–60%) в поверхностных горизонтах всех почв. В горизонте

ВТ неоднородность содержания комплексных соединений Co, Mo, Sb и Zr снижается (<30%). Средней и низкой вариабельностью содержания комплексных соединений во всех исследуемых горизонтах почв характеризуются As, Bi, Fe, Ni, Pb.

Содержание сорбированных гидроксидами Fe и Mn (F3) соединений Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Ti, W, Zn, Zr укладывается в разброс литературных данных, а As, Bi, Rb, Sr, U – ниже опубликованных значений (рисунок 4.9). Это подтверждает, что F3 формы вносят высокий вклад в физико-химическую миграцию ХЭ в почвах Центрально-Лесного заповедника.

В гумусовом горизонте относительно почв Мезенско-Вычегодской равнины понижено содержание F3 форм соединений  $Fe_{0.4} Cr_{0.1}$ , повышено –  $Ni_{10} Mn Pb Zn_3$ . В горизонте EL и BC изученных почв относительно Мезенско-Вычегодской равнины повышено содержание сорбированных форм соединений  $Sr_{23} Mn_3 Pb Zn_2$  и  $Ni_8 Mn_2$  соответственно. В дерново-подзолистых почвах средней и южной тайги обогащение сорбированными формами соединений элементов наблюдается в нижней части горизонта EL (Соколова и др., 2014). В карбонатном горизонте относительно эталона сравнения незначительно увеличивается концентрация  $Ni_{2-3}$ , вероятно, из-за более высоких значений pH (таблица 4.6), чем в аналогичных горизонтах почв Мезенско-Вычегодской равнины (Семенков, 2016).

Пространственная вариабельность сорбированных форм соединений ХЭ контрастно дифференцирована по горизонтам (приложение Г). Так, в горизонтах ао и Т она высокая у F3 форм соединений Mn, Rb, Sb, Co, Cr, La, Sr, W, Zr. Более низкая вариабельность содержания характерна для меньшего числа элементов (Cd, Cu, Ni, Fe, Pb, Zn) во всех позициях рельефа. Снижение вариабельности содержания F3 форм соединений в горизонте ВТ характерно для Co, Cr, Cu, Fe, La, Pb, U, W, Zn, Zr. Вариабельность содержания соединений Cu (35%), Ni и Zn (28%) сопоставима с данными по F3 формам элементов в пахотных горизонтах агросерых почв Брянского ополья (Карпущина и др., 2012). В горизонте ВТ Cv снижаются до низких значений у содержания сорбированных соединений Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, U, Zn, Zr. Высокая вариабельность характерна только для содержания As (56 – 100%).

Таким образом, в гумусовом и торфяном горизонтах почв катены для F1 форм As, Co, Cr, Fe, La, U, Zr, Pb и Mn, F2 форм Rb, Sb, Sr, Mn и F3 форм Mn, Rb, Sb, Co, Cr, La, Sr, W, Zr не целесообразно проводить анализ сезонной изменчивости латеральной дифференциации из-за высокой пространственной неоднородности их содержания.

#### Выводы

Почвы Центрально-Лесного заповедника являются околочларковыми по валовому содержанию элементов (As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, Ti, U, W,

Zn, Zr). Содержание F1 форм соединений большинства изученных элементов (As, Bi, Cd, La, Mn, Ni, Pb, Rb, Sb, Ti, U, W, Zn, Zr) относительно почв Восточно-Европейской равнины и Западной Сибири повышено в гумусовых горизонтах. Содержание F2 форм соединений ХЭ сопоставимо с данными по почвам таёжных ландшафтов. Содержание F3 форм соединений элементов (Zn Fe Mn) повышено в элювиальном горизонте за счет накопления в составе Fe-Mn конкреций.

Наибольшей пространственной неоднородностью в гумусовом и торфяном горизонтах почв катены обладают F1 форма соединений As, Co, Cr, Fe, La, U, Zr, Pb и Mn, F2 – Rb, Sb, Sr, Mn и F3 – Mn, Rb, Sb, Co, Cr, La, Sr, W, Zr, поэтому для них не целесообразно проводить анализ изменчивости латеральной дифференциации.

Биогеохимическая дифференциация лесных сообществ катены определяется структурой фитоценозов. Листья большинства древесных пород изученных сообществ катены накапливают Mn, Bi, Zn, Co, Cd, а также Rb, в то время как травянистые растения и кустарнички относительно деревьев концентрируют элементы с низкой биофильностью – Ti, Fe, Zr, в отдельных случаях Cd и Cr. Сфагнум при низком содержании зольного остатка выступает в качестве умеренного концентратора более широкого спектра элементов с относительно низкой биофильностью – Fe, Ti, Cr, Co, Zr и Pb. В распределении элементов по надземным органам древесных растений прослеживаются разные стратегии накопления: в широколиственных породах наибольшая концентрация элементов приходится на фотосинтезирующие органы, а в хвойной породе (если обыкновенной) – ветках и коре.

В БИК наиболее активно участвуют Mn, Zn, Bi, Cd и Rb, которые интенсивнее поглощаются растениями автономного ландшафта и подножия склона. Органогенные горизонты являются основным резервным фондом подвижных форм Bi, Cd, Mo, Pb, Sb, Zn: при деструкции лесной подстилки в автоморфных ландшафтах высвобождаются Cd, Mn, Pb, Zn, а замедленное разложение торфяного горизонта в полугидроморфных ландшафтах определяет аккумуляцию в них Bi, Cd, Pb, Sb, Zn.

## **Глава 5. Радиальная и латеральная почвенно-геохимическая структура катены: R,L-анализ распределения подвижных форм элементов**

Вертикальное распределение форм соединений ХЭ в катенах определяет радиальную почвенно-геохимическую структуру ландшафтов, которую количественно описывают с помощью коэффициента радиальной (R) дифференциации (Глазовская, Касимов, 1987). На основе этого коэффициента в разные сезоны были выявлены типы радиального распределения (по Розанову, 2004) форм элементов в профиле почв. Для определения факторов, влияющих на дифференциацию элементов в почвах катены использована концепция геохимических барьеров. Аккумулятивное распределение с максимальной концентрацией элемента в горизонте А и монотонным падением с глубиной определяет биогеохимический барьер в гумусовом горизонте. Аккумулятивно-элювиально-иллювиальное распределение указывает на биогеохимический и сорбционный барьеры в горизонтах А и ВТ соответственно и активный вынос подвижных форм элементов из горизонта ЕL. Элювиальное распределение с активным выносом из верхней части профиля с монотонным увеличением концентрации к средней и нижней его части происходит при отсутствии геохимических барьеров (щелочного, карбонатного или сорбционного). Грунтово-аккумулятивное распределение определяет вынос форм элементов из верхней и средней части профиля с остаточным накоплением в почвообразующей породе или аккумуляцией на щелочном барьере. Отсутствие ярко выраженных геохимических барьеров приводит к равномерному распределению элементов в профиле почв.

Субгоризонтальные латеральные потоки химических элементов зависят от контрастности смены условий миграции в катене. В лесных почвах наиболее значимую роль в латеральном распределении элементов играет комплексный сорбционно-биогеохимический барьер (Авессаломова, 2012; 2017), поэтому в изученной южнотаёжной катене выделены варианты контрастного распределения элементов в зависимости от положения этого барьера (Геннадиев, Касимов, 2004): в средней части склона - транзитный тип латерального распределения, у его подножья и в заболоченной потяжине – аккумулятивный тип латерального распределения.

### ***5.1 Изменчивость радиальной дифференциации***

Рассмотрены типы распределения форм элементов в профиле почв в четыре периода обследований: сентябрь 2016 г., июнь и ноябрь 2017 г. и май 2018 года. В тексте обсуждается влияние сезонной смены условий увлажнения и вегетационной фазы

развития растений на изменения концентраций форм химических элементов в верхней части профилей почв катены. степени

### **5.1.1 Валовое содержание элементов**

В сентябре 2016 года **аккумулятивное распределение** имеют Cd, Zn, Pb, Sb и Zr (таблица 5.1, приложение Е.1). В этом месяце ведущую роль в дифференциации элементов в верхней части профиля почв играет поступление на поверхность растительного опада, содержащего Cd и Zn, а также разложение органов травянистых растений, извлекающих из почвы подвижную в кислых почвах Sb ( $A_{\text{х}}=1-10$ , таблица 4.5) и обогащенных Zr (рис 4.2). Содержание Pb, незначительно превышающее кларк, отмечается в ферментированной лесной подстилке (рисунок 4.8).

В июне в верхней части почв задерживаются Cd и Bi, интенсивно извлекаемые из почв древесными растениями заповедника (таблица 4.5). Bi не фиксируется в гумусовом горизонте почве на долгое время, поскольку после разложения мортмассы поглощается растениями и быстро мигрирует в нижележащие горизонты, вероятно, в составе растворенного органического вещества (Kabata-Pendias, Szteke, 2015).

В ноябре к группе элементов, наблюдаемой в сентябре (Cd, Pb и Sb), добавляется Mo, поверхностно-аккумулятивное распределение которого, вероятно, обусловлено захватом растениями из более щелочных нижних горизонтов почв ( $A_{\text{х}}=9-11$ , таблица 4.5), их разложением и прочной фиксацией элемента органическим веществом в кислых условиях (Kabata-Pendias, Szteke, 2015).

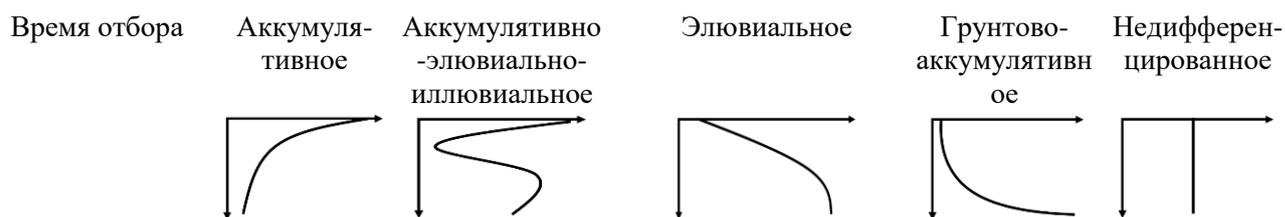
В мае в верхних горизонтах почв задерживаются Sb, Pb и Zr. Для Sb это вызвано тем, что она слабоподвижна в кислой среде (Manaka, 2006), сорбируется органическим веществом (приложение Д.1) и образует устойчивые в кислой среде соединения с гуминовыми кислотами (Bolan et al., 2022). Для Pb отмечается корреляционная зависимость с содержанием Сорг (приложение Д.1).

**Аккумулятивно-элювиально-иллювиальное распределение** Mo в сентябре (таблица 5.1, приложение Е.1) может объясняться его способностью окисляться в кислых условиях до молибдатов, которые связываются органическим веществом и  $\text{CaCO}_3$  (Kabata-Pendias, Szteke, 2015), что также подтверждается значимой корреляционной зависимостью с содержанием Сорг и  $\text{CaCO}_3$  (приложение Д.1).

В июне данный тип распределения характерен для Zn, Mo и Sb. Биогеохимически активный в ландшафтах катены Zn (таблица 4.5) аккумулируется органическим веществом почв и илистой фракцией (приложение Д.1). Наличие соединений Sb в средней и нижней частях профиля, вероятно, обусловлено миграцией элемента в составе фульвокислот, сорбцией илистой фракцией и оксидами Fe и Mn (Kabata-Pendias, Szteke, 2015).

Таблица 5.1

Радиальное распределение валового содержания элементов в почвах катены



Грубогумусированная палево-подзолистая почва автономного ландшафта вершины холма

Сентябрь 2016	Bi Mo Pb Zr	Cd Mn	Cr Cu Fe La U	Co Ni	Rb Sr Ti W Zn
Июнь 2017	Cd Bi	Sb Zn	As Co Cu Fe La Ti U Zr	Ni	Rb Sr W
Ноябрь 2017	Bi Mo Pb Sb	As Cd Zn	Co Cr Fe La Rb Sr Ti U Zr	Mn Zn	Ni W
Май 2018	Zr	Cd Mn	As Co Cr Cu Fe Mo Ti U	Ni W Zn	Bi La Pb Rb Sb Sr

Дерново-палево-подзолистая почва трансэлювиального ландшафта средней части склона

Сентябрь 2016	As Cd Mn Pb Zn Zr	Bi Mo Sb W	Fe La Ti U	Co Cr Cu Ni	Rb Sr
Июнь 2017	Cd	Bi Mn Mo Pb Sb Zn	As Co Cr Cu Fe La Ni Zr	-	Rb Sr U W
Ноябрь 2017	Cd Mo Pb Sb Zn Zr	As Bi Co Mn	La Ti U	Cr Cu Fe Ni	Rb Sr W
Май 2018	Mn Mo Pb Sb U W Zr	Bi Cd	As Ti	Cr Cu Fe La Ni	Co Rb Sr Zn

Торфянисто-перегнойная подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта нижней части склона

Сентябрь 2016	Cd Pb Zn Sb	Mo	As Co Cr Cu Fe La Mn Rb Sr Ti U W Zr	Ni	Bi
Июнь 2017	As Bi Cd	Mo Pb Sb	Co Cr Rb Fe La Mn Ni Sr U	-	Cu
Ноябрь 2017	Cd Mo Pb	Bi Sb Zn	As U	Co Cr Cu Fe Ni	La Mn Rb Sr Ti Zr
Май 2018	Pb	Bi Co Cu Mn Mo	As Fe La U	Cd Ni	Cr Rb Sb Sr Ti W Zn Zr

Торфянистая подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта дна потяжины

Сентябрь 2016	Cd Sb	Zn	As Co Cr Cu Fe La Mn Sr Ti U W	Ni	Bi Mo Pb
Июнь 2017	Ni	-	As Co Cu Cr Mn U Zr	Pb Sb Bi Cd	La Mo Rb Sr W Zn
Ноябрь 2017	Cd Mo Pb	As	Co Cr Cu Fe La Mn Sr Ti U Zn Zr	Ni	Bi W
Май 2018	Bi Cd Pb Sb	-	As Co Cr Cu Fe Mn Mo Rb Sr U Zr	La Ni Ti Zn	W

Примечание. Полу жирным выделены элементы, тип распределения которых сохраняется в двух и более разрезах

В ноябре высокое содержание в почвах As может ингибировать подвижность Sb, фиксируя ее в верхней части профиля. Поступивший в июне с растительным опадом Bi осенью мигрирует в среднюю часть профиля и, вероятно, сорбируется оксидами Fe и Mn.

В мае соединения биогеохимически активных Mn и Bi задерживаются органическим веществом в гумусовом горизонте почв, оксидами Fe в средней части профиля и щелочной средой – в нижней, для Mn отмечена корреляция с Сорг и рН (приложение Д.1).

**Элювиальное распределение** характерно для валового содержания As, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Sr, Ti, U, W, Zr (таблица 5.1, приложение Е.1). Аккумуляция на сорбционном барьере наблюдается у валового содержания As, Co, Cr, Cu, Fe, La, Sr, Ti (приложение Д.1). Слабоподвижный As в кислых условиях также может сорбироваться Fe-Mn конкрециями (Lee et al. 2011). Корреляционная связь с содержанием CaCO<sub>3</sub> у Sr подтверждает его аккумуляцию на карбонатном барьере (приложение Д.1), у Mn прослеживается связь с величиной рН (приложение Д.1). Накопление Cu на щелочном и сорбционном геохимических барьерах подтверждается корреляцией с рН и илистой фракцией (приложение Д.1) и отмечалось ранее (Перельман, Касимов, 1999; Kabata-Pendias, Szteke, 2015; Reimann, Caritat, 1998; Boyd, 2020).

**Грунтово-аккумулятивное распределение** Ni (таблица 5.1, приложение Е.1) обусловлено сорбцией илистыми частицами и осаждением совместно с карбонатами, что подтверждается корреляционными зависимостями с содержанием ила и CaCO<sub>3</sub> (приложение Д.1). В мае La вымывается в нижнюю часть профиля в составе илистых частиц (приложение Д.1). Содержание Zn возрастает в породе из-за увеличения связанных с карбонатами соединений в щелочных условиях (Minkina et al., 2010).

### **5.1.2 Обменные соединения элементов (F1)**

**Аккумулятивное распределение** в сентябре и ноябре (таблица 5.2, приложение Е.2) характерно для обменных форм Cd, Mn, Zn, которые интенсивно поглощаются древесными растениями (таблица 4.5) и осенью возвращаются на поверхность почв в составе обильного опада. Также гумусовые горизонты обогащены F1 формой соединений Co, Fe, Pb и Rb. Распределение Pb объясняется его фиксацией органическим веществом в кислых условиях (Mboringong et al., 2013), что подтверждается значимой корреляцией с содержанием Сорг (приложение Д.1). Содержание легкорастворимых соединений Fe и Co возрастает в кислых гумусовых горизонтах почв катены. Содержание легко поглощаемого растениями Rb повышено в гумусовом горизонте, поскольку его подвижность в кислых почвах увеличивается (Kabata-Pendias, Mukherjee, 2007).

В июне аккумулятивное распределение, помимо вышеперечисленных элементов, также наблюдается и для F1 форм соединений Bi, As, Mo и Cr. Участвующий в биологическом круговороте Bi (таблица 4.5) возвращается на поверхность почв вместе с опадом, что подтверждает корреляционная зависимость содержания его F1 формы соединений и Сорг (приложение Д.1). Летом при высокой микробиологической активности бактерии в

гумусовом горизонте почв могут преобразовывать соединения As в доступную для биоты форму (Santini, 2012). Мо может фиксироваться органическим веществом почв, особенно в условиях низких значений pH (Kabata-Pendias, Szteke, 2015). В подчиненных заболоченных ландшафтах торф способен прочно удерживать соединения Cr (Kuziol, 2002).

В мае, после периода низкой биологической активности, содержание F1 форм соединений элементов в гумусовых горизонтах снижается, что, вероятно, обусловлено частичным выносом подвижных соединений ХЭ с талыми и дождевыми водами.

**Аккумулятивное элювиально-иллювиальное распределение** (таблица 5.2, приложение Е.2) в сентябре свойственно F1 формам соединений Mn, Cu и Ni, что объясняется их интенсивным накоплением (Mn, Cu) и захватом (Ni) растениями (таблица 4.1) с последующим возвращением на поверхность почв. Ni накапливается в верхней части профиля заболоченных позиций из-за консервации его обменных соединений в торфяных горизонтах, что типично для таких условий (Семенков, Касимов, Терская, 2017; Авессаломова, 2017; Kabata-Pendias, Szteke, 2015). Обменные соединения Cu и Ni также сорбируются G1 и мигрируют вниз по профилю с тонкими частицами с последующей аккумуляцией на карбонатном барьере в средней и нижней частях профиля (приложение Д.1). Mn осаждается на щелочном барьере, что подтверждается прямой корреляционной зависимостью с величиной pH (приложение Д.1).

В июне F1 форма соединений Co накапливается в гумусовом и элювиальном горизонтах, поскольку в тёплый и дождливый период его подвижные в кислых условиях соединения могут мигрировать в нижнюю часть горизонта EL и сорбироваться оксидами Mn с увеличением pH (таблица 4.1, Kabata-Pendias, Szteke, 2015).

В ноябре, после обильных дождей в октябре (см. рисунок 2.2), F1 формы Zn частично вымываются из гумусового горизонта, что также характерно для подзолистых почв среднетаежных ландшафтов Архангельской области (Таранина, 1992), а с увеличением pH в средней части профиля (таблица 4.1) могут прочно фиксироваться Сорг (приложение Д.1) и илистой фракцией (Kumpiene et al., 2011).

Таблица 5.2

Радиальное распределение F1 форм соединений элементов в почвах катены

Срок опробования	Аккумулятивное	Аккумулятивно-элювиально-иллювиальное	Элювиальное	Грунтово-аккумулятивное	Недифференцированное
Грубогумусированная палево-подзолистая почва автономного ландшафта вершины холма					
Сентябрь 2016	<b>Cd Co Fe Pb Zn</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr Cu La Rb U</b>	<b>Ni Sr Zr</b>	<b>As Bi Mo Sb Ti W</b>
Июнь 2017	<b>As Cd Mo Pb Rb</b>	<b>Mn Bi Zn</b>	<b>Cr Cu Fe La U Zr</b>	<b>Co Sr Ni</b>	<b>Sb W</b>
Ноябрь 2017	<b>Bi Cd Co Fe Ni Pb Rb Zr</b>	<b>Mn Zn</b>	<b>Cr Cu La U</b>	<b>Sr</b>	<b>As Mo Sb Ti W</b>
Май 2018	<b>Cd Rb</b>	<b>Co Fe Mn Pb Ni Zn</b>	<b>Cu La</b>	<b>Cr</b>	<b>As Bi Mo Sb Ti W</b>
Дерново-палево-подзолистая почва трансэлювиального ландшафта средней части склона					
Сентябрь 2016	<b>As Cd Cr Fe Mn Sr Zn</b>	<b>Cu Ni Pb Rb Zr</b>	<b>U</b>	<b>La</b>	<b>Bi Co Mo Sb Ti W</b>
Июнь 2017	<b>As Bi Cd Rb Zn Cr Pb</b>	<b>Co Cu Mn Sr</b>	<b>Fe La W U Zr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo Sb</b>
Ноябрь 2017	<b>Cd Fe Mn Pb</b>	<b>Co Cr Zn</b>	<b>La Zr</b>	<b>Cu Sr U</b>	<b>As Bi Mo Sb Ti W</b>
Май 2018	<b>Cd Rb</b>	<b>Co Mn Pb Zn</b>	<b>Fe Zr</b>	<b>Cr Sr U</b>	<b>As Bi Cu Mo Ni Sb Ti W</b>
Торфянисто-перегнойная подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта нижней части склона					
Сентябрь 2016	<b>Cd Co Fe Pb Rb Sr Zn</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr Cu La Ni U Zr</b>	-	<b>As Bi Mo Sb Ti W</b>
Июнь 2017	<b>As Pb Cr Fe Zr Bi Sr</b>	<b>Cd Co Mn Ni Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>La U</b>	<b>Mo Rb Sb W</b>
Ноябрь 2017	<b>Pb U Zr</b>	<b>Cd Co Cr Fe Mn Zn</b>	-	<b>Cu La Ni Sr</b>	<b>As Bi Mo Rb Sb Ti W</b>
Май 2018	<b>Co Fe Pb U Zn</b>	<b>Cd Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu La Ni Sr</b>	<b>As Bi Mo Rb Sb Ti W</b>
Торфянистая подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта днища потяжины					
Сентябрь 2016	<b>Cd Co Cr Fe Pb Rb Sr Zn</b>	<b>Cu Mn Ni</b>	<b>La U Zr</b>	-	<b>As Bi Mo Sb Ti W</b>
Июнь 2017	<b>Cd Sr Co Cr U Bi Mo Pb Zn</b>	<b>Cu La Ni Rb</b>	<b>Cr Zr</b>	-	<b>As Mn Sb W</b>
Ноябрь 2017	<b>Cd Cr Zr</b>	<b>Co Pb Rb Zn</b>	<b>Fe U</b>	<b>Cu La Mn Sr</b>	<b>As Bi Mo Ni Sb Ti W</b>
Май 2018	<b>Pb</b>	<b>Cd Fe Rb Zn</b>	<b>Cr Cu La U Zr</b>	<b>Co Ni Mn Sr</b>	<b>As Bi Mo Sb Ti W</b>

Примечание. Полу жирным выделены элементы, тип распределения которых сохраняется в двух и более разрезах

*Элювиальное распределение* в *сентябре* и *ноябре* имеют Cr, Cu, La и U (таблица 5.2, приложение E.2). Содержание Cr увеличивается в средней части профиля, поскольку окислительно-восстановительный потенциал его соединений, напрямую связан с содержанием оксидов железа и марганца (Chung, Sa, 2001). Концентрации F1 формы соединений Cu и La имеют прямую корреляцию с содержанием илистой фракции и значениями pH (приложение Д.1).

В *мае* к этой группе элементов добавляется Zr, мигрирующий в среднюю и нижнюю часть профиля с растворённым органическим веществом и сорбируемый гидроксидами Mn (Kabata-Pendias, Szteke, 2015). В *июне* к вышеперечисленным элементам добавляется Fe, легкорастворимые соединения которого в кислых условиях с обильными осадками интенсивно вымываются из верхней части профиля (рисунок 2.2).

*Грунтово-аккумулятивное распределение* свойственно F1 форме соединений Ni, Cu, La и Sr (таблица 5.2, приложение E.2), которые сорбируются илистой фракцией и аккумулируются на карбонатном барьере в породе. Содержание всех этих элементов коррелирует с содержанием G1 и CaCO<sub>3</sub> (приложение Д.1).

### **5.1.3 Комплексные соединения элементов (F2)**

*Аккумулятивное распределение* в *сентябре* характерно для Fe и халькофильных Bi, Pb, Zn (таблица 5.3, приложение E.3). Содержание F2 форм соединений этих элементов коррелирует с содержанием Сорг (приложение Д.1).

В *июне* наблюдается накопление в верхней части почв As, Bi, Cd, Cr, Cu, Mn, Zn, Pb. Способность этих элементов образовывать комплексы с органическим веществом подтверждается значимой корреляцией с содержанием Сорг (приложение Д.1). Для Pb образование органокомплексов в почве отмечено и в других работах (Basta et al., 2005). В *мае* и в *ноябре* ослабление элювирования F2 форм соединений Fe может быть обусловлено обилием Fe-Mn конкреций в горизонте EL после обильного увлажнения.

*Аккумулятивное элювиально-иллювиальное распределение* в *сентябре* свойственно F2 формам соединений Cd и Cu (таблица 5.3, приложение E.3), у которых наблюдается корреляция с содержанием Сорг (приложение Д.1), что подтверждает их миграцию в составе органических комплексов (Kabata-Pendias, Sadurski, 2004). Накопление в средней части профиля свойственно F2 формам соединений Cu за счёт миграции ее подвижных органических комплексов (Kabata-Pendias, Szteke, 2015; Moiseenko et al., 2013).

Таблица 5.3

Радиальное распределение F2 форм элементов в почвах катены

Срок отбор	Аккумулятивное	Аккумулятивно-элювиально-иллювиальное	Элювиальное	Грунтово-аккумулятивное	Недифференцированное
Грубогумусированная палево-подзолистая почва автономного ландшафта вершины холма					
Сентябрь 2016	<b>Bi Fe Mn</b>	<b>Co Cu Pb</b>	-	<b>Mo Ni</b>	As Cd Cr La Rb Sb Sr Ti U W
Июнь 2017	<b>Cr Cu Sr Zn Fe</b> La Mo <b>Pb Sb</b>	<b>As Bi Cd Mn</b> Rb W	<b>Co Zr</b>	Ni	U
Ноябрь 2017	<b>As Bi Cr Fe La</b> Sr	<b>Cu Pb Zn</b>	Zr	<b>Co Ni</b>	Cd Mn Mo Rb Sb Ti U W
Май 2018	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Cu Zr</b>	-	As Bi Cd Cr La Mn Mo Rb Sb Sr Ti U W Zn
Дерново-палево-подзолистая почва трансэлювиального ландшафта средней части склона					
Сентябрь 2016	<b>As Bi Cu Fe Pb</b> <b>Zn</b>	<b>Cd Mn Mo</b>	<b>Co Zr</b>	La Ti	Cr Rb Sb Sr U W
Июнь 2017	<b>Bi Cd Cr Cu</b> Mn Zn <b>As Pb</b>	<b>Mo Ni Sb W</b>	<b>Co Fe La Zr</b> Rb	Sr	U
Ноябрь 2017	<b>Bi Cr Cu Fe Mn</b>	<b>As Cd La Mo</b> <b>Pb W Zn</b>	<b>Zr</b>	<b>Ni Sr Ti</b>	Co Rb Sb
Май 2018	<b>Fe</b>	<b>Cd Co La Zn</b>	<b>Zr</b>	<b>Cu</b>	As Bi Cr Mn Mo Rb Sb Sr Ti U W
Торфянисто-перегнойная подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта нижней части склона					
Сентябрь 2016	<b>Bi Fe Pb Ti W</b> <b>Zn</b>	<b>Cd Cu</b>	La Mo	<b>Co Mn Ni</b>	As Cr Rb Sb Sr U
Июнь 2017	<b>As Cd Cr Mo</b> <b>Pb Rb Sb W Zn</b> <b>Bi</b>	<b>Cr Cu Fe Ni</b>	-	<b>Co Mn Zr</b>	La Sr U
Ноябрь 2017	<b>As Mo Pb</b>	<b>Bi Cd Cu Fe</b> La W <b>Zn</b>	<b>Zr</b>	<b>Co Mn Ni Ti</b>	Cr Rb Sb Sr U
Май 2018	<b>Cd Fe La</b>	<b>Zn</b>	<b>Co</b>	<b>Zr</b>	As Bi Cr Mn Mo Rb Sb Sr Ti U W
Торфянистая подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта днища потяжины					
Сентябрь 2016	<b>Bi Cu Pb W Zn</b>	<b>Fe La</b>	<b>Zr</b>	<b>Co Mn Mo Ni</b> Ti	As Cd Cr Rb Sb Sr U
Июнь 2017	<b>Cd Cr Ni Pb</b> <b>Rb Zn</b>	<b>As Bi Co Cu</b> <b>Fe La</b>	W	<b>Zr Mn Mo</b>	Sb Sr
Ноябрь 2017	<b>As Fe La Pb Zn</b>	<b>Bi Cd Cu</b>	<b>Zr</b>	<b>Co Cr Mn Mo</b> <b>Ni Sr Ti</b>	Rb Sb U W
Май 2018	<b>Cr Zn</b>	<b>Cd Fe La</b>	<b>Zr</b>	<b>Co Cu</b>	As Bi Mn Mo Rb Sb Sr Ti U W

Примечание. Полу жирным выделены элементы, тип распределения которых сохраняется в двух и более разрезах

В *июне* под влиянием оподзоливания (свежеобразованными гумусовыми кислотами), активизирующегося после обильных дождей, мобилизуемое Fe (Канев, 2011) вымывается в нижнюю часть профиля, где образует комплексы с карбонатами (Thomson et al., 2006). Накопление анионогенного W в верхней и средней части почв (таблица 5.3, приложение E.3) обусловлено его миграцией в составе гумусовых кислот (Kabata-Pendias, Szteke, 2015).

В *ноябре* и *мае* комплексные соединения Zn могут мигрировать в среднюю часть профиля в составе почвенных растворов (Barsova, Mozutova, 2012).

**Элювиальное распределение** в почвах катены характерно для Zr, содержание F2 форм соединений которого положительно коррелирует с содержанием илистой фракции (приложение Д.1).

**Грунтово-аккумулятивное распределение** свойственно F2 форме соединений Co, Mn, Mo, Ni (таблица 5.3, приложение E.3), аккумуляция на щелочном барьере Co и Mn подтверждается положительной корреляцией со значениями рН (приложение Д.1). Комплексные соединения Ni мигрируют в составе почвенных растворов и осаждаются совместно с карбонатами в породе, что подтверждается значимой положительной корреляцией с содержанием CaCO<sub>3</sub> (приложение Д.1). В *июне* F2 формы Zr мигрируют в нижнюю часть профиля с илстыми частицами (приложение Д.1). Sr образует комплексы с карбонатами в породе, что подтверждается корреляцией с содержанием CaCO<sub>3</sub> (приложение Д.1).

#### **5.1.4 Сорбированные формы соединений элементов (F3)**

**Аккумулятивное распределение** в *сентябре* свойственно F3 форме соединений Fe, Pb, Sr и Zn (таблица 5.4, приложение E.4). Содержание F3 формы соединений Pb, Sr и Zn положительно коррелирует с содержанием Сорг (приложение Д.1).

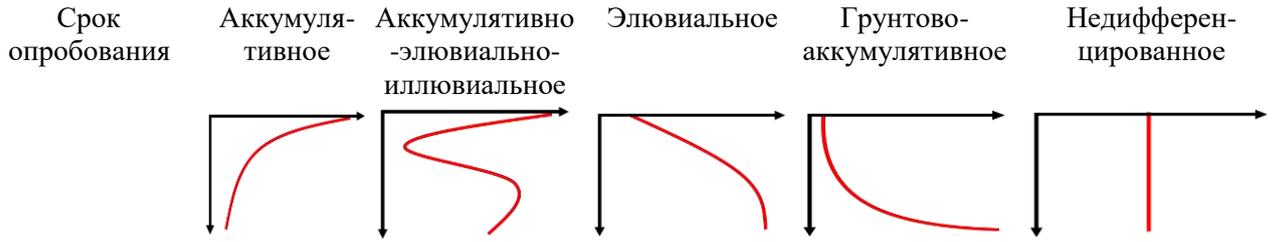
В *июне* анионогенная Sb накапливается в гумусовом горизонте, поскольку слабоподвижна в кислой среде (Manaka, 2006) и образует соединения с гуминовыми кислотами (Bolan et al., 2022).

**Аккумулятивное элювиально-иллювиальное распределение** свойственно соединениям As, Cd, Pb и Sr, которые накапливаются в средней части профиля за счёт сорбции Fe-Mn конкрециями (Lee et al. 2011, Wang et al. 2012, Violante, 2013). При этом As сорбируется оксидами Fe, а Cd и Pb – с оксидами Mn (Водяницкий, 2010).

Накопление Cu и Zn в средней части профиля обусловлено увеличением содержания илстых частиц в иллювиальном горизонте (см. таблицу 4.1). Накопление в средней части профиля Cu может быть связано с сорбцией ее соединений оксидами Mn (Perelomov et al. 2013).

Таблица 5.4

Радиальное распределение F3 форм соединений элементов в исследованных почвах катены



Грубогумусированная палево-подзолистая почва автономного ландшафта вершины холма

Сентябрь 2016	<b>Fe Pb</b>	<b>Co Cu</b>	<b>Bi Cr La U</b> Zn Zr	<b>Ni Ti</b>	As Cd Mn Mo Rb Sb Sr W
Июнь 2017	<b>Pb Rb Sb</b> Sr	<b>As Cd Co Cu</b> Mn Ni W Zn	<b>Cr La Bi</b>	Fe	Mo U Zr
Ноябрь 2017	-	-	<b>Cr Cu Fe Ti</b> U Zn	Rb	As Bi Cd Co Mn Mo Ni Pb Sb Sr W Zr La
Май 2018	<b>Cd Co Pb</b> Sr	Rb	<b>Cr Cu Fe La</b> Ni U Zn	-	As Bi Mn Mo Sb W Zr

Дерново-палево-подзолистая почва трансэлювиального ландшафта средней части склона

Сентябрь 2016	<b>As Cd Fe</b> Zn	<b>Cu</b>	<b>Bi Co Cr La</b> U Zr	<b>Ni Sr Ti W</b>	Mn Rb Sb
Июнь 2017	<b>Cd Mn Zn</b> As <b>Pb Rb</b> Sb	<b>Cu Sr W</b>	<b>Bi Fe Cr La</b>	Zr	Co Mo Ni U
Ноябрь 2017	Fe Zn	-	<b>Cr La Ti</b>	-	As Bi Cd Co Mn Mo Ni Pb Sb Sr W Zr La
Май 2018	Fe <b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Bi Cr La Ti</b>	Zn	As Cd Co Mn Mo Ni Pb Sb U W Zr

Торфянисто-перегнойная подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта нижней части склона холма

Сентябрь 2016	<b>As Cu Fe</b> Mo <b>Pb Sb</b> Sr Zn	<b>Cd</b>	Ti U W	Bi Co Cr La Ni Zr	Mn Rb
Июнь 2017	-	<b>As Cd Cu Fe</b> Pb	La U W Zr	Rb Bi Co Cr Mn Ni	Mo Sb Sr Zn
Ноябрь 2017	-	-	<b>Cr Fe Ti Zn</b>	-	As Bi Cd Co Mn Mo Ni Pb Sb Sr W Zr La
Май 2018	<b>Rb Sr U</b>	-	<b>Cr Cu Fe La</b> Ti Zn	Ni	As Bi Cd Co Mn Mo Pb Sb W Zr

Торфянистая подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта днища потяжины

Сентябрь 2016	<b>Pb Sr W</b> Zn	<b>Cd Cu Mo</b>	<b>Bi Co Cr Fe</b> Sb U Zr	<b>La Ni Ti</b>	As Mn Rb
Июнь 2017	As	<b>Cd Cu Pb Rb</b> Zn	Bi Co Cr Fe La Mn U W	<b>Ni Zr</b>	Mo Sb Sr
Ноябрь 2017	Sr	Zn	<b>Cr Cu Fe Ti</b> U	-	As Bi Cd Co Mn Mo Ni Pb Sb Sr W Zr La
Май 2018	-	<b>Sr</b>	<b>Cr Cu Fe La Ni</b> Pb Rb U Zn	Ti	As Bi Cd Mn Mo Sb W Zr

Примечание. Полу жирным выделены элементы, тип распределения которых сохраняется в двух и более разрезах

**Элювиальное распределение** свойственно F3 форме соединений Bi, Cr, La, U, Zr (таблица 5.4, приложение E.4). В *сентябре* и *июне* Bi выносятся из гумусового горизонта и накапливаются в средней части профиля благодаря сорбции илистыми частицами (Pasieczna, 2012). Соединения Cr, La, U и Zr накапливаются в нижней части профиля, поскольку распределение этих элементов связано с элювиально-иллювиальным распределением илистых частиц (приложение Д.1). Высокое содержание F3 формы соединений Fe наблюдается в горизонте EL за счёт накопления в обильных железистых конкрециях (Водяницкий, 2010). В *ноябре* и *мае* элювиальный тип распределения свойственен Cr Cu Fe Ti U и Zn благодаря высокому содержанию Fe-Mn конкреций в средней части профиля. При этом Cr закрепляется оксидами Fe (Водяницкий 2010), а Zn – оксидами Mn (Водяницкий, 2009)

**Грунтово-аккумулятивное распределение** имеет F3 форма соединений La, Ni и Ti, что для La обусловлено миграцией с илистыми частицами, Ni – осаждением на щелочном барьере (приложение Д.1), Ti – остаточным накоплением в породе. Сорбированные соединения Zr задерживаются илистыми частицами в нижней части профиля (приложение Д.1).

## 5.2 Динамика латеральной дифференциации

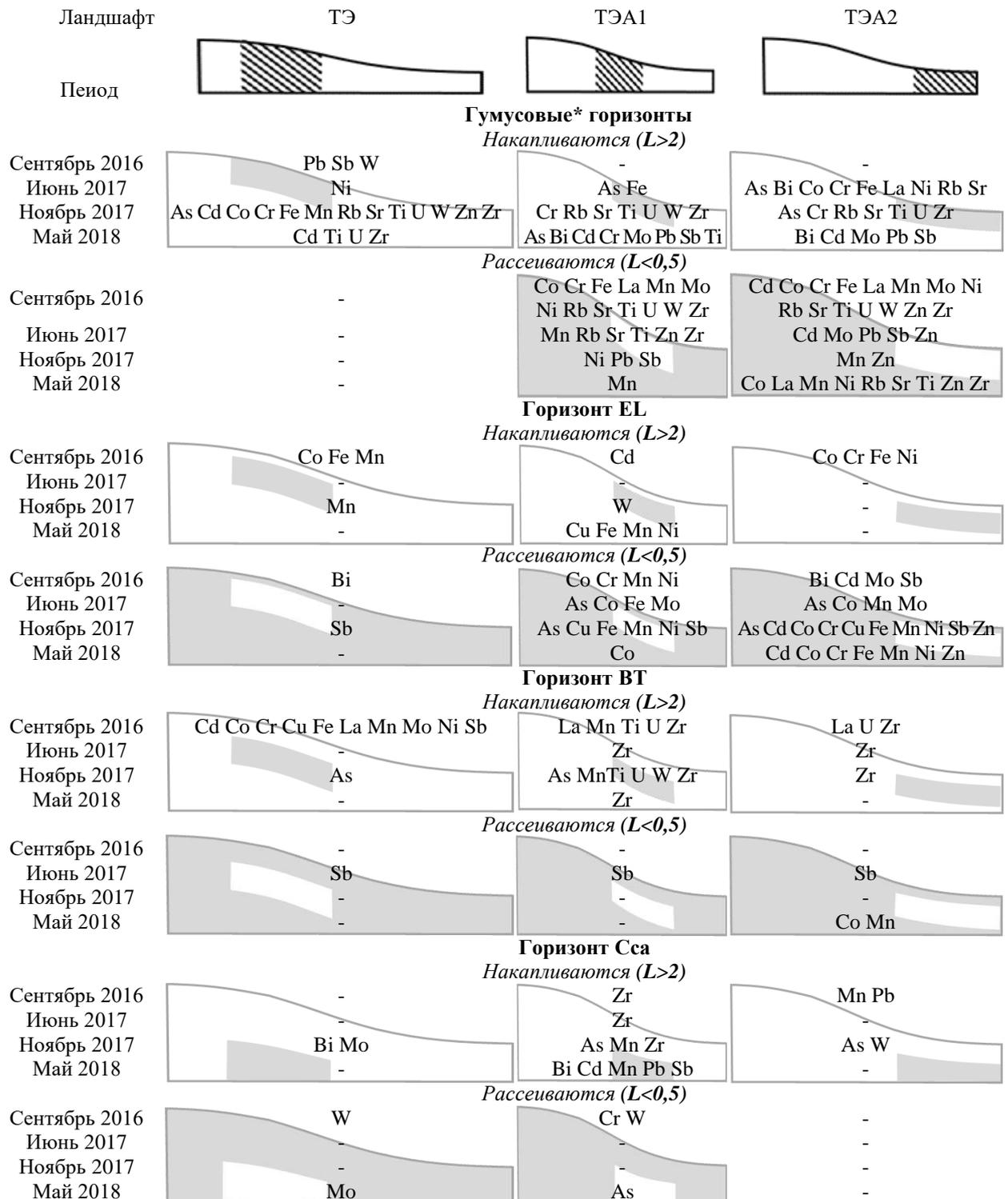
В изученной катене Центрально-Лесного заповедника с крайне незначительным перепадом высот при сезонной смене условий миграции за счет колебаний уровня грунтовых вод, окислительно-восстановительного потенциала и содержания легко растворимого органического вещества может изменяться положение геохимических барьеров, что способно проявляться в неустойчивой (меняющейся) картине латерального распределения элементов и их подвижных форм. В главе обсуждаются элементы, для которых характерна временная изменчивость катенарной дифференциации. Основной акцент сделан на элементах и их формах с контрастной дифференциацией: накоплением или рассеянием.

### 5.2.1 Валовое содержание элементов

Накопление в *гумусовом горизонте* трансэлювиального ландшафта в *сентябре* относительно автономного характерно для Pb, Sb, W (таблица 5.5, приложение Ж.1). Вероятно, благодаря отмиранию и разложению однолетних растений травяно-кустарничкового яруса с высоким содержанием W (таблица 4.2) и накапливающейся в кислых условиях Sb ( $A_x=1-10$ , см. таблицу 4.5). Повышенное содержание Pb отмечено в ферментированной лесной подстилке верхних звеньев катены (см. рисунок 4.8).

Таблица 5.5

Элементы (валовое содержание), накапливающиеся и рассеивающиеся в горизонтах почв подчиненных ландшафтов катены Центрально-Лесного заповедника



Примечание. \*А, Н и Т горизонты для ТЭ, ТЭА1 и ТЭА2 элементарных ландшафтов соответственно. Фоновая заливка ячеек: серым отмечены области аккумуляции валовых форм элементов, белым – выноса.

В июне валовой Ni в большей степени накапливается в гумусовом горизонте трансэлювиального ландшафта склона (таблица 5.5). Миграция Ni с пылеватыми гранулометрическими фракциями (1–10 мкм) ранее отмечена в смешенных лесах бассейна средней Протвы, на Смоленско-Московской возвышенности (Samonova, Aseyeva, 2020).

Хорошо прослеживается влияние слабого дренажа на замедление миграции (накопление) As, Bi, Co, Cr, Fe, La, Ni, Rb, Sr на латеральном геохимическом барьере оторфованных почв (таблица 5.5). Содержание валового As также увеличивается в почвах подножья склона, вероятно, из-за аккумуляции смываемых с автономных позиций гумусовых веществ. Торф обогащён Fe, накапливающимся активнее других элементов в сфагнуме (см. таблицу 4.5).

В *ноябре* прослеживается накопление большей части элементов на биогеохимическом барьере склонового ландшафта, где на поверхность почв поступает обильный лиственный опад растений, в разной степени концентрирующих элементы (таблица 4.5). В ноябре, после обильных осадков, происходит интенсивный латеральный смыв соединений Cd, Mn Zn с органическим веществом (приложение Д.1) и As, Co, Cr, Fe, Rb, Sr, Ti с мелкозёмом (приложение Д.1) и аккумуляция элементов в подчиненном ландшафте.

В *мае*, после снеготаяния, также отмечается латеральная миграция As, Bi, Cd, Cr, Mo, Pb, Sb, Ti (таблица 5.5) с накоплением в перегнойном горизонте почв нижней части склона. В ландшафтах потяжины в мае, напротив, рассеивается большая часть (Co, La, Mn, Ni, Rb, Sr, Ti, Zn, Zr) изученных элементов.

В *элювиальном горизонте* контрастность латеральной дифференциации снижается. Накопление Co, Fe, Mn в трансэлювиальном ландшафте обусловлено увеличением количества Fe-Mn конкреций в склоновой позиции катены относительно автономной (приложение Б). В элювиальном горизонте почв подчиненных ландшафтов в сентябре накопление Co, Cr, Fe, Ni может быть вызвано усилением роли сорбционного барьера Fe-Mn конкреций в период иссушения, когда в остальные сезоны года при близком залегании грунтовых вод конкреции разрушаются (приложение Б).

Латеральное распределение элементов в *иллювиальном горизонте* почв катены в большей степени обусловлено положением сорбционного геохимического барьера на склоне и концентрацией здесь многих элементов (таблица 5.5). Для валовых Co, Cr, Cu, Fe, La, Mo и Ni прослеживается связь с содержанием илистой фракции (приложение Д.1).

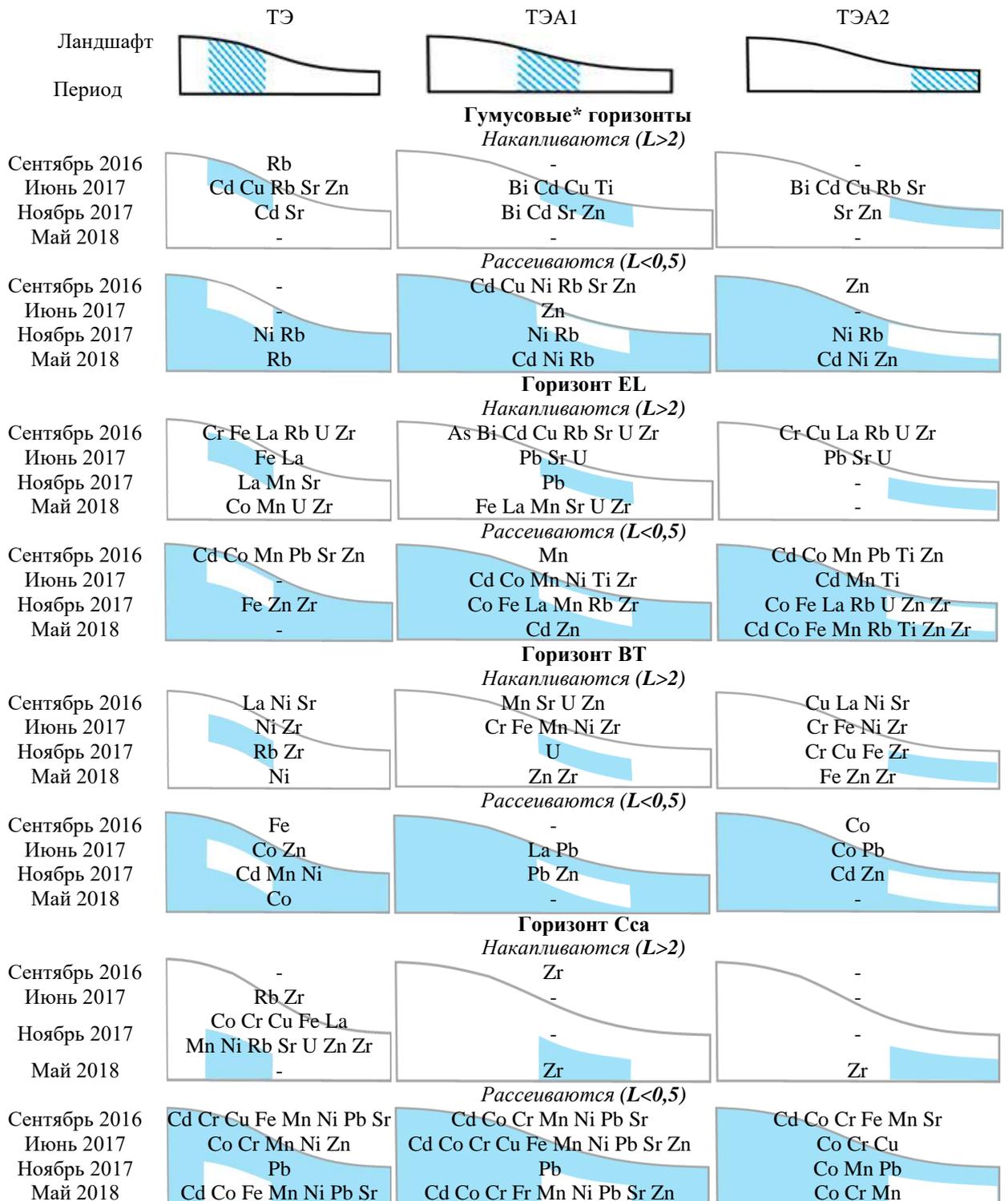
В *почвообразующей породе* большинство изученных элементов монотонно латерально распределены во все сезоны опробования. Стоит лишь отметить накопление Zr в нижней части склона в сентябре, июне и ноябре.

### **5.2.2 Обменные формы элементов**

Латеральная дифференциация F1 форм элементов (таблица 5.6) характеризуется более контрастной сезонной дифференциацией, чем валового содержания. Отчасти это может быть обусловлено повышенной вариабельностью содержания подвижных соединений элемента относительно валового содержания того же элемента (см. раздел 4. и таблицу 4.7).

Таблица 5.6

F1 форма элементов, накапливающихся и рассеивающихся в горизонтах почв подчиненных ландшафтов катены Центрально-Лесного заповедника



Примечание. \*А, Н и Т горизонты для ТЭ, ТЭА1 и ТЭА2 элементарных ландшафтов соответственно. Фоновая заливка ячеек: голубым отмечены области аккумуляции F1 формы соединений элементов, белым – выноса.

В *гумусовом горизонте* почв трансэлювиального ландшафта в *сентябре* накапливаются F1 формы Rb. Содержание Rb, активно поглощаемого растениями катены, коррелирует с содержанием Сорг (приложение Д.1).

В *июне* F1 формы большинства изученных ТММ (Bi, Cd, Cu, Ti) накапливаются в заболоченном ландшафте потяжины. Наличие латерального геохимического барьера в оторфованных почвах подчиненных ландшафтов ранее отмечали в таежных катенах (Авессаломова, 2017; Семенков и др., 2016, 2019).

В *ноябре* F1 форма соединений Bi Cd Zn мигрирует в нижнюю часть склона в составе растворённого органического вещества. У этих трех металлов выявлены положительные корреляции с содержанием Сорг (приложение Д.1).

В *элювиальном горизонте* нижней части склона в сентябре роль комплексного латерального барьера в осаждении F1 формы соединений As, Bi, Cd, Cu, Rb, Sr, U, Zr возрастает (таблица 5.6, приложение Ж.2) в связи с усилением различий увлажненности верхней части почв автономных и подчиненных ландшафтов. В ноябре и мае легкорастворимая F1 форма соединений элементов активнее вымывается из кислых элювиальных горизонтов подчинённых ландшафтов.

В *иллювиальном горизонте* контрастность временной изменчивости проявляется слабо. Наибольшее количество элементов накапливается в июне и сентябре в почвах нижней части склона, поскольку растворённое органическое вещество в этой позиции мигрирует в нижнюю часть профиля почв, где F1 форма соединений элементов сорбируется Fe-Mn конкрециями. В остальные сезоны опробования большая часть изученных элементов (таблица 5.7) имеет монотонное латеральное распределение в иллювиальном горизонте сопряженных почв.

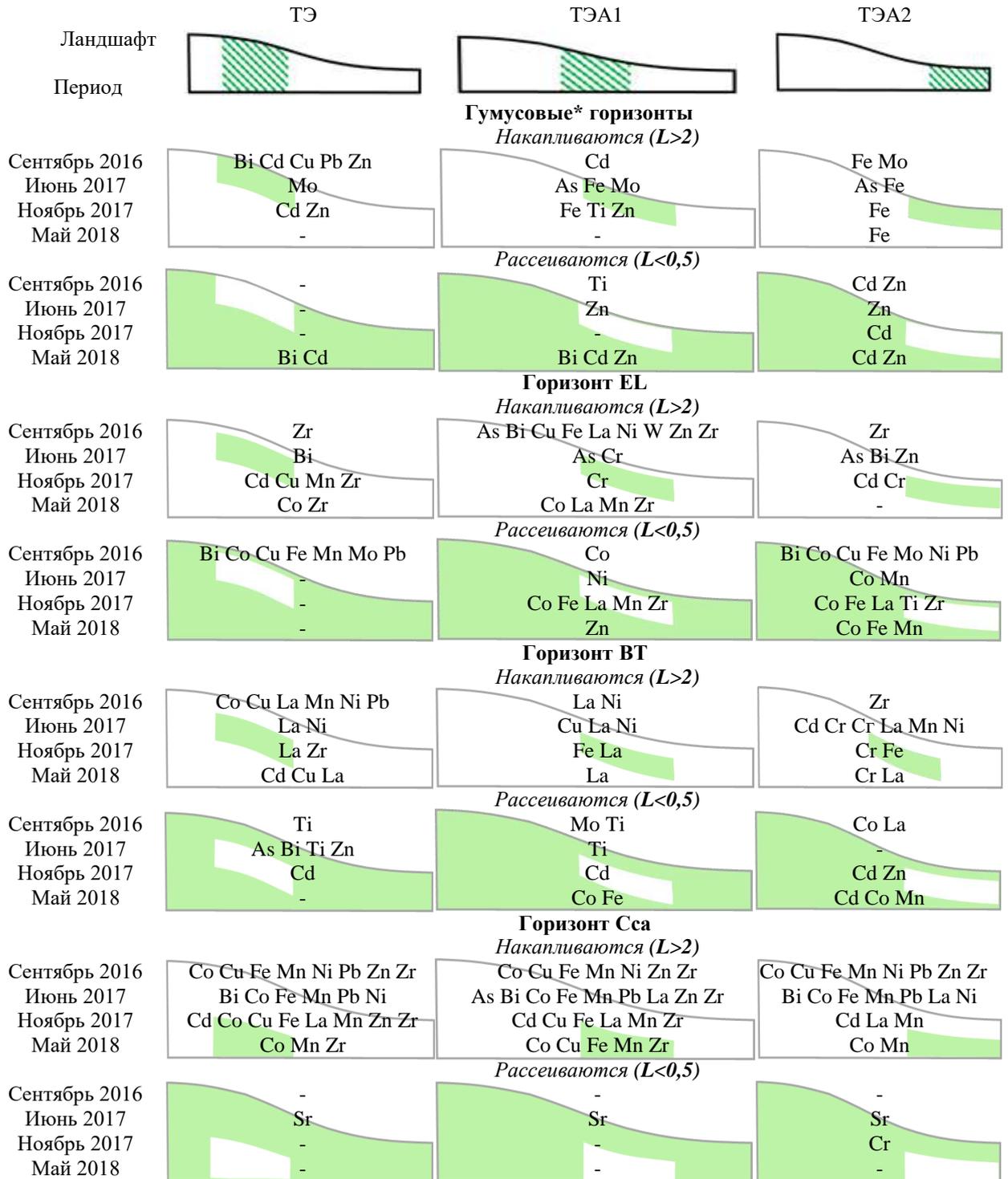
Переувлажненные *материнские породы* подчиненных ландшафтов в ноябре обеднены F1 формой соединений большинства изученных ТММ (Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Ni, Rb, Sr, U, Zn, Zr), вероятно, из-за более лёгкого гранулометрического состава относительно вышележащего горизонта и формирования благоприятных для выноса элементов условий (глеевая обстановка и высокая влажность). У Mn, Rb, Zn наблюдается связь с содержанием песчаных фракций, у Cr, Fe, Ni, Pb, Sr, U – пылеватых, а у Cu, La, и Sr – илистых (приложение Д.1).

### 5.2.3 Комплексные формы элементов

В *гумусовых горизонтах* почв трансэлювиального ландшафта склона накапливается F2 форма соединений Bi, Cd, Cu, Pb, Zn (таблица 5.7, приложение Ж.3). Образование органических комплексов подтверждается положительной корреляцией с содержанием Сорг (приложение Д.1). В *сентябре* большая часть F2 форм соединений Cd накапливается на склоне.

Таблица 5.7

F2 форма соединений элементов, накапливающихся и рассеивающихся в горизонтах почв подчиненных ландшафтов катены Центрально-Лесного заповедника



Примечание. \*А, Н и Т горизонты для ТЭ, ТЭА1 и ТЭА2 элементарных ландшафтов соответственно. Фоновая заливка ячеек: зелёным отмечены области аккумуляции F2 формы соединений элементов, белым – выноса.

Содержание соединений Bi и Cd в мае, июне и ноябре выше в автономном ландшафте, чем в подчиненных. Со выносятся из автономного в склоновые и рассеивается в подчиненных. В ноябре наблюдается увеличение содержания соединений Zn в гумусовом горизонте нижней части склона и рассеивание в переувлажненном ландшафте потяжины.

Накопление в подчинённых ландшафтах в *июне* характерно для F2 формы соединений As, максимальное содержание которого отмечено в трансэлювиально-аккумулятивной позиции нижней части склона (таблица 5.7, приложение Ж.3). Большая часть F2 формы соединений Fe содержится в нижних звеньях катены. F2 форма соединений As, Fe, Mo накапливается на латеральном биогеохимическом барьере перегнойного горизонта подножья склона (таблица 5.7, приложение Ж.3) из-за миграции органических комплексов из вышележащих ландшафтов. Для As прослеживается связь Сорг (приложение Д.1). Соединения Fe с высокими значениями констант устойчивости с гумусовыми кислотами (Моисеенко и др., 2013) в кислых условиях активно мигрируют вниз по склону с поверхностным стоком и накапливаются в подчиненных ландшафтах. Накопление при движении вниз по склону также характерно для F2 формы соединений As в июне.

В *элювиальном горизонте* органоминеральные соединения халькофильных As, Bi, Cu и Zn накапливаются в почвах трансэлювиального ландшафта нижней части склона, вероятно, из-за большей потечности гумуса в глеевой обстановке (приложение Б). F2 форма соединений анионогенного Cr накапливается в горизонте EL почв подчиненных ландшафтов, вероятно, из-за замедления его миграции в сильноокислых условиях подножия склона и потяжины (pH=3.7 и 3.9 соответственно, см. таблицу 4.1).

Наиболее контрастная латеральная дифференциация ТММ отмечена в *сентябре*, когда горизонт EL почв разных частей катены существенно отличается по степени увлажнения, возникают условия для формирования Fe-Mn конкреций в наиболее сухих участках и может продолжаться вынос из наиболее влажных участков особенно при сохранении глеевой обстановки.

В *иллювиальном горизонте* Co, Cu, La, Mn, Ni, Pb накапливаются в *сентябре* в трансэлювиальном ландшафте склона и Cd, Cr, Cu, La, Mn, Ni в *июне* в заболоченном ландшафте потяжины, где элементы мигрируют в переувлажненных почвах с почвенными растворами в нижнюю часть профиля и задерживаются при увеличении pH. В *ноябре* и *мае* отмечается менее контрастная латеральная дифференциация в иллювиальном горизонте сопряженных почв.

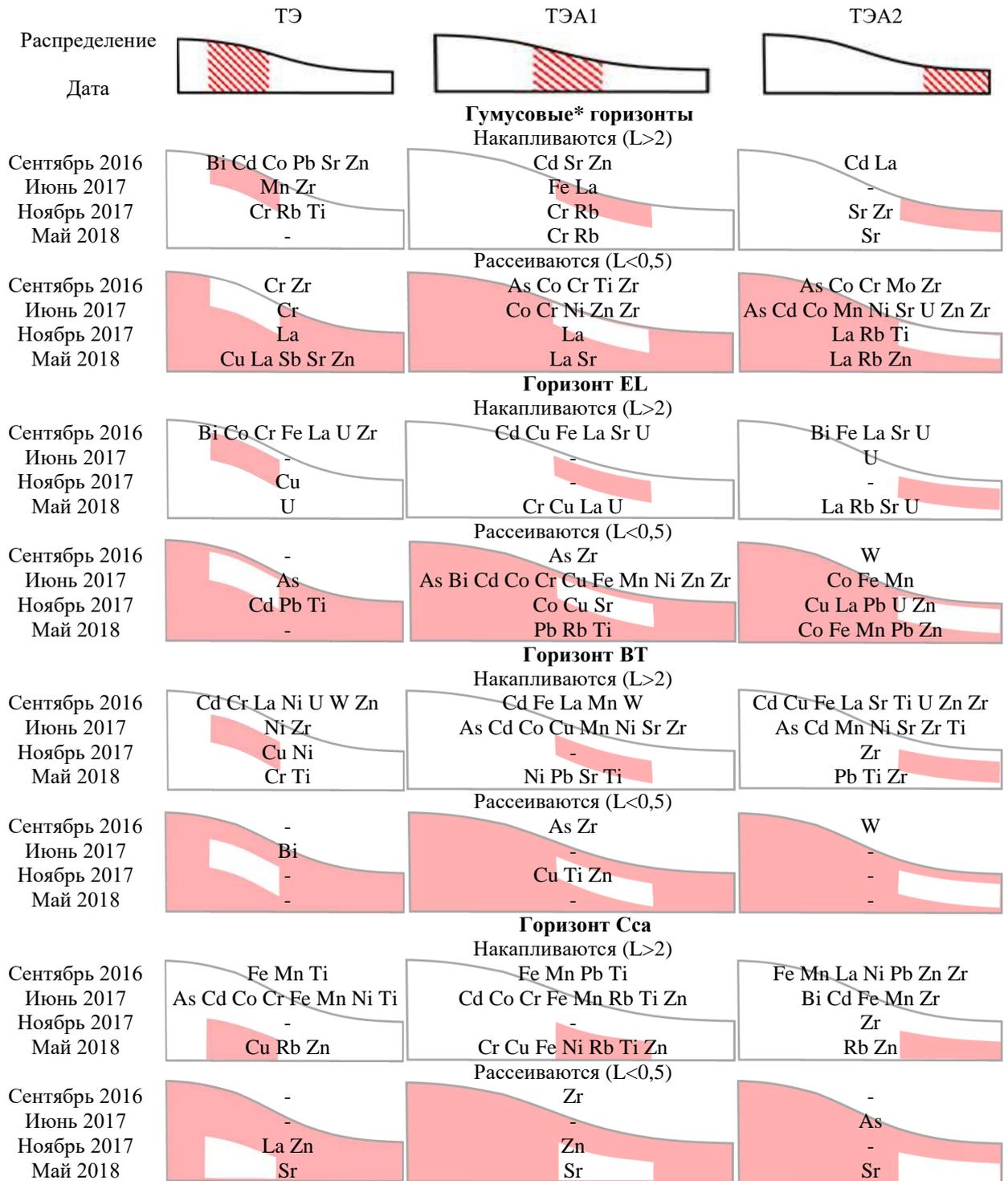
Во все сезоны опробования содержание F2 формы соединений большинства элементов в *почвообразующей породе* увеличивается при движении вниз по катене, чему может способствовать частая смена окислительно-восстановительных условий в склоновых и подчиненных ландшафтах при близком залегании грунтовых вод (приложение Б) и формирование комплексного кислородного и глеевого барьеров.

### 5.2.4 Сорбированные гидроксидами Fe и Mn формы элементов

В гумусовом горизонте почв латеральное распределение сорбированных гидроксидами Fe и Mn соединений элементов контрастно и зависит от сезона опробований (таблица 5.8, приложение Ж.4).

**Таблица 5.8**

F3 форма накопление элементов, накапливающихся и рассеивающихся в горизонтах почв подчиненных ландшафтов катены Центрально-Лесного заповедника



Примечание. \*А, Н и Т горизонты для ТЭ, ТЭА1 и ТЭА2 элементарных ландшафтов соответственно. Фоновая заливка ячеек: красным отмечены области аккумуляции F3 формы соединений элементов, белым – выноса.

В *сентябре* Bi, Cd, Pb, Zn накапливаются в гумусовом горизонте склонового ландшафта. Вынос из автономных ландшафтов и аккумуляция на биогеохимическом барьере подчиненных ландшафтов наблюдается у F3 формы соединений Cd, Zn в *сентябре*. В *июне* такое распределение элементов в гумусовом горизонте катаны характерно для Fe.

В *элювиальном горизонте* в сентябре в склоновом ландшафте относительно автономного повышено содержание Bi, Co, Cr, Fe, La, U, Zr, что можно объяснить большим содержанием Fe-Mn конкреций в почвах трансэлювиального ландшафта (приложение Б).

В нижней части склона в *сентябре* относительно почв вершины холма повышено содержание Cd, Cu, Fe, La, Sr, U, в потяжине – Bi, Fe, La, Sr, U. В остальные сезоны опробования (май, июнь и ноябрь) наблюдается преимущественно монотонное латеральное распределение F3 формы соединений изученных ХЭ с более частым рассеиванием в подчиненных ландшафтах, чем накоплением в виду влажных условий и сохранения глеевой обстановки, благоприятных для миграции веществ и неблагоприятных для формирования латеральных геохимических барьеров в элювиальном горизонте сопряженных почв.

В *иллювиальном горизонте* и *породе* в подчиненных ландшафтах увеличивается содержание F3 формы соединений многих химических элементов, чему может способствовать частая смена окислительно-восстановительных условий при близком залегании грунтовых вод и формирование комплексного кислородного и глеевого барьеров, что подтверждается признаками оглеения (приложение Б). Рассеивание F3 формы соединений ХЭ отчается лишь в отдельных случаях во все сезоны опробования.

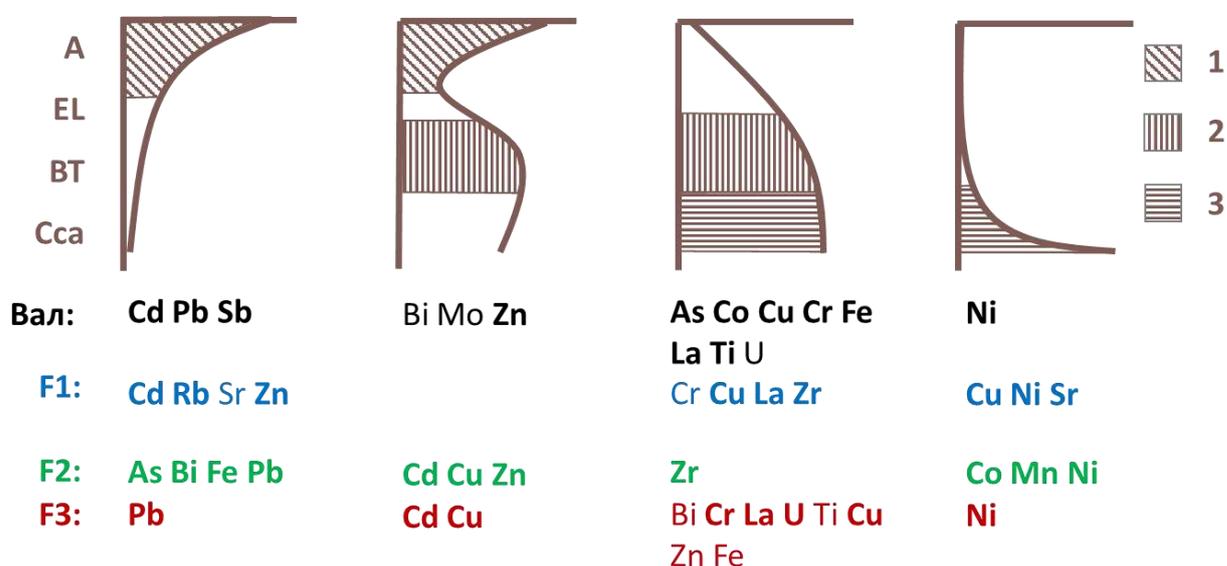
### 5.3 Общие черты радиальной и латеральной дифференциации

Картина радиального распределения химических элементов сохраняется вне зависимости от сезона опробования. Латеральная почвенно-геохимическая структура фоновой южнотаежной катены характеризуется ярче выраженной изменчивостью, чем в случае с радиальной почвенно-геохимической структурой. Тем не менее, прослеживаются некоторые общие закономерности L-распределения химических элементов в горизонтах почв катены в разные сезоны опробования. В этом разделе охарактеризованы наиболее устойчивые тренды радиальной и латеральной дифференциации элементов в почвенно-геохимической катене.

#### 5.3.1 Радиальная дифференциация

Аккумулятивное распределение *валового содержания* в течение года сохраняется для Cd, Pb, Sb (рисунок 5.1). Их накопление на биогеохимическом барьере подтверждается прямой корреляцией с содержанием Сорг. (рисунок 5.1, приложение Д.1). Аккумулятивно-элювиально-иллювиальная дифференциация свойственна Bi, Mo и Zn (рисунок 5.1). Для Zn

накопление на биогеохимическом и сорбционном барьерах подтверждается значимой корреляцией с содержанием Сорг и илстой фракции соответственно (приложение Д.1). Содержание Мо и Вi в верхней части профиля обусловлено участием этих элементов в БИК (таблица 4.5). Для Мо прослеживается связь с содержанием илстой фракции (приложение Д.1). Кроме того, он может фиксироваться оксидами Мп в средней части профиля (Водяницкий, 2010, Kabata-Pendias, 2015). Для большинства элементов наблюдается накопление в средней и нижней частях профиля (рисунок 5.1), благодаря сорбции илстыми частицами As, Cr, Cu, Fe, La, Ti и накоплению на щелочном геохимическом барьере Ni (приложение Д.1). Что подтверждает способность La сорбироваться на поверхностях глинистых минералов и входить в межпакетные пространства (Wan, Liu, 2005, Laveuf, Cornu, 2009).



**Рисунок 5.1** Накопление ТММ на геохимических барьерах горизонтов почв катены; Чёрный – валовое содержание; синий – F1, зелёный – F2, красный – F3; Геохимические барьеры: 1 – биогеохимический, 2 – сорбционный, 3 – щелочной; Представлены элементы, имеющие одинаковый тип распределения в двух и более разрезах в два и более сезона опробования; Полужирным выделены элементы, накапливающиеся на геохимических барьерах, что подтверждено коэффициентами корреляции (приложение Д.1)

**F1 формы** Cd, Rb и Zn имеют аккумулятивное распределение, для всех этих элементов наблюдается положительная корреляция с содержанием Сорг (приложение Д.1). Элювиальное распределение свойственно F1 форме соединений Cr, Cu, La и Zr. Для Cr наблюдается положительная корреляция с содержанием пылеватых фракций (приложение Д.1). Cu, Ni и Sr также осаждаются на щелочном барьере в породе.

**F2 форма** соединений халькофильных As, Bi, Cd, Cu, Pb и Zn накапливается в верхней части профиля в виде комплексов с органическим веществом. Для Fe также прослеживается положительная корреляция с содержанием Сорг (приложение Д.1). С глубиной

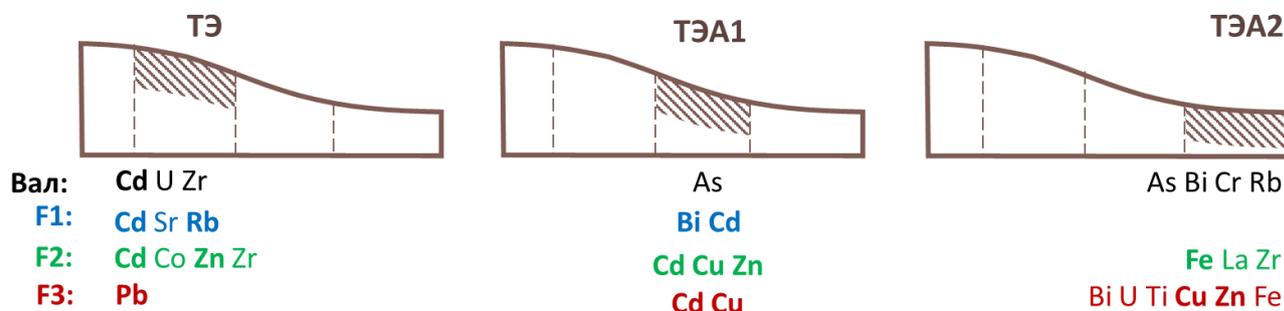
увеличивается содержание F2 формы соединений Zr, содержание которого значимо коррелирует с илстой фракцией (приложение Д.1). На щелочном барьере в нижней части профиля аккумулируется F2 форма соединений Co и Mn, что подтверждает корреляции со значениями рН. Замедлением миграции Ni наряду с нарастанием щелочности связано с образованием карбонатных комплексов, о чём говорит положительная корреляция с содержанием CaCO<sub>3</sub> (приложение Д.1).

Радиальная почвенно-геохимическая структура **F3 форм** соединений ХЭ (рисунок 5.1) характеризуется преимущественно аккумулятивным типом распределения Cd, Cu, Pb, содержание которых коррелирует с содержанием Сор<sub>г</sub> (приложение Д.1). Для Cd и Cu также характерен вынос в среднюю часть профиля, где элементы сорбируются Fe-Mn конкрециями (Lee et al. 2011; Wang et al. 2012; Violante, 2013). Содержание большинства литофильных элементов Cr, La, U, Ti и халькофильных Bi, Cu, Zn возрастает в средней части профиля в основном из-за обилия Fe-Mn конкреций. Осаждение на сорбционном барьере отмечено только у Cr, La и U, на щелочном барьере – U, карбонатном барьере – Cu (приложение Д.1). Сорбированный Ni осаждается на щелочном барьере в нижней части профиля почв (приложение Д.1).

### 5.3.2 Латеральная дифференциация

В *гумусовом горизонте валовой* Cd накапливается на биогеохимическом барьере дерново-подзолистых почв склона (рисунок 5.2), F1 форма которого поступает на поверхность с растительными остатками (таблица 4.5) и образует комплексы (F2) с органическим веществом почв (приложение Д.1).

Аккумулятивный тип L-распределения с накоплением на биогеохимическом барьере торфянисто-перегнойных подзолистых почв нижней части склона имеют валовые As, Cr, Rb благодаря механической миграции (приложение Д.1, Samonova, Aseyeva, 2020).



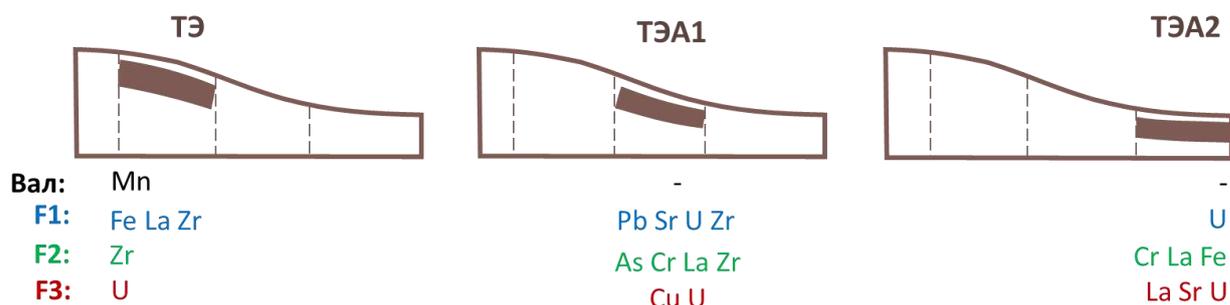
**Рисунок 5.2** Накопление элементов на латеральном биогеохимическом барьере гумусовых горизонтов почв катены; Представлены элементы, имеющие одинаковый тип L-распределения в два и более сезона опробования; Чёрный цвет – валовое содержание; синий – F1, зелёный – F2, красный – F3; Штриховка – места аккумуляции элементов; Полу жирным выделены элементы, чье накопление на биогеохимическом барьере подтверждено корреляцией с содержанием Сор<sub>г</sub> (приложении Г)

*F1 форма* соединений Rb, участвующая в биологическом круговороте, сорбируется органическим веществом почв (приложение Д.1). F1 форма соединений Bi и Cd имеет транзитный тип L-распределения и выносятся из торфа подчиненного ландшафта и поглощается растениями в более кислых условиях (см. таблицу 4.5). F1 форма соединений Pb имеет аккумулятивный тип L-распределения, из-за поглощения сфагнумом и накопления в торфе заболоченного ландшафта (приложение 4.4). Схожее распределение характерно для F1 формы соединений элементов с низкой биогеохимической активностью (Fe, La, U, Zr), которые консервируются в торфе подчиненного ландшафта.

*F2 форма* соединений халькофильных Cd, Cu и Zn имеет аккумулятивный тип L-распределения, что также характерно для подвижных комплексов Fe, которые выносятся из верхних звеньев катены и накапливаются в подчиненных (Thomson et al. 2006; Moiseenko et al., 2013).

*F3 форма* соединений большинства элементов в гумусовых горизонтах имеет аккумулятивное L-распределение, поскольку в торфянисты подзолистых почвах нижней части склона формируются наиболее благоприятные условия их образования. При затоплении этой позиции, соединения могут подниматься с грунтовыми водами и задерживаться в гумусовом горизонте.

В *элювиальном горизонте* дерново-подзолистых почв трансэлювиального ландшафта склона повышено *валовое содержание* Mn (рисунок 5.3) за счёт миграции с растворённым органическим веществом (приложение Д.1), что подтверждается наличием обильных гумусовых затёков (приложение Б). Также горизонт EL верхней части склона характеризуется менее кислой реакцией среды, что замедляет миграцию в нижележащие горизонты (Enchilik, Semenov, 2022).



**Рисунок 5.3** Накопление элементов в горизонте EL, имеющих одинаковый тип распределения в два и более сезона опробования; Чёрный цвет – валовое содержание; синий – F1, зелёный – F2, красный – F3; Заливкой показаны места аккумуляции элементов

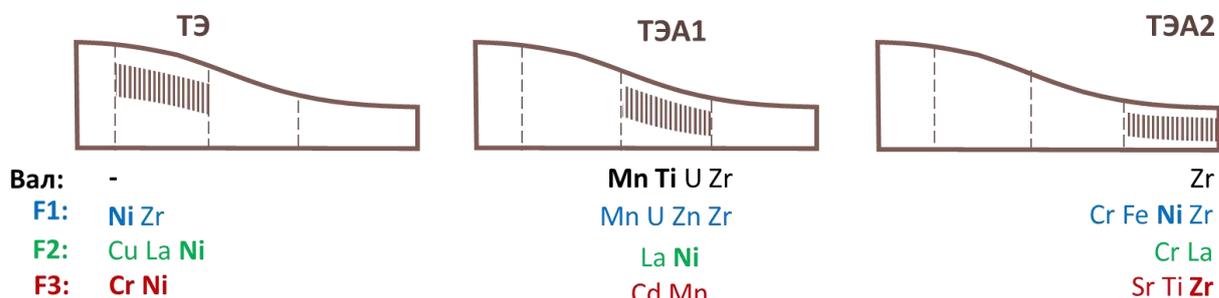
*F1 форма* соединений Fe, La, Zr в элювиальном горизонте имеет транзитный тип L-распределения с накоплением в дерново-подзолистых почвах верхней части склона. Аккумулятивный тип L-распределения Pb, Sr, U, Zr – с накоплением в торфянисто-перегнойных подзолистых почвах нижней части склона и U – с накоплением в тофянистых

подзолистых почвах потяжины. Распределение Fe, U, La, Zr в катене зависит от распределения крупнопылеватыми фракции, La и Sr – от илистой фракции, а Pb мигрирует с растворенным органическим веществом (приложение Д.1).

Для *F2 форм* соединений большинства элементов в элювиальном горизонте характерно аккумулятивное L-распределение. Так, As, Cr, La, Zr накапливаются в перегнойно-торфянистых подзолистых почвах подчиненного ландшафта нижней части склона (рисунок 5.3), а Fe – в торфянисто-подзолистых почвах потяжины. Такое распределение As и Cr связано с поступлением в горизонт растворённого органического вещества (приложение Д.1).

*F3 форма* соединений элементов аккумулятивно распределены по катене с накоплением Cu, La, U в перегнойно-торфянистых подзолистых почв нижней части склона, La, Sr, U – в торфянисто-подзолистых почвах потяжины, поскольку в подчиненных позициях частая смена окислительно-восстановительных условий приводит к большему содержанию в горизонте Fe-Mn конкреций, сорбирующих элементы. Также миграция Cu связана с содержанием Сорг, которое увеличивается в горизонте EL подчиненных ландшафтов, а La и U – с содержанием илистой фракции (приложение Д.1).

В *иллювиальном горизонте* (рисунок 5.4) контрастность латеральной дифференциации валового содержания элементов относительно гумусового горизонта снижается, поэтому для большинства элементов характерен монотонный тип L-распределения. Аккумулятивное L-распределение свойственно Mn, Ti, U и Zr при накоплении в перегнойно-торфянистых подзолистых почвах подножия склона. Для Mn прослеживается накопление на щелочном барьере, а Ti – на сорбционном (приложение Д.1). Миграция U и Zr связана с крупнопылевой фракцией (приложение Д.1), содержание которой возрастает в горизонте ВТ почв подчиненных ландшафтов (Enchilik, Semenov, 2022).



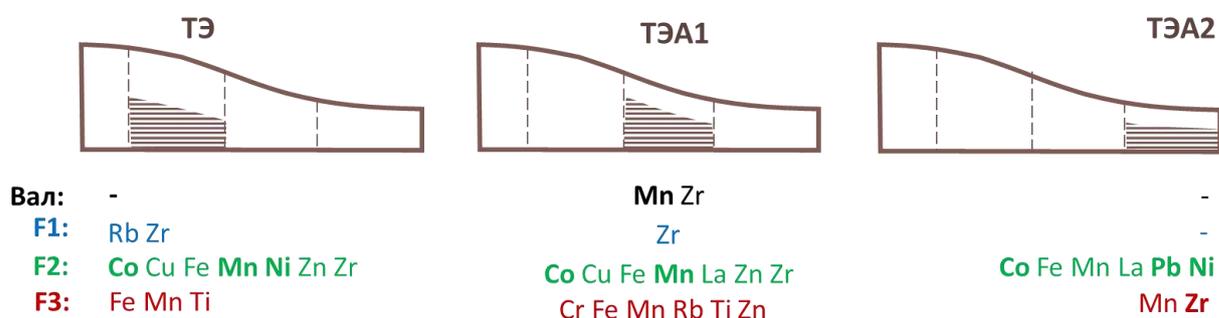
**Рисунок 5.4** Накопление элементов на латеральном сорбционном и щелочном барьерах горизонта ВТ почв катены; Представлены элементы, имеющие одинаковый тип L-распределения в два и более сезона опробования; Чёрный цвет – валовое содержание; синий – F1, зелёный – F2, красный – F3; Штриховкой показаны места аккумуляции элементов; Полужирным выделены элементы, чье накопление на сорбционном и щелочном барьерах подтверждено корреляцией с илистой фракцией и/или рН соответственно (приложения Г)

*F1 форма* соединений Ni и Zr имеют транзитное L-распределение с аккумуляцией в иллювиальном горизонте дерново-подзолистых почв склона. При этом для Ni характерно накопление как на сорбционном, так и на щелочном барьерах (приложение Д.1), а концентрация Zr коррелирует с содержанием крупнопылевой фракции. Аккумулятивное L-распределение Mn и Zn можно объяснить увеличением содержания Сор<sub>г</sub> (Enchilik, Semenov, 2022), с которым у элементов положительная корреляция (приложение Д.1). В почвах заболоченного ландшафта потяжины признаки оглеения по всему профилю усиливают элювиально-иллювиальный процесс, приводящий к накоплению Ni на сорбционном и щелочном барьерах, а также Cr, Fe, Zr, мигрирующих с пылевыми частицами (приложение Д.1).

*F2 форма* соединений Cu, La, Ni имеют транзитное L-распределение в горизонте ВТ (рисунок 5.4). Органические комплексы Cu мигрируют в переувлажненных почвах с почвенными растворами в нижнюю часть профиля и задерживаются при увеличении рН. Ni в нижней части профиля образует комплексы с карбонатами (приложение Д.1).

*F3 форма* соединений Cr и Ni имеют транзитное L-распределение и мигрирует с илестыми частицами (приложение Д.1). Также эти соединения металлов сорбируются оксидами Mn. Наличие марганцевых примазок в нижней части профиля отмечено в ходе полевых работ (приложение Б). У подножия склона задерживаются соединения Cd и Mn, в потяжине – Sr, Ti, Zr (рисунок 5.4). У последнего прослеживается связь с содержанием илестой фракции (приложение Д.1).

В *породе валовое содержание* Mn и Zr имеет аккумулятивное L-распределение с накоплением в трфянистых подзолистых почвах нижней части склона (рисунок 5.5), где Mn задерживается на щелочном барьере, а Zr мигрирует с крупнопылевыми частицами (приложение Д.1).



**Рисунок 5.5** Накопление элементов на латеральном щелочном и карбонатном барьерах в карбонатных породах катены; Представлены элементы, имеющие одинаковый тип распределения в два и более сезона опробования; Чёрный цвет – валовое содержание; синий – F1, зелёный – F2, красный – F3; Штриховка – места аккумуляции элементов; Полужирным выделены элементы, чье накопление на щелочном и карбонатном барьерах подтверждено корреляцией с величиной рН и/или содержанием СаСО<sub>3</sub> соответственно (приложении Г)

*F1 форма* соединений Rb и Zr с подземными водами мигрирует в нижнюю часть профиля и аккумулируются на щелочном барьере.

*F2 форма* соединений многих элементов имеет аккумулятивное L-распределение. Они представлены комплексами с карбонатами (Ni, Zr) и накапливаются на щелочном (Co, Mn, Ni, Pb) барьере подчиненных ландшафтов, поскольку при движении вниз по склону верхняя граница вскипания от 10% HCl расположена ближе к поверхности (приложение Б).

Содержание *F3 формы* соединений большинства элементов увеличивается в породе нижней части склона, поскольку в этой переувлажненной позиции при частой смене окислительно-восстановительных условий наиболее благоприятные условия для формирования и миграции сорбированных соединений элементов (приложение Б).

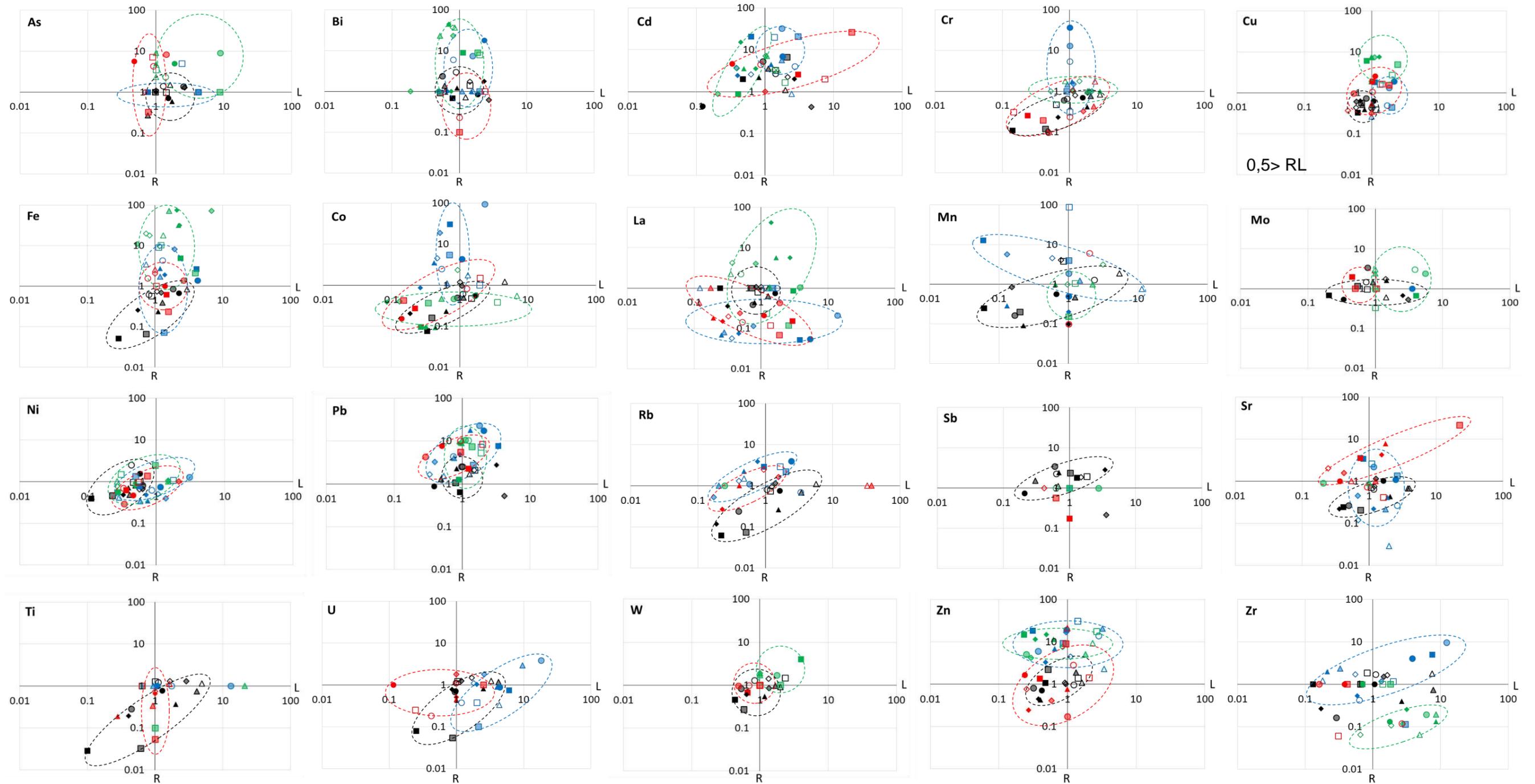
#### **5.4 Контрастность радиальной и латеральной почвенно-геохимической структуры катены**

Контрастность распределения форм соединений химических элементов в подчинённых ландшафтах катаны для каждого сезона оценена путем расчета коэффициентов радиальной (R) и латеральной (L) дифференциации. При значениях коэффициентов  $R, L > 2$  элементы считались контрастно накапливающимися, а при  $R, L < 0,5$  – рассеивающимися в почвах катены. Соотношение коэффициентов R и L (рисунок 5.6-5.8) и, соответственно, типов радиального (по Розанову, 2004) и латерального распределения (Геннадиев, Касимов, 2004) в профиле и разных генетических горизонтах почв отражает комплексное влияние внутривидовых и пространственных факторов на потоки веществ в катене.

В *гумусовом горизонте* (рисунок 5.6) в сентябре контрастная R и L-дифференциация валового содержания Cd, Co, Cr, Fe, La, Mn, Ni, Rb, Sr, Ti, U, W, Zr ( $2 < R < 0,5$ ,  $2 < L < 0,5$ ). Для большинства элементов свойственно элювиальное радиальное распределение при транзитном латеральном ( $R, L < 0,5$ ) с максимальным рассеиванием в торфе подчиненного заболоченного ландшафта. Аккумулятивное R, L распределение характерно только для Cd ( $R=6$  и  $L=2$ ) в перегнойном горизонте ландшафта подножия склона. Сезонная изменчивость проявляется в июне у Mn, Rb, Sr и Ti, в ноябре у Ni в элювиальном радиальном при транзитном латеральном распределении этих элементов в перегнойном горизонте подножия склона. В мае аккумулятивное радиальное распределение при транзитном латеральном с накоплением в гумусовом горизонте трансэлювиального ландшафта верхней части склона ( $R, L > 2$ ) характерно для валового содержания Cd и аккумулятивное радиальное и латеральное распределение Pb, Sb с накоплением в потяжине. У Co, La, Mn, Ni, Rb, Sr, Ti, Zn, Zr элювиальное радиальное распределение при транзитном латеральном с рассеиванием в заболоченной потяжине ( $R, L < 0,5$ ).

*F1 формы* As (рисунок 5.9) в сентябре контрастно накапливаются ( $R=5$ ,  $L=2,4$ ) в гумусовом горизонте почв средней части склона, Cd и Rb – в перегное у его подножия, а Fe, Pb и Zr – в торфе потяжины. В июне у Cd и Zn коэффициенты R и L контрастно увеличиваются ( $>2$ ) в верхней части склона, Co, Fe, U и Zr – у подножия склона, а Bi, Pb, Rb и Zr – в заболоченной потяжине. В ноябре высокие R и L коэффициенты ( $>2$ ) Zn в верхней части склона и U и Zn – в его нижней части. Низки значения коэффициентов R и L ( $<0,5$ ) La во всех подчиненных ландшафтах, а Ni – в верхней части склона. В мае La и Mn рассеиваются ( $R, L < 0,5$ ) в потяжине.

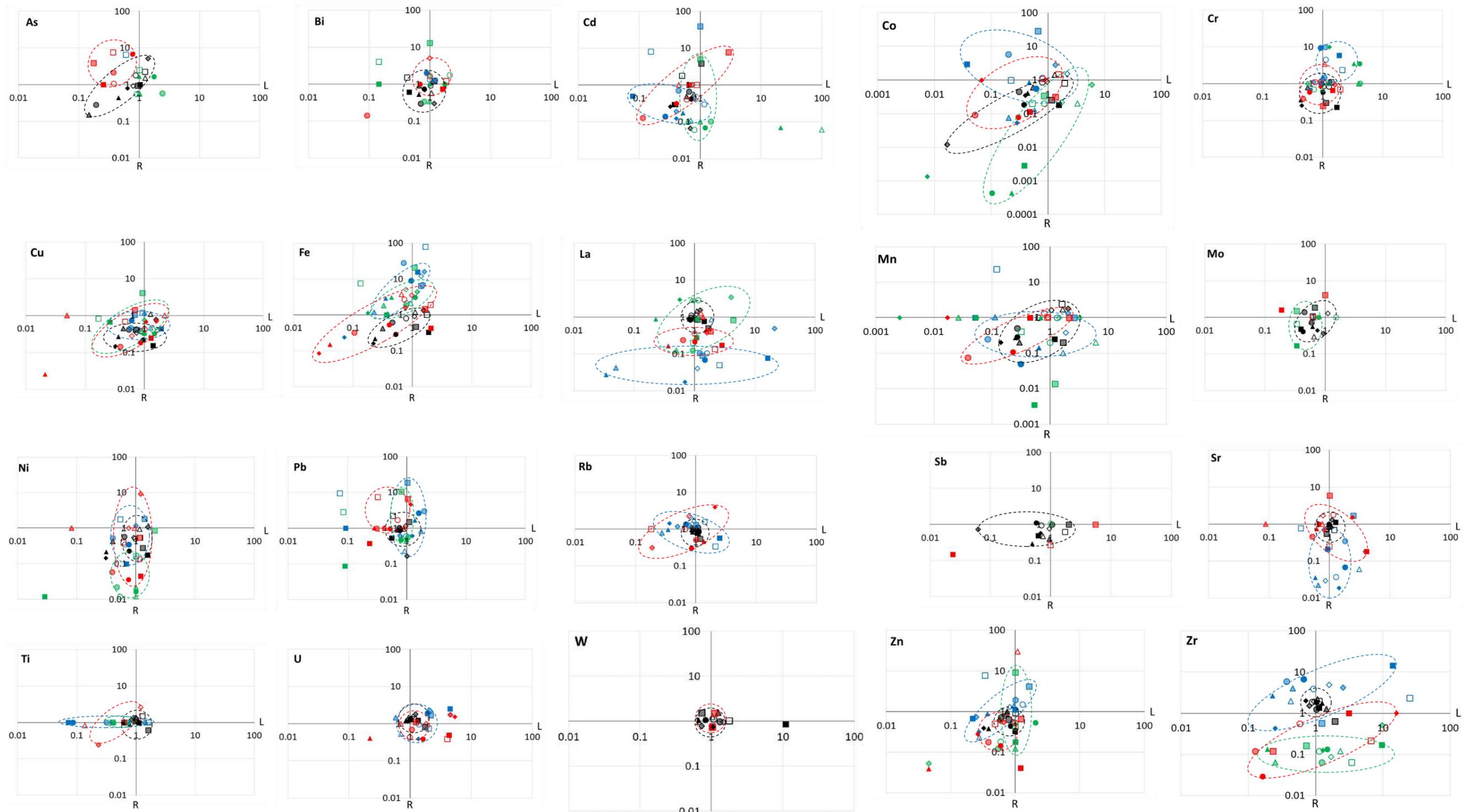
*F2 формы* Cu и Zn в сентябре контрастно накапливаются ( $R, L > 2$ ) в верхней и нижней частях склона, Fe имеет аккумулятивное радиальное и латеральное распределение с накоплением в нижней части склона и потяжине, W – только в потяжине. У F2 форм Co элювиальное радиальное распределение при транзитном латеральном ( $R, L < 0,5$ ) с рассеиванием в подчиненных переувлажненных ландшафтах подножия склона и потяжины. В июне аккумулятивное радиальное и латеральное распределение F2 форм Fe с накоплением ( $R, L > 2$ ) в перегнойном и торфяном горизонте нижней части склона и в потяжине, As – только в нижней части склона и La – только в потяжине. Mo имеет аккумулятивное радиальное распределение с накоплением в гумусовом горизонте верхней части пологого склона и в потяжине. У F2 форм Co элювиальное радиальное распределение при транзитном латеральном с рассеиванием ( $R, L < 0,5$ ) в торфе потяжины. В ноябре у Mn и Zn аккумулятивное радиальное распределение при транзитном латеральном с накоплением в верхней части склона, а у Fe аккумулятивное радиальное и латеральное распределение с накоплением в заболоченной потяжине. У F2 форм Co элювиальное радиальное распределение при транзитном латеральном с рассеиванием ( $R=0,1, L=0,4$ ) в торфе потяжины. В мае у Fe аккумулятивное R и L распределение с накоплением ( $>2$ ) в торфе потяжины.



**Рисунок 5.6.** Соотношение радиальной и латеральной дифференциации элементов в А-горизонта почв катены в системе координат: R – коэффициент радиальной дифференциации для горизонта А, L – коэффициент латеральной дифференциации А-горизонта; цветом показана форма элемента: вал – чёрный, F1 – синий, F2 – зеленый, F3 – красный; интенсивность цвета – элементарный ландшафт: контур – ТЭ, полупрозрачный – ТЭА1, сплошная заливка – ТЭА2; геометрическая форма – сезон: квадрат – сентябрь, круг – июнь, треугольник – ноябрь, ромб – май; пунктирной линией выделены наиболее плотные группировки точек

У F3 форм Cd в сентябре аккумулятивное радиальное и латеральное распределение с максимальным накоплением в нижней части склона ( $R=26, L=18$ ) и в торфе заболоченной потяжины ( $R,L=3$ ). У Pb аккумулятивное радиальное распределение при транзитном латеральном с накоплением в верхней части склона ( $R=8, L=2$ ), а у Sr аккумулятивное R и L распределение с накоплением в нижней части склона ( $R=21, L=23$ ). В сентябре у Cu элювиальное радиальное распределение при транзитном латеральном с рассеиванием ( $R,L<0,5$ ) в органоминеральном горизонте всех подчиненных ландшафтов, у Co – с рассеиванием только в нижней части склона и потяжине, у Zr – в верхней и нижней частях склона, у U – только в верней части склона. В июне элювиальное радиальное распределение при транзитном латеральном у Co, Ni и Zr с рассеиванием в нижней части склона и в заболоченной потяжине ( $<0,5$ ), Cr – в верхней ( $R=0,2, L=0,03$ ) и нижней ( $R=0,1, L=0,5$ ) частях склона, U – в его верхней части ( $R=0,2, L=0,4$ ) и в потяжине ( $R=0,03, L=0,1$ ), Zn – только в нижней части склона ( $R=0,2, L=0,03$ ), Mn – только в потяжине ( $R=0,04, L=0,003$ ). В ноябре элювиальное радиальное распределение La сопровождается его снижением в верхней части склона ( $R=0,4, L=0,1$ ) и в потяжине ( $R,L=0,2$ ), Rb и Ti – только в потяжине. В мае элювиальное радиальное распределение при транзитном латеральном у La с рассеиванием ( $<0,5$ ) во всех подчиненных ландшафтах, Cu – в верхней части склона, Rb и Zn – в потяжине.

В *элювиальном горизонте* в сентябре валовое содержание Cd и Mo контрастно рассеивается в потяжине ( $R,L <0,5$ ; рисунок 5.7). В июне в нижней части склона и потяжине снижается содержание ( $R,L <0,5$ ) As, Co, Mn и Mo. В ноябре многие изучаемые элементы (As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Sb, Zn) рассеиваются ( $R,L <0,5$ ) в элювиальном горизонте подчиненного ландшафта заболоченной потяжины, из них As, Cu, Cu, Fe, Mn, Ni – в нижней части склона. В мае элювиально-элювильное распределение при транзитном латеральном ( $R,L <0,5$ ) характерно для Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni и Zn. Содержание Co также контрастно снижается в нижней части склона. В целом, для валового содержания исследуемых элементов характерно контрастное элювиально-элювильное распределение при транзитном латеральном с рассеиванием в подчиненных переувлажненных ландшафтах нижней части склона и заболоченной потяжины, что, вероятно, обусловлено, более кислыми условиями среды, что способствует интенсификации оподзоливания.



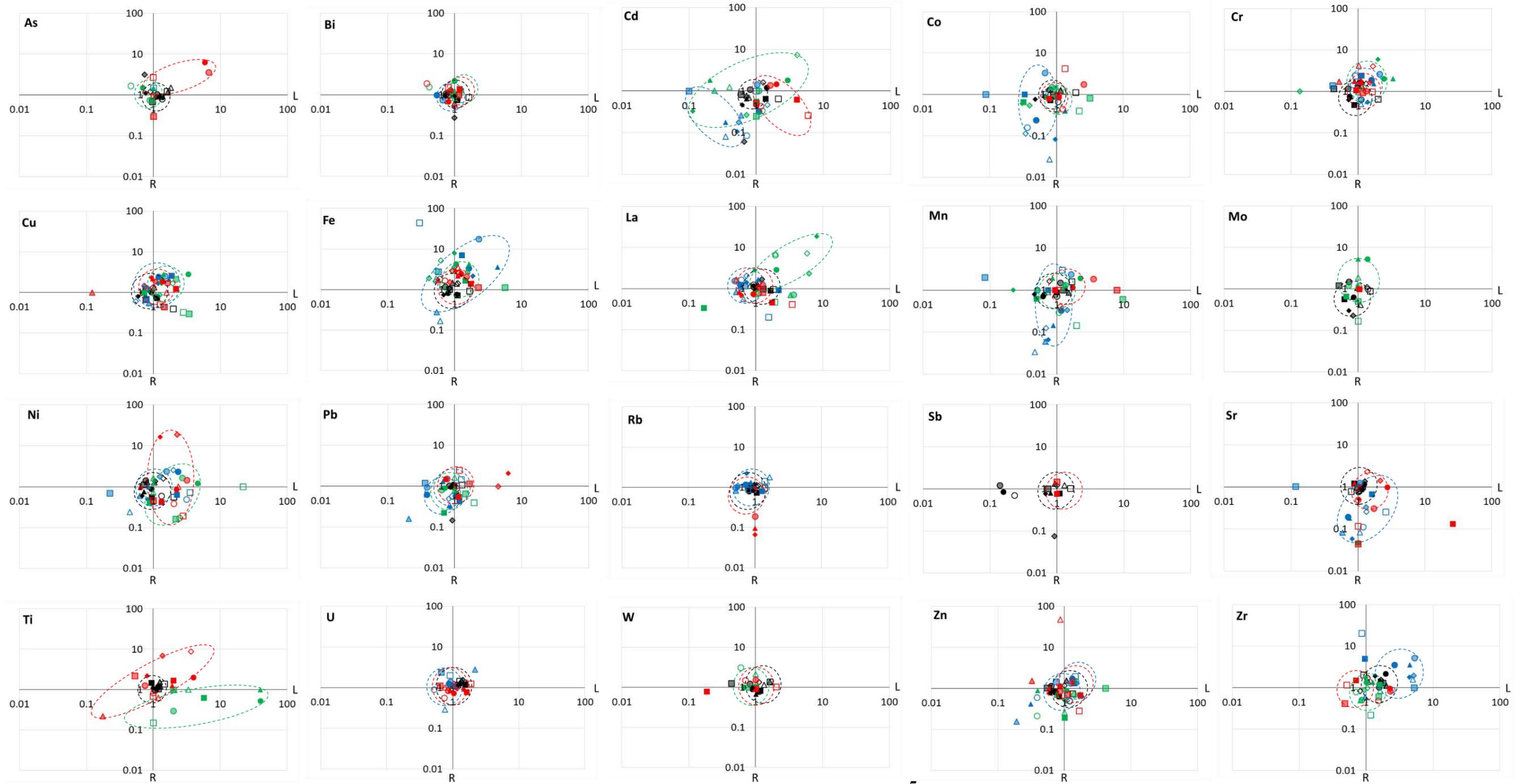
**Рисунок 5.7.** Радиальная и латеральная почвенно-геохимическая структура EL-горизонта почв катены в системе координат: R – коэффициент радиальной дифференциации для горизонта EL, L – коэффициент латеральной дифференциации EL-горизонта; цветом показана форма элемента: вал – чёрный, F1 – синий, F2 – зеленый, F3 – красный; интенсивность цвета – элементарный ландшафт: контур – ТЭ, полупрозрачный – ТЭА1, сплошная заливка – ТЭА2; геометрическая форма – сезон: квадрат – сентябрь, круг – июнь, треугольник – ноябрь, ромб – май; пунктирной линией выделены наиболее плотные группировки точек

В сентябре в элювиальном горизонте верхней части склона контрастно возрастает содержание *F1 форм* Cr и Zr, в заболоченной потяжине – U и Zr ( $R,L>2$ ) и снижается только Cd в нижней части склона. В июне концентрации U увеличиваются ( $R,L>2$ ) у подножия склона, Cd и Mn снижаются ( $R,L<0,5$ ) в нижней части склона и в заболоченной потяжине. В ноябре *F1 формы* Zn рассеиваются ( $R,L<0,5$ ) в верхней части склона, а Co и La - в нижней. В мае Zr контрастно накапливается ( $R,L>2$ ) в нижней части склона, а Cd, Co, Fe, Zn и Zr – рассеиваются в потяжине ( $R,L<0,5$ ).

*F2 формы* Co, Mo, Ni и Pb накапливаются ( $R,L<0,5$ ) в заболоченном ландшафте потяжины, Mn – в верхней части склона. В июне R, L коэффициенты Cr контрастно увеличиваются в потяжине ( $R,L>2$ ), Co снижается ( $R,L<0,5$ ) у подножия склона и Ni - в потяжине. В ноябре для *F2 форм* Cr также прослеживается накопление ( $R,L>2$ ) в заболоченном ландшафте. При этом, в подчиненных переувлажненных позициях контрастно рассеиваются ( $R,L<0,5$ ) Co, La и Zr. В мае в нижней части склона возрастает концентрация La ( $R=3, L=3$ ) и снижается концентрация Zn ( $R=0,1, L=0,04$ ).

*F3 формы* Cd контрастно накапливаются ( $R=8, L=3$ ) в нижней части склона. Co, Pb, Sb рассеиваются ( $R,L<0,5$ ) в потяжине, Zn – в верхней части склона, Zr – у подножия. В июне коэффициенты R и L контрастно уменьшаются ( $<0,5$ ) в подчиненных ландшафтах нижней части склона (Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn, Zr) и заболоченной потяжины (Cd, Co, Mn, Zr). В ноябре в потяжине Cu, Fe, La, U, Zn контрастно рассеиваются ( $R,L<0,5$ ). В мае в заболоченной потяжине контрастно накапливается Rb ( $R=4, L=2$ ), рассеиваются Fe и Zn ( $R,L<0,5$ ). У подножия склона значения R и L уменьшаются у Rb и Ti ( $R,L<0,5$ ).

В *иллювиальном горизонте* валовое содержание элементов во все сезоны опробования характеризуется равномерным радиальным и латеральным распределением (рисунок 5.8). Для *F1 форм* элементов в сентябре также не прослеживается контрастной RL-дифференциации. В июне в нижней части склона накапливаются Cr, Fe и Zr, в заболоченной потяжине – Ni и Zr ( $R,L>2$ ) и рассеиваются – Co ( $R,L<0,5$ ). В ноябре в потяжине контрастно накапливаются *F2 формы* Fe и Zr, у подножия склона – U ( $R,L>2$ ). В верхней части склона рассеивается Cd, Mn и Ni, а у подножия склона и в потяжине – Cd, Pb, Zn ( $R,L<0,5$ ). В мае контрастно рассеивается ( $R,L<0,5$ ) только содержание *F1 формы* соединений Co в верхней части склона.



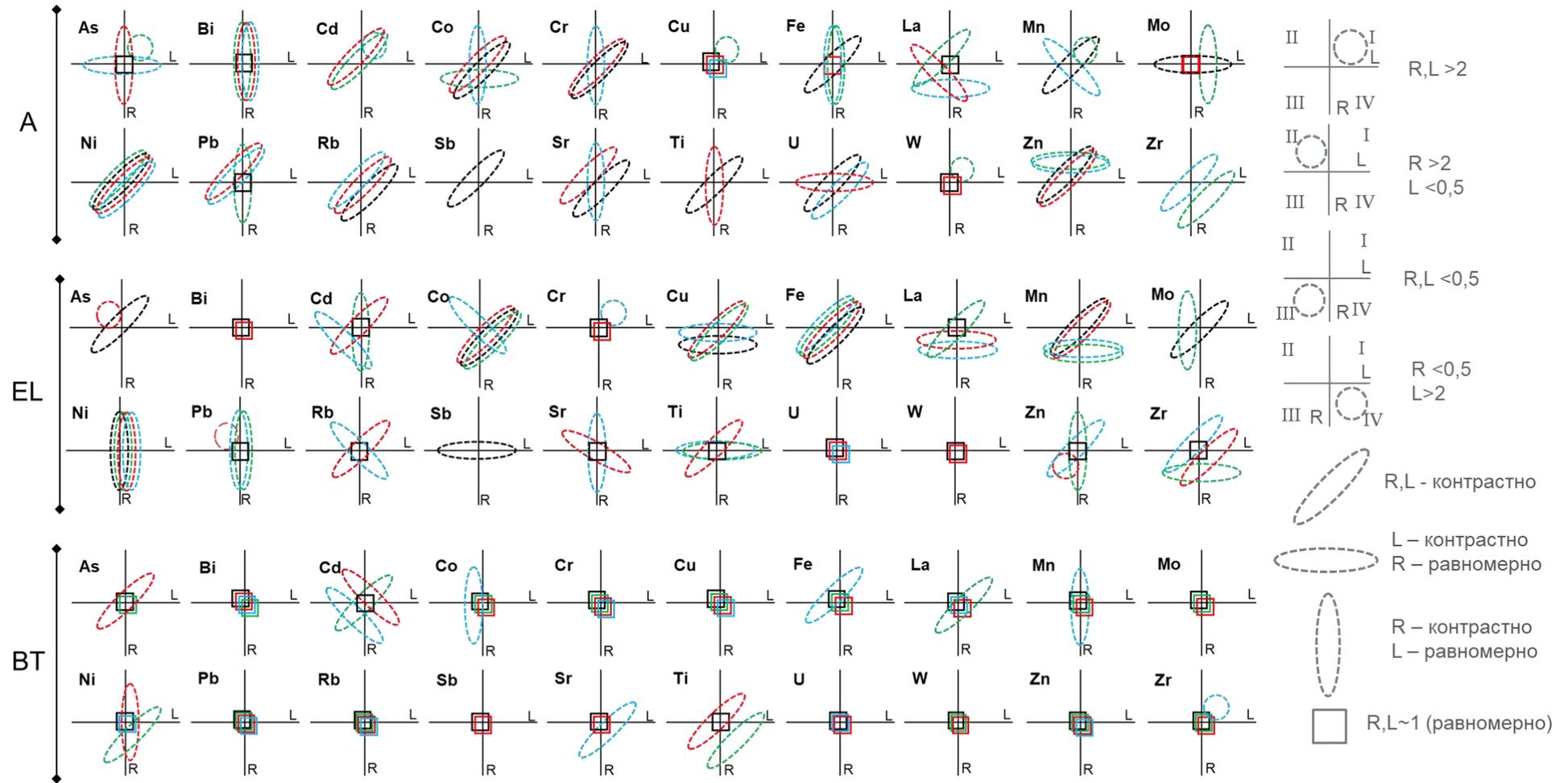
5

**Рисунок 5.8.** Радиальная и латеральная почвенно-геохимическая структура ВТ-горизонта почв катены в системе координат: R – коэффициент радиальной дифференциации для горизонта ВТ, L – коэффициент латеральной дифференциации ВТ-горизонта; цветом показана форма элемента: вал – чёрный, F1 – синий, F2 – зеленый, F3 – красный; интенсивность цвета – элементарный ландшафт: контур – ТЭ, полупрозрачный – ТЭА1, сплошная заливка – ТЭА2; геометрическая форма – сезон: квадрат – сентябрь, круг – июнь, треугольник – ноябрь, ромб – май

Для *F2 форм* элементов в сентябре также наблюдается равномерная RL-дифференциация. В июне в подчинённых переувлажненных ландшафтах контрастно накапливаются ( $RL > 2$ ) Cr, Cu и La, рассеивается только Zn ( $R=0,2$ ,  $L=0,4$ ) в верхней части склона. В ноябре в потяжине накапливается Cr ( $R=2$ ,  $L=3$ ). В мае во всех подчиненных позициях относительно элювиальной накапливается ( $R,L > 2$ ) La и Cd в верхней части склона. Комплексные соединения Cd рассеиваются в потяжине ( $R,L < 0,5$ ).

*F3 формы* Zr в сентябре рассеиваются в нижней части склона ( $R,L < 0,5$ ). В подчиненных ландшафтах нижней части склона в июне накапливаются As и Ti ( $R,L > 2$ ), в ноябре – рассеивается Ti ( $R=0,4$ ,  $L=0,5$ ). В мае в верхней части склона накапливается F3 формы Ti ( $R=4$ ,  $L=9$ ), у подножия склона – Ni ( $R=19$ ,  $L=2$ ) и в потяжине – Pb ( $R=2$ ,  $L=6$ ).

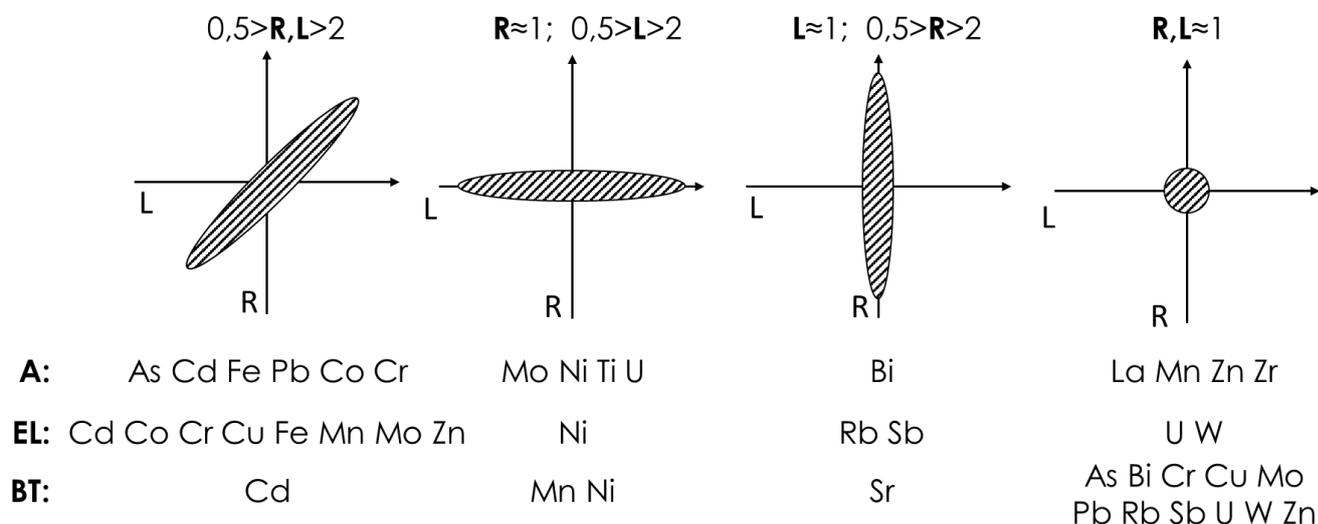
*Гумусовый горизонт* характеризуется наиболее дифференцированным профильным и катенарным распределением. По полям точек, формирующимся на графиках R и L коэффициентов, можно выделить четыре группы элементов (рисунок 5.9 и 5.10). Первую группу формируют XЭ, у которых наблюдается прямая зависимость между коэффициентами R и L, то есть, аккумулятивное радиальное и латеральное распределение ( $R,L < 2$ ) или элювиальное радиальное распределение при транзитном латеральном ( $R,L < 0,5$ ) – облако точек расположено в I и III четверти системы координат: As, Cd, Mn, Ni, Fe, Pb, Rb, Zn и отчасти Co и Cr. Связь между латеральной и радиальной дифференциацией подтверждает значимая прямая корреляция между R и L коэффициентами для валовых и подвижных форм Fe ( $r=0,6$ ), Co, Cr ( $r=0,7$ ) в гумусовых горизонтах ландшафтов катены. Во вторую группу можно отнести элементы, которые при равномерном L-распределении имеют элювиальную или аккумулятивную R дифференциацию (облако точек расположено вдоль оси L): Mo, Ni, Ti, U. Третью группу формируют элементы, у которых равномерное R-распределение сопровождается контрастной аккумулятивной или транзитной L-дифференциацией (вдоль оси R): Bi.



Цветом фигуры показаны формы элементов: черный – валовые, синий – F1, зеленый – F2, красный – F3.

**Рисунок 5.9.** Контрастность R и L дифференциации форм соединений элементов в горизонтах почв катены

У Cu, Sr и W облако значений концентрируется вокруг единицы, то есть элементы равномерно распределены в гумусовом горизонте почв катены ( $R, L \sim 1$ ). У La, Mn, Zn и Zr этот круг расширяется, что говорит о более контрастном распределении этих элементов.



**Рисунок 5.10.** Схема радиальной и латеральной почвенно-геохимической структуры A, EL, BT-горизонтов почв катены в системе координат: R – коэффициент радиальной дифференциации, L – коэффициент латеральной дифференциации

В элювиальном горизонте также по полям точек, формирующимся на графике соотношения коэффициентов, можно выделить группы элементов (рисунок 5.9). В первую группу (где контрастность дифференциации R зависит от L) можно отнести Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo и Zn. Прямая корреляционная зависимость между коэффициентами R и L обнаружена для Cd ( $r=0,6$ ) и Mn ( $r=0,7$ ). Ко второй группе (равномерное L-распределение при контрастном R) относится Ni. В третью группу (равномерное R-распределение при контрастном L) можно отнести Rb, Sb. Облако значений концентрируется вокруг единицы ( $R, L \sim 1$ ) у анионогенных U и W. Для остальных элементов (As, Bi, La, Ti, Pb, Sr, Zr) сезонные и ландшафтные условия сильнее влияют на соотношение коэффициентов в элювиальном горизонте, поэтому преобладающего положения поля точек не прослеживается.

В иллювиальном горизонте для большинства элементов (As, Bi, Cr, Cu, Mo, Pb, Rb, Sb, U, W, Zn) характерна ситуация, при которой облако значений концентрируется вокруг единицы ( $R, L \sim 1$ ), что подтверждает преобладание равномерного распределения в этом горизонте почв катены.

#### Выводы

В палево-подзолистых, дерново-подзолистых и торфянисто-подзолистых почвах Центрально-Лесного заповедника диагностированы биогеохимический, сорбционный, глеевый и карбонатный радиальные геохимические барьеры, положение которых относительно устойчиво в условиях сезонной изменчивости. Обменная (F1) форма соединений элементов

аккумулируется на комплексном биогеохимическом и сорбционном барьере, поскольку большую роль в их радиальном распределении играют биогеохимические процессы (поглощение растениями из нижних горизонтов и возвращение с опадом на поверхность почв, гумусонакопление) и сорбция органическим веществом почв. В распределении комплексных (F2) форм соединений ХЭ ведущими факторами являются содержание органического вещества почв и карбонатность пород. В распределении сорбированных гидроксидами Fe и Mn (F3) форм соединений ХЭ большую роль играет накопление на биогеохимическом барьере в гумусовом горизонте (As, Cd, Cu, Pb, Zn, Sb), аккумуляция на сорбционном барьере Fe-Mn конкреций в элювиальном и иллювиальном горизонтах (As, Bi, Cd, Pb), а также миграция с илистыми частицами (Cr).

Латеральное распределение большинства элементов контрастно отличается по сезонам года в органогенных горизонтах почв обследованной катены, где на миграцию подвижных форм соединений элементов в большей степени влияет состав растительного опада и содержание Сорг. На межсезонные отличия латерального распределения в элювиальных горизонтах влияют окислительно-восстановительные условия и миграция растворённого органического вещества, так как они зависят от сезонной смены условий увлажнения. В иллювиальном горизонте и породе изменчивость L-распределения элементов и их форм проявляется слабее, поскольку в нижней части профиля почв ключевую роль в миграции элементов играет гранулометрический состав почв и наличие щелочного геохимического барьера – показателей, слабо зависящих от смены погодных условий в южнотаежных ландшафтах.

Радиальная дифференциация Cd, Mn, Ni, Pb, Rb и Zn напрямую зависит от латеральной, что проявляется в увеличении значений R и L коэффициентов в А-горизонтах подчиненных ландшафтов катены. Подвижные формы биогеохимически активных элементов имеют аккумулятивное радиальное и латеральное распределение в почвах катены. В элювиальном горизонте для Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Mo и Zn наблюдается обратная ситуация, при которой аккумулятивное элювиально-иллювиальное радиальное распределение элементов сопровождается их транзитным латеральным распределением. В иллювиальном горизонте контрастность R и L дифференциации всех исследуемых элементов значительно снижается.

## Глава 6. Подвижность химических элементов в почвах катены

Подвижность химических элементов как совокупность соединений, способных переходить из почвы в раствор под действием реагентов (Fujikawa et al., 2000; Takeda et al., 2006; Sipos, 2009; Shaheen, 2018; Xiao et al., 2019; Burachevskaya et al., 2020; Sungur et al., 2021), определяет многие экологические функции почв, включая плодородие и буферность по отношению к загрязнителям (Мотузова, 2009), а также доступность веществ растениям (Peijnenburg, 2007; Scheckel, 2009; Alloway, 2013; Vodyanitskii, Vlasov, 2021). Сопряженные исследования радиального и латерального распределения подвижных форм элементов и особенно потенциально токсичных (Sundaramanickam et al., 2016, Hu et al., 2017; Rahman, Singh, 2019; Shao et al., 2020) в зависимости от свойств и факторов окружающей среды (Sungur et al., 2021) в природных ландшафтах важны, поскольку отражают миграционную способность, биодоступность и экологическую токсичность (Глазовская, Касимов, 1987, Минкина и др., 2009, Мотузова, 2009, Kosheleva, et al., 2015). Подвижные формы химических элементов обладают различной реакционной способностью, биологической доступностью и устойчивостью к воздействию физико-химических и биогеохимических факторов.

### 6.1 Вклад форм нахождения химических элементов в общую подвижность

Соотношение подвижных соединений зависит от свойств химических элементов, и почвообразующих процессов внутри генетических горизонтов (рисунок 6.1).

В *гумусовом и органогенных горизонтах* почв катены повышенная доля обменных (F1), наиболее доступных для растений форм у Cd (F1=26-100%), Mn (5-96%) и Sr (7-88%), Zn (12-43%) и в меньшей степени As (6-18%) отражает большую роль биологического круговорота в миграции этих элементов (Сиромля, 2019; Zhou et al., 2010; Li et al., 2017; Gabarrón et al., 2019). Увеличение доли F1 этих элементов, наблюдаемое в торфе заболоченного ландшафта, подтверждает снижение интенсивности биологического круговорота и консервацию доступных соединений в этих позициях (см. раздел 4.2). В гумусовом горизонте близка доля комплексных (F2) и сорбированных гидроксидами Fe и Mn (F3) форм Co, Mn, Cd, Zn, что указывает на активное участие в биогенной миграции в южнотаежных ландшафтах Центрально-Лесного заповедника.



В нижележащих *минеральных горизонтах* изменение соотношения подвижных форм ТММ обусловлено влиянием Fe-Mn конкреций и карбонатности почвообразующих пород. Так, в горизонтах EL и BT у многих элементов (As, Bi, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Pb и Zn) возрастает доля F3 из-за образования Fe-Mn конкреций при частой смене окислительно-восстановительных условий. Преобладание фракции специфически сорбированных соединений у Fe, Cu, Zn, Ni и Pb отмечена в почвах юго-востока Западной Сибири (Сиромля, 2019). В моренных суглинках повышена доля F2 форм соединений Cd, Co, Mn и Zr за счет наличия карбонатных комплексов. Низкое содержание F2 форм соединений Sr в профиле всех изученных почв согласуется с данными по подзолистым почвам Польши (Jeske, 2013).

Сезонная дифференциация соотношения подвижных форм соединений элементов обусловлена избирательным поглощением из почвы наиболее востребованных веществ растениями, их выносом в нижележащие горизонты и поверхностные воды с нисходящими токами влаги после снеготаяния и обильных дождей, а также высвобождением ТММ в почвенный раствор поверхностных горизонтов при разложения свежего растительного опада. В результате в осенние месяцы снижается содержание F1, F2, F3 форм соединений As, Bi, Mo, Sb, W, чему может способствовать извлечение F1 элементов из профиля почв растениями и миграция F2 и F3 форм с почвенными растворами. Увеличение доли F1 и F2 форм соединений Cd, Co, Mn, Ni и Zr среди непрочно сорбированных в мае и ноябре, вероятно, указывает на их поступление из легко разлагаемого опада однолетних травянистых растений.

## **6.2 Группирование и изменчивость радиального распределения потенциальной подвижности элементов**

Потенциальная подвижность представляет суммарную долю обменных (F1), комплексных (F2) и непрочно сорбированных гидроксидами Fe и Mn (F3) форм соединений элементов от валового содержания. Потенциальная подвижность большинства элементов (Cd, Pb, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Fe, Bi, Sr) максимальна в кислых органогенных горизонтах почв катены (M2>50%; таблица 6.1), что ранее отмечали в текстурно-дифференцированных почвах Мезенско-Вычегодской равнины (Семенков и др., 2016) и серогумусовых оподзоленных почвах Тобольского материка (Семенков и др., 2019).

В группу *сильноподвижных элементов* в почвах катены входят Cd, Pb, Mn, Co. Их потенциальная подвижность снижается в средней части профиля. В гумусовом горизонте среди непрочно связанных соединений Cd, Mn, Co обнаружено близкое содержание органоминеральных и сорбированных гидроксидами Fe и Mn соединений, что отражает большую важность биологического круговорота в их миграции в южнотаежных ландшафтах Центрально-Лесного заповедника. В кислом элювиальном горизонте сильноподвижными остаются соединения Cd и Pb, которые сорбируются (гидр)оксидами Fe и Mn (Violante 2013,

Kabata-Pendias, 2015). В иллювиальном горизонте и породе сильноподвижны Cd, Pb, Mn, за счет радиальной миграции растворённого органического вещества и перемещения илистых частиц, а также Co за счет сорбции соединениями Fe и Mn при высоких значениях pH (Kabata-Pendias, 2015).

Эта группа во все сезоны характеризуется устойчивой радиальной дифференциацией, проявляющейся в относительно равномерном распределении подвижности с незначительным увеличением у Pb в верхней части почв и уменьшению – Mn, Co и Cd в средней части. Сезонная изменчивость проявляется в горизонте EL в виде снижения концентрации Co в июне и Mn в мае. Вероятно, подвижные соединения этих металлов, поступившие на поверхность почв с растительными остатками (Mn – хвоя ели, Co – сфагнум, см. таблицу 4.5), осенью с растворённым органическим веществом мигрируют в горизонт EL, а весной и летом выносятся из него с талыми и дождевыми водами в нижнюю часть профиля.

**Подвижными элементами** с максимумом в верхней части почв являются La, Ni, Cu, Zn, Fe. Такое распределение Ni, Cu, Zn и Bi обусловлено активным участием в биологическом круговороте (см. таблицу 4.5). Снижение подвижности Ni и La наблюдается в горизонте EL, а Cu – еще и в породе. Ni сильноподвижен с большим участием его органоминеральных соединений. Эта закономерность для подвижных соединений Ni отмечена и в других работах (Kabata-Pendias, 2015). La и Fe образуют комплексы с органическим веществом, что для F2-форм соединений Fe подтверждается корреляционной зависимостью с содержанием Сорг. (приложение Д.1). В верхней части профиля среди подвижных соединений Zn и Bi преобладают F1 и F2 формы.

Для элементов, обладающих максимальной подвижностью в верхней и нижней частях профиля (Ni, La), в июне и ноябре возрастает потенциальная подвижность в средней части профиля, чему может способствовать промачивание почв и принос соединений как из гумусовых горизонтов с осадками, так и из иллювиальных горизонтов с капиллярным поднятием. Увеличение содержания La в лесной подстилке в ноябре и мае, вероятно, обусловлено накоплением и преобразованием остатков травянистых растений, обогащенных этим элементом в ландшафтах катены (см. рисунок 4.2). Для Bi, Fe, Zn, Cu сезонная дифференциация проявляется в увеличении потенциальной подвижности в сентябре в гумусовом и органогенных горизонтах, вероятно, в результате высокой микробиологической активности летом и поступлении в раствор их соединений при разрушении мортмассы. Во влажные июнь и ноябрь подвижные соединения катионогенных Fe, Zn и Cu выносятся в нижележащие горизонты, благодаря поступлению обильных слабокислых осадков с pH=5,2 (см. рисунок 3.4).

Таблица 6.1

Потенциальная подвижность (F1+F2+F3) элементов в горизонтах текстурно-дифференцированных почв катены Центрально-Лесного заповедника, %

Элемент	Zr	Sb	W	Mo	Rb	Sr	As	U	Cr	Bi	Fe	Zn	Cu	Ni	La	Cd	Co	Mn	Pb
Горизонт СЕНТЯБРЬ, 2016																			
Oa(3)	<u>0.3</u> 51	<u>2.7</u> 44	<u>1.8</u> 38	<u>3.7</u> 67	<u>14</u> 66	<u>42</u> 59	<u>29</u> 27	<u>3.3</u> 15	<u>7</u> 61	<u>62</u> 33	<u>29</u> 15	<u>86</u> 25	<u>74</u> 27	<u>60</u> 36	<u>18</u> 54	<u>98</u> 4	<u>95</u> 9	<u>90</u> 12	<u>100</u> 0
ao(4)	<u>1.0</u> 100	<u>6</u> 65	<u>6</u> 83	<u>10</u> 28	<u>18</u> 100	<u>33</u> 100	<u>35</u> 61	<u>18</u> 98	<u>15</u> 23	<u>60</u> 62	<u>63</u> 67	<u>39</u> 55	<u>65</u> 62	<u>55</u> 73	<u>40</u> 100	<u>79</u> 31	<u>85</u> 34	<u>63</u> 50	<u>93</u> 15
AYEL(4)	<u>0.5</u> 75	<u>3.1</u> 90	<u>0.9</u> 78	<u>6</u> 90	<u>1.3</u> 34	<u>1.7</u> 70	<u>16</u> 57	<u>8</u> 28	<u>21</u> 7	<u>17</u> 46	<u>13</u> 59	<u>9</u> 38	<u>14</u> 56	<u>9</u> 78	<u>11</u> 34	<u>23</u> 48	<u>24</u> 86	<u>25</u> 46	<u>37</u> 62
EL(3)	<u>1.0</u> 51	<u>1.4</u> 60	<u>1.6</u> 80	<u>5</u> 36	<u>1.2</u> 26	<u>2.5</u> 78	<u>19</u> 139	<u>14</u> 10	<u>24</u> 42	<u>17</u> 13	<u>17</u> 29	<u>10</u> 52	<u>18</u> 38	<u>8</u> 20	<u>22</u> 56	<u>24</u> 34	<u>44</u> 74	<u>41</u> 61	<u>29</u> 25
BEL(3)	<u>2.5</u> 30	<u>0.3</u> 9	<u>2.7</u> 38	<u>3</u> 18	<u>1.8</u> 49	<u>3.0</u> 19	<u>6</u> 80	<u>13</u> 23	<u>19</u> 27	<u>17</u> 26	<u>14</u> 17	<u>12</u> 28	<u>20</u> 19	<u>15</u> 81	<u>31</u> 9	<u>23</u> 62	<u>38</u> 34	<u>35</u> 26	<u>30</u> 13
BT(4)	<u>2.8</u> 19	<u>1.5</u> 126	<u>2.6</u> 22	<u>8</u> 29	<u>1.2</u> 9	<u>4.2</u> 42	<u>4.2</u> 82	<u>13</u> 19	<u>16</u> 15	<u>16</u> 25	<u>12</u> 34	<u>15</u> 35	<u>17</u> 38	<u>19</u> 49	<u>37</u> 18	<u>32</u> 63	<u>51</u> 23	<u>67</u> 26	<u>30</u> 9
BC(3)	<u>4.4</u> 39	<u>1.5</u> 100	<u>2.9</u> 8	<u>10</u> 37	<u>1.3</u> 19	<u>7</u> 62	<u>4.0</u> 10	<u>12</u> 21	<u>14</u> 15	<u>14</u> 21	<u>10</u> 43	<u>16</u> 11	<u>16</u> 25	<u>30.4</u> 20	<u>40</u> 23	<u>67</u> 15	<u>50</u> 13	<u>83</u> 22	<u>32</u> 4
Cca(2)	<u>3.0</u> 7	<u>2.2</u> 100	<u>1.6</u> 77	<u>6</u> 138	<u>1.3</u> 21	<u>23</u> 96	<u>0.05</u> 15	<u>15</u> 22	<u>7</u> 12	<u>11</u> 6	<u>6</u> 26	<u>13</u> 28	<u>11</u> 6	<u>26.8</u> 34	<u>43</u> 23	<u>59</u> 21	<u>39</u> 24	<u>67</u> 37	<u>39</u> 61
ИЮНЬ, 2017																			
Oa(2)	<u>0.1</u> 11	<u>2.1</u> 52	<u>2.2</u> 44	<u>6.2</u> 6	<u>7</u> 7	<u>43</u> 6	<u>31</u> 17	<u>4.1</u> 32	<u>7</u> 8	<u>31</u> 7	<u>52</u> 0	<u>95</u> 7	<u>69</u> 2	<u>44</u> 77	<u>15</u> 45	<u>100</u> 0	<u>89</u> 15	<u>100</u> 0	<u>100</u> 0
ao(3)	<u>0.7</u> 100	<u>4.0</u> 63	<u>2.7</u> 105	<u>23.9</u> 100	<u>3.0</u> 60	<u>22</u> 53	<u>34</u> 60	<u>11</u> 96	<u>7</u> 50	<u>28</u> 72	<u>68</u> 42	<u>61</u> 28	<u>66</u> 24	<u>39</u> 45	<u>35</u> 101	<u>100</u> 0	<u>45</u> 61	<u>63</u> 78	<u>100</u> 0
AYEL(3)	<u>0.1</u> 20	<u>3.8</u> 100	<u>1.3</u> 100	<u>7.3</u> 48	<u>0.7</u> 11	<u>3.8</u> 15	<u>20</u> 27	<u>9</u> 44	<u>6</u> 16	<u>5</u> 52	<u>34</u> 50	<u>21</u> 33	<u>28</u> 9	<u>19</u> 10	<u>13</u> 43	<u>70</u> 2	<u>18</u> 69	<u>58</u> 62	<u>69</u> 23
EL(5)	<u>0.2</u> 49	<u>2.0</u> 43	<u>1</u> 75	<u>4.6</u> 48	<u>1.2</u> 29	<u>3.4</u> 18	<u>20</u> 80	<u>10</u> 20	<u>9</u> 19	<u>1.5</u> 32	<u>34</u> 34	<u>11</u> 20	<u>13</u> 20	<u>6</u> 16	<u>12</u> 18	<u>32</u> 35	<u>22</u> 68	<u>34</u> 21	<u>33</u> 15
BEL(4)	<u>0.5</u> 51	<u>1.2</u> 16	<u>2.2</u> 86	<u>10.5</u> 98	<u>1.4</u> 37	<u>4.1</u> 18	<u>10</u> 60	<u>13</u> 28	<u>10</u> 11	<u>1.7</u> 15	<u>32</u> 16	<u>13</u> 13	<u>22</u> 41	<u>11</u> 44	<u>28</u> 39	<u>32</u> 31	<u>35</u> 28	<u>35</u> 20	<u>33</u> 19
BT(5)	<u>0.9</u> 22	<u>0.8</u> 49	<u>2.9</u> 21	<u>9.0</u> 38	<u>1.1</u> 37	<u>5</u> 13	<u>8</u> 44	<u>12</u> 20	<u>8</u> 28	<u>1.5</u> 44	<u>25</u> 40	<u>15</u> 31	<u>22</u> 39	<u>26</u> 63	<u>40</u> 20	<u>59</u> 30	<u>49</u> 20	<u>60</u> 42	<u>39</u> 14
BC(5)	<u>1.4</u> 19	<u>1.6</u> 78	<u>2.6</u> 33	<u>9.4</u> 51	<u>1.1</u> 8	<u>15</u> 101	<u>6</u> 23	<u>15</u> 32	<u>9</u> 30	<u>1.3</u> 29	<u>16</u> 35	<u>20</u> 29	<u>20</u> 17	<u>41</u> 17	<u>48</u> 15	<u>76</u> 20	<u>55</u> 7	<u>72</u> 19	<u>39</u> 37
Cca(4)	<u>2.2</u> 78	<u>0.8</u> 33	<u>2.0</u> 47	<u>5.9</u> 77	<u>2.5</u> 137	<u>26</u> 58	<u>6</u> 46	<u>19</u> 14	<u>8</u> 85	<u>1.9</u> 101	<u>23</u> 120	<u>14</u> 9	<u>19</u> 33	<u>38</u> 29	<u>55</u> 55	<u>55</u> 60	<u>61</u> 45	<u>73</u> 25	<u>29</u> 27
НОЯБРЬ, 2017																			
Oa(2)	<u>0.5</u> 104	<u>0.5</u> 28	<u>5</u> 47	<u>1.0</u> 26	<u>10</u> 113	<u>28</u> 66	<u>14</u> 12	<u>8</u> 37	<u>12</u> 59	<u>62</u> 23	<u>23</u> 36	<u>77</u> 33	<u>43</u> 8	<u>72</u> 56	<u>37</u> 102	<u>100</u> 0	<u>97</u> 4	<u>69</u> 65	<u>100</u> 0
ao(3)	<u>0.3</u> 69	<u>1.1</u> 38	<u>4.2</u> 19	<u>1.0</u> 23	<u>3.1</u> 79	<u>19</u> 104	<u>9</u> 74	<u>14</u> 33	<u>10</u> 11	<u>51</u> 41	<u>32</u> 60	<u>68</u> 49	<u>48</u> 40	<u>45</u> 50	<u>32</u> 79	<u>98</u> 3	<u>61</u> 54	<u>42</u> 28	<u>98</u> 3
AYEL(3)	<u>0.4</u> 82	<u>1.2</u> 31	<u>3.7</u> 22	<u>1.2</u> 16	<u>1.6</u> 57	<u>3.0</u> 67	<u>5</u> 38	<u>14</u> 43	<u>11</u> 12	<u>10</u> 137	<u>13</u> 20	<u>16</u> 28	<u>21</u> 14	<u>21</u> 72	<u>17</u> 29	<u>57</u> 61	<u>35</u> 55	<u>21</u> 51	<u>62</u> 51
EL(5)	<u>0.5</u> 105	<u>2.2</u> 25	<u>3.7</u> 16	<u>2.1</u> 21	<u>1.6</u> 37	<u>2.4</u> 68	<u>13</u> 85	<u>11</u> 52	<u>11</u> 14	<u>2.5</u> 22	<u>11</u> 53	<u>13</u> 31	<u>21</u> 46	<u>12</u> 23	<u>20</u> 57	<u>26</u> 86	<u>30</u> 78	<u>31</u> 74	<u>30</u> 25
BEL(3)	<u>1.3</u> 26	<u>2.2</u> 3	<u>4.2</u> 19	<u>2.3</u> 37	<u>1.7</u> 34	<u>4.6</u> 2	<u>4.7</u> 12	<u>15</u> 27	<u>13</u> 15	<u>2.3</u> 21	<u>10</u> 33	<u>21</u> 7	<u>31</u> 15	<u>36</u> 30	<u>34</u> 9	<u>46</u> 90	<u>62</u> 20	<u>42</u> 11	<u>35</u> 14
BT(4)	<u>1.6</u> 45	<u>1.5</u> 19	<u>3.9</u> 36	<u>13.2</u> 175	<u>1.7</u> 22	<u>7</u> 27	<u>4.6</u> 28	<u>18</u> 47	<u>11</u> 19	<u>5</u> 129	<u>7</u> 32	<u>14</u> 59	<u>21</u> 47	<u>27</u> 12	<u>38</u> 15	<u>53</u> 41	<u>40</u> 71	<u>41</u> 21	<u>44</u> 21
BC(5)	<u>1.8</u> 33	<u>1.5</u> 26	<u>3.8</u> 10	<u>3.5</u> 122	<u>1.5</u> 16	<u>21</u> 83	<u>4.6</u> 24	<u>15</u> 28	<u>10</u> 24	<u>3.7</u> 100	<u>5.0</u> 33	<u>20</u> 13	<u>23</u> 26	<u>47</u> 46	<u>38</u> 15	<u>62</u> 53	<u>63</u> 11	<u>49</u> 13	<u>33</u> 17
Cca(4)	<u>1.9</u> 41	<u>1.6</u> 11	<u>3.5</u> 18	<u>2.3</u> 102	<u>1.3</u> 29	<u>41</u> 85	<u>5</u> 23	<u>21</u> 48	<u>8</u> 25	<u>3.1</u> 97	<u>3.5</u> 21	<u>19</u> 11	<u>21</u> 27	<u>36</u> 21	<u>39</u> 12	<u>61</u> 67	<u>71</u> 29	<u>59</u> 39	<u>36</u> 22
МАЙ, 2018																			
Oa(2)	<u>0.1</u> 13	<u>1.3</u> 28	<u>1</u> 21	<u>2.1</u> 25	<u>2.9</u> 58	<u>12</u> 52	<u>92</u> 12	<u>8</u> 24	<u>13</u> 1	<u>90</u> 16	<u>22</u> 3	<u>66</u> 6	<u>32</u> 3	<u>53</u> 34	<u>26</u> 67	<u>100</u> 0	<u>100</u> 0	<u>86</u> 9	<u>100</u> 0
ao(3)	<u>0.6</u> 125	<u>0.5</u> 30	<u>1</u> 48	<u>0.8</u> 14	<u>6</u> 129	<u>26</u> 141	<u>2.3</u> 88	<u>25</u> 65	<u>9</u> 64	<u>44</u> 61	<u>33</u> 101	<u>51</u> 58	<u>38</u> 30	<u>51</u> 84	<u>49</u> 94	<u>80</u> 30	<u>74</u> 52	<u>62</u> 58	<u>76</u> 56
AYEL(4)	<u>0.1</u> 26	<u>1.3</u> 28	<u>1</u> 8	<u>1.1</u> 31	<u>1.6</u> 40	<u>1.9</u> 34	<u>1.9</u> 96	<u>9</u> 47	<u>14</u> 8	<u>20</u> 47	<u>9</u> 71	<u>16</u> 57	<u>27</u> 51	<u>14</u> 39	<u>12</u> 43	<u>55</u> 43	<u>35</u> 99	<u>29</u> 73	<u>60</u> 48
EL(5)	<u>0.2</u> 95	<u>1.5</u> 24	<u>1</u> 16	<u>1.3</u> 28	<u>1.4</u> 44	<u>1.5</u> 51	<u>1.4</u> 119	<u>9</u> 51	<u>15</u> 10	<u>12</u> 17	<u>8</u> 58	<u>11</u> 40	<u>20</u> 11	<u>11</u> 67	<u>12</u> 66	<u>22</u> 68	<u>33</u> 121	<u>17</u> 57	<u>33</u> 34
BEL(4)	<u>0.8</u> 22	<u>1.3</u> 14	<u>1</u> 19	<u>1.5</u> 13	<u>1.5</u> 28	<u>2.7</u> 38	<u>0.4</u> 13	<u>13</u> 33	<u>11</u> 64	<u>11</u> 12	<u>9</u> 31	<u>15</u> 29	<u>25</u> 37	<u>23</u> 49	<u>26</u> 30	<u>23</u> 66	<u>40</u> 49	<u>26</u> 49	<u>33</u> 25
BT(4)	<u>1.5</u> 33	<u>1.2</u> 20	<u>1</u> 11	<u>1.7</u> 26	<u>1.2</u> 10	<u>5</u> 27	<u>0.6</u> 14	<u>17</u> 16	<u>15</u> 21	<u>12</u> 13	<u>8</u> 33	<u>18</u> 30	<u>27</u> 28	<u>28</u> 44	<u>43</u> 8	<u>44</u> 67	<u>43</u> 16	<u>36</u> 22	<u>43</u> 10
BC(5)	<u>1.7</u> 31	<u>0.96</u> 51	<u>1.0</u> 113	<u>2.2</u> 120	<u>1.3</u> 10	<u>15</u> 83	<u>1.02</u> 65	<u>18</u> 22	<u>9</u> 54	<u>8</u> 37	<u>4.9</u> 38	<u>17</u> 9	<u>23</u> 14	<u>46.0</u> 23	<u>42</u> 23	<u>58</u> 58	<u>53</u> 18	<u>52</u> 21	<u>36</u> 46
Cca(4)	<u>1.7</u> 25	<u>1.2</u> 7	<u>0.6</u> 15	<u>1.0</u> 42	<u>1.0</u> 25	<u>35</u> 63	<u>0.7</u> 27	<u>20</u> 15	<u>6</u> 61	<u>6</u> 62	<u>3.0</u> 36	<u>14</u> 33	<u>17</u> 28	<u>31.3</u> 25	<u>40</u> 17	<u>67</u> 18	<u>48</u> 27	<u>45</u> 15	<u>40</u> 15

Примечание. В числителе – среднее по всем ландшафтам, в знаменателе – коэффициент вариации. В скобках – число проб для осреднения. Цвет обозначает потенциальную подвижность (%): красный &lt;1, оранжевый 1–5, желтый 5–20, синий 20–50 и темно-синий &gt; 50.

**Среднеподвижные** Bi, Cr, U, As и Sr, и U характеризуются относительно равномерным распределением потенциальной подвижности в профилях почв катены. В верхней части профиля среди непрочно связанных преобладает F1 форма соединений As, Rb и Sr. К нижележащим минеральным горизонтам их потенциальная подвижность, за исключением Sr, снижается.

Изменчивость потенциальной подвижности этой группы элементов проявляется в увеличении доли подвижных форм соединений Cr в средней части профиля почв в сентябре, вероятно, благодаря миграции комплексных соединений элемента с растворённым органическим веществом (рисунок 6.1, приложение Д.1). Потенциальная подвижность U в ноябре и мае возрастает в породе. У As наибольшая потенциальная подвижность в гумусовых горизонтах отмечается в сентябре, июне и мае. Высокая потенциальная подвижность Sr в гумусовых горизонтах и породе сохраняется вне зависимости от сезона опробования.

**Слабоподвижными элементами** в почвах катены являются Rb, Mo, W и Sb. При этом, потенциальная подвижность Mo и Rb из-за их биогенной аккумуляции (см. таблицу 4.5, Перельман, Касимов, 1999) незначительно возрастает в гумусовом и иллювиальном горизонтах почв, а Sb характеризуется равномерным распределением по всему профилю. Увеличение потенциальной подвижности Mo в гумусовом горизонте почв в июне, вероятно, обусловлено поступлением с растительными остатками, богатыми этим элементом (таблица 4.5) и не полным его извлечением растениями и наличием высокой доли F1 форм элемента (рисунок 6.1).

**Минимальную потенциальную подвижность** в текстурно-дифференцированных почвах катены с незначительным увеличением с глубиной (до 2,2%) имеет Zr. Сезонная изменчивость распределения проявляется в незначительном увеличении потенциальной подвижности в верхней части почв в сентябре и снижении – в мае.

Пространственная вариабельность потенциальной подвижности Cr, Cu, Fe и Zn в горизонтах ао и ВТ менее 30% (приложение Д.1). Высокая ( $C_v > 50\%$ ) вариабельность потенциальной подвижности свойственна Rb, Sb, W, Zr в горизонтах ао и Т; La – в горизонте ао; As, Mn, Mo и Ti – в горизонте Т. Высокая пространственная неоднородность значений потенциальной подвижности в горизонте ао и Т объясняется значительным вкладом непрочно связанных (F1, F2, F3) соединений. В горизонте ВТ изменчивость значений потенциальной подвижности снижается, не превышая 30% у Co, Cr, Cu, Fe, La, Pb, Rb, Sb, Sr, U, Zn и Zr. Высокие и средние значения  $C_v$  имеет только потенциальная подвижность Ti и As ( $C_v < 100\%$ ), Mo, Ni, Bi и Cd ( $< 70\%$ ). Снижение  $C_v$  значений потенциальной подвижности в горизонте ВТ обусловлено преобладанием прочно связанных соединений.

### 6.3 *Потенциальная подвижность химических элементов*

Латеральное распределение потенциальной подвижности наиболее контрастно в гумусовых горизонтах изученных текстурно-дифференцированных почв. **Максимально подвижные** Pb, Mn, Co и Cd накапливаются в гумусовых горизонтах почв верхних звеньев катены (таблица 6.2). Сезонная изменчивость характеризуется снижением потенциальной подвижности Co и Mn в торфяном горизонте нижней части склона в июне. В средней части профиля в июне контрастно снижается потенциальная подвижность Co, а в мае – Mn.

**Сильноподвижные** в органогенных горизонтах почв La, Ni, Cu, Zn, Fe характеризуются контрастной сезонной изменчивостью. La и Ni сильноподвижны в автономной и трансэлювиальной позиции с большим участием органоминеральных комплексов. Эта закономерность для подвижных соединений Ni отмечена и в других работах (Kabata-Pendias, 2015). Увеличение доли подвижных форм La в горизонте T почв заболоченного днища ложбины объясняется высокой способностью торфа удерживать соединения элемента (Stern et al., 2007). В сентябре прослеживается обеднение гумусовых горизонтов автономного ландшафта подвижными формами La.

Потенциальная подвижность Cu в июне возрастает в автономном ландшафте. Потенциальная подвижность Zn в верхней части склона снижается в сентябре и возрастает в ноябре. Снижение потенциальной подвижности в верхних звеньях катены в начале осени обусловлено поглощением легкодоступных соединений Zn растениями в период активной вегетации, а увеличение после листопада – возвращением их на поверхность с растительным опадом (Енчилик и др., 2020). Потенциальная подвижность Fe в ноябре и мае снижается в склоновых ландшафтах катены. Вi подвижен в гумусовом горизонте автономного и подчинённого ландшафтов за счёт сорбции Fe-Mn конкрециями в автономном ландшафте и накопления растворенного органического вещества в почвах нижней части склона (Kabata-Pendias, 2015). Потенциальная подвижность Вi в сентябре и ноябре характеризуется относительно равномерным распределением в гумусовых горизонтах. В июне наблюдается обеднение элементом гумусового горизонта почв склона и потяжины, в мае – вынос из перегнойного горизонта нижней части склона.

**Средняя потенциальная подвижность** характерна для Вi, Cr, U, As и Sr (таблица 6.2). Латеральное распределение потенциальной подвижности Cr и U сохраняется вне зависимости от сезона. Потенциальная подвижность As снижается в подчиненных ландшафтах катены. Для соединений As в сентябре, июне и ноябре наблюдается монотонное латеральное распределение в гумусовых горизонтах ландшафтов катены, а в мае элемент накапливается в ландшафтах верхних звеньев катены. Потенциальная подвижность Sr в автономном ландшафте катены снижается в сентябре и увеличивается в июне и ноябре.

Для *слабоподвижных* в ландшафтах катены Rb, Mo, W и Sb характерна контрастная сезонная изменчивость. В автономном ландшафте потенциальная подвижность Rb в сентябре снижается за счет поглощения его соединений растениями, а в ноябре – увеличивается после возвращения на поверхность почв с опадом, что отражает участие элемента в биологическом круговороте. Потенциальная подвижность Mo в ландшафтах катены контрастно возрастает в июне в торфе заболоченной потяжины, благодаря интенсивному поглощению элемента сфагнумом (табл. 4.4). В мае и ноябре потенциальная подвижность элемента контрастно снижается. В июне у W и Sb минимальна потенциальная подвижность в торфяном горизонте заболоченной позиции и максимальна в склоновых почвах. В сентябре и мае потенциальная подвижность W в подчиненных позициях возрастает.

Латеральная дифференциация *минимально подвижного* в почвах катены Zr характеризуется слабой сезонной изменчивостью. Минимальна потенциальная подвижность за все сезоны опробования наблюдается в июне в торфяном горизонте заболоченного ландшафта и максимальна в склоновых почвах.

Таблица 6.2

Потенциальная подвижность элементов в горизонтах текстурно-дифференцированных почв катены Центрально-Лесного заповедника, %

	СЕНТЯБРЬ					ИЮНЬ					НОЯБРЬ					МАЙ				
	A	TЭ	TЭA1*	TЭA2*		A	TЭ	TЭA1*	TЭA2*		A	TЭ	TЭA1*	TЭA2*		A	TЭ	TЭA1*	TЭA2*	
<b>Zr</b>	ao/H/T*	0,3	0,3	0,6	3	ao*	0,1	0,1	2	0,1	ao*	0,9	0,1	0,2	1	ao*	0,1	0,1	0,2	2
	AYEL	0,8	0,8	0,1	0,2	AYEL	-	0,1	0,1	0,1	AYEL	0,8	0,3	0,1	-	AYEL	0,1	0,2	0,2	0,1
	BEL	3	3	-	2	EL	0,3	0,3	0,1	0,1	EL	1	1	0,1	0,2	EL	0,1	0,2	1	0,1
	BT	3	3	2	3	BT	1	0,9	0,8	0,7	BT	2	2	0,8	1	BEL	0,8	0,6	-	0,9
	BC	5	6	-	2	BC	1	2	1	1	BC	1	3	2	1	BC	2	2	1	1
Cca	3	-	-	3	Cca	1	1	-	1	Cca	2	3	-	1	Cca	2	-	-	1	
<b>Sb</b>	ao/H/T*	9	6	7	0,5	ao*	3	6	5	1	ao*	0,4	0,6	1	0,6	ao*	2	1	0,4	0,4
	AYEL	3	7	1	1	AYEL	-	10	1	0,9	AYEL	0,9	1	2	-	AYEL	0,9	1	2	2
	BEL	0,3	0,3	-	2	EL	3	3	1	2	EL	2	2	2	2	EL	1	1	1	2
	BT	0,3	0,2	1	4	BT	0,2	0,7	1	1	BT	2	1	2	2	BEL	1	1	-	2
	BC	0,2	0,3	-	4	BC	0,9	4	1	1	BC	1	1	2	2	BC	1	1	1	2
Cca	0,2	-	-	4	Cca	1	1	-	0,9	Cca	2	1	-	2	Cca	1	-	-	1	
<b>W</b>	ao/H/T*	3	2	7	13	ao*	3	2	6	0,4	ao*	6	3	4	5	ao*	0,7	0,5	0,5	1
	AYEL	0,9	0,5	0,3	2	AYEL	-	0,7	0,3	3	AYEL	4	4	3	-	AYEL	0,6	0,5	0,6	0,6
	BEL	3	2	-	3	EL	1	1	0,3	0,4	EL	4	3	3	4	EL	0,4	0,5	0,6	0,6
	BT	3	3	3	2	BT	3	2	3	3	BT	4	3	3	6	BEL	0,4	0,7	-	0,7
	BC	3	3	-	3	BC	1	2	4	3	BC	4	4	3	3	BC	0,6	0,5	0,5	0,6
Cca	0,7	-	-	2	Cca	1	2	-	2	Cca	4	4	-	3	Cca	0,5	-	-	0,6	
<b>Mo</b>	ao/H/T*	7	11	10	14	ao*	7	8	8	56	ao/H/T*	1	0,8	1	0,8	ao/H/T*	3	2	0,8	1,0
	AYEL	5	5	0,3	12	AYEL	-	7	4	11	AYEL	1	1	1	-	AYEL	0,8	0,9	2	1
	BEL	4	3	-	5	EL	3	6	2	7	BEL	1	2	2	2	BEL	1	1	1	1
	BT	8	4	10	9	BT	9	7	10	14	BT	2	2	2	48	BT	1	2	-	1
	BC	6	10	-	13	BC	2	15	12	9	BC	2	1	2	11	BC	2	1	2	2
Cca	0,1	-	-	12	Cca	1	4	-	12	Cca	2	0,6	-	1	Cca	0,6	-	-	1	
<b>Rb</b>	ao/H/T*	1	0,8	3	67	ao/H/T*	7	1,0	5	4	ao/H/T*	18	2	1	6	ao/H/T*	4	2	1	14
	AYEL	1	2	0,8	1,0	AYEL	-	0,7	0,8	0,7	AYEL	2	2	0,6	-	AYEL	2	2	1	0,9
	BEL	2	2	-	2	BEL	1	2	1	1	BEL	2	2	1	1	BEL	2	2	1	1
	BT	1	1	1	1	BT	1	0,8	0,8	1,0	BT	1	2	2	1	BT	2	1,0	-	1
	BC	1	1	-	2	BC	1,0	1,0	1	1	BC	1	2	1	2	BC	1	1	1	1
Cca	1	-	-	1	Cca	0,7	1,0	-	0,7	Cca	1	2	-	1	Cca	0,7	-	-	1	
<b>Sr</b>	ao/H/T*	4	4	21	100	ao/H/T*	41	10	33	23	ao/H/T*	40	15	12	41	ao/H/T*	17	8	7	68
	AYEL	0,8	1	1	3	AYEL	-	3	4	4	AYEL	2	2	5	-	AYEL	2	1	3	1
	BEL	3	4	-	4	BEL	3	4	3	3	BEL	3	5	1	1	BEL	1	1	3	1
	BT	2	6	5	4	BT	6	6	6	4	BT	7	8	9	5	BT	3	1	-	3
	BC	11	5	-	4	BC	42	7	7	7	BC	42	13	38	6	BC	5	6	6	3
Cca	39	-	-	7	Cca	48	22	-	18	Cca	47	86	-	25	Cca	64	-	-	19	
<b>As</b>	ao/H/T*	23	12	57	48	ao/H/T*	35	24	57	21	ao/H/T*	13	15	16	7	ao/H/T*	100	84	2	5
	AYEL	9	8	23	26	AYEL	-	15	21	25	AYEL	4	4	8	-	AYEL	0,7	0,7	2	5
	BEL	11	2	-	4	BEL	8	4	27	43	BEL	4	3	29	21	BEL	0,6	0,8	0,4	0,9
	BT	8	0,05	3	5	BT	7	2	11	9	BT	6	3	4	5	BT	0,5	0,4	-	0,4
	BC	4	4	-	4	BC	6	5	8	5	BC	3	5	4	5	BC	0,5	0,6	0,7	0,7
Cca	0,1	-	-	0,04	Cca	5	9	-	3	Cca	7	5	-	4	Cca	0,8	-	-	0,4	
<b>U</b>	ao/H/T*	6	6	17	43	ao/H/T*	5	4	24	6	ao/H/T*	6	10	13	19	ao/H/T*	7	10	25	41
	AYEL	5	9	9	10	AYEL	-	5	12	10	AYEL	21	10	11	-	AYEL	9	8	15	5
	BEL	14	16	-	21	BEL	7	9	11	10	BEL	20	12	9	9	BEL	5	8	16	7
	BT	14	15	9	12	BT	14	10	11	10	BT	18	13	30	11	BT	12	9	-	19
	BC	14	14	-	10	BC	23	14	12	12	BC	20	18	9	12	BC	18	17	13	19
Cca	17	-	-	12	Cca	22	18	-	15	Cca	21	36	-	19	Cca	21	-	-	21	
<b>Cr</b>	ao/H/T*	17	11	19	14	ao/H/T*	8	5	12	6	ao/H/T*	17	7	9	11	ao/H/T*	13	13	12	3
	AYEL	21	23	20	19	AYEL	-	7	7	5	AYEL	11	13	11	-	AYEL	14	15	15	13
	BEL	16	16	-	15	BEL	12	8	9	8	BEL	13	10	12	13	BEL	15	16	13	17
	BT	16	12	16	18	BT	6	6	11	10	BT	10	9	14	13	BT	13	13	-	19
	BC	11	14	-	15	BC	5	8	12	11	BC	7	7	12	11	BC	12	14	16	19
Cca	7	-	-	6	Cca	4	5	-	4	Cca	7	8	-	6	Cca	7	-	-	10	
<b>Bi</b>	ao/H/T*	28	27	94	91	ao/H/T*	32	19	51	15	ao/H/T*	72	52	66	59	ao/H/T*	100	79	18	71
	AYEL	10	24	11	25	AYEL	-	9	3	5	AYEL	2	25	2	-	AYEL	34	14	17	16
	BEL	19	12	-	16	BEL	2	2	1	0,9	BEL	2	2	3	3	BEL	16	11	11	12
	BT	19	11	15	19	BT	1	0,7	2	1	BT	2	2	2	15	BT	11	9	-	11
	BC	11	13	-	17	BC	0,7	1	2	1	BC	2	2	3	10	BC	14	10	12	11
Cca	12	-	-	11	Cca	0,7	1,0	-	1	Cca	8	1	-	2	Cca	6	-	-	10	
<b>Fe</b>	ao/H/T*	31	22	100	100	ao/H/T*	52	58	100	45	ao/H/T*	28	17	27	53	ao/H/T*	22	21	10	70
	AYEL	17	22	5	9	AYEL	-	50	16	36	AYEL	13	15	10	-	AYEL	16	12	7	1
	BEL	17	13	-	23	BEL	43	43	16	28	BEL	13	8	6	21	BEL	13	12	8	2
	BT	12	7	13	18	BT	18	11	35	28	BT	6	5	9	10	BT	9	7	-	13
	BC	7	8	-	15	BC	8	15	19	24	BC	3	4	7	5	BC	8	6	7	12
Cca	5	-	-	7	Cca	7	12	-	9	Cca	3	3	-	3	Cca	2	-	-	5	

<b>Zn</b>	ao/H/T*	22	19	52	62	ao/H/T*	91	63	43	77	ao/H/T*	59	95	72	100	ao/H/T*	69	64	38	84
	AYEL	10	11	4	10	AYEL	-	29	20	15	AYEL	13	21	14	-	AYEL	26	16	18	4
	BEL	8	14	-	15	BEL	13	14	11	8	BEL	15	18	10	12	BEL	16	12	13	4
	BT	10	12	21	19	BT	15	9	22	19	BT	23	3	15	17	BT	16	9	-	14
	BC	14	15	-	18	BC	14	19	29	17	BC	23	19	18	19	BC	14	19	25	13
Cca	11	-	-	16	Cca	16	13	-	14	Cca	18	22	-	18	Cca	7	-	-	17	
<b>Cu</b>	ao/H/T*	37	24	100	98	ao/H/T*	68	48	70	79	ao/H/T*	41	46	26	62	ao/H/T*	31	33	30	51
	AYEL	12	20	4	21	AYEL	-	29	30	25	AYEL	20	18	24	-	AYEL	45	19	31	14
	BEL	15	21	-	23	BEL	12	17	11	16	BEL	31	30	12	19	BEL	21	19	23	20
	BT	14	10	22	23	BT	16	15	34	28	BT	20	8	26	30	BT	21	17	-	38
	BC	15	12	-	20	BC	16	19	23	23	BC	18	20	34	23	BC	20	22	31	37
Cca	11	-	-	12	Cca	17	17	-	13	Cca	21	29	-	15	Cca	11	-	-	20	
<b>Ni</b>	ao/H/T*	21	22	78	100	ao/H/T*	69	29	59	28	ao/H/T*	100	43	53	62	ao/H/T*	65	40	31	100
	AYEL	6	9	2	19	AYEL	-	21	19	18	AYEL	10	14	37	-	AYEL	20	14	17	7
	BEL	7	9	-	9	BEL	7	6	5	5	BEL	12	15	14	11	BEL	20	16	13	5
	BT	9	24	29	13	BT	12	22	44	42	BT	25	31	28	24	BT	12	28	-	15
	BC	29	37	-	25	BC	43	42	40	30	BC	34	46	84	32	BC	18	43	34	18
Cca	20	-	-	33	Cca	28	38	-	32	Cca	40	42	-	36	Cca	20	-	-	38	
<b>La</b>	ao/H/T*	13	8	38	100	ao/H/T*	20	8	75	22	ao/H/T*	64	10	22	60	ao/H/T*	39	14	33	100
	AYEL	10	12	7	16	AYEL	-	6	17	14	AYEL	23	13	16	-	AYEL	15	10	18	6
	BEL	28	34	-	25	BEL	11	14	9	10	BEL	26	27	33	9	BEL	10	10	27	7
	BT	31	45	40	32	BT	43	43	49	36	BT	44	40	37	30	BT	23	17	-	33
	BC	42	49	-	30	BC	42	47	49	42	BC	35	43	32	34	BC	44	45	38	46
Cca	36	-	-	50	Cca	37	43	-	39	Cca	38	45	-	33	Cca	35	-	-	50	
<b>Cd</b>	ao/H/T*	63	53	100	100	ao/H/T*	100	100	100	100	ao/H/T*	100	100	100	100	ao/H/T*	100	100	53	100
	AYEL	19	39	13	23	AYEL	-	71	69	69	AYEL	25	53	93	-	AYEL	85	62	43	31
	BEL	17	13	-	19	BEL	43	44	20	28	BEL	2	51	5	44	BEL	42	29	16	23
	BT	15	36	59	19	BT	49	55	75	79	BT	84	48	47	33	BT	28	1	-	28
	BC	79	64	-	59	BC	62	87	69	64	BC	70	79	80	4	BC	39	85	39	14
Cca	50	-	-	68	Cca	61	75	-	77	Cca	77	100	-	64	Cca	77	-	-	75	
<b>Co</b>	ao/H/T*	100	42	100	100	ao/H/T*	79	67	52	14	ao/H/T*	94	100	31	56	ao/H/T*	100	100	30	94
	AYEL	46	36	4	9	AYEL	-	32	12	9	AYEL	46	47	13	-	AYEL	49	78	13	2
	BEL	23	48	-	36	BEL	35	36	6	7	BEL	27	66	4	-	BEL	26	34	100	1
	BT	57	56	58	33	BT	45	45	67	45	BT	51	69	1	40	BT	22	28	-	65
	BC	54	55	-	43	BC	54	60	54	50	BC	50	67	68	66	BC	39	53	41	39
Cca	32	-	-	45	Cca	36	59	-	50	Cca	67	100	-	52	Cca	30	-	-	59	
<b>Mn</b>	ao/H/T*	100	53	26	73	ao/H/T*	100	100	81	8	ao/H/T*	37	100	38	32	ao/H/T*	80	91	30	55
	AYEL	39	26	11	24	AYEL	-	100	37	38	AYEL	23	31	9	-	AYEL	42	52	15	7
	BEL	25	36	-	39	BEL	27	37	26	39	BEL	15	39	6	65	BEL	25	28	14	8
	BT	70	71	85	44	BT	46	49	69	100	BT	44	41	49	29	BT	14	16	-	34
	BC	100	87	-	63	BC	72	76	65	55	BC	46	53	59	45	BC	30	47	34	32
Cca	50	-	-	85	Cca	59	71	-	65	Cca	60	92	-	46	Cca	40	-	-	55	
<b>Pb</b>	ao/H/T*	100	73	100	100	ao/H/T*	100	100	100	100	ao/H/T*	100	100	100	100	ao/H/T*	100	100	27	100
	AYEL	22	36	20	69	AYEL	-	87	58	62	AYEL	34	55	96	-	AYEL	100	61	42	36
	BEL	28	35	-	32	BEL	39	38	28	29	BEL	36	39	26	27	BEL	49	40	30	27
	BT	30	34	28	28	BT	42	44	35	31	BT	54	42	46	32	BT	31	22	-	42
	BC	31	33	-	32	BC	22	62	32	42	BC	31	38	25	40	BC	44	48	38	40
Cca	22	-	-	56	Cca	36	34	-	29	Cca	24	42	-	39	Cca	33	-	-	48	

Примечание. \*Н-горизонт для ТЭА1 и Т-горизонт для ТАС2. Цвет обозначает потенциальную подвижность (%): красный <1, оранжевый 1–5, желтый 5–20, голубой 20–50 и синий > 50. Прочерк – расчет не проводили, так как валовое содержание элемента ниже предела обнаружения.

#### 6.4 Биодоступность химических элементов

Суммарная доля обменных (F1) и комплексных (F2) форм соединений от валового содержания определяет биодоступность химических элементов. Этот показатель связан с участием элементов в биологическом круговороте – пулом доступных для растений веществ почв и комплексов, образованных в том числе и в результате разложения органического вещества. В почвах концентрация этих соединений невысока и обладает высокой вариабельностью (глава 4), что обуславливает контрастную пространственную и временную дифференциацию биодоступности элементов (таблица 6.3). Однако общие закономерности распределения подвижности групп элементов сохраняются. Поэтому в этом разделе описаны отличия распределения биодоступности и потенциальной подвижности, а также ее связи со свойствами почв (приложение Д.1).

Биодоступность *сильноподвижных* Mn, Co, Cd, Pb понижена в элювиальном горизонте (таблица 6.3). Наиболее ярко элювиальный процесс проявляется в ландшафтах верхних звеньев катены. В верхней части профиля почв в ноябре у Mn и Cd максимальна биодоступность, вероятно, благодаря преобразованию свежих листовых остатков.

У La в гумусовом горизонте биодоступность значительно ниже потенциальной и увеличивается с глубиной, благодаря миграции с илистыми частицами (приложение Д.1). Ni подвижен в верхней части профиля за счёт распределения Сорг и в нижней – сорбции илистой фракцией (приложение Д.1).

*Подвижные* в органогенных горизонтах почв Cu, Zn, Fe характеризуются контрастным снижением биодоступности с глубиной, что в наибольшей степени проявляется у Fe. Для всех этих элементов характерна пряма корреляция с содержанием Сорг (приложение Д.1).

*Средняя биодоступность* характерна для Bi, U, As, Sr и Mo (таблица 6.2). У As она увеличивается в верхней части профиля за счёт образования и накопления комплексов с Сорг при разложении растительных остатков (приложение Д.1), а у Sr – в нижней за счёт сорбции илистой и пылевой фракциями (приложение Д.1). U и Mo равномерно подвижны по всему профилю. Распределение биодоступности U связано с дифференциацией илистой и пылевой гранулометрических фракций (приложение Д.1).

Для *слабоподвижных* в почвах катены Rb, Cs и W характерно снижение биодоступности с глубиной и её связь с распределением Сорг (приложение Д.1). Увеличение биодоступности *минимально подвижного* Zr с глубиной и снижение в верхней части профиля обусловлено миграцией элемента с илистой фракцией (приложение Д.1).

Таблица 6.3

Биодоступность элементов в горизонтах текстурно-дифференцированных почв катены  
Центрально-Лесного заповедника, %

	СЕНТЯБРЬ 2016				ИЮНЬ 2017				НОЯБРЬ 2017				МАЙ 2018				
	A	TЭ	TЭА		A	TЭ	TЭА		A	TЭ	TЭА		A	TЭ	TЭА		
Zr	A	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,05	0,1	0,1	0,8	0,1	0,2	-	0,1	0,1	0,1	0,1
	EL	0,4	1	0,9	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,1
	B	2	3	2	2	1	0,8	1	0,6	1	2	0,6	1	1	2	0,8	1
	C	2	5	-	3	0,8	1	-	0,9	1	3	1	1	1	0,8	2	1
Rb	A	0,8	4	0,7	0,9	4	7	0,7	0,5	18	2	1	-	3	1	0,4	0,6
	EL	1	1	1,0	2	1	2	0,9	1	2	2	0,6	0,7	2	1	0,9	0,7
	B	1	1	1	1	1	0,8	0,8	1,0	1	2	1	1	1	0,9	0,8	1
	C	1	1	-	1	0,6	1,0	-	0,7	0,6	1	0,7	0,6	0,7	0,7	0,9	0,4
W	A	1	1	0,3	2	2	2	2	1	8	4	4	-	4	3	3	4
	EL	0,3	1	1	2	2	1	2	2	5	4	3	5	3	3	3	3
	B	2	1	2	2	3	2	4	3	5	4	3	4	3	3	3	4
	C	0,7	2	-	1	1	2	-	1	5	4	4	3	3	4	2	4
Sb	A	5	4	1	0,8	2	3	6	6	2	4	8	-	9	6	3	11
	EL	0,9	0,7	0,9	1,0	8	8	9	9	5	10	13	17	7	9	9	11
	B	0,9	0,6	0,9	0,8	1	4	9	7	8	6	9	10	7	7	7	10
	C	0,7	0,8	-	0,6	6	6	-	5	9	8	12	8	7	8	0,6	8
Cr	A	4	1	11	7	5	7	3	2	11	4	7	-	6	8	5	7
	EL	5	5	2	4	2	2	5	4	2	3	6	7	5	6	2	10
	B	3	1	2	4	0,5	0,5	0,2	1	0,8	0,8	1	2	1	0,8	0,9	3
	C	2	1	-	0,5	1	0,7	-	0,5	2	3	3	1,0	5	1	3	2
Mo	A	4	4	2	10	6	6	3	13	7	5	7	-	11	8	4	6
	EL	2	2	4	4	2	6	1	12	8	12	13	13	5	4	5	6
	B	7	5	9	8	9	6	11	14	10	9	10	50	7	5	8	10
	C	1	10	-	11	4	4	-	2	9	4	10	7	3	6	2	3
Sr	A	4	13	1	3	21	28	3	4	26	13	12	-	13	7	7	1
	EL	0,6	1	5	3	0,8	1	1	1	2	5	1	1	0,8	0,6	3	1
	B	2	6	5	3	5	6	5	3	7	7	6	4	4	5	5	3
	C	39	4	-	6	48	20	-	18	44	72	38	25	64	16	18	42
As	A	6	8	15	13	15	17	16	17	46	29	61	-	29	29	11	29
	EL	2	1	0,5	0,4	3	3	23	30	16	13	99	35	4	5	3	6
	B	0,9	0,3	0,4	0,4	9	4	9	6	24	13	14	18	3	4	5	4
	C	0,4	2	-	0,3	5	8	-	5	25	19	17	16	5	5	14	5
U	A	4	2	7	9	1	2	9	8	6	8	13	-	7	7	15	4
	EL	3	8	10	14	3	5	7	7	11	8	6	3	3	4	10	4
	B	8	6	5	6	7	4	4	4	8	7	11	6	8	8	7	10
	C	9	5	-	5	8	7	-	5	10	22	5	8	12	7	11	12
Bi	A	26	43	9	25	32	29	3	5	72	52	65	-	99	79	18	16
	EL	3	9	9	9	0,7	0,9	1	0,8	16	16	23	17	16	12	12	13
	B	11	7	9	10	0,7	0,4	1,0	0,7	15	13	17	10	14	10	13	12
	C	8	8	-	8	0,3	0,5	-	0,3	8	6	23	9	6	7	3	7
Fe	A	14	13	2	6	32	33	8	23	18	8	23	-	13	9	6	1
	EL	2	3	2	4	5	6	7	13	2	2	2	4	2	2	2	1
	B	2	0,8	2	3	3	2	2	4	0,9	0,4	1	2	1	0,8	0,8	2
	C	0,6	0,7	-	1	1	1	-	0,9	0,4	0,8	1	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3
Zn	A	12	49	2	7	44	63	13	8	40	68	72	-	40	43	26	4
	EL	4	4	4	2	3	4	5	4	4	3	6	5	5	4	2	3
	B	2	3	4	3	2	0,7	6	4	3	0,8	1	2	2	2	3	3
	C	2	3	-	3	6	3	-	3	4	12	4	4	3	3	3	4

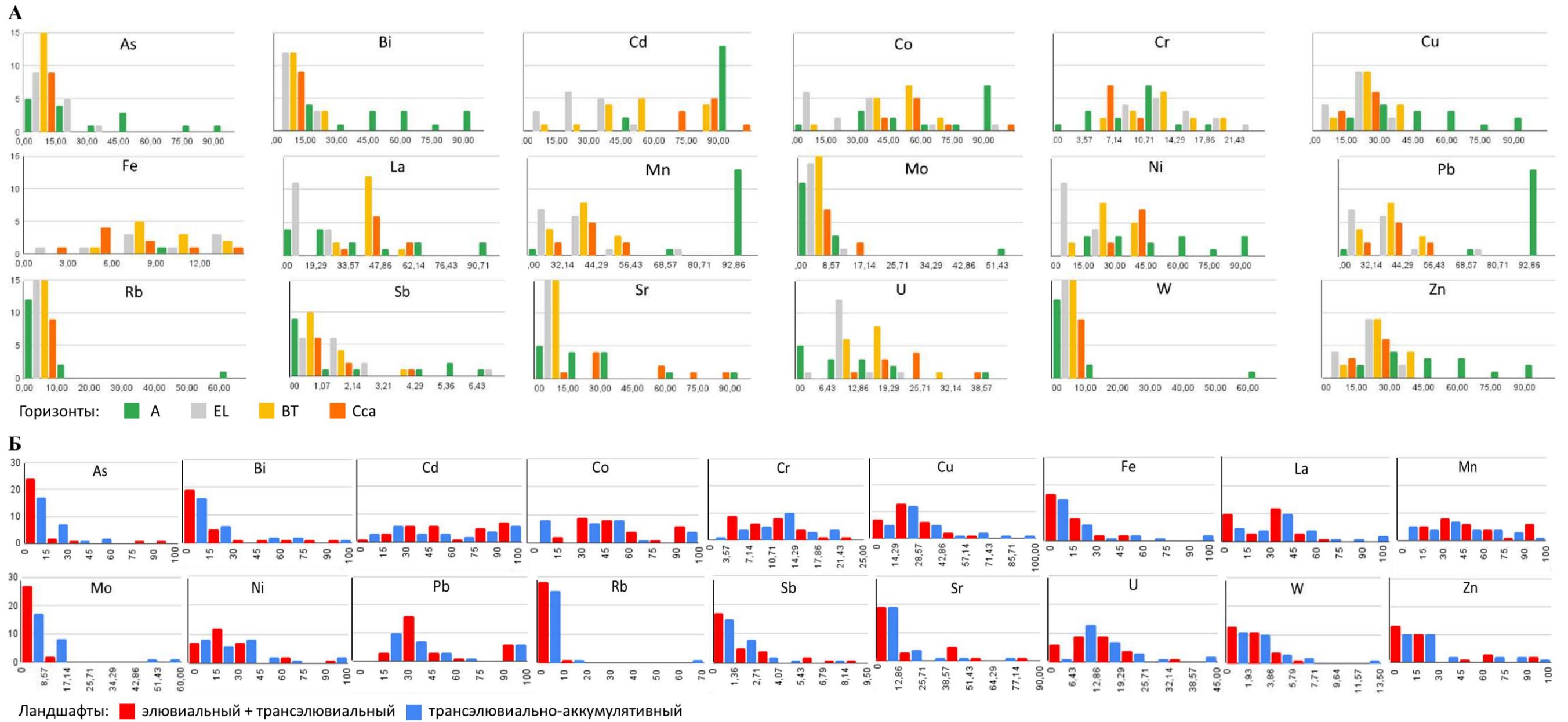
Cu	A	18	27	1	9	36	37	14	11	4	4	5	-	3	4	3	4
	EL	3	4	4	5	4	6	6	9	7	8	2	3	3	3	8	6
	B	4	3	7	4	5	5	6	12	5	7	8	9	5	7	7	11
	C	3	4	-	3	8	7	-	5	8	18	16	5	5	7	7	5
Ni	A	11	18	1	10	35	11	9	10	61	24	39	-	37	22	17	9
	EL	1	2	3	2	3	2	2	3	1	5	14	7	4	3	4	8
	B	2	14	14	3	7	13	18	29	11	11	10	12	7	24	12	5
	C	9	21	-	18	17	22	-	19	22	23	52	20	13	18	29	18
La	A	6	3	2	6	8	4	6	5	16	4	14	-	15	5	14	2
	EL	2	6	17	11	2	3	3	3	10	14	2	1	3	2	12	2
	B	14	12	18	14	22	18	22	16	14	16	16	14	22	19	15	24
	C	13	15	-	16	11	12	-	11	11	21	15	11	15	10	19	14
Pb	A	64	55	11	42	73	84	28	36	98	68	97	-	99	99	16	23
	EL	6	9	10	10	9	10	15	16	11	17	14	10	17	12	13	16
	B	13	18	14	10	21	22	19	15	31	19	20	13	23	29	17	16
	C	14	21	-	38	16	18	-	17	27	20	23	26	23	23	5	22
Cd	A	59	91	13	20	74	97	43	51	87	87	99	-	99	99	39	30
	EL	15	18	20	13	17	24	15	15	15	29	4	24	24	21	16	25
	B	11	25	42	8	34	38	46	59	64	32	30	22	28	65	27	14
	C	50	47	-	48	53	53	-	61	75	83	78	52	77	61	7	52
Co	A	68	36	2	5	43	58	7	6	60	62	31	-	99	96	19	1
	EL	9	16	28	13	10	11	1	2	18	41	1	10	6	11	99	1
	B	38	43	34	15	37	35	34	35	32	36	1	25	30	36	18	19
	C	12	39	-	34	26	39	-	40	39	82	55	36	19	37	28	28
Mn	A	79	67	10	22	99	99	34	35	30	99	38	-	52	57	23	6
	EL	9	10	39	17	7	12	23	34	8	26	4	22	6	8	8	7
	B	51	59	61	26	39	41	48	99	34	26	29	21	25	39	20	13
	C	46	72	-	73	50	52	-	53	45	75	59	36	40	34	31	32

Примечание. Цвет обозначает потенциальную подвижность (%): красный <1, оранжевый 1–5, желтый 5–20, голубой 20–50 и синий > 50. Прочерк – нет данных.

Общие черты радиального и латерального распределения биодоступности элементов схожи с потенциальной. Влияние свойств горизонтов почв на биодоступность элементов ниже, чем на потенциальную подвижность и в большей мере определяется поступлением органического вещества с опадом и его распределением в профиле почв.

### 6.5 Ряды подвижности химических элементов в почвах

Радиальное распределение потенциальной подвижности химических элементов контрастнее латерального (рисунок 6.2), поскольку контролирующие доступность ХЭ сорбционно-десорбционные процессы в генетических горизонтах почв формируют устойчивые ассоциации элементов. В каждом почвенном горизонте элементы были ранжированы по медианным значениям потенциальной подвижности и биодоступности, группы выделялись с помощью Т-критерия Уилкоксона по значимым различиям между соседними в рядах элементами.



**Рисунок 6.2.** Гистограммы плотности (частот) распределения подвижности элементов в горизонтах почв (А) и ландшафтах (Б) катены.

В *органоминеральных горизонтах* по потенциальной подвижности формируется 5 групп элементов, а по биодоступности – 6 (таблица 6.4). На распределение подвижности в этом горизонте влияет дифференциация органического вещества, что подтверждено корреляционным и факторным анализом (рисунок 6.3).

Первая группа по потенциальной подвижности и биодоступности включает Pb и Cd, для которых подвижность в большей степени обусловлена биогеохимическими процессами – комплексообразованием и сорбцией органическим веществом (Violante, 2002, 2008, 2013; Huang, 2002), что подтверждается значимой корреляционной зависимостью показателя от содержания Сорг ( $r=0,7$  и  $0,5$  соответственно, рисунок 6.3а, приложение Д.2). Эти элементы более активно сорбируются ферригидритом и органоминеральными комплексами при значениях  $pH < 5,3$  (Водяницкий, 2008; Xu, 2013). Высокая подвижность ( $>50\%$ ) Cd гумусовом горизонте согласуется с данными о повышенных коэффициентах его биологического поглощения и преобладанием растворенной формы в водных потоках бассейна реки Селенги (Kasimov et al., 2020). Максимальные значения этих показателей для Cd и Pb согласуются с данными по подвижности (MF), представляющей собой сумму обменной и карбонатной фракции, и потенциальной подвижности (MFp), представляющей сумму обменной, карбонатной, гидроксидной и органической фракций, в поверхностных горизонтах фоновых дерново-подзолистых почв национального парка «Мещера» (Касимов и др., 2016).

Вторая группа по потенциальной подвижности включает наибольшее число элементов – Co, Mn, Zn, Ni, Bi и Cu, Fe, La, As. Высокая (55 – 86%) потенциальная подвижность Co, Mn, Zn, Ni, Bi связана с Сорг. (рисунок 6.3а, приложение Д.2), с доминирующими процессами комплексообразования (Violante, 2002, 2008, 2013; Huang, 2002) в органоминеральных горизонтах – Mn, Zn и Bi (рисунок 6.1). По биодоступности во вторую группу входит только Zn. Преимущественно Сорг. определяет биодоступность только Bi и Ni (рисунок 6.3б, приложение Д.3). Cu, Fe, La, As в органоминеральных горизонтах потенциальная подвижность только трех последних элементов и биодоступность Fe имеет связь с Сорг, что для Fe и La обусловлено комплексообразованием с органическим веществом (рисунок 6.1). Увеличение доступности Fe и Mn может быть обусловлено кислотностью ( $pH < 4,5$ ) почв (Баргальи, 2005). Сорбции подвижных форм As органическим веществом может способствовать присутствие положительно заряженных аминогрупп (Caporale, Violante, 2015).

По биодоступности (M1) Zn выделяется в отдельную группу, его высокая подвижность в гумусовом горизонте согласуется с данными о повышенных коэффициентах биологического поглощения и водной миграции (Перельман, Касимов, 1999), а также преобладанием растворенной формы в водных потоках бассейна реки Селенги (Kasimov et.al., 2020).

В третью группу по биодоступности входят Mn, Co и Bi, которые при относительно высоких коэффициентах биологического поглощения (таблица 4.5, 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 распределении потенциальной подвижности и биодоступности в ландшафтах заповедника.

Третью группу потенциальной подвижности составляют Sr, Cr и U, которые менее подвижны (11 – 19%) в гумусовых горизонтах почв катены. В подвижность Sr наибольший вклад вносят обменные соединения (рисунок 6.1) благодаря участию элемента в биологическом круговороте в ландшафтах заповедника (таблица 4.5), поэтому она сильно коррелирует ( $r=0,9$ ) с содержанием органического вещества (рисунок 6.4, приложение Д.2). Соединения Cr сорбируются оксидами Fe и Mn и глинистыми минералами (Covelo, 2007; рисунок 6.1), содержание которых в верхней части профиля невелико. В органогенных горизонтах подвижность U обусловлена преимущественно обменными соединениями.

Четвертая группа по потенциальной подвижности включает Mo, Rb, W и Sb. Подвижность анионогенных Mo и Sb низкая в кислых гумусовых горизонтах. Rb подвижен в большей степени за счёт обменных соединений (рисунок 6.1) из-за участия элемента в биогеохимическом круговороте в ландшафтах катены (таблица 4.5).

В отдельную группу как по потенциальной подвижности, так и по биодоступности выделяется Zr, который характеризуется минимальной подвижностью во всём профиле почв катены. Этот элемент характеризуется низкими значениями коэффициентов водной миграции как в поверхностных, так и в подземных водах (Перельман, Касимов, 1999) и биологического поглощения (таблица 4.5, Перельман, Касимов, 1999).

Таблица 6.4

Ряды химических элементов по потенциальной подвижности (M2=F1+F2+F3) и биодоступности (M1=F1+F2) в генетических горизонтах текстурно-дифференцированных почв катены Центрально-Лесного заповедника

Горизонт	М	Ряды элементов по медианным значениям подвижности, %					
		100	50	20	10	5	1
А (16)	M2	Pb Cd <sub>99</sub>   Co <sub>86</sub> Mn <sub>64</sub> Zn <sub>63</sub> Ni <sub>56</sub> Bi <sub>55</sub>   Cu <sub>47</sub> Fe <sub>38</sub> La <sub>28</sub> As <sub>22</sub>   Sr <sub>19</sub> Cr <sub>11</sub> U <sub>10</sub>   Mo <sub>4,5</sub> Rb <sub>3,2</sub> W <sub>2,8</sub> Sb <sub>1,3</sub>   Zr <sub>0,2</sub>					
	M1	Cd <sub>74</sub> Pb <sub>64</sub>   Zn <sub>40</sub>   Mn <sub>38</sub> Co <sub>36</sub> Bi <sub>29</sub>   As Ni <sub>17</sub> Fe <sub>13</sub> Sr U <sub>7</sub> Cr Mo La <sub>6</sub> Cu <sub>5</sub>   Sb <sub>4</sub> W <sub>2</sub> Rb <sub>1,1</sub>   Zr <sub>0,1</sub>					
ЕL (16)	M2	Pb <sub>33</sub> Co <sub>31</sub> Mn <sub>26</sub> Cd <sub>25</sub>   Cu <sub>19</sub> Fe <sub>13</sub> Cr <sub>13</sub> Zn <sub>12</sub> La <sub>11</sub>   Ni <sub>10</sub> U <sub>9</sub> As <sub>8</sub> Bi <sub>6</sub>   Mo <sub>2,2</sub> Sr <sub>2</sub> Sb <sub>1,7</sub>   W <sub>0,7</sub>   Rb <sub>0,3</sub>   Zr <sub>0,2</sub>					
	M1	Cd <sub>18</sub>   Pb <sub>12</sub> CoBi <sub>11</sub>   Mn <sub>9</sub>   Sb <sub>8</sub> U <sub>6</sub> MoCu <sub>5</sub>   As <sub>4</sub>   Cr Zn <sub>4</sub> Ni La <sub>3</sub> Fe W <sub>2</sub>   Rb <sub>1,2</sub> Sr <sub>1,1</sub>   Zr <sub>0,1</sub>					
ВТ (16)	M2	Cd <sub>48</sub> Mn <sub>47</sub> Co <sub>45</sub>   La <sub>41</sub> Pb <sub>39</sub>   Ni <sub>24</sub> Cu <sub>22</sub>   Zn <sub>16</sub> U <sub>14</sub> Cr <sub>12</sub> Bi Fe <sub>10</sub> Sr Mo <sub>6</sub> As <sub>4</sub>   W <sub>2,7</sub> Zr <sub>1,5</sub> Sb Rb <sub>1,2</sub>					
	M1	Mn <sub>36</sub>   Co <sub>34</sub> Cd <sub>31</sub>   Pb <sub>19</sub> La <sub>16</sub> Ni <sub>11</sub> Bi <sub>10</sub> Mo <sub>9</sub>   Sb U Cu <sub>7</sub> Sr <sub>5</sub> As <sub>4</sub> W <sub>3</sub> Zn Fe <sub>2</sub> Zr <sub>1,3</sub> Cr   Rb <sub>1,2</sub>					
Сса (16)	M2	Cd <sub>75</sub>   Mn <sub>59</sub> Co <sub>51</sub>   La <sub>38</sub> Pb <sub>35</sub> Ni <sub>34</sub> Sr <sub>32</sub> U <sub>20</sub>   Cu Zn <sub>16</sub>   Cr <sub>6,4</sub>   Fe <sub>5</sub> As Bi <sub>4</sub> W Zr <sub>2</sub> Mo <sub>1,3</sub> Rb Sb <sub>1,1</sub>					
	M1	Cd <sub>53</sub> Mn <sub>48</sub>   Co <sub>36</sub> Sr <sub>31</sub> Pb <sub>21</sub> Ni <sub>20</sub> La <sub>14</sub>   U <sub>8</sub>   Bi Sb <sub>7</sub> Cu <sub>6</sub> As <sub>5</sub> Mo <sub>4</sub> Zn W <sub>3</sub>   Cr <sub>2</sub> Zr <sub>1,3</sub>   Rb Fe <sub>0,7</sub>					

Примечание. В скобках – число проб. Вертикальными линиями обозначены группы элементов, разделенные по статистически значимым (p<0,05) различиям показателя в ряду элементов по медианным значениям подвижности. Зеленым отмечены элементы с  $A\lambda > 10$

В элювиальном горизонте потенциальная подвижность и биодоступность всех элементов снижается, поскольку F1, F2 и F3 формы соединений элементов при оподзаливании выносятся в нижнюю часть профиля. Из-за снижения в горизонте подвижности, сезонной смены окислительно-восстановительных условий и положения комплексного латерального сорбционного барьера неоднородность содержания химических элементов выше, поэтому формируется большее количество групп (таблица 6.4). В этом горизонте влияние рассматриваемых химических свойств на подвижность снижается (приложение Д.2, Д.3). Факторный анализ показал (рисунок 6.3), что на биодоступность элементов в большей степени влияет рН почв (рисунок 6.3б), а на потенциальную подвижность – распределение Сорг (рисунок 6.3а), что может свидетельствовать о высокой роли органического вещества в формировании Fe-Mn конкреций и сорбции элементов в элювиальном горизонте подзолистых почв катены. Только потенциальная подвижность Pb, Cd и Ni связана с Сорг, в наибольшей степени проявляющаяся для Pb ( $r_{Corg}=0,8$ ), чье распределение также коррелирует с мелкопесчаной фракцией ( $r_{G6}=0,6$ ), подтверждая значимую роль Fe-Mn конкреций в дифференциации подвижности элемента в этом горизонте (Sposito, 2008; Kabata-Pendias, 2011; Barrón, Torrent, 2013; Samonova, Aseyeva, 2019).

По сравнению с органоминеральными горизонтами, в элювиальном горизонте в группу наиболее подвижных элементов добавляется Co, у которого в средней части профиля увеличивается доля в F3 форм соединений, сорбируемых оксидами Mn (рисунок 6.1, Borch, 2010). Также у элемента в этом горизонте наблюдается значимая корреляция с рН. По остальным группам существенные изменения относительно наблюдаемых в вышележащем горизонте не выявлены.

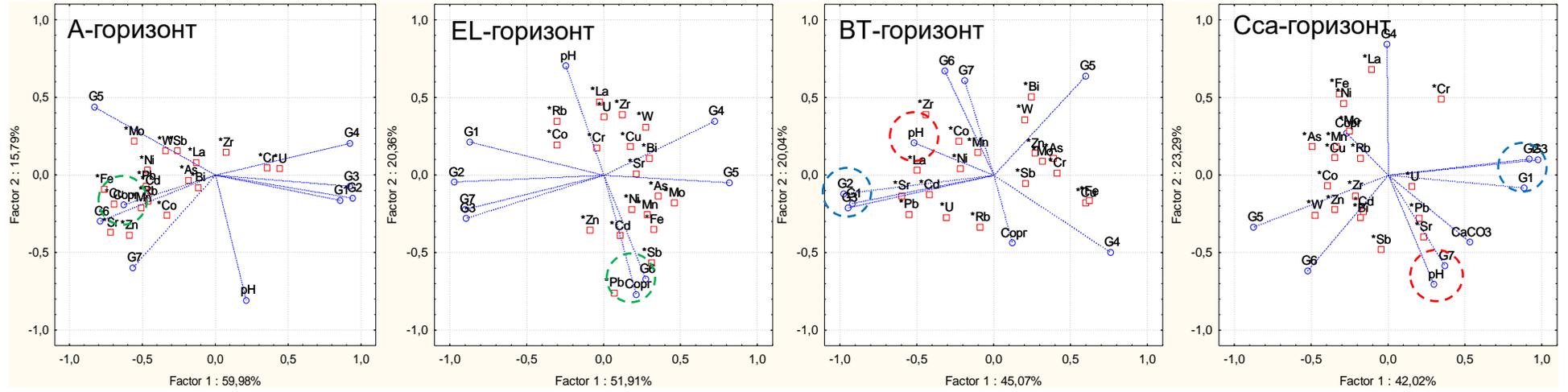
В иллювиальном горизонте основным процессом аккумуляции подвижных форм является сорбция илстыми частицами (рисунок 6.3, приложение Д.2,3), содержание которых относительно равномерно в почвах катены и не зависит от смены условий, поэтому здесь по потенциальной подвижности и биодоступности формируется 5 групп элементов (таблица 6.4).

Наиболее подвижные Cd и Mn мигрируют в горизонт ВТ вместе с илстой фракцией (рисунок 6.4, приложение Д.2). Co сорбируется гидроксидами Mn, что подтверждается обилием в верхней части горизонта Fe-Mn конкреций (приложение Б). Формы La и Pb сорбируются илстыми и пылеватыми частицами, с которым у элементов значимая корреляционная связь (G1 и G2, приложение Д.2).

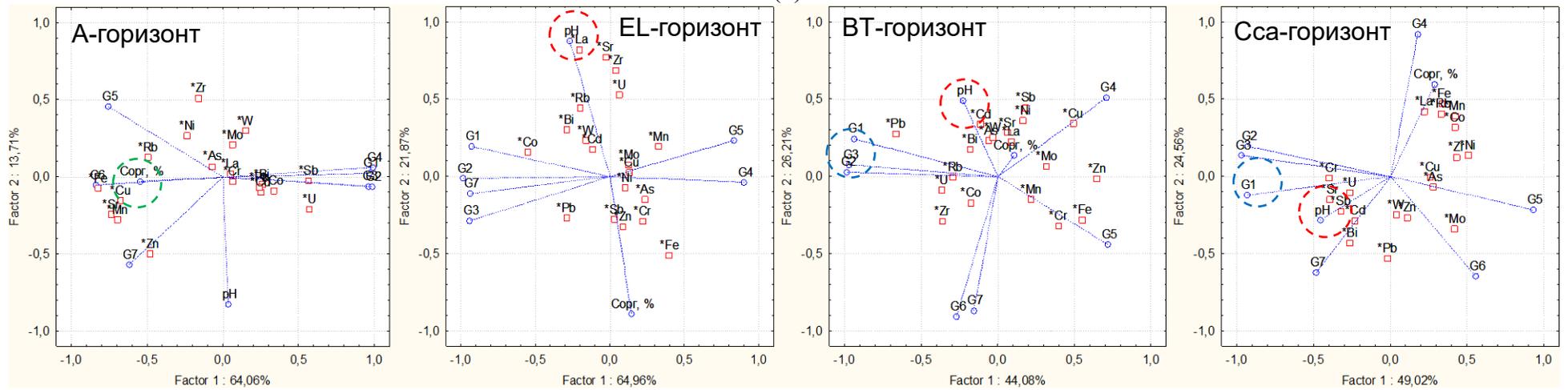
Подвижные Ni и Zn аккумулируются на щелочном барьере в горизонте ВТ, что подтверждает значимая корреляция потенциальной подвижности элемента с рН почв (приложение Д.2).

В *почвообразующей породе* наименьшая пространственная и временная дифференциация содержаний элементов приводит к формированию меньшего числа групп элементов (таблица 6.4). Ряд элементов схож с вышележащим горизонтом ВТ, поскольку здесь также имеет место накопление на сорбционном барьере илистых частиц (рисунок 6,3, приложение Д.2,3). В нижней части профиля наибольшую роль играет аккумуляция на щелочном геохимическом барьере подвижных форм соединений элементов, что для потенциальной подвижности анионогенного U и катионогенного Sr и биодоступности Cd подтверждается наличием положительной корреляции с величиной pH (рисунок 6,3, приложение Д.2,3).

(a)



(б)



**Рисунок 6.3.** Связь физико-химических свойств горизонтов почв катены с распределением потенциальной подвижности (а) и биодоступности (б) элементов (%) по методу главных компонент. Ведущие факторы выделены пунктиром по результатам корреляционного анализа (приложение Д.2)

*Выводы*

В гумусовом горизонте среди подвижных соединений Cd, Mn, Co, Zn обнаружено близкое содержание органоминеральных и сорбированных гидроксидами Fe и Mn соединений. Среди подвижных соединений Sr, Cd, Rb, Zn преобладают обменные. К нижележащим минеральным горизонтам потенциальная и биодоступность всех рассматриваемых элементов значительно снижается в связи с меньшей долей комплексных и сорбированных соединений и увеличением доли прочно связанных соединений.

В радиальной дифференциации потенциальной подвижности и биодоступности слабо проявляется сезонная изменчивость. Высокая подвижность элементов наблюдается в кислых органогенных горизонтах почв, где наибольшей М обладают Cd, Pb, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Fe, Bi, Sr. К нижележащим минеральным горизонтам подвижность значительно снижается.

Латеральное распределение подвижности в гумусовых горизонтах почв контрастно отличается по сезонам. При этом во все периоды опробования выявлено накопление подвижных форм соединений Co, Mn, Pb, Zn, Ni в верхних звеньях катены, а Cd, La – в нижних.

В катене Центрально-Лесного заповедника с крайне незначительным перепадом высот сезонная смена условий миграции приводит к смещению положения латеральных геохимических барьеров, что отражает зависящую от сезона опробования латеральную почвенно-геохимическую структуру распределения ТММ и их подвижных форм в отличие от менее изменчивой радиальной почвенно-геохимической структуры.

Высокая подвижность в верхней части профиля в большей степени обусловлена биогеохимическими процессами. Потенциальная подвижность Pb и Cd возрастает из-за сорбции гидроксидами марганца (Cd) и органоминеральными комплексами (Pb). В распределении сильноподвижных Mn, Pb, Co и Ni в ландшафтах заповедника важную роль играет биологическая. В горизонте EL биодоступность всех элементов снижается и увеличивается потенциальная подвижность Sr и U, у которых повышена доля F3 формы соединений. В иллювиальном горизонте подвижные формы сорбируются илистой фракцией, в породе – аккумулируются на щелочном 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 комплексных (F2) форм As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Ni, Pb, Sb, Ti, U, Zn, Zr. Гумусовые горизонты этих почв обогащены обменными соединениями (F1) большинства изученных элементов (As, Bi, Cd, La, Mn, Ni, Pb, Rb, Sb, Ti, U, W, Zn, Zr) и обеднены сорбированными формами As, Bi, Rb, Sr, U.

В южнотаёжных ландшафтах катены наиболее биогеохимически активны Mn, Zn, Cd, Bi и Rb, которые поглощаются древесными растениями и возвращаются на поверхность почв с обильным опадом. В ландшафтах верхних звеньев катены подвижные формы этих элементов интенсивно высвобождаются из растительных остатков, а в подчиненных переувлажненных позициях – 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 радиальном распределении обменных (F1) форм соединений элементов большую роль играют биогеохимические процессы и сорбция органическим веществом почв, комплексных (F2) – содержание органического вещества почв и карбонатность пород, сорбированных (F3) – накопление на биогеохимическом барьере в гумусовом горизонте (As, Cd, Cu, Pb, Zn, Sb), аккумуляция на сорбционном барьере Fe-Mn конкреций в элювиальном и иллювиальном горизонтах (As, Bi, Cd, Pb) и миграция с илистыми частицами (Cr).

Латеральная почвенно-геохимическая структура фоновой южнотаежной катены характеризуется изменчивостью, наиболее ярко проявляющейся в сопряженных гумусовых горизонтах, где ведущими процессами дифференциации являются накопление и разложение растительных остатков. В EL-горизонте F1 и F2 формы соединений As, Bi, Cd, Cu и Zn в июне имеют аккумулятивный тип латерального распределения и осаждаются на комплексном латеральном геохимическом барьере из-за влияния на изменчивость окислительно-восстановительных условий и миграции растворённого органического вещества. В BT-горизонте и породе F3 форма соединений многих химических элементов (Cd, Mn, Sr, Ti и Cr, Fe, Mn, Rb, Ti, Zn) имеет аккумулятивный тип латерального распределения из-за наличия в подчиненных ландшафтах комплексного кислородного и глеевого барьеров. В минеральных горизонтах сезонная изменчивость латерального распределения ХЭ и их форм проявляется слабее.

В гумусовом горизонте почв катены Cd, Mn, Ni, Pb, Rb и Zn характеризуются аккумулятивным радиальным и латеральным типом распределения. В элювиальном горизонте для Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Mo и Zn аккумулятивное элювиально-иллювиальное радиальное распределение элементов

сопровождается их транзитным латеральным распределением, из-за высокой степени оглеения в средней части профиля подчиненных ландшафтов катены. В иллювиальном горизонте контрастность R и L дифференциации всех исследуемых элементов значительно снижается.

Высокая потенциальная подвижность элементов наблюдается в кислых 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 нижележащим минеральным горизонтам она значительно падает. В радиальной дифференциации потенциальной подвижности ХЭ слабо проявляется сезонная изменчивость. На латеральное распределение потенциальной подвижности ХЭ в гумусовых горизонтах почв влияет сезонная смена условий миграции. В верхней части профиля почв подвижность элементов обусловлена накоплением органического углерода, в иллювиальном горизонте возрастает роль илистой фракции. В карбонатных моренных суглинках подвижные формы элементов аккумулируются на щелочном барьере.

## Литература

- Авессаломова И.А. Катенарная геохимическая организация таежных ландшафтов Восточно-Европейской равнины/ И.А. Авессаломова// Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М. А. Глазовской. – М.: АПР. – 2012. – С. 97-117.
- Авессаломова И.А. Биогеохимия высокогорных ландшафтов Приэльбрусья/ И.А. Авессаломова// Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения А. И. Перельмана. – М.: АПР. – 2017. – С. 167-189.
- Авессаломова И.А. Биогеохимия ландшафтов/ И.А. Авессаломова. — М.: Географический факультет МГУ, 2007. — 163 с.
- Авессаломова И.А. Структурно-функциональные особенности лугов и болот в ландшафтах Центральной Мещеры/ И.А. Авессаломова, И.М. Микляева// Вестник Московского университета. Серия 5: География, № 1. – 1997. – С. 43-48
- Александрова Л.М. Гумусовые вещества почвы (их образование, состав, свойства и значение в почвообразовании и плодородии) / Л.М. Александрова, М.Ф. Люжин, В.Ф. Аршавская// Записки Ленингр.с.-х. ин-та. Ленинград, 1970. – Т. 142. – 233с.
- Ананко Т.В. О влиянии климата на соотношение несиликатных форм железа в почвах/ Т.В. Ананко, И.А. Соколов// Почвоведение, № 5. – 1978. – С. 42-47.
- Айвазян А.Д. Геохимические особенности флоры ландшафтов юго-западного Алтая/ А.Д. Айвазян. – М.: Изд-во МГУ. – 1974. – 155 с.
- Бабак В.И. Геоморфолого-неотектоническое районирование почвенно-геологические условия Нечерноземья/ В.И. Бабак, В.И. Башилов, Е.А. Гаврюшов, Е.И. Вохмина, Л.Н. Спирин, Ф.Г. Касаткин. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – С. 41-79.
- Базилевич Н.И. Биокруговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах/ Н.И. Базилевич, А.А. Титлянова. – Новосибирск: Наука, 2007. – 381 с.
- Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений / Р. Баргальи. – Екатеринбург: ГЕОС, 2005. – 457 с.
- Башкин В.Н. Биогеохимия/ В.Н. Башкин, Н.С. Касимов. – М.: Научный мир, 2004. – 648 с.
- Белицына, Г.Д. Особенности поведения свинца в некоторых почвах дерново-подзолистой подзоны / Г.Д. Белицына, Т.А. Пачепская // Тяжелые металлы в окружающей среде. – 1980. – С. 45-50.
- Белицына, Г.Д. Цинк в основных компонентах лесных биогеоценозов Валдайской возвышенности / Г.Д. Белицына, Т.В. Черепова // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Труды II Всесоюзного совещания. – М.: Гидрометеиздат. – 1980. – С. 208-213.
- Борисенко Е.Н. Геохимия глеевого катагенеза в породах красноцветной формации/ Е.Н. Борисенко. – М.: Наука, 1980. – 164 с.
- Васенёв И.И. Модель развития таёжных дерново-подзолистых почв в связи с ветровалами/ И.И. Васенёв, В.О. Таргульян// Почвоведение. – 1994. – № 12. – С. 5-16.
- Веригина К.В. Определение подвижного двух-, трехвалентного железа/ К.В. Веригина // Агрохимические методы исследования почв. – 1965. – С. 321-322.
- Витковская С.Е. Пространственная изменчивость параметров плодородия дерново-подзолистой почвы в полевых опытах/ С.Е. Витковская //Агрофизика. – 2011. – № 2. – С. 19-25.
- Витт В.С. К характеристике глееподзолистых и болотно-подзолистых почв суглинистых почв северной тайги европейской территории Союза/ В.С. Витт // Почвоведение. – 1985. – № 5. – С. 20-31.
- Водяницкий Ю.Н. Гидроксиды железа в биогенных новообразованиях лесных почв/ Ю.Н. Водяницкий// Почвоведение. – 2003. – № 12. – С. 1440-1452.

- Водяницкий Ю. Н. Методы последовательной экстракции тяжелых металлов из почв – новые подходы и минералогический контроль (аналитический обзор) / Ю.Н. Водяницкий// Почвоведение. — 2006. — № 10. — С. 1190–1199.
- Водяницкий Ю.Н. Гидроксиды железа в почвах (обзор литературы) / Ю.Н. Водяницкий// Почвоведение. — 2010. — № 11. — С. 1341-1352.
- Водяницкий Ю.Н. Минералогия и геохимия марганца (обзор литературы) / Ю.Н. Водяницкий // Почвоведение. — 2009. — Т.42. № 10. — С. 1170-1178.
- Водяницкий Ю.Н. Оглеение, олививизация и гидрометаморфический процесс/ Ю.Н. Водяницкий // Бюл. Почв. Ин-та им. В.В. Докучаева. — 2008. — Вып. 61. — С. 12-20.
- Водяницкий Ю.Н. Роль соединений железа в закреплении тяжелых металлов и металлоидов в почвах (обзор литературы) / Ю.Н. Водяницкий// Почвоведение. — 2010. — № 5. — С. 558-572.
- Водяницкий Ю.Н. Химия и минералогия почвенного железа/ Ю.Н. Водяницкий. — М.: Почв. Ин-т им. В.В. Докучаева, 2003. — 238 с.
- Геннадиев А.Н. Латеральная миграция вещества в почвах и почвенно-геохимические катены/ А.Н. Геннадиев, Н.С. Касимов//Почвоведение. — 2004. — № 12. — С. 1447-1461.
- Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов/ М.А. Глазовская. — Смоленск: Ойкумена, 2002. — 286 с.
- Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР/ М.А. Глазовская. — М: Высшая школа, 1988. — 328 с.
- Глазовская М.А. Геохимия тяжелых металлов в природных и техногенных ландшафтах/ М.А. Глазовская. — М.: Изд-во МГУ, 1983. — 196 с.
- Глазовская М.А. Педолитогенез и континентальные циклы углерода/ М.А. Глазовская. — М: ЛИБРОКОМ, 2009. — 336 с.
- Глазовская М.А. Почвы мира. География почв т.2/ М.А. Глазовская. — М, 1973. — 428 с.
- Глазовская М.А. Ландшафтно-геохимические основы мониторинга природной среды/ М.А.Глазовская, Н.С.Касимов, Т.А.Теплицкая. — М: «Наука», 1989. — 264 с.
- Глазовская М.А. Ландшафтно-геохимические основы мониторинга природной среды/ М.А.Глазовская, Н.С.Касимов// Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 1987. — № 2. — С. 63-70
- Гольдшмидт, В.М. Принципы распределение химических элементов в минералах и горных породах/ В.М. Гольдшмидт. — М.-Л.: ГОНТИ НКТП СССР, 1930. — С. 215-242.
- Гончарук Н.Ю. Почвенный покров Центрально-Лесного биосферного государственного заповедника/ Н.Ю. Гончарук //Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. — М., 1995. — 32 с.
- Гончарук Н.Ю. Почвенная карта заповедника и закономерности пространственного размещения почв/ Н.Ю. Гончарук // Труды Центрально-Лесного заповедника, выпуск 4: Сборник статей. —2007. — С. 195-219.
- Горбунов Н.И. Методы определения несиликатных аморфных и кристаллических полупрозрачных окислов в почвах и глинах/ Н.И. Горбунов, Г.С. Дзедевич, Б.М. Туник// Почвоведение. — 1961. — № 11. — С.103-111.
- Добрицкая Ю.М. Определение валового содержания марганца в почвах и растениях. Методы определения микроэлементов в почвах и растениях/ Ю.М. Добрицкая. — М.: АН СССР, 1958. — 144 с.
- Добровольский В.В. Регуляторная роль почвы в функционировании таежных экосистем/ В.В. Добровольский. — М: Наука, 2002. — 364 с.

- Добровольский Г.В. География почв/ Г.В. Добровольский, И.С. Урусевская. – М.: Изд-во МГУ, Наука, 2006 – 460 с.
- Добровольский Г.В. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации/ Г.В. Добровольский, И.С. Урусевская. – 2013.
- Елькина Г.Я. Подвижность тяжелых металлов и их токсичность для кормовых культур / Г.Я. Елькина. – Аграрная наука. – 2010. – №6. – С. 15-16,
- Енчилик П.Р. Биологическое поглощение и биогеохимическая подвижность микроэлементов в лесных ландшафтах Центрально-Лесного Государственного Природного Биосферного заповедника/ П.Р. Енчилик, Е.Н. Асеева, И.Н. Семенов// Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 4. – С. 93-98.
- Енчилик П.Р. Катенарная биогеохимическая дифференциация в южно-таежных ландшафтах (Центрально-Лесной заповедник, Тверская область) / П.Р. Енчилик, И.Н. Семенов, Е.Н. Асеева, О.А. Самонова, А.Д. Иовчева, Е.В. Терская // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2020. – № 6. – С. 121-133.
- Ершов Ю.И. Теоретические проблемы лесного почвообразования/ Ю.И. Ершов. – Новосибирск: Наука, 2015. – 319 с.
- Железнова О.С. Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов/ О.С. Железнова, Н.А. Черных, С.А. Тобратов// Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2017. – Т. 25. – № 2. – С. 253-270.
- Журавлева Е.Г. О формах соединений и подвижности меди в дерново-подзолистой почв // Научные труды Почвенного института имени В.В. Докучаева «Химия почвы. Формы соединений и методы определения макро- и микроэлементов» / Е.Г. Журавлева. – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1978а. – С.49-60.
- Журавлева, Е.Г. О связи содержания меди и железа в дерново-подзолистой почве/ Е.Г. Журавлева // Научные труды Почвенного института имени В.В. Докучаева «Химия почвы. Формы соединений и методы определения макро- и микроэлементов». – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. – 1978б. – С. 71-78.
- Зайдельман Ф.Р. Эколого-мелиоративное почвоведение гумид-ных ландшафтов/ Ф.Р. Зайдельман. – М.: Агропромиздат, 1991. – 319 с.
- Зонн С.В. Железо в почвах (генетические и географические аспекты) / С.В. Зонн. – М.: Наука, 1982. – 207 с.
- Зонн С.В. Алюминий. Роль в почвообразовании и влияние на растения/ С.В. Зонн, А.П. Травлеев. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1992. – 224 с
- Зырин Н.Г. К вопросу о формах соединений меди, цинка и свинца в почвах и доступности их для растений/ Н.Г. Зырин, Н.А. Чеботарева// Содержание и формы микроэлементов в почвах. – 1979. – С. 350- 386.
- Зырин Н.Г. Формы соединений кобальта в почвах/ Н.Г. Зырин, А.А.Титова // Содержание и формы микроэлементов в почвах. – 1979. – С. 160-223.
- Зырин Н.Г. Формы соединений цинка в почвах и поступление его в растения / Н.Г Зырин, В.И. Рерих, Ф.А. Тихомиров // Агрохимия. – 1976. – № 5. – С. 124-132.
- Ильина Л.П. Использование данных о структуре почвенного покрова при районировании Московской области / Л.П. Ильина // Структура почвенного покрова и методы её изучения. – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. – 1973. – С. 46-73.
- Исаченкова Л.Б. Сравнительная биогеохимическая характеристика лесных экосистем/ Л.Б. Исаченкова, М.В. Тарзаева // Экосистемы широколиственно-хвойных лесов южного Подмосковья. – М.: Географический факультете МГУ. – 2006 – с.84-97.

- Ишкова И.В. Почвы склона и поймы ручья в Центральном-Лесном заповеднике: некоторые химические свойства и состав глинистых минералов/ И.В. Ишкова, Е.С. Русакова, И.И. Толпешта, Т.А. Соколова // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2010. – № 3. – С. 3-9.
- Канев В.В. Динамика содержания кислоторастворимых соединений железа в дерново-подзолистых почвах южной части республики Коми/ В.В. Канев// Почвоведение. – 2011. – № 11. – С. 1312-1326.
- Караванова Е.И. Пространственная и временная динамика элементного состава почвенных растворов торфянисто-подзолистых глееватых почв/ Е.И. Караванова, М.С. Малинина// Почвоведение. — 2007. — № 8. — С. 927–936.
- Карпачевский Л.О. Почвы Центрально-лесного заповедника и их экологическая оценка/ Л.О. Карпачевский, М.Н. Строганова //Динамика, структура почв и современные почвенные процессы. – МЦНИЛ Главохоты РСФСР. – 1987. – С. 10-30.
- Карпухина Н.Ю. Пространственная изменчивость содержания тяжелых металлов в агросерой почве в масштабе сельскохозяйственного угодья/ Н.Ю. Карпухина, М.М. Карпухин, В.П. Самсонова, Д.Г. Кротов // Агрохимия, 2012. – № 8. – С. 57-65.
- Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:2500000 / Под ред. Г.В. Добровольского, И.С. Урусевской. Авторы: И.С. Урусевская, И.О. Алябина, В.П. Винюкова, Л.Б. Востокова, Е.И. Дорофеева, С.А. Шоба, Л.С. Щипихина. – М.: «Талка+», 2013. – 16 с.
- Касимов Н.С. Геохимия ландшафтов и география почв: основные концепции и подходы/ Н.С. Касимов, А.Н. Геннадиев// Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2005.– №2. – С. 10-17.
- Касимов Н.С. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы // Н. С. Касимов, Д. В. Власов, Н. Е. Кошелева, Е. М. Никифорова. — АПР Москва, 2016. — 276 с.
- Касимов Н.С. Содержание и распределение подвижных форм Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr, Ti, Zn и Zr в почвах южнотаежной катены на двучленных отложениях Центрально-Лесного заповедника/ Н.С. Касимов, И.Н. Семенов, Е.Н. Асеева, О.А. Самонова, П.Р. Енчилик, А.Д. Иовчева, Е.В. Терская // Сборник Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН «Почвы в биосфере». – 2018.
- Касимов Н.С. О геохимии почв // Почвоведение/ Н.С. Касимов, А.И. Перельман. – 1992. – №2. – С. 9- 26.
- Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
- Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова /В.А. Ковда. – М: Наука, 1985. – 264 с.
- Кошелева Н.Е. Регрессионные модели поведения тяжелых металлов в почвах Смоленско-Московской возвышенности/ Н.Е. Кошелева, Н.С. Касимов, О.А. Самонова // Почвоведение. – 2002. – №8. – С. 954-966.
- Кречетов П.П. Химия почв. Аналитические методы исследования/ П.П. Кречетов, Т.М. Дианова. – М: Географический факультет МГУ Москва, 2009. – 148 с.
- Кротов Д.Г. Пространственная изменчивость гранулометрического состава агросерых почв и агросерых со вторым гумусовым горизонтом/ Д.Г. Кротов, В.П. Самсонова// Вестник МГУ. Серия 17. Почвоведение. – 2009. – № 1. – С. 19-23.
- Кузьмин В.А. Химический состав механических фракций двух почв Восточного Саяна и Присяня/ В.А. Кузьмин // Почвоведение. – №9. – 1968.
- Кураева Е.Н., Минаева Т.Ю., Шапошникова Е.С. Типологическая структура и флористическое разнообразие сообществ ЦЛГЗ/ Е.Н. Кураева, Т.Ю. Минаева, Е.С. Шапошникова// Сукцессионные процессы в заповедниках России и проблемы сохранения биологического разнообразия – Санкт-Петербург. – 1999. – С. 314-317.
- Ладонин Д.В. Методы определения фракционного состава соединений тяжёлых металлов в почвах/ Д. В Ладонин // Теория и практика химического анализа почв. Под ред. Л.А. Воробьёвой. – М: ГЕОС. – 2006. – с. 293-309.

- Ладонин, Д.В. Фракционный состав соединений меди, цинка, кадмия и свинца в некоторых типах почв при полиэлементном загрязнении/ Д.В. Ладонин, О.В. Пляскина// Вестник Московского университета. Серия.17. – Почвоведение. – 2003. – №1. – С.8-16.
- Лехт Э.Е. Геоморфология и гляциоморфология Калининской области (карта м-ба 1:500000) Пояснит, зап. ПГО "Центргеология" / Э.Е. Лехт, В.Н. Гудкова. – М.: Госцентр "Природа", 1986. – 25 с.
- Липатов Д.Н. Пространственное варьирование свойств торфяных почв в нефтегазодобывающем регионе на северо-востоке о. Сахалин/ Липатов Д.Н., Щеглов А.И., Манахов Д.В., Завгородняя Ю.А., Розанова М.С., Брехов П.Т. // Почвоведение. – 2017. – № 7. – С. 874-885.
- Липгарт Т.М. Гидрохимия атмосферных осадков/ Т.М. Липгарт, В.И. Николашин, Т.В. Бельшева, И.М. Брускина // Летопись природы «Динамика явлений и процессов в природном комплексе заповедника» ФГУ «Центрально-Лесной заповедник». – 2008. – 422 с.
- Лукашев К.И. Геохимическое изучение ландшафтов Березинского биосферного заповедника/ К.И. Лукашев. – Минск: Наука и техника, 1985. – 144с.
- Макарова О.А. Экологическая оценка содержания тяжелых металлов в системе вода–почва–растение в прирусловой части поймы реки Иртыш: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16/Макарова Ольга Александровна. – Омск, 2009. – 113 с.
- Манджиева С.С. Фракционно-групповой состав соединений цинка и свинца как показатель экологического состояния почв / С. С. Манджиева, Т.М. Минкина, Г.В. Мотузова, С.Е. Головатый, Н.Н. Мирошниченко, Н.К. Лукашенко, А.И. Фатеев // Почвоведение. — 2014. — № 5. — С. 632–640.
- Марков К.К. Рельеф и стратиграфия четвертичных отложений северо-запада Русской равнины/ К.К.Марков. – Изд-во АН СССР, 1961. – 173-207 с.
- Маряхина Н.Н. Химико-минералогическая характеристика подзолистых почв Центрального лесного заповедника в местах распространения карстовых образований / Н.Н. Маряхина, Ю.Г. Максимова, И.И. Толпешта, Т.А. Соколова // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. – 2009. – № 3. – С. 25-31.
- Минкина Т.М. Комбинированный прием фракционирования соединений металлов в почвах/ Г.В. Мотузова, О.Г. Назаренко и др. // Почвоведение, 2008. – №11.– С.40-49.
- Минкина Т.М. Формы соединений тяжелых металлов в почвах степной зоны/ Т.М. Минкина, Г.В. Мотузова, О.Г. Назаренко// Почвоведение. – 2008. – № 5. – С.1- 9.
- Миняев Н. А., Конечная Г. Ю. Структура и продуктивность еловых лесов южной тайги / Н.А. Миняев, Г.Ю. Конечная// Флора Центрально-Лесного государственного заповедника. – Л., 1976.
- Мячкова Н.А. Климат СССР: учеб. пособие для географ. спец. Вузов / Н.А. Мячкова. - М.: МГУ, 1983. – 192 с.
- Никифорова Е.М. Элементы в южно-таежных ландшафтах Валдайской возвышенности/ Е.М. Никифорова// Геохимия ландшафта и практика народного хозяйства. – М.: Изд-во МГУ, 1980 – С. 57-98.
- Никифорова, Е.М. Фракционный состав соединений свинца в почвах Москвы и Подмосковья / Е.М. Никифорова, Н.Е. Кошелева // Почвоведение. – 2009. – № 8. – С.940-951.
- Пейве Я.В. Полевая лаборатория для определения доступных растениям микроэлементов в почвах/ Я.В. Пейве, Г.Я. Ринькис. – Рига: изд-во АН Лат.ССР. – 1958. – 21 с.
- Перельман А.И. Геохимический ландшафт как самоорганизующаяся система/ А.И. Перельман // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 1995. – № 4. – С. 10-16.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта/ А.И. Перельман. – Москва: Высшая школа, 1966. – 392 с.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта/ А.И. Перельман, Н.С. Касимов. – М.: Астрель-2000, 1999. – 768с.
- Пляскина О.В. Соединения ТМ в гранулометрических фракциях некоорых типов почв/ О.В. Пляскина, Д.В. Ладонин // Вестник МГУ. Серия 17. Почвоведение. – 2003. – №4. – 36-42 с.

- Попов А.И. Хемодеструкционное фракционирование органического вещества почв/ А.И. Попов, А.В. Русаков// Почвоведение. – 2016. – № 6. – С. 663-670.
- Попова Л.Ф. Трансформация подвижных форм цинка в почвах г. Архангельска/ Л.Ф. Попова, О.Н. Репницына, М.В. Никитина. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, 2010. – 65-71 с.
- Почвенный справочник/Пер. с франц. – Смоленск: Ойкумен, 2000. – 288 с.
- Прянишников Д.Н. Агрохимия/ Д.Н. Прянишников// М.: Сельхозгиз, 1936. – 494 с.
- Пузаченко Ю.Г. Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник. Популярный очерк // Ю.Г. Пузаченко, А.С. Желтухин, Д.Н. Козлов, Н.П. Кораблев, М.В. Федяева, М.Ю. Пузаченко, Сиунова Е.В. – М.: Деловой мир, 2007. — 80 с.
- Пузаченко Ю.Г. Отображение пространственно-временной динамики размещения особей популяции по территории/ Ю.Г. Пузаченко, А.С. Желтухин, Р.Б. Сандлерский – М: Наука, 2008. – 31 с.
- Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н. Геоморфологическая история развития региона/ Ю.Г. Пузаченко, Д.Н. Козлов// Комплексные исследования в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике: их прошлое, настоящее и будущее. Труды Центрально-Лесного заповедника. Выпуск 4. – Тула: Гриф и К, 2007. – С. 125-159.
- Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н., Зарецкая Н.Е. Геоморфологическая история развития территории Центрально-Лесного заповедника/ Ю.Г. Пузаченко, Д.Н. Козлов, Н.Е. Зарецкая// Летопись природы. Кн. 44. Пос. Заповедный. – 2005.
- Решетникова Т.В. Лесные подстилки как депо биогенных элементов/ Т.В. Решетникова// Вестн. КрасГАУ. – 2011. – № 12. – С. 74-81.
- Родин Л.Е. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах/ Л.Е. Родин, Н.П. Ремезов, Н.И. Базилевич – Л.: Наука, 1968. – 143 с.
- Розанов Б.Г. Морфология почв. – М.: Академический проект, 2004. – 432 с.
- Самойлова, Е.М. Дерново-подзолистые почвы западной части Смоленской области / Е.М. Самойлова, Н.Ф. Титкова // Почвы дерново-подзолистой зоны и их рациональное использование. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – С. 37-55.
- Самонова О.А. Подвижные формы металлов в почвах эрозионных ландшафтно-геохимических систем (юго-восточная часть Смоленско-Московской возвышенности/ О.А. Самонова, Н.С. Касимов, Е.Н. Асеева// Вестник МГУ, Серия №5 География. — 2011. — № 6. — С. 67-75.
- Самонова, О.А. Ассоциации микроэлементов в профиле дерново-подзолистых почв южной тайги / О.А. Самонова, Н.Е. Кошелева, Н.С. Касимов// Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 1998. – № 2. – С. 14-19.
- Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств на примере дерново-подзолистых почв/ В.П. Самсонова. – М.: Изд-во «ЛКИ», 2008. – 156 с.
- Самсонова В.П. Пространственная изменчивость агрохимических свойств сельскохозяйственных угодий Брянской области/ В.П. Самсонова, Д.Г. Кротов, Е.Ю. Лавринова// Агрохимия. – 2017. – № 7. – С. 11-18.
- Самсонова В.П. Оценка роли рельефа в пространственной изменчивости агрохимически важных почвенных свойств для интенсивно обрабатываемого сельскохозяйственного угодья/ В.П. Самсонова, Ю.Л. Мешалкина// Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. – 2014. – № 3. – С. 36- 44.
- Семенков И.Н. Латеральная дифференциация форм соединений металлов в почвенных суглинистых катенах центра Западно-Сибирской равнины/ И.Н. Семенков, Н.С. Касимов, Е.В. Терская// Вестник Московского Университета. Серия 5. География. – 2019. – № 3. – С. 25-37.

- Семенков И. Н. Латеральное распределение форм металлов в тундровых, таежных и лесостепных катенах Восточно-Европейской равнины/ И.Н. Семенков, Н.С. Касимов, Е.В. Терская// Вестник МГУ, Серия №5 География. — 2016. — № 3. — С. 29-39.
- Сиромля Т.И. Система форм соединений химических элементов в почвах и растениях юго-востока Западной Сибири/ Т.И. Сиромля //Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. – Новосибирск, 2019. – 35 с.
- Соколов И.А. Взаимодействие почвы и среды: почва–память и почва–момент/ И.А. Соколов, В.О. Таргульян // Изучение и освоение природной среды. – 1976. – С. 150-164.
- Соколов Н. Н. Рельеф и четвертичные отложения Центрального лесного заповедника. / Н.Н. Соколов //Уч. зап. Ленингр. гос. ун-та. № 124. Серия геогр. Наук. Выпуск. 6. – Л., 1946.
- Соколова Т. А. Биологические характеристики и содержание подвижных соединений Fe, Al и Si в ризосфере ели в подзолистой почве/ Т.А. Соколова, И.И. Толпешта, Л.В. Лысак, Ю.А. Завгородняя, Т.С. Чалова, М.М. Карпухин, Ю.Г. Изосимова // Почвоведение. – 2018. – № 11. – С. 1330-1339.
- Соколова Т.А. Глинистые минералы в почвах/ Т.А. Соколова, Т.Я. Дронова, И.И. Толпешта. – Москва: Гриф и К., 2005. – 336 с.
- Соколова Т.А. Соединения Al, Fe и Si в вытяжках Тамма и Мера–Джексона в перегнойно-торфянисто-подзолисто-глеевой почве: содержание, запасы, распределение по профилю и гранулометрическим фракциям/ Т.А. Соколова, И.И. Толпешта, Ю.Г. Максимова // Почвоведение. – 2014. – № 5. – с. 537-545.
- Соловьев А.Г. Использование комплексных вытяжек для определения доступных форм микроэлементов в почвах/ А.Г. Соловьев// Мониторинг фонового загрязнения природных сред. – 1989. – Вып.5. – С. 216-227.
- Сосорова С.Б. Содержание микроэлементов и железа в почвах и растениях бассейна озера Котокельское (Западное Забайкалье)/ С.Б. Сосорова, А.Б. Гынинова, М.Г. Меркушева, Л.Л. Убугунов, Л.Н. Болонева //Почвоведение. – 2012. – № 4. – С. 429-438.
- Степанова М.Д. Элементы в органическом веществе почв (черноземы и дерново-подзолистых) / М.Д. Степанова. – Новосибирск: Наука, 1976. – 106 с.
- Сулова С.Б. Геохимические особенности фоновых ландшафтов Верхневолжья (на примере озера Селигер) / С.Б. Сулова, Т.М. Кудерина, Г.С. Шилькрот // Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию М.А. Глазовской). — 2012. — С. 308–310.
- Сулова С.Б. Атмогеохимические особенности ландшафтов Тверской области/ С.Б. Сулова, Т.М. Кудерина, Г.С. Шилькрот // Геохимия ландшафтов (к 100-летию А.И. Перельмана). — 2016. — Т. 32. — С. 555–558.
- Таранина С.Р. Тяжелые металлы в почвах среднетаежных ландшафтов Архангельской области/ С.Р. Таранина// Географический анализ природных и социально-экономических образований: Тезисы научно-практической конференции. – 1992. –С. 98-103.
- Таргульян В.О. Структурный и функциональный подход к почве: почва-память и почва-момент/ В.О. Таргульян, И.А. Соколов // Математическое моделирование в экологии. –1978. – С.17-33.
- Таргульян В.О. Память почв: теоретические основы концепции, современное состояние и перспективы развития/ В.О. Таргульян, М.А. Бронникова// Почвоведение. – 2019. – № 3. – С. 259-275. DOI: 10.1134/S0032180X19030110
- Терехина Н.В. Методические указания к проведению фитогеохимических исследований: учебно-методическое пособие/ Н.В. Терехина. – СПб, 2010. – 25 с.
- Толпешта И.И. Подвижные соединения алюминия в почвах катен южной тайги (на примере почв Центрально-Лесного заповедника) / И.И. Толпешта, Т.А. Соколова // Почвоведение. – 2010. – № 8. – С. 959-968.

- Тонконогов В.Д. Глинисто-дифференцированные почвы Европейской России/ В.Д. Тонконогов. – М: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1999. – 155 с.
- Урусевская И.С. Почвенные катены Нечерноземной зоны РСФСР / И.С. Урусевская // Почвоведение. – 1990. – № 9. – С. 12-27.
- Хентов В.Я. Процессы комплексообразования природного и техногенного происхождения/ В.Я. Хентов, В.В. Семченко, Е.Ю. Шачнева. – Москва, 2017 – 265 с.
- Чеботарева Н.С. Ледниковые потоки валдайского ледникового покрова/ Н.С. Чеботарева // Краевые образования материковых оледенений. – М.: Наука, 1972. – 309с.
- Шапошников Е.С. Растительный покров Центрально-Лесного заповедника/ Е.С. Шапошников // Комплексные биогеоэкологические исследования в Центрально-Лесном заповеднике за 50 лет. – 1982. – с. 11-12.
- Шихова Л.Н. Динамика запасов углерода в почвенном ярусе лесной таежной экосистемы / Л.Н. Шихова, О.А. Зубкова, Е.А. Русских, Е.В. Корякина// Вестник Удмуртского ун-та. Серия Биология. Науки о Земле. – 2011. – Вып. 4. – С. 31-39.
- Adriano D.C. Trace elements in the terrestrial environment / D.C. Adriano. – N.Y., Berlin, Heidelberg, Tokyo: Shpringer – Velag, 2001. – 867 p.
- Alloway B. J. Heavy Metals in Soils, Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability /B.J. Alloway// Environmental Pollution. – Vol. 22. – 2013. – 614 p.
- Bade C. Chemical properties of decaying wood in an old-growth spruce forest and effects on soil chemistry/ C. Bade, M. Jacob, C. Leuschner, M. Hauck // Biogeochemistry, 2015. – Vol. 122. - pp 1–13.
- Barsova N. Transport parameters and sorption-desorption of Zn and Cu Sin soddy soils of the Upper Volga. In: Competitive Sorption and Transport of Heavy Metals in Soils and Geological Media /N. Barsova, G. Mozutova. – FL: CRC Press, 2012. – pp 233–266.
- Basta, N.T., Ryan, J.A., Chaney, R.L. Trace element chemistry in residual-treated soils: Key concepts and metal bioavailability /N.T. Basta, J.A. Ryan, R.L. Chaney// J. Environ. Qual., 2005. – 34:49–63. DOI: 10.2134/jeq2005.0049dup
- Beckwith C.W. Anisotropy and depth related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat: I. Laboratory measurements/ C.W. Beckwith, A.J. Baird, A.L. Heathwaite// Hydrol. Process, 2003. – №17(1). – pp 89–101. DOI: 10.1002/(ISSN)1099-108510.1002/hyp.v17:110.1002/hyp.1116
- Berg D. Recent trends in atmospheric deposition of trace elements in Norway as evident from the 1995 moss survey/ D. Berg, E. Steinnes// Sci. Total Environ. – 1997. – 208. – pp. 197–206.
- Bogunovic I. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil/ I. Bogunovic, M. Mesic, Z. Zgorelec, J. Aurisic, D. Bilandzija// Soil Till Res. – 2014. – 144. – pp. 174-183.
- Borda M.J. Kinetics and Mechanism of Sorption-Desorption in Soils: A Multiscale Assessment / M.J. Borda, D.L. Sparks //Biophysico-Chemical Processes of Heavy Metals and Metalloids in Soil Environments. – New York, 2008. – pp. 97-125.
- Borch T. Biogeochemical redox processes and their impact on contaminant dynamics/ T. Borch, R. Kretzschmar, A. Kappler, P. Van Cappellen, M. Ginder-Vogel, A. Voegelin // Environ Sci Technol. – 2010. – 44. – pp. 15–23.
- Bolan N. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils - To mobilize or to immobilize?/ N. Bolan, A. Kunhikrishnan, R. Thangarajan, J. Kumpiene, J. Park, T. Makino, M.B. Kirkham, K. Scheckel// Journal of Hazardous Materials. – 2014. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.018
- Boruvka L. Speciation of cadmium, lead and zinc in heavily polluted soil/ L. Boruvka, S. Kristoufkova, J. Kozak, A. Huan Wei //Rostlinna Vyroba. –1997. – 43. – pp. 187–192.
- Boyd C.E. Water Quality Protection/ C.E. Boyd //Water Quality. – 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-23335-8\_18

- Brummer G.W. The importance of chemical speciation in environmental processes/ G.W. Brummer. – Berlin: Springer, 1986. – 169 p.
- Burachevskaya M. Assessment of extraction methods for studying the fractional composition of Cu and Zn in uncontaminated and contaminated soils Burachevskaya M., Minkina T., Bauer T., Mandzhieva S., Gülser C., Kızılkaya R., Sushkova S. and Rajput V. Eurasian Journal of Soil Science. – 2020. – 9(3). DOI: 10.18393/ejss.734601
- Caporale A.G. Chemical Processes Affecting the Mobility of Heavy Metals and Metalloids in Soil Environments/ A.G. Caporale, A. Violante// Curr Pollution Rep. – 2016. – 2. – pp. 15–27. DOI: 10.1007/s40726-015-0024-y
- Chung J.B. Chromium oxidation potential and related soils characteristics in arable upland soils/ J.B. Chung// Commun Soil Sci. Plant Anal. – 2001. – 32. – pp. 1719–1733.
- Covelo EF, Vega FA, Andrade ML. Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components/ E.F. Covelo, F.A. Vega, M.L. Andrade// J Hazard Mater. – 2007. – 140. – pp. 308–15.
- Enchilik P.R. Vertical And Spatial Distribution Of Major And Trace Elements In Soil Catena At The Central Forest State Naturфд Biosphere Reserve (Se Valdai Hills, Russia)/ P.R. Enchilik, I.N. Semenov // Geography, Environment, Sustainability. – 2022. – 3(15). – pp. 99-119. DOI: 10.24057/2071-9388-2022-038
- Evseev A.V. Toxic metals in soils of the Russian North/ A.V. Evseev, T. M. Krasovskaya// Journal of Geochemical Exploration. 2017. –V. 174. – pp. 128-131.
- Fan T.-T. Effects of soil organic matter on sorption of metal ions on soil clay particles/ T.-T. Fan, Yu-J. Wang, Ch.-B. Li, D.-M. Zhou, S.P. Friedman // Soil Science Society of America J. – 2015. – Vol. 79. – pp. 794–802.
- Filgueiras A.V. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples/ A.V. Filgueiras, I. Lavilla, C. Bendicho // J. Environm. Monitoring. – 2002. – Vol. 4. – Iss. 6. – pp. 823–857.
- Fu W. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements/ W. Fu, K. Zhao, P. Jiang, Z. Ye, H. Tunney, C. Zhang // Soil Res. – 2013. – 51. – pp. 503-512.
- Fujikawa Y. Vertical distributions of trace metals in natural soil horizons from Japan. Part 1. Effect of soil types/ Y. Fujikawa, M. Fukui, A. Kudo // Water, Air, and Soil Pollution. – 2000. DOI: 10.1023/A:1005120204500
- Gandois A. Localisation and mobility of trace metal in silver fir needles/ Probst A. Gandois // Chemosphere. – 2012. – Vol. 87. – pp. 204-210.
- Grigg, B.Y.J.L. A rapid method for the determination of molybdenum in soils/ B.Y.J.L. Grigg// The Analyst. – 1953. – 78. – pp. 470-473.
- Grønflaten K. Comparison of Four Different Extraction Methods to Assess Plant Availability of Some Metals in Organic Forest Soil Soil/ K. Grønflaten, E. Steinnes //Science and Plant Analysis. – 2005. – 36. – pp. 2699–2718.
- Guidelines for soil description, 4th edition. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.
- Hou H. Concentrations of Ag, In, Sn, Sb and Bi, and their chemical fractionation in typical soils in Japan/ H. Hou, T. Takamatsu, M.K. Koshikawa, M. Hosomi// European Journal of Soil Science. – 2006. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2005.00731.x
- Hou H. Concentration of Ag, In, Sn, Sb and Bi, and their chemical fractionations in typical soils in Japan/ H. Hou, R. Swennen, J. Deckers, R. Maquill, // Eurasian J. Soil Sci. 57:214–277.
- Hu Z. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update/ Z. Hu, S. Gao// Chemical Geology. – 2008. – Vol. 253 (3–4). – pp. 205–221.
- Huang J.-H., Ilgen G., Matzner E. Fluxes and budgets of Cd, Zn, Cu, Cr and Ni in a remote forested catchment in Germany // Biogeochemistry, 2011. – Vol. 103, Issue 1–3, pp 59–70.
- Huang, J., & Matzner, E. (2007). Fluxes of inorganic and organic arsenic species in a Norway spruce forest floor. Environmental Pollution, 149(2), 201–208

- Huang P.M. Chemical and biochemical processes in the rhizosphere: metal pollutants/ P.M. Huang, J.J. Germida //Interactions between soil particles and microorganisms: impact on the terrestrial ecosystem. – New York: Wiley, 2002. – pp. 381-438.
- Jeske A. Mobility and distribution of barium and strontium in profiles of podzolic soils// Soil Science Annual. – 2013. – Vol. 64. – No.1. – pp. 2-7. DOI: 10.2478/ssa-2013-0001
- 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. – No. 106. – FAO, Rome, 2014.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Fourth Edition/ A. Kabata-Pendias. – CRC Press, 2011. – 548 p.
- Kabata-Pendias A., Szeke B. Trace Elements in Abiotic and Biotic Environments. 1st Edition / A. Kabata-Pendias, B. Szeke. – Boca Raton: CRC Press, 2015. – 468 p. DOI: 10.1201/b18198
- Kabata-Pendias A. Baseline zinc content of soils and plants in Poland/ A. Kabata-Pendias, B. Galczynska, S. Dudka// Environ. Geochem. Health. – 1989. –Vol. 11.–P. 19–24.
- Kabata-Pendias A. Trace elements and compounds in soils / A. Kabata-Pendias, W. Sadurski// Elements and Their Compounds in the Environment, 2nd ed. – Weinheim, Germany: Wiley, 2004. – pp. 79–99.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements from Soil to Human / A.Kabata-Pendias, A.B. Mukherjee. – Berlin: Springer-Verlag. – 2007. – 23p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-32714-1>
- Karim, Z. Heavy metal content in urban soils as an indicator of anthropogenic and natural influences on landscape of Karachi—A multivariate spatio-temporal analysis/ Z. Karim, B.A. Qureshi, M. Mumtaz, S. Qureshi// Ecological Indicators. – 2014. – 42. – pp. 20–31. DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.07.020
- Kasimov N. River Water Quality of the Selenga-Baikal Basin: Part II—Metal Partitioning under Different Hydroclimatic Conditions / N. Kasimov, G. Shinkareva, M. Lychagin, S. Chalov, M. Pashkina, J. Thorslund, J. Jarsjö// Water. – 2020. – 12. – 2392. doi:10.3390/w12092392
- Kolař S. Labile fractions of soil organic matter, their quantity and quality/ S. Kolař, S. Kužel, J. Horaček, V. Čechova, J. Borova-Batt, J. Peterka// Plant Soil Environ. – 2009. – 55. – pp. 245–251.
- Kumpiene J. Spatial variability of soil contamination with trace elements in preschools in Vilnius, Lithuania/ J. Kumpiene, E. Bränvall, R. Taraskievičius// J. Geochem. Explor. – 2011. – 108. – pp. 15–20.
- Kyzioł J. Sorption and Binding Force of Organic Substances (Peat) for Selected Cations of Heavy Metals/ J. Kyzioł. – Poland: The Polish Academy of Sciences, 2002 (in Polish).
- Laveuf C. A review on the potentiality of Rare Earth Elements to trace pedogenetic processes/ C. Laveuf, S. Cornu// Geoderma. – 2009. – pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.10.002
- Lee D.Y. Simultaneous extraction of soil phytoavailable cadmium, copper, and lead by chelating resin membrane/ D.Y. Lee, H.C. Zheng// Plant and Soil. – 1994. – 164(1) – pp. 19–23.
- Lehmann J. Spatial complexity of soil organic matter forms at nanometre scales/ J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, S. Wirick, C. Jacobsen // Nature Geoscience. – 2008. – Vol 1. – pp. 238-242.
- Li Y. Accumulation, fractionation and health risk assessment of fluoride and heavy metals in soil-crop systems in northwest China/ Y. Li, S. Wang, Z. Nan, F. Zang, H. Sun, Q. Zhang, W. Huang, L. Bao// Science of the Total Environment. – 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.257
- Linehan D.J. Mobilization of copper, manganese, and zinc in the soil solutions of barley rhizospheres/ D.J. Linehan, A.H. Sinclair, M.C. Mitchell, // Plant and Soil. –1985. – 86(1). – pp. 17-149.
- Manaka M. Amount of amorphous materials in relationship to arsenic, antimony, and bismuth concentrations in a brown forest soil/ M. Manaka// Geoderma. – 2006. – 136. – pp. 75–86. DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.02.002

- Markert B. Chemical Evolution: The Biological System of the Elements/ B. Markert, S. Fränze, S. Wünschmann. – Springer International Publishing, 2015.
- Markert B. Establishing of 'reference plant' for inorganic characterization of different plant species by chemical fingerprinting/ B. Markert// Water, Air, and Soil Pollution. – 1992. – Vol. 64. – Issue 3–4. – p. 533–538.
- Mboringong M.N. Assessment of lead, zirconium and iron concentration in soils in parts of Jos Plateau, North Central Nigeria /M.N. Mboringong, M.E.A. Brown, E.C. Ashano, A. Olasehinde //Earth Resources. – 2013. – pp. 48–53. DOI: 10.12966/er.07.02.2013
- McLaren R.G. Studies on soil copper. The fractionation of copper in soils/ R.G. McLaren, D.W. Crawford// J. Soil Sci. – 1973. – V. 24. – Iss. 2. – pp. 172–181.
- Minkina T. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil/ T. Minkina, S. Mandzhieva, M. Burachevskaya, T. Bauer, S. Sushkova// MethodsX. – 2018. – 5. – pp. 217–226. DOI: 10.1016/j.mex.2018.02.007
- Minkina T. Heavy metal compounds in a soil of technogenic zone as indicate of its ecological state / T. Minkina, S. Mandzhieva, G. Motusova, M. Burachevskaya, O. Nazarenko//Eurasian Journal of Soil Science. – 2014 – 3(2). – pp. 144–151.
- Moiseenko T.I. Occurrence forms of metals in natural waters depending on water chemistry/ T.I. Moiseenko, M.I. Dinu, N.A. Gashkina, T.A. Kremleva //Water Resources. – 2013. DOI: 10.1134/S009780781304009X
- Motuzova G.V. Soil contamination with heavy metals as a potential and real risk to the environment / G.V. Motuzova, T.M. Minkina, E.A. Karpova, N.U. Barsova, S.S. Mandzhieva // J Geochemical Exploration. – 2014. – 144(B). – pp. 241–246.
- Oleszek W. Soil, food and agroproduct contamination monitoring in Poland/ W. Oleszek, H. Terelak, B. Maliszewska-Kordybach, S. Kukuła //Polish Journal of Environmental Studies. – 2003. – Vol. 12. – No. 3. – pp. 261–268.
- Oomen A.G. Comparison of five in vitro digestion models to study the bioaccessibility of soil contaminants/ A.G. Oomen, A. Hack, M. Minekus, E. Zeijdner, C. Cornelis, G. Schoeters, W. Verstraete, T. Van de Weile, J. Wragg, C.J.M. Rempelberg, A.J.A.M. Sips, J.J. Van Wijnen // Environmental Science & Technology. – 2002. – 36. – 3326–3334.
- Pasieczna A. Mercury in soils of urbanized areas in Poland / A. Pasieczna // Geol. Rev. – 2012. – 60. – 46–58.
- Palleiro L. Metal fractionation in topsoils and bed sediments in the Mero River rural basin: Bioavailability and relationship with soil and sediment properties/ L. Palleiro, C. Patinha, M.L. Rodríguez-Blanco, M.M. Taboada-Castro, M.T. Taboada-Castro// Catena. – 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.04.019
- Peijnenburg W. J. Monitoring metals in terrestrial environmental within a bioavailability framework and a focus on soil extraction/ W. J. Peijnenburg, M. Zablotskaja, M.G. Vijver// Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2007. – 67. – pp. 163–179.
- Perelomov L.V. Molecular mechanisms of interaction of microelements with microorganisms in the environment. Direct biological transformation of microelement compounds/ L.V. Perelomov, A.N. Chulin// Biology Bulletin Reviews. – 2014. DOI: 10.1134/s2079086414040070
- Prescott C. Litter decomposition: What controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? / C. Prescott // Biogeochemistry. – 2010. – 101. – pp. 33–149.
- Puzachenko Y. Methods of evaluating thermodynamic properties of landscape cover using multispectral reflected radiation measurements by the landsat satellite/ Y. Puzachenko, R. Sandler, A. Sankovski// Entropy.— 2013. — Vol. 15, no. 9. — P. 3970–3982. DOI: 10.3390/e15093970
- Qian J. Evaluation of plant availability of soil trace metals by chemical fractionation and multiple regression analysis/ J. Qian, Z.J. Wang, X.Q. Shan, Q. Tu, B. Wen, B. Chen// Environmental Pollution. – 1996. – 91(3). – pp. 309–315. DOI: 10.1016/0269-7491(95)00066-6

- Rauret G. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials/ G. Rauret, J. F. Lo'pez-Sa'nchez, A. Sahuquillo, R. Rubio, C. Davidson, A. Ure, Ph. Quevauvillerc // *J. Environ. Monit.*, 1999. – Vol. 1. – pp. 57–61.
- Reimann C. Chemistry of Europe's agricultural soils – part A: Methodology and interpretation of the gemas data set/ C. Reimann, M. Birke, A. Demetriades, P. Filzmoser, P. O'Connor. – 2014. – 523p.
- Reimann C. Chemical Elements in the Environment. Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist/ C. Reimann, P. de Caritat. // Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag. – 1998. – 398 p.
- Reza S.K. Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system / S.K. Reza, D.C. Nayak, S. Mukhopadhyay, T. Chattopadhyay, S.K. Singh // *Arch Agron Soil Sci.* – 2017. – 63(11). – pp. 1489-1498.
- Rinklebe J. Trace elements in soils / J. Rinklebe, S.O. Yong, D. Alessi, F. Tack // *Applied Geochemistry.* – 88(A). – 2018.
- Rudnick R.L. Composition of the continental crust/ R.L. Rudnick, S. Gao // *Treatise on Geochemistry (Second Edition).* – 2014. – Vol. 4. – pp. 1-51
- Samonova O.A. Particle Size Partitioning Of Metals In Humus Horizons Of Two Small Erosional Landforms In The Middle Protva Basin – A Comparative Study/ O.A. Samonova, E.N. Aseyeva // *Geography, Environment, Sustainability.* – 2011. – Vol.13. – No 1. – pp. 260-271. DOI-10.24057/2071-9388-2019-116.
- Samonova O. A., Aseyeva E.N. Particle size partitioning of metals in humus horizons of two small erosional landforms in the middle protva basin – a comparative study/ O.A. Samonova, E.N. Aseyeva // *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY.* — 2020. — Vol. 13(1). — P. 260–271.
- Santini M.J. The Metabolism of Arsenite/ M.J. Santini, S.A. Ward – CRC Press, 2012.
- Scheckel K.G. Advances in assessing bioavailability of metal(oids) in contaminated soils/ K.G. Scheckel, R. Chaney, N.T. Basta, J.A. Ryan // *Advances in Agronomy.* – 2009. – 104. – pp. 1–52.
- Schramel, O. Study of the copper distribution in contaminated soils of hop fields by single and sequential extraction procedures/ O. Schramel, B. Michalke, A. Kettrup // *Science of the Total Environment.* – 2000. – 263. – pp. 11–22.
- Semenkov I. Data on the concentration of fractions and the total content of chemical elements in catenae within a small catchment area in the Trans Urals, Russia/ I. Semenov, V. Krupskaya, G. Klink // *Data in Brief.* – 2019. – Vol. 25. – 104224. DOI: 10.1016/j.dib.2019.104224
- Shaheen S.M. Vanadium in thirteen different soil profiles originating from Germany and Egypt: Geochemical fractionation and potential mobilization/ S.M. Shaheen, J. Rinklebe // *Applied Geochemistry.* – 2018. – Volume 88. – Part B. – pp. 288-301. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.02.010
- Sipos, P. Distribution and sorption of potentially toxic metals in four forest soils from Hungary / P. Sipos // *Central European Journal of Geosciences.* – 2009. – Vol.1–2. – pp. 183-192
- Sommer M. Archetypes of catenas in respect to matter - A concept for structuring and grouping catenas/ M. Sommer, E. Schlichting // *Geoderma.* – 1997. DOI: 10.1016/S0016-7061(96)00095-X
- Sparks D.L. Environmental Soil Chemistry. 2<sup>nd</sup> edition/ D.L. Sparks // Academic Press, San Diego, 2003.
- Stegmann R. Treatment of Contaminated Soil/ R. Stegmann, G. Brunner, W. Calmano, G. Matz // Springer, Berlin, Germany, 2001. – 658 p.
- Stern B.R. Copper and human health: Biochemistry, genetics, and strategies for modeling dose-response relationships/ B.R. Stern, M. Solioz, D. Krewski // *J. Toxicol. Environ. Health.* – 2007. – 10:157-222.
- Sukhareva T.A. Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution in the Kola Peninsula/ T.A. Sukhareva, N.V. Lukina // *Russian Journal of Ecology.* — 2014. — Vol. 45. — №2. — pp. 95–102.

- Sungur A. Geochemical fractions of trace metals in surface and core sections of aggregates in agricultural soils/ A. Sungur, Y. Kavdir, H. Özcan, R. İlay, M. Soylak// *Catena*. – 2021. – Vol. 197. – 104995. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104995
- Svete, P. Optimisation of an extraction procedure for determination of total watersoluble Zn, Pb and Cd and their species in soils from a mining area/ P. Svete, R. Milacic, B. Pihlar// *Annali di Chimica*. – 2000. Vol. 90(5–6). – pp. 323–334.
- Takeda A. Extractability of major and trace elements from agricultural soils using chemical extraction methods: Application for phytoavailability assessment/ A. Takeda, H. Tsukada, Y. Takaku, S. Hisamatsu, J. Inaba, M. Nanzyo// *Soil Science and Plant Nutrition*. – 2006. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2006.00066.x
- Tarnocai C. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region/ C. Tarnocai, J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova, S. Zimov// *Global Biogeochemical Cycles*. – 2009. – №23. – pp. 1–11.
- Tessier A. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals / A. Tessier, P.G.C. Campbell, M. Bisson // *Analytical Chemistry*. – Vol. 51. – No.7. – 1979.
- Thompson T.L. Soil C and N pools in patchy shrublands of the Negev and Chihuahuan Deserts/ T.L. Thompson, E. Zaady, P. Huancheng, T.B. Wilson, D.A. Martens // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2006. – 38 (7). – pp. 1943–1955.
- Toth G. The lucas 2012 topsoil survey and derived cropland and grassland soil properties of Bulgaria and Romania/ G. Toth, T.E. Antofie, A. Jones, B. Apostol // *Environmental Engineering and Management Journal*. – 2016. – 15(12). – pp. 2651–2662. DOI: 10.30638/eej.2016.291
- Tyler G. Rare earth elements in soil and plant systems - A review / G. Tyler// *Plant and Soil*. – 2004. – 267. – pp. 191–206. DOI: 10.1007/s11104-005-4888-2
- Uprety D. Concentration of trace elements in arable soil after long-term application of organic and inorganic fertilizers/ D. Uprety, M. Hejman, J. Száková, E. Kunzová, P. Tlustoš, // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. – 2009. – №85. – pp. 241–252.
- Ure A.M. Speciation of Heavy Metals in Soils and Sediments. An Account of the Improvement and Harmonization of Extraction Techniques Undertaken Under the Auspices of the BCR of the Commission of the European Communities/ A.M. Ure, Ph. Quevauviller, H. Muntau, B. Griepink // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. – 1993. – 51:1–4. – pp. 135–151. DOI: 10.1080/03067319308027619
- Ure A.M. Chemical speciation in the environment/ A.M. Ure, C.M. Davidson. – Glasgow: Blackie, 2001. – 464 p.
- Violante A. Elucidating Mechanisms of Competitive Sorption at the Mineral/Water Interface / A. Violante // *Agronomy*. – 2013. – Vol. 118. – pp. 111–176. DOI: 10.1016/B978-0-12-405942-9.00003-7
- Violante A. Impact of organic substances on the formation of metal oxides in soil environments/ A. Violante, G. Krishnamurti, P. Huang// *Interactions between soil particles and microorganism: impact on the terrestrial ecosystem*. – New York: Wiley, 2002. – pp. 133–88.
- Violante A. Mobility of trace elements in soil environments/ A. Violante, G. Krishnamurti, M. Pigna // *Biophysico-chemical processes of metals and metalloids in soil environments*. Hoboken: Wiley. – 2008. – pp. 169–213.
- Wan Y., Liu C. Study on adsorption of rare earth elements by kaolinite/ Y. Wan, C. Liu// *J. Rare Earths*. – 2005. – Vol. 23. – № 3. – pp. 377–381.
- Wang M. Effect of anisotropy on solute transport in degraded fen peat soils/ M. Wang, H. Liu, D. Zak, B. Lennartz// *Hydrol. Process*. – 2020. – Vol. 34 (9). – pp. 2128–2138. DOI: 10.1002/hyp.v34.910.1002/hyp.13717.
- Wang Yu. Assessing the fractionation and bioavailability of heavy metals in soil–rice system and the associated health risk/ Yu. Wang, W. Xu, J. Li, Y. Song, M. Hua, W. Li, Yu. Wen, T. Li, X. He// *Environmental Geochemistry and Health*. – 2021. – 44. – pp. 301–318. DOI: 10.1007/s10653-021-00876-4.

- Wang, E. X.,. Mechanisms controlling the mobility of lead in the spodosols of a northern hardwood forest ecosystem/ E.X. Wang, G. Benoit// *Environmental Science and Technology*. – 1996. – Vol. 30(7). – pp. 2211-2219.
- Watmough S.A. Calcium, strontium and barium biogeochemistry in a forested catchment and insight into elemental discrimination/ S.A. Watmough // *Biogeochemistry*. – 2014. – Vol. 118. – pp. 357-369.
- Wenzel W.W. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure/ W.W. Wenzel, N. Kirchbaumer, T. Prohaska, G. Stingeder, E. Lombi, D.C. Adriano// *Analytica Chimica*. – Vol. 436. – 2001. – pp. 309-323.
- Wu J. Kriging on highly skewed data for DTPA-extractable soil Zn with auxiliary information for pH and organic carbon/ J. Wu, W. A. Norvell, R. M. Welch// *Geoderma*. – Volume 134. – Issues 1–2. – 2006. – pp. 187-199.
- Xiao L. Distribution and availability of heavy metals in soils near electroplating factories/ L. Xiao, D. Guan, Y. Chen, J. Dai, W. Ding, M.R. Peart, C. Zhang // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – 26. – pp. 22596–22610. DOI: 10.1007/s11356-019-04706-0
- Xu R. Interaction between heavy metals and variable charge minerals/ R. Xu // *Molecular environmental soil science*. Chapter 8. – Dordrecht: Springer, 2013. – pp. 193-224.
- Yutong Z. Chemical fraction, leachability, and bioaccessibility of heavy metals in contaminated soils, Northeast China/ Z. Yutong, X. Qing, L. Shenggao // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2016. – 23. – pp. 24107–24114. DOI: 10.1007/s11356-016-7598-9
- Zanella A. Humusica: soil biodiversity and global change. *Bulletin of Geography*/ A. Zanella, J. Ascher-Jenull, J.-F. Ponge, C. Bolzonella, D. Banas// *Physical Geography Series*, Nicolaus Copernicus University in Torun. – 2018. – pp. 15-36.

## Приложения

## Приложение А. Описание участка исследования

Ланд-т	Координаты	Высота над уровнем моря, м	Местоположение	Рельеф	Растительность			Название почвы			
					Древесный ярус	Подлесок	Мохово-травянистый ярус	Классификация 1977	Классификация 2004	WRB	
Э	N56°27'48.7'' E 32°57'45''	265	Разрез заложен на привершинной поверхности небольшого моренного холма, максимальная высота которого составляет 267 м	Выровненная поверхность вытянутой гряды, кочки высотой от 30 см до 1 м занимают 40% поверхности, хорошо выражен микрорельеф, представленный валежником	липово-еловое с кленом остролистным <i>Ácer platanoídes</i> и вязом шершавым <i>Ulmus glábra</i> Huds. лещиново-кисличное растительное сообщество (5E+4JI+1K, B). Проективное покрытие - 60%	ель обыкновенная <i>Picea ábies</i> (35 – 37 м) возрастом 100 л, липа сердцевидная <i>Tília cordáta</i> , Клён остролиственный <i>Ácer platanoídes</i> , вяз шершавый <i>Ulmus glábra</i>	лещина обыкновенная <i>Corylus avellana</i>	мозаичный 10 – 20%, по приствольным повышениям доминирует кислица обыкновенная <i>Óxalis acetosélla</i> , на остальных участках доминируют хвощ лесной <i>Equisétum sylváticum</i> , яснотка зеленчуковая <i>Lámium galeóbdolon</i> , орляк обыкновенный <i>Pteridium aquilinum</i> , сныть обыкновенная <i>Aegoródium podagrágia</i> . В месте заложения разреза доминирует <i>Óxalis acetosélla</i> .	Маломощные дерново-глубокоподзолистые (палевоподзолистые) легкосуглинистые почвы на двучленных отложениях (покровных суглинках, подстилаемых мореной).	Грубогумусированные палево – глубокоподзолистые глубокоглееватые легкосуглинистые на двучленных отложениях (покровных легких суглинках, подстилаемых мореной) местами остаточного карбонатные.	Endocalcaric Albic Glossic Stagnic Profondic Retisols (Cutanic, Loamic)
ТЭ	56°27'47,5'' 32°56'15,4''	264	48 – 49 м на север от точки минус 24, трансекты 91/92. Крайволнистый микрорельеф с вырубки 1940 – 1950 гг. Разрез ориентирован с северо-запада на восток-юго-восток. Ширина передней стенки 70 см, боковых – 2,5 м	поверхность склона крутизной около 1°, хорошо выраженными приствольными повышениями, ложбинами. Нанорельеф представлен валежником разной степени разложивности. Передняя стенка профиля пересекает микроповышение, где растет лещина, а в травянистом ярусе доминирует медуница, хвощ, звездчатка (проективное покрытие травянистого яруса 30%)	елово-широколиственный лес (Ельник-липняковый <i>Piceeta tiliosa</i> ) (5Л+3Е+1К). Сомкнутость крон 80%. Проективное покрытие - преимущественно 20%, местами до 30%	ель возрастом около 100 – 150 лет, с диаметром ствола 50 см, высотой 30 – 40 м; древостой более молодого возраста представлен липой сердцевидной <i>Tília cordáta</i> , клёном остролистным <i>Ácer platanoídes</i> .	лещина обыкновенная <i>Corylus avellana</i> (доминант), жимолость лесная <i>Lonicera xylosteum</i> (единично),	черника <i>Vaccínium myrtíllus</i> (единично), пятнистый. По приствольным повышениям кислица обыкновенная <i>Óxalis acetosélla</i> . Много неморальных видов (яснотка зеленчуковая <i>Lámium galeóbdolon</i> , копытень европейский <i>Asarum europaéum</i> , ветреница дубравная <i>Anémone nemorósa</i> , медуница неясная <i>Pulmonária obscúra</i> ), орляк обыкновенный <i>Pteridium aquilinum</i> , звездчатка ланцетолистная <i>Stellaria holostea</i> , хвощ лесной <i>Equisétum sylváticum</i> .	маломощные дерново-глубокоподзолистые (палевоподзолистые) легкосуглинистые почвы на покровных суглинках, подстилаемых мореной	маломощные дерново-палево – глубокоподзолистые поверхностно-оглеенные языковатые легкосуглинистые на двучленных отложениях (покровных легких суглинках, подстилаемых мореной)	Albic Glossic Stagnic Profondic Retisol (Cutanic, Humic/ Ochric, Loamic)
ТЭА1	56°27'47,1'' 32°56'19,8''	263	6 – 7 м на юг-юго-восток от точки № (-32). В 8 м от просеки, отделяющей склон холма от ложбины с заболоченной лесной растительностью. Разрез ориентирован с северо-северо-запада на юг-юго-восток	сложный микрорельеф с ложбинами и искориями. Приствольные повышения	ельник чернично-сфагновый (9Е+1Л). Сомкнутость крон 20%	ель обыкновенная <i>Picea ábies</i> высотой 12(15) – 20 м	ель обыкновенная <i>Picea ábies</i> , рябина обыкновенная <i>Sórbus aucupária</i> , липа сердцевидная <i>Tília cordáta</i> , клён остролиственный <i>Ácer platanoídes</i> ; черника <i>Vaccínium myrtíllus</i>	сфагновые мхи <i>Sphagnum girgensohnii</i>	перегнойно-торфяно-подзолистая глеевая	мелкоперегнойно-торфяная глубокоподзолистая профильно-оглеенная потечногумусовая конкреционная легкосуглинистая на покровных суглинках	Albic Gleyic Histic Retisols (Cutanic, Loamic)
ТЭА2	56°27'48,0'' 32°56'21,1''	263	5 м к югу от точки минус 34. Разрез ориентирован с запада на восток	центральная часть с неглубокой потяжиной. Хорошо выраженный ветровальный микрорельеф	ельник с ивой козьею <i>Sálix cáprea</i> кислично-сфагновый (8Е+2И, Л, К)	ель обыкновенная (25 – 30 м), ива <i>Sálix</i> , липа <i>Tília cordáta</i> , клен <i>Ácer platanoídes</i> . Сомкнутость крон 50%. Валежник покрыт порослью липы. Подлесок: рябина <i>Sórbus aucupária</i>	в месте заложения разреза: сфагнум <i>Sphágnum</i> , кислица <i>Óxalis acetosélla</i> ; на приствольных повышениях – кислица <i>Óxalis acetosélla</i> и черника <i>Vaccínium myrtíllus</i> ; в микропонижениях – сфагнум <i>Sphagnum girgensohnii</i>	торфяно-подзолистые окисленно-глеевые конкреционные	мелкоторфянистая глубокоподзолистая профильно-оглеенная потечногумусовая конкреционная языковатая легкосуглинистая на двучленных отложениях (покровных суглинках, подстилаемых мореной)	Albic Gleyic Histic Profondic Retisols (Cutanic, Loamic)	

## Приложение Б. Морфологическое описание почв катены

Ланд-шафт	Название почвы Классификация, 2004	Глубина горизонта, см	Индекс горизонта			Цвет по шкале Манселла	Морфологическое описание
			1997	2004	WRB		
Э	грубогумусированные палево – глубокоподзолистые глубокоглееватые легкосуглинистые на двучленных отложениях (покровных легких суглинках, подстилаемых среднекаменистой мореной) местами остаточными карбонатными.	0 – 2(3)	A0	O	Oe	10YR 4/5	Подстилка из средне-, слаборазложившегося опада;
		2(3) – 6(12)	AdA1	ao	Oa	2,5YR 6/6	Хорошо разложившееся древесный остаток красного цвета
		6(12) – 6(14)	A1A2 (фрагмента р-ный)	AYEL	AhE	10YR 2/2	Коричнево-темно-серый, местами коричневый; влажный; мелкокомковатый; легкосуглинистый; рыхлый; с включениями корней растений диаметром до 1 см. Переход четкий. Граница слабоволнистая.
		6(14) – 32(37)	A2	ELf	Esc	10YR 6/4 10YR 6/6	Палево-светло-серый, на боковых стенках более серые и палевые пятна; влажный; непрочно-комковато-плитчатая структура; легкосуглинистый; уплотненный; единичные Fe-Mn конкреции. Переход ясный. Граница волнистая.
		32(37) – 56(63)	A2B	BEL	BE	7,5YR 6/6 10YR 7/4	Белесовато-палевый фон; тонкие вертикальные полосы и гумусовые потёки по корням; влажный; плотный; пылеватая супесь – легкий суглинок; местами Fe-Mn примазки; мелкие палево-желтые пятна вокруг мелких Fe-Mn конкреций. На сколе листоватый. Переход ясный. Граница языковатая.
						7,5YR 2,5/1	Бурый, с сизовато-белесыми языками и более яркими темно-бурыми пятнами книзу, с локальными скоплениями Fe-Mn примазок; влажный; плитчатый; легкосуглинистый, пылеватый; плотный; с включениями корней диаметром 1 – 5 мм.
		56(63) – 100	B	PBTca	2Bwk	7,5YR 6/6 10YR 7/4 10YR 6/4	Переход постепенный по цвету, ясный по гранулометрическому составу и присутствию каменных обломков. Красновато-бурый, среднесуглинистый языки из вышележащего горизонта; осветленные участки; призматичный. влажный; с включением корней диаметром 2 – 5 мм; сильно и слабо выветрелые крупные каменные обломки (гранит, гнейсы, кварцит, сильно выветрелые обломки сланцев); скопления Fe-Mn примазок.
100 – 177	BC	PBCg,ca	2BClk	7,5YR 6/6	На левой стенке разреза обломки карбонатов, вскипающих от 10% HCl. Переход ясный по исчезновению белесых языков. Красновато-бурый, неоднородный; сырой, в верхней части менее увлажнен; вязкий; преимущественно среднесуглинистый с мелкими сизовато-палевыми пятнами и Fe-Mn примазками; корни проникают до 130 см; по передней стенке практически отсутствуют крупные каменные обломки, но имеются белые обломки на глубине 110 – 135 см. Структура различима до глубины 110 см.		
177-200	C	PCg,ca	2Clk	-	-		
ТЭ	маломощные дерново-палево–глубокоподзолистые поверхностно-оглеенные языковатые легкосуглинистые на двучленных отложениях (покровных легких суглинках, подстилаемых - мореной)	0 – 2,5	A0	O	Oe		Подстилка средне- и сильно разложившаяся из листьев, веток и хвои
		2.5 – 4(8)	AdA1	ao	Oa	7,5YR 3/1	Горизонт серого цвета; влажный; неясно-комковатый; рыхлый; включения большого количества органических остатков и пронизанный живой корневой системой.
		4(8) – 10(12)	A1	AYao	Ah	7,5YR 3/1	Коричневато-серый; влажный; комковатый; легкосуглинистый; рыхлый; включения большого количества корней диаметром 1- 2 мм, древесных - 2 – 7 см. Переход ясный. Граница слабоволнистая.
		10(12) – 18(25)	A1A2 (фрагментарный)	AYEL	AhE	7,5YR 4/4 7,5YR 6/1	Коричневато-палевый, неоднородно окрашенный с более светлыми палевыми и Легкосуглинистый – супесчаный; Fe-Mn конкрециями диаметром 3 мм, включение многочисленных древесных корней диаметром до 1 см. Переход ясный. Граница волнистая.
		18(25) – 45	A2яз	ELf,g,y	Esc1	10YR 7/4	На палево с оливковым оттенком фоне ржавые темно-бурые четко очерченные пятна Fe-Mn конкреций диаметром 5 – 7 мм, наибольшее количество которых до глубины 36 см; влажный; уплотненный – близкий к плотному; непрочно-листоватый; сильнопылеватый легкий суглинок – супесь. Граница ровная с тонкими языками.
		45 – 69	A2B'	BEL1g	BEsc1	7,5YR 5/6 10YR 7/4	Неоднородно окрашен; на буром фоне белесовато-палевые языки и заклинки из вышележащего горизонта, ржавыми-темно-бурыми пятнами и примазками с некоторой полосчатостью в нижней части; влажный; плитчатый; плотный; неоднородный по плотности.
		69 – 90(92)	A2B''	BEL2g	BEsc1	10YR 5/8 10YR 6/4	Светлее вышележащего с большим количеством сизоватых пятен, с тонкими языками палево-белесого цвета по ходам корней, с большим количеством Fe-Mn примазок и светло-ржавыми разводами; влажный; плитчатый; легкосуглинистый – супесчаный. Переход ясный.

		90(92) – 124	B	ПВТca(g)	Bwsck	5YR 5/6	Красновато-бурый с Mn примазками и неконтрастными мелкими сизовато-палевыми пятнами местами с оливковым оттенком; влажный; плотный; среднесуглинистый опесчаненный; призматичная структура. Переход постепенный.
		124 – 160	BC	ПВСca	2Bwsck	5YR 5/6	Цвет и окраска аналогичны вышележащему. Влажный, мокрый в нижней части горизонта; среднесуглинистый, местами сильно опесчанен; слабовыраженная структура с элементами творожистости; включения обломков горных пород.
		160-200	C	ПCca (g)	2Cwsck	-	-
ТЭА1	мелкоперегнойно-торфяная глубокоподзолистая профильно- оглеенная потечногумусовая конкреционная легкосуглинистая на покровных суглинках	0 – 5(9)	At	O	He	5YR 2,5/1	Серовато-коричневый; влажный; уплотненный, состоит из остатков сфагновых мхов, торфяная масса пронизана корнями растений. Переход ясный. Граница пильчатая.
		5(9) – 14(18)	Ap	H	Ha	2,5YR 2,5/1	Темно-серый; сырой; уплотненный, местами рыхлый; включает красные древесные корни, полуразложившиеся органические остатки, гумус. Переход резкий. Граница волнистая.
		14(18) – 20(24)	A1A2(g)	AYELg	Etl	10YR 4/1 10YR 5/2 10YR 5/3	Серовато-белесый со слабоконтрастными более светлыми и палевыми участками; сырой; супесчаный заиленный; конкреции диаметром до 4 мм. Переход ясный. Граница слабоволнистая.
		20(24) – 34(38)	A2ox	ELnn, ox	Etosc	2,5Y 7/4 7,5 YR 6/6	Оливково-палевый с ржавыми и охристыми пятнами и конкрециями 25 – 30 %; включает отмершие корни, редкие живые корни. Сырой, плитчато-листоватый; уплотненный, плотнее вышележащего, супесчаный - легкий суглинок. пятнами и конкрециями 25 – 30 %; включает отмершие корни, редкие живые корни. Сырой, плитчато-листоватый; уплотненный, плотнее вышележащего, супесчаный - легкий суглинок
		34(38) – 70	Bg	BTg	Bwg	5Y 6/2 7,5YR 5/8	Переход ясный по уменьшению количества белесых и палевых пятен и преобладанию светло-бурого цвета. По границе горизонтов на левой стенке разреза сочится вода. Светло-бурый с зеленовато-сизыми языками по ходам корней и пятнами, общая площадь которых около 20%; включает Fe-Mn примазки и конкреции; сырой, с глубины 55 см – мокрый; легкосуглинистый; листоватый; плотный, плотнее вышележащего; с признаками горизонтальной делимости. по ходам корней и пятнами, общая площадь которых около 20%; включает Fe-Mn примазки и конкреции; сырой, с глубины 55 см – мокрый; легкосуглинистый; листоватый; плотный, плотнее вышележащего; с признаками горизонтальной делимости.
		70-100	BC	BCg	BCwg	-	-
ТЭА2	мелкоторфянистая глубокоподзолистая профильно- оглеенная потечногумусовая конкреционная языковатая легкосуглинистая на двучленных отложениях (покровных суглинках, подстилаемых мореной)	0 – 8(11)	At	T1	Ha	10YR 2/2	Торф, состоящий из двух слоев: Первый: более светлый желтовато-серый, состоящий, преимущественно, из слаборазложившегося сфагнума, а также листовенного опада, рыхлый. Второй слой: более темный, полуразложившейся опад, плотнее вышележащего. Вся торфяная масса пронизана корнями деревьев диаметром 2 – 20 мм. Переход ясный. Граница слабоволнистая.
		8(11) – 12(23)	A1A2	AYEL	Etoscl	2,5Y 2/1 2,5Y 6/2	Неоднородно окрашен из-за темно-серых затеков по белесовато-сизому фону; пятнистость 40%; сырой; среднесуглинистый; творожисто-комковатый; уплотненный.
		12(23) – 25(30)	A2g	ELg	Etosclg	10YR 5/6 10YR 6/3 7,5YR 3/4	Переход ясный. Граница мелкоязыковатая, затечная, волнистая. Белесовато-сизый с редкими железистыми пятнами; марганцевые конкреции; влажный – близкий к сырому; легкосуглинистый, алевритовый, плотный. Переход ясный. Граница слабоволнистая с горизонтальной делимостью.
		25(30) – 35	A2ox	ELox, nn	Etosclg		На белесовато-сизом фоне большое количество конкреций и ржавых пятен, пятнистость горизонта 25%; влажный; уплотнённый, местами плотный; супесчаный – легкосуглинистый.
		35 – 45(54)	A2Bg	BELg,y, nn	BEtoscl	10YR 6/4 7,5YR 7/5	Белесовато-сизый фон (40 – 50%) с ржаво-бурыми пятнами и сизыми языками до глубины 72 см, большое количество Fe-Mn конкреций на глубине 37 – 40 см; влажный, близкий к сырому; супесчаный, легкосуглинистый; уплотненный, местами плотный. Переход постепенный.
		45(54) – 76(78)	Bg	ПВТg	2Bg	7,5YR 5/6 7,5YR 6/4	На светло-буром фоне пятна и мелкие сизовато-белесые, белесовато-сизоватые языки, более темные Fe-Mn примазки; влажный – близкий к сырому; присутствуют обломки плотных каменистых валунов; листоватый; алевритовый, близкий к плотному, плотнее вышележащего. Переход постепенный по цвету, ясный по гранулометрическому составу.
		76(78) – 130	BCg	ПGca	2Crkg	10YR 5/8 – фон 7,5YR 5/8	Сизый, редкие языки, ржавые и железистые пятна; красноватый оттенок появляется с 98 см, сырой; среднесуглинистый; верхняя часть с линзами однородного песка, суглинистая часть опесчанена; нижняя часть локально опесчанена. На глубине 110 см сочится вода через песчаную толщу над водоупором.
		130 - 200	Cg	ПGca	2Crkg	-	-

## Приложение В. Зольность и содержание элементов в растениях катены

Вид	Орган	Зольность (%)	мг/кг сухого вещества																			
			As	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sr	Ti	U	W	Zn	Zr
Автономный ландшафт вершины холма																						
Ель обыкновенная	хвоя	3	<0,01	0,36	0,05	0,26	0,49	2,5	50	0,04	1961	0,07	1,98	0,003	14	0,01	11	2,3	0,01	0,05	16	0,10
	ветки > 0,5см	1	<0,01	0,26	0,27	0,32	0,27	4,5	15	0,02	574	0,07	1,29	0,002	6	0,01	10	0,9	0,01	0,05	32	0,70
	ветки <0,5см	2	<0,01	0,62	0,15	0,36	0,49	5,3	38	0,05	754	0,09	2,87	0,01	15	0,04	13	2,4	0,01	0,05	34	0,09
Липа седцевидная	кора	4	<0,01	0,60	0,56	0,35	0,23	4,0	27	0,04	609	0,08	1,46	0,04	8	0,11	22	1,0	0,01	0,05	81	0,06
	листья	7	<0,01	0,10	0,07	0,09	1,14	8,0	71	0,25	808	0,25	2,39	<0,001	110	0,50	28	2,8	0,02	0,06	21	0,44
	ветки > 1см	4	<0,01	0,98	0,10	0,21	0,72	4,4	40	0,37	346	0,18	3,18	0,01	20	0,25	50	1,8	0,01	0,05	30	0,10
Клен остролистный	ветки <1 см	5	<0,01	0,19	0,12	0,28	0,33	6,1	21	0,51	440	0,10	3,72	0,003	35	0,32	65	1,0	0,01	0,06	117	0,09
	кора	4	<0,01	0,52	0,03	0,10	0,18	5,2	17	0,05	758	0,10	1,93	0,01	9	0,12	57	0,5	0,01	0,05	3	0,04
	листья	6	<0,01	0,07	0,31	0,06	0,26	5,0	45	0,25	1553	0,19	1,84	<0,001	46	0,01	24	0,6	0,01	0,06	40	0,10
Вяз шершавый	ветки	4	<0,01	0,54	0,53	0,06	0,13	4,1	26	0,38	686	0,14	1,31	0,004	12	0,10	46	0,9	0,02	0,05	29	0,09
	кора	10	0,03	0,96	2,89	0,28	<0,043	12,0	46	0,12	4091	0,13	2,62	0,07	14	0,35	93	1,7	0,02	0,08	68	0,11
	листья	10	<0,01	0,11	0,01	0,06	0,22	5,4	47	0,75	119	0,28	1,92	<0,001	35	0,02	31	0,9	0,02	0,07	9	0,21
Лещина обыкновенная	ветки > 1см	2	<0,01	0,23	0,02	0,03	0,13	2,3	18	0,19	26	0,08	0,81	<0,001	5	0,01	21	0,8	0,01	0,06	6	0,04
	кора	9	<0,01	0,26	0,05	0,21	<0,043	10,8	26	0,23	76	0,12	2,77	0,01	22	0,02	164	0,2	0,01	0,06	6	0,04
Звездчатка ланцетолистная	листья	7	<0,01	0,14	0,03	0,11	0,59	12,9	59	0,15	1745	0,12	2,26	<0,001	66	0,17	38	2,2	0,01	0,05	28	0,17
Ветреница дубравная	листья и стебли	14	<0,01	0,26	1,59	0,21	0,84	5,4	198	0,27	1760	0,37	1,16	0,04	174	0,01	21	16,6	0,13	0,08	124	0,90
Яснотка зеленчуковая	листья и стебли	15	0,09	0,61	0,37	0,57	2,12	8,0	924	1,86	640	0,20	2,16	0,02	92	0,01	71	75,1	0,75	0,08	89	4,07
Кислица обыкновенная	листья и стебли	16	0,03	0,26	0,05	0,21	0,65	6,7	279	0,58	333	0,41	1,52	0,03	177	0,01	38	21,8	0,18	0,07	54	0,95
Орляк обыкновенный	листья и стебли	12	0,11	0,29	0,03	0,19	0,64	7,1	203	0,33	617	0,25	1,08	0,03	114	0,01	26	18,7	0,10	0,07	27	1,18
Орляк обыкновенный	листья и стебли	9	0,04	0,38	0,26	0,32	5,22	8,5	443	5,16	630	0,70	4,10	0,03	144	0,10	14	42,6	0,26	0,08	31	2,20
Трансэлювиальный ландшафт пологого склона																						
Ель обыкновенная	хвоя	4	<0,01	0,19	0,18	0,19	<0,04	2,3	33	0,05	1353	0,06	1,19	0,03	12	0,02	17	1,2	0,01	0,05	28	0,04
	ветки > 0,5см	2	<0,01	0,26	0,33	0,25	<0,04	3,7	18	0,03	358	0,04	1,08	0,05	5	0,01	14	1,0	0,01	0,05	32	0,03
	ветки <0,5см	2	<0,01	0,87	0,31	0,38	0,47	4,2	47	0,07	714	0,06	2,10	0,07	15	0,02	22	2,2	0,01	0,06	48	0,12
Липа седцевидная	кора	4	<0,01	0,29	0,82	0,27	<0,04	4,3	16	0,04	519	0,05	1,06	0,01	5	0,01	18	0,8	0,01	0,05	81	0,03
	листья	7	<0,01	0,10	0,10	0,07	0,46	8,8	51	0,23	539	0,19	1,47	<0,001	72	0,71	28	2,4	0,01	0,06	24	0,07
	ветки > 1см	5	<0,01	0,27	0,07	0,10	0,29	2,9	11	0,29	142	0,08	2,15	0,002	13	0,04	32	0,3	0,01	0,06	36	0,02
Клен остролистный	ветки <1 см	6	<0,01	0,29	0,11	0,12	0,26	4,6	15	0,35	186	0,09	1,91	0,002	17	0,08	47	0,3	0,01	0,07	67	0,04
	кора	7	<0,01	0,11	0,02	0,09	<0,04	3,7	14	0,02	528	0,07	1,47	0,01	10	0,10	57	0,2	0,01	0,10	2	0,03
	листья	6	<0,01	0,38	0,51	0,05	0,55	6,5	48	0,05	1336	0,17	1,07	0,002	51	0,01	22	0,6	0,01	0,08	46	0,04
Лещина обыкновенная	ветки > 1см	3	<0,01	0,18	0,36	0,03	0,21	2,4	11	0,03	377	0,10	0,82	0,002	9	0,09	20	0,6	0,01	0,08	12	0,02
	кора	10	<0,01	0,16	0,76	0,17	<0,04	5,0	15	0,07	1555	0,06	2,05	0,01	10	0,03	94	<0,03	0,00	0,05	30	0,01
Рябина обыкновенная	листья	8	<0,01	0,16	0,04	0,12	<0,04	9,6	65	0,26	1379	0,09	1,84	0,01	60	0,16	39	0,9	0,01	0,05	27	0,04
Печёночница благородная	листья	8	<0,01	0,14	0,35	0,20	0,11	7,3	56	0,05	1308	0,17	0,93	0,01	72	0,01	33	1,3	0,01	0,04	32	0,05
Подмаренник душистый	листья и стебли	9	<0,01	0,23	0,56	0,11	0,21	6,6	44	0,07	339	0,24	1,07	0,01	144	0,01	35	1,4	0,01	0,06	37	0,10
Орляк обыкновенный	листья и стебли	18	0,03	0,22	0,29	0,10	0,22	4,6	107	0,25	225	0,28	1,05	0,01	100	0,02	51	6,6	0,14	0,10	64	0,23
Яснотка зеленчуковая	листья и стебли	7	<0,01	0,15	0,61	0,08	0,89	8,0	154	1,23	566	0,24	1,72	0,01	87	0,16	11	11,3	0,06	0,09	50	0,63
Копытень европейский	листья и стебли	14	<0,01	0,23	0,04	0,08	0,26	7,7	107	0,12	248	0,29	1,09	0,04	162	0,01	40	6,2	0,04	0,06	55	0,25
Хвощ лесной	листья и стебли	14	<0,01	0,12	0,21	0,09	0,32	7,1	99	0,14	309	0,57	0,96	0,04	105	0,01	49	9,8	0,03	0,15	51	0,23
Медуница неясная	листья и стебли	23	<0,01	0,08	0,25	0,16	0,20	6,9	42	0,91	71	0,26	1,46	0,01	131	0,01	34	1,6	0,02	0,07	27	0,07
Ветреница дубравная	листья и стебли	16	<0,01	0,09	0,46	0,07	0,23	12,6	72	0,12	145	0,43	1,09	0,03	165	0,01	34	3,7	0,04	0,08	48	0,16
Ветреница дубравная	листья и стебли	15	0,04	0,34	0,43	0,21	0,85	7,5	350	0,86	309	0,27	1,28	0,01	70	0,01	63	31,4	0,19	0,07	86	1,26

Звездчатка ланцетолистная	листья и стебли	12	<0, 01	0,14	1,62	0,14	0,15	6,7	116	0,07	897	0,37	0,88	0,06	163	0,01	34	5,2	0,02	0,07	151	0,15
Кислица обыкновенная	листья и стебли	13	<0, 01	0,21	0,04	0,22	0,20	9,0	100	0,09	546	0,35	1,19	0,04	169	0,01	21	3,1	0,02	0,07	31	0,17
Трансэлювиальный аккумулятивный ландшафт нижней части склона																						
Ель обыкновенная	хвоя	4	<0, 01	0,12	0,09	0,12	0,11	2,6	38	0,03	415	0,05	0,57	<0,001	9	0,01	21	1,7	0,01	0,03	45	0,05
	ветки > 0,5см	2	<0, 01	0,43	0,17	0,11	0,12	4,7	22	0,03	167	0,06	0,56	0,01	4	0,01	18	1,3	0,01	0,08	39	0,05
	ветки <0,5см	6	<0, 01	1,07	0,14	0,17	0,42	4,8	54	0,06	258	0,06	0,96	0,01	8	0,01	22	2,8	0,02	0,07	51	0,11
Липа (подрост)	кора	4	<0, 01	0,25	0,27	0,21	0,13	2,1	29	0,02	271	0,05	1,07	0,09	5	0,01	16	1,2	0,00	0,07	83	0,04
	листья	7	<0, 01	0,12	0,05	0,05	0,39	7,4	69	0,04	204	0,15	1,03	<0,001	29	0,24	13	2,0	0,01	0,06	18	0,09
	ветки > 0,5см	4	<0, 01	0,69	0,03	0,08	0,46	4,3	30	0,03	68	0,10	1,10	0,01	7	0,23	26	1,2	0,01	0,06	14	0,09
Клен (подрост)	кора	8	<0, 01	2,01	0,04	0,12	0,46	4,8	35	0,07	297	0,05	1,26	0,01	3	0,02	51	1,3	0,01	0,06	8	0,07
	листья	5	<0, 01	0,10	0,29	0,04	0,20	3,4	36	0,02	652	0,12	0,77	<0,001	18	0,40	12	0,6	0,00	0,07	31	0,02
Рябина обыкновенная	листья	12	<0, 01	0,10	0,14	0,09	0,34	7,9	71	0,08	493	0,13	0,86	<0,001	45	0,33	18	1,3	0,02	0,05	25	0,06
Черника обыкновенная	листья	4	0,03	0,16	0,03	0,15	0,44	7,0	199	0,29	825	0,13	0,99	0,01	28	0,01	5	20,3	0,09	0,07	11	0,68
	ветки >0,5см	3	0,04	0,37	0,10	0,24	1,80	6,7	188	0,30	743	0,08	1,49	0,01	19	0,01	6	13,6	0,08	0,07	26	0,56
Трансэлювиальный аккумулятивный ландшафт потяжины																						
Ель обыкновенная	хвоя	3	<0, 01	0,22	0,05	0,15	0,12	1,8	38	0,02	437	0,07	0,70	0,01	9	0,01	9	1,3	0,01	0,06	17	0,03
	ветки > 0,5см	2	<0, 01	0,62	0,14	0,13	0,17	4,3	25	0,03	158	0,05	0,83	0,03	7	0,01	8	1,3	0,01	0,06	34	0,04
	ветки <0,5см	2	0,03	1,84	0,12	0,21	0,60	5,9	74	0,07	218	0,08	1,36	0,02	8	0,02	11	3,9	0,02	0,07	37	0,13
Ива козья	кора	6	<0, 01	0,23	0,36	0,20	0,23	2,1	20	0,02	316	0,05	0,87	0,09	8	0,01	9	0,9	0,00	0,06	82	0,03
	листья	5	0,05	0,07	0,34	0,27	<0,04	10,1	57	0,06	85	0,14	1,08	<0,001	41	0,01	27	0,5	0,00	0,12	74	0,04
	ветки > 1см	4	0,03	0,26	0,27	0,16	0,37	3,0	21	0,15	46	0,09	1,04	0,00	9	0,13	22	0,7	0,01	0,05	76	0,05
Липа (подрост)	кора	4	<0, 01	0,56	0,32	0,28	0,14	2,8	18	0,04	54	0,06	0,98	0,01	9	0,02	30	1,0	<0,001	0,06	119	0,02
	листья	6	<0, 01	0,10	0,09	0,17	0,23	8,4	101	0,04	511	0,15	1,29	0,003	48	0,45	21	1,0	0,01	0,07	13	0,05
Клен (подрост)	ветки	7	<0, 01	0,25	0,05	0,10	0,25	5,3	23	0,04	76	0,09	1,10	0,002	11	0,09	29	0,4	0,01	0,05	28	0,03
	листья	4	<0, 01	0,09	0,19	0,05	0,12	5,4	54	0,06	1757	0,12	1,16	<0,001	17	0,01	13	2,2	0,02	0,09	27	0,06
Рябина обыкновенная	листья	7	<0, 01	0,11	0,07	0,05	0,21	6,8	47	0,04	981	0,09	0,71	0,003	53	0,21	22	0,7	0,01	0,05	16	0,04
Орляк обыкновенный	листья и стебли	7	<0, 01	0,15	0,10	0,14	1,08	6,6	134	2,54	266	0,21	1,64	0,02	98	0,16	10	12,1	0,05	0,05	22	0,48
Кислица обыкновенная	листья и стебли	9	<0, 01	0,20	0,03	0,10	0,23	4,7	83	0,13	792	0,22	0,97	0,13	72	0,01	21	4,4	0,03	0,05	22	0,24
Черника обыкновенная	листья	5	<0, 01	0,09	0,04	0,06	<0,04	5,8	78	0,08	1556	0,10	0,84	<0,001	42	0,01	4	4,0	0,03	0,06	11	0,13
	ветки	3	<0,01	0,14	0,12	0,06	0,28	5,1	43	0,05	1365	0,07	0,69	0,002	22	0,01	5	2,2	0,02	0,04	27	0,09
Сфагнум	листья и стебли	4	0,10	0,00	0,20	0,40	2,90	4,8	400	0,37	584	0,40	2,00	3,70	14	0,50	18	26,2	<0,001	0,20	49	0,80
Кларки наземных растений (Ермаков, Kovalsky, 2018)			0,1	0,01	0,5	0,2	0,5	10	150	0,2	200	0,5	0,5	1	50	0,1	50	5	0,01	0,02	50	0,1

Примечание. Цветом показаны ярусы растительности: Зеленый – древостой, синий – подрост, красный – травяно-кустарничковый, коричневый – моховой.

*Приложение Г. Вариабельность (Сv, %) свойств химических элементов в горизонтах почв*

Показатель	Вся выборка		Автономный		Трансэлювиальный		Трансэлювиально-аккумулятивный		
	ао(18)	ВТ(27)	ао(9)	ВТ(9)	ао(9)	ВТ(9)	Т(9)	ВТ(9)	
Гранулометрические фракции, %	G7	100	-	100	-	100	-	-	
	G6	75	100	92	100	60	51	100	
	G5	12	20	8	19	15	17	24	
	G4	18	37	13	15	22	22	8	
	G3	20	32	14	14	24	12	24	
	G2	21	42	16	16	26	13	19	
	G1	24	32	17	12	31	9	18	
	pH	9	9	9	8	8	5	5	5
Сорг, %	27	100	26	74	29	74	-	100	
Валовое содержание, мг/кг	As	29	23	30	21	30	18	48	28
	Bi	37	100	34	100	39	100	100	100
	Cd	28	25	29	25	26	23	45	27
	Co	46	16	49	13	46	13	66	17
	Cr	14	20	12	11	14	14	91	11
	Cu	20	14	25	8	13	10	18	11
	Fe	25	15	19	9	25	9	76	10
	La	18	10	18	8	14	7	78	3
	Mn	45	25	53	27	18	25	92	22
	Mo	25	26	22	12	17	18	21	23
	Ni	31	23	14	14	42	17	49	20
	Pb	24	7	26	8	14	8	38	4
	Rb	20	10	18	5	21	7	100	4
	Sb	29	79	25	98	26	14	32	10
	Sr	18	12	19	11	17	10	79	4
	Ti	23	8	22	8	21	9	100	7
	U	14	16	13	8	8	7	58	6
	W	19	16	17	7	18	13	53	14
	Zn	27	26	28	11	21	17	21	10
Zr	24	27	25	7	22	10	100	17	
Обменные соединения, мг/кг	As	100	-	100	-	100	-	-	-
	Bi	35	-	31	-	39	-	53	-
	Cd	34	49	38	49	31	36	20	53
	Co	100	61	100	50	100	35	37	33
	Cr	-	52	-	55	-	60	100	24
	Cu	55	44	70	48	28	24	45	36
	Fe	100	56	100	43	96	68	87	35
	La	100	41	100	36	100	26	44	11
	Mn	45	42	53	32	35	24	98	42
	Ni	52	40	28	44	75	40	31	33
	Pb	48	38	52	29	46	30	36	15
	Rb	54	26	48	23	54	20	37	20
	Sr	30	21	35	9	27	14	18	19
	Ti	70	-	79	-	51	-	87	-
	U	97	20	100	20	88	16	70	25
	Zn	43	43	49	48	36	40	37	25
Zr	89	68	92	47	88	63	56	47	
Комплексные соединения, мг/кг	As	26	21	30	18	23	24	44	14
	Bi	35	35	25	13	29	48	33	40
	Cd	37	66	36	100	35	45	23	59
	Co	51	21	56	22	46	18	28	19
	Cr	31	68	38	63	11	78	43	36
	Cu	35	46	46	68	21	20	15	36
	Fe	25	31	29	18	22	29	40	27

	La	95	35	59	39	96	35	36	20
	Mn	57	41	51	49	60	22	58	39
	Mo	37	28	41	27	32	24	58	36
	Ni	38	66	27	100	49	42	15	50
	Pb	32	34	31	28	16	25	30	14
	Sb	100	-	85	-	-	-	86	-
	Ti	-	76	-	76	-	30	-	35
	W	94	57	50	67	-	3	-	38
	Zn	51	53	51	74	48	42	43	26
	Zr	48	14	55	9	44	21	65	12
Сорбированные гидроксидами Fe и Mn соединения, мг/кг	As	31	100	27	100	35	97	56	56
	Bi	-	44	-	24	-	45	-	38
	Cd	45	46	49	66	38	34	38	39
	Co	61	24	69	18	56	15	49	24
	Cr	68	18	75	23	61	14	-	13
	Cu	43	17	55	26	26	8	17	11
	Fe	37	19	33	15	34	18	40	14
	La	97	24	63	33	100	17	46	10
	Mn	85	34	68	26	97	20	94	28
	Ni	39	45	29	56	50	29	21	29
	Pb	35	23	37	20	9	25	34	19
	Rb	100	-	100	-	83	-	-	53
	Sb	100	-	85	-	-	-	-	-
	Sr	74	58	75	52	73	72	39	27
	Ti	-	47	-	40	-	25	-	17
	U	74	14	84	17	62	14	45	9
	W	57	29	53	30	57	10	-	38
	Zn	49	18	49	17	48	14	42	14
	Zr	53	29	70	13	34	26	100	22
Подвижность, %	As	24	49	24	24	24	41	90	28
	Bi	21	40	19	38	21	44	32	40
	Cd	10	35	13	47	4	24	0	30
	Co	7	15	9	13	6	13	33	13
	Cr	25	28	23	20	26	15	24	6
	Cu	17	25	22	20	13	12	13	8
	Fe	26	30	28	12	26	23	19	16
	La	72	17	52	10	89	10	28	8
	Mn	0	30	0	18	0	20	70	38
	Mo	22	44	27	62	17	27	100	29
	Ni	33	43	23	66	42	22	27	26
	Pb	0	18	0	12	0	16	0	10
	Rb	69	16	68	20	55	14	53	10
	Sb	96	-	82	-	100	-	100	-
	Sr	38	24	36	13	41	18	29	23
	Ti	24	100	23	100	27	22	72	16
	U	61	20	73	8	50	15	36	13
	W	80	31	68	43	98	17	-	21
	Zn	15	24	12	20	19	20	21	11
Zr	67	22	88	9	38	16	75	15	

Диапазоны значений C<sub>v</sub>:

	>80%		10-30%
	50-80%		<10
	30-50%		

содержание элементов ниже предела обнаружения во всех повторностях

Примечание. В скобках – количество проб. 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.

**Приложение Д. Корреляционные матрицы между свойствами почв, содержанием форм и подвижностью элементов**

Таблица Д.1. Корреляционные матрицы между свойствами почв, содержанием форм соединений и подвижностью элементов во всем профиле почв

Элемент	Свойства							pH	Сорг, %	CaCO <sub>3</sub> , %
	G7	G6	G5	G4	G3	G2	G1			
Валовое содержание										
As	-0,01	-0,15	-0,14	-0,08	0,12	0,23	0,34	-0,16	-0,36	0,06
Bi	-0,02	-0,04	0,12	-0,04	-0,08	0,00	-0,03	-0,08	-0,04	0,07
Cd	0,36	0,34	0,12	-0,26	-0,02	-0,08	-0,12	0,30	0,49	0,06
Co	-0,21	-0,31	-0,21	-0,05	0,23	0,37	0,44	0,16	-0,26	0,15
Cr	-0,14	-0,22	-0,09	-0,34	0,26	0,52	0,60	-0,03	-0,37	0,34
Cu	-0,09	-0,14	0,02	-0,42	0,13	0,49	0,63	0,13	-0,30	0,27
Fe	-0,09	-0,23	-0,33	-0,19	0,37	0,49	0,66	0,17	-0,33	0,21
La	-0,30	-0,42	-0,05	0,30	-0,15	0,01	0,20	-0,11	-0,51	-0,16
Mn	0,07	-0,05	-0,22	0,14	0,17	-0,01	-0,05	0,35	0,32	-0,06
Mo	0,07	0,10	-0,15	-0,25	0,33	0,24	0,23	0,18	0,19	0,34
Ni	0,06	-0,09	-0,06	-0,51	0,25	0,58	0,65	0,12	-0,30	0,33
Pb	0,18	0,28	0,08	-0,09	-0,04	-0,14	-0,18	0,29	0,37	-0,03
Rb	-0,24	-0,32	-0,37	-0,04	0,39	0,48	0,49	-0,05	-0,63	0,22
Sb	0,11	0,21	0,03	-0,18	0,04	0,04	0,01	0,35	0,29	0,05
Sr	-0,16	-0,27	-0,21	0,06	0,11	0,23	0,36	-0,03	-0,63	0,34
Ti	-0,08	-0,30	-0,44	0,18	0,31	0,22	0,36	0,08	-0,22	0,02
U	-0,15	-0,27	-0,16	0,68	-0,22	-0,40	-0,35	-0,22	-0,25	-0,29
W	0,00	0,02	-0,01	0,01	0,11	-0,03	-0,10	-0,03	0,01	0,04
Zn	0,40	0,29	-0,03	-0,55	0,27	0,30	0,29	0,19	0,41	0,24
Zr	-0,03	-0,25	-0,20	0,63	-0,16	-0,38	-0,30	-0,12	-0,10	-0,34
Обменные соединения (F1)										
As1	-0,10	-0,09	0,14	-0,04	-0,08	0,00	0,13	-0,09	0,07	0,02
Bi1	0,17	0,39	0,35	-0,08	-0,27	-0,37	-0,38	0,04	0,61	-0,15
Cd1	0,43	0,41	0,15	-0,21	-0,03	-0,21	-0,29	0,23	0,73	0,10
Co1	-0,01	0,06	-0,03	0,01	0,16	-0,06	-0,12	0,15	0,43	0,30
Cr1	-0,16	-0,17	-0,24	0,31	0,20	-0,07	-0,13	0,03	0,00	0,13
Cu1	-0,02	-0,13	0,11	-0,07	-0,18	0,05	0,31	-0,04	-0,33	0,34
Fe1	-0,06	-0,13	-0,11	0,43	-0,04	-0,29	-0,31	-0,12	-0,05	-0,20
La1	-0,18	-0,26	0,06	-0,18	-0,04	0,31	0,51	0,02	-0,43	0,21
Mn1	0,42	0,43	0,14	-0,19	-0,07	-0,22	-0,28	0,19	0,64	0,07
Mo1	-0,07	-0,06	0,06	0,02	-0,06	-0,03	0,10	-0,01	0,08	0,00
Ni1	-0,06	0,02	0,05	-0,39	0,23	0,32	0,37	0,26	0,16	0,53
Pb1	0,17	0,42	0,22	-0,15	-0,05	-0,26	-0,34	0,21	0,75	0,09
Rb1	0,47	0,25	0,05	-0,07	-0,16	-0,18	-0,17	0,04	0,34	-0,21
Sb1	0,00	-0,02	-0,01	-0,05	0,04	0,03	0,16	0,00	0,15	0,06
Sr1	0,09	0,05	-0,12	-0,45	0,35	0,44	0,51	0,12	-0,05	0,93
Ti1	-0,01	0,10	0,12	0,19	-0,11	-0,31	-0,41	-0,08	0,13	-0,16
U1	-0,19	-0,30	-0,13	0,24	0,03	0,03	0,11	-0,01	-0,20	0,18
W1	-0,07	-0,18	0,04	-0,03	0,01	0,07	0,22	-0,03	0,07	0,10
Zn1	0,45	0,41	0,22	-0,13	-0,16	-0,33	-0,40	0,04	0,70	-0,08
Zr1	-0,07	-0,17	-0,09	0,35	-0,10	-0,18	-0,19	-0,10	-0,12	-0,20

Элемент	Свойства							pH	Сорг, %	CaCO <sub>3</sub> , %
	G7	G6	G5	G4	G3	G2	G1			
Комплексные соединения (F2)										
As2	0,44	0,36	0,21	-0,19	-0,23	-0,22	-0,19	-0,07	0,36	-0,08
Bi2	0,37	0,51	0,25	-0,14	-0,17	-0,36	-0,44	0,19	0,93	-0,16
Cd2	0,46	0,38	0,28	-0,32	-0,14	-0,16	-0,22	0,20	0,76	-0,13
Co2	-0,07	-0,09	0,00	-0,15	0,10	0,21	0,22	0,27	0,07	0,04
Cr2	0,38	0,17	-0,07	0,04	-0,03	-0,19	-0,17	0,01	0,42	0,03
Cu2	0,49	0,50	0,24	-0,39	-0,25	-0,11	0,00	0,02	0,36	0,03
Fe2	0,17	0,32	0,21	0,13	-0,21	-0,46	-0,53	0,10	0,72	-0,31
La2	-0,10	-0,11	0,13	0,06	-0,12	-0,05	-0,07	0,09	0,11	-0,36
Mn2	0,33	0,16	0,07	-0,07	-0,05	-0,13	-0,18	0,22	0,44	-0,09
Mo2	0,12	0,28	0,24	-0,27	-0,12	-0,03	-0,10	-0,07	-0,01	-0,19
Ni2	-0,02	0,03	0,10	-0,48	0,17	0,39	0,41	0,32	0,09	0,26
Pb2	0,28	0,36	0,18	-0,10	-0,08	-0,26	-0,37	0,30	0,80	-0,15
Rb2	-0,01	0,15	0,03	-0,11	-0,04	0,03	0,10	-0,07	0,21	0,00
Sb2	0,16	0,20	0,01	-0,12	0,02	-0,04	0,04	0,05	0,30	0,04
Sr2	-0,01	0,19	0,10	-0,33	0,06	0,16	0,22	0,00	0,10	0,44
Ti2	-0,01	-0,15	-0,28	0,23	0,23	0,01	-0,13	-0,09	0,06	-0,18
U2	-0,01	-0,23	-0,31	0,03	0,29	0,23	0,35	0,16	0,06	0,12
W2	-0,14	0,02	-0,11	-0,04	0,11	0,14	0,20	0,08	0,01	-0,15
Zn2	0,59	0,47	0,28	-0,26	-0,20	-0,30	-0,35	0,05	0,81	-0,08
Zr2	-0,18	-0,23	0,11	-0,19	-0,10	0,28	0,46	0,01	-0,46	0,05
Сорбированные гидроксидами Fe и Mn соединения (F3)										
As3	0,21	0,45	0,29	0,04	-0,32	-0,47	-0,52	0,11	0,47	-0,17
Bi3	-0,16	-0,15	0,11	0,24	-0,19	-0,17	-0,24	-0,15	-0,22	-0,14
Cd3	0,52	0,50	0,25	-0,27	-0,17	-0,25	-0,31	0,18	0,81	-0,10
Co3	-0,02	-0,05	-0,10	0,07	0,13	0,01	-0,04	0,24	0,21	-0,02
Cr3	-0,23	-0,33	-0,08	0,05	0,02	0,23	0,32	-0,02	-0,47	-0,20
Cu3	0,14	0,09	0,25	-0,14	-0,22	-0,11	0,04	0,21	0,26	-0,11
Fe3	-0,11	-0,25	-0,14	0,36	-0,08	-0,12	-0,05	-0,05	-0,24	-0,34
La3	-0,22	-0,21	0,08	-0,34	0,11	0,44	0,52	0,13	-0,31	0,18
Mn3	0,32	0,18	0,03	0,01	-0,03	-0,20	-0,28	0,18	0,51	-0,11
Mo3	-0,02	-0,17	-0,31	0,02	0,32	0,22	0,32	0,16	0,07	0,11
Ni3	-0,01	0,01	0,08	-0,50	0,18	0,43	0,50	0,30	0,03	0,23
Pb3	0,30	0,41	0,14	-0,04	-0,10	-0,32	-0,43	0,26	0,77	-0,17
Rb3	0,00	0,08	-0,24	0,00	0,30	0,08	0,02	0,16	0,24	0,07
Sb3	0,01	-0,09	-0,20	0,01	0,21	0,11	0,22	0,13	0,14	0,08
Sr3	0,43	0,36	0,16	-0,32	-0,11	-0,07	-0,04	0,05	0,43	0,15
Ti3	-0,04	-0,17	-0,11	0,11	0,13	0,04	-0,08	-0,12	-0,11	-0,13
U3	-0,19	-0,31	-0,22	-0,05	0,19	0,38	0,49	0,01	-0,46	0,34
W3	-0,08	0,00	0,32	-0,13	-0,20	-0,07	0,04	-0,16	0,11	-0,03
Zn3	0,65	0,51	0,18	-0,41	-0,11	-0,11	-0,10	0,13	0,61	-0,03
Zr3	-0,19	-0,25	-0,03	-0,12	0,04	0,30	0,44	-0,02	-0,48	0,36
Потенциальная подвижность (%)										
As	0,12	0,23	0,11	0,11	-0,13	-0,31	-0,4	-0,09	0,55	-0,14
Bi	0,06	0,17	0,12	0,07	-0,05	-0,26	-0,38	-0,08	0,65	-0,14
Cd	0,09	0,12	0,04	-0,08	0,09	-0,03	-0,12	0	0,52	0,03
Co	0,19	-0,01	-0,16	-0,06	0,16	0,1	0,1	-0,02	0,01	-0,03

Элемент	Свойства							pH	Сорг, %	CaCO <sub>3</sub> , %
	G7	G6	G5	G4	G3	G2	G1			
Cr	-0,08	-0,11	-0,02	0,39	-0,15	-0,29	-0,34	-0,03	-0,01	-0,35
Cu	0,41	0,51	0,36	-0,24	-0,44	-0,31	-0,16	0,03	0,19	-0,04
Fe	0,28	0,35	0,3	0,1	-0,38	-0,49	-0,57	-0,15	0,44	-0,32
La	-0,16	-0,15	0,1	-0,36	0,12	0,41	0,42	0,14	-0,16	0,17
Mn	0,53	0,56	0,3	-0,37	-0,21	-0,2	-0,26	-0,02	0,54	-0,03
Mo	0	0,11	0,32	0	-0,32	-0,23	-0,2	-0,11	-0,05	-0,2
Ni	-0,03	0,18	0,28	-0,36	-0,01	0,09	0,1	0,21	0,44	0,16
Pb	0,1	0,14	0,02	0,04	0,04	-0,15	-0,25	-0,05	0,57	-0,1
Rb	0,31	0,32	0,21	-0,17	-0,14	-0,2	-0,23	-0,03	0,66	-0,12
Sb	0,03	0,32	0,24	0,02	-0,22	-0,33	-0,31	-0,1	0,1	-0,15
Sr	0,23	0,22	0,01	-0,53	0,24	0,32	0,38	0,12	0,24	0,81
Ti	0,04	0,18	0,18	0,13	-0,15	-0,34	-0,43	-0,07	0,22	-0,15
U	-0,22	-0,28	-0,17	-0,24	0,31	0,52	0,61	0,22	-0,38	0,54
W	-0,11	0,09	0,5	-0,15	-0,39	-0,17	-0,08	-0,19	0,08	-0,14
Zn	0,51	0,51	0,3	-0,22	-0,22	-0,35	-0,39	-0,04	0,83	-0,11
Zr	-0,16	-0,12	0,09	-0,38	0,11	0,44	0,43	0,06	-0,35	0,18
Биологическая подвижность (%)										
As	-0,02	-0,01	0,09	0,11	-0,10	-0,17	-0,16	-0,05	0,31	-0,09
Bi	0,07	0,14	0,04	0,08	0,01	-0,20	-0,28	-0,06	0,64	-0,14
Cd	0,08	0,11	0,02	-0,11	0,13	0,00	-0,08	0,02	0,51	0,08
Co	0,19	-0,02	-0,15	-0,07	0,16	0,11	0,12	-0,01	0,01	-0,03
Cr	0,11	0,05	-0,11	0,32	-0,02	-0,31	-0,40	-0,04	0,36	-0,13
Cu	0,53	0,62	0,29	-0,24	-0,36	-0,35	-0,27	-0,02	0,44	-0,04
Fe	0,47	0,58	0,36	-0,08	-0,35	-0,52	-0,59	-0,11	0,78	-0,23
La	-0,13	-0,16	0,10	-0,23	0,03	0,29	0,32	0,09	-0,16	0,07
Mn	0,50	0,55	0,32	-0,44	-0,19	-0,14	-0,19	0,00	0,50	0,03
Mo	-0,07	-0,03	0,22	0,09	-0,29	-0,20	-0,08	-0,10	-0,05	-0,21
Ni	-0,03	0,16	0,24	-0,34	0,02	0,10	0,10	0,21	0,46	0,18
Pb	0,09	0,14	0,04	0,00	0,05	-0,12	-0,22	-0,03	0,59	-0,07
Rb	0,30	0,28	0,24	-0,17	-0,17	-0,19	-0,22	-0,05	0,59	-0,13
Sb	-0,09	-0,25	-0,18	0,21	0,05	0,01	0,17	-0,06	-0,13	0,02
Sr	0,15	0,14	-0,04	-0,51	0,31	0,39	0,45	0,13	0,11	0,88
U	-0,21	-0,26	-0,11	-0,07	0,20	0,28	0,35	0,15	-0,18	0,42
W	-0,10	-0,11	0,03	-0,06	0,01	0,09	0,23	-0,01	0,09	0,00
Zn	0,42	0,46	0,27	-0,13	-0,18	-0,37	-0,46	-0,07	0,83	-0,11
Zr	-0,15	-0,12	0,10	-0,38	0,09	0,42	0,42	0,06	-0,34	0,12

Значимые корреляции при  $p < 0,05$

Значимые корреляции при  $p < 0,01$

Значимые корреляции при  $p < 0,001$

Примечание. Гранулометрические фракции: G7 – крупнопесчаная (1000–500 мкм), G6 – среднепесчаная (500–250), G5 – мелкопесчаная (250–50), G4 – крупнопылевая (50–10), G3 – среднепылевая (10–5), G2 – мелкопылевая (5–1), G1 – илистая (<1). Сорг – содержание углерода органических соединений

Д.2. Корреляционные матрицы между свойствами горизонтов почв катены и потенциальной подвижностью элементов в горизонтах почв катены

	As	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sr	U	W	Zn	Zr
А-горизонт																			
G7	0,1	0,0	0,3	0,3	-0,3	0,6	0,5	-0,2	0,4	0,2	0,0	0,3	0,3	0,0	0,6	-0,4	0,0	0,5	-0,2
G6	0,1	0,0	0,3	0,3	-0,2	0,8	0,7	-0,1	0,5	0,6	0,2	0,4	0,3	0,4	0,5	-0,5	0,2	0,4	-0,2
G5	0,0	0,1	0,3	0,1	-0,3	0,4	0,5	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,2	0,5	-0,2	0,5	0,4	0,1
G4	-0,1	0,0	-0,3	-0,2	0,4	-0,7	-0,7	0,0	-0,4	-0,6	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,7	0,5	-0,3	-0,5	0,1
G3	0,0	0,1	-0,2	-0,2	0,4	-0,7	-0,6	-0,1	-0,4	-0,5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,6	0,3	-0,4	-0,4	0,1
G2	-0,2	-0,1	-0,4	-0,4	0,3	-0,6	-0,7	-0,1	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,6	0,3	-0,3	-0,5	0,0
G1	-0,3	-0,3	-0,5	-0,4	0,2	-0,5	-0,7	-0,2	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,6	0,4	-0,1	-0,6	0,1
pH	-0,1	0,2	0,0	0,2	0,1	-0,2	-0,2	0,1	0,1	-0,5	0,1	-0,1	0,1	-0,2	0,1	0,3	-0,1	0,3	0,0
Сорг	0,4	0,6	0,7	0,5	-0,3	0,3	0,6	0,5	0,5	0,0	0,9	0,6	0,7	-0,1	0,9	-0,4	0,4	0,8	0,0
ЕL-горизонт																			
G7	-0,2	-0,2	0,0	0,3	0,0	-0,1	-0,2	0,0	-0,2	-0,3	-0,1	0,0	0,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,3	0,1	-0,1
G6	0,1	0,1	0,3	0,0	-0,2	0,3	0,5	-0,2	0,6	0,4	0,3	0,6	-0,3	0,9	0,1	-0,3	-0,1	0,6	-0,2
G5	0,2	0,4	0,2	-0,2	-0,1	0,4	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,1	-0,2	0,3	0,3	0,1	0,4	0,1	0,3
G4	0,3	0,1	-0,1	-0,2	0,0	-0,1	0,2	-0,1	0,1	0,3	-0,1	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,1	-0,4	0,0
G3	-0,2	-0,4	0,0	0,2	0,0	-0,4	-0,2	-0,3	-0,2	-0,4	-0,2	0,2	0,1	-0,1	-0,3	-0,3	-0,4	0,1	-0,4
G2	-0,4	-0,3	-0,1	0,3	0,1	-0,3	-0,3	0,0	-0,2	-0,4	-0,2	0,0	0,3	-0,3	-0,2	0,0	-0,3	0,1	-0,2
G1	-0,4	-0,3	-0,2	0,3	-0,1	0,1	-0,4	0,3	-0,4	-0,5	-0,1	-0,2	0,4	-0,4	-0,1	0,2	-0,1	0,1	0,1
pH	-0,4	0,1	0,0	0,4	0,1	0,3	-0,5	0,6	-0,1	-0,4	0,2	-0,3	0,3	-0,2	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3
Сорг	0,1	-0,2	0,6	-0,2	-0,2	-0,2	0,1	-0,3	0,0	0,0	0,5	0,8	-0,4	0,3	0,3	-0,2	0,0	0,2	-0,3
ВТ-горизонт																			
G7	-0,2	0,1	0,0	0,0	-0,3	0,0	-0,2	0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	-0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2
G6	0,1	0,3	-0,1	0,2	-0,1	-0,4	-0,2	0,0	0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	0,1	0,2	-0,1	0,4
G5	0,4	0,4	-0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	-0,1	0,1	0,3	0,0	-0,4	-0,3	0,2	-0,3	-0,4	0,4	0,3	-0,1
G4	0,1	0,0	-0,4	-0,4	0,2	0,6	0,5	-0,5	-0,2	0,2	-0,2	-0,4	0,2	0,2	-0,4	-0,1	-0,1	0,2	-0,5
G3	-0,4	-0,3	0,5	0,1	-0,4	-0,5	-0,5	0,5	0,2	-0,3	0,1	0,6	0,1	-0,3	0,6	0,4	-0,3	-0,3	0,4
G2	-0,4	-0,3	0,4	0,2	-0,4	-0,6	-0,5	0,5	0,1	-0,3	0,1	0,6	0,1	-0,3	0,6	0,3	-0,2	-0,4	0,4
G1	-0,4	-0,4	0,4	0,3	-0,4	-0,5	-0,6	0,4	-0,1	-0,3	0,2	0,6	0,2	0,0	0,5	0,4	-0,2	-0,2	0,2
pH	-0,4	0,0	0,2	0,3	-0,2	-0,3	-0,7	0,3	0,1	-0,2	0,6	0,1	0,1	0,1	0,6	0,1	0,0	0,1	0,5
Сорг	0,1	-0,5	0,1	0,1	-0,1	0,3	0,2	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,3	0,3	0,3	0,0	0,4	-0,1	-0,1	-0,4
Сса-горизонт																			
G7	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-0,1	0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	-0,3	0,0	-0,1
G6	-0,3	0,1	0,1	0,0	-0,4	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	0,2	-0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0
G5	0,4	0,4	0,1	0,3	0,0	0,2	0,2	0,0	0,3	0,4	-0,1	0,1	0,1	0,4	-0,3	-0,3	0,6	0,4	0,2
G4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	0,2	0,0	0,0	0,2	0,6	-0,3	0,0	0,1	-0,2	-0,4	0,0	0,3	-0,1
G3	-0,4	-0,3	-0,1	-0,3	-0,1	-0,5	-0,2	0,1	-0,1	-0,4	-0,3	0,1	-0,1	-0,4	0,4	0,5	-0,5	-0,5	-0,1
G2	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,6	-0,2	0,1	-0,1	-0,4	-0,3	0,1	0,0	-0,4	0,3	0,5	-0,3	-0,5	0,0
G1	-0,4	-0,4	0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,4	-0,2	-0,4	-0,6	-0,3	0,2	-0,2	-0,3	0,5	0,6	-0,4	-0,4	-0,3
pH	-0,3	-0,4	0,2	-0,3	-0,5	-0,3	-0,6	-0,5	-0,5	-0,7	-0,3	-0,1	-0,5	-0,5	0,7	0,6	-0,3	-0,3	-0,3
Сорг	0,2	-0,5	-0,2	0,2	-0,1	0,1	0,3	0,3	0,1	-0,1	0,2	-0,2	0,2	-0,2	0,0	0,2	-0,1	-0,2	-0,3

Примечание. Гранулометрические фракции (%): G7 – крупнопесчаная (1000–500 мкм), G6 – среднепесчаная (500–250), G5 – мелкопесчаная (250–50), G4 – крупнопылевая (50–10), G3 – среднепылевая (10–5), G2 – мелкопылевая (5–1), G1 – илистая (<1). Сорг – содержание углерода органических соединений (%). Красным выделены значимые коэффициенты корреляции при  $p < 0,05$

Д.3. Корреляционные матрицы между свойствами горизонтов почв катены и потенциальной подвижностью элементов в горизонтах почв катены

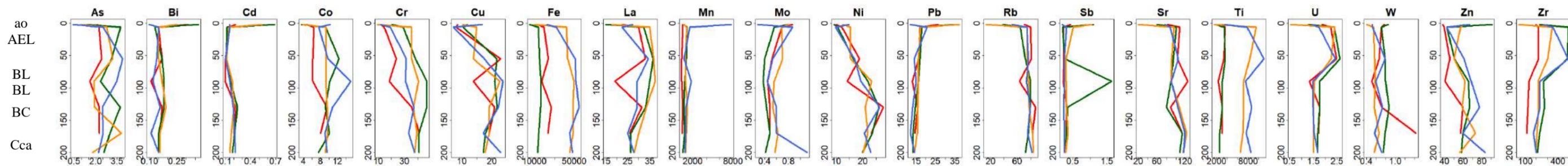
	As	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sr	U	W	Zn	Zr
А-горизонт																			
G7	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	0,1	0,6	0,6	-0,2	0,7	-0,1	-0,2	-0,1	0,3	-0,3	0,6	-0,4	-0,3	0,5	-0,2
G6	-0,2	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3	0,8	0,8	-0,3	0,6	-0,1	0,0	-0,2	0,2	-0,4	0,4	-0,7	-0,4	0,3	-0,1
G5	0,3	-0,2	-0,3	-0,4	-0,1	0,2	0,4	0,1	0,3	-0,1	0,4	-0,3	0,5	-0,6	0,5	-0,3	0,2	0,3	0,5
G4	0,0	0,3	0,2	0,3	0,1	-0,7	-0,8	0,1	-0,7	0,1	-0,2	0,2	-0,4	0,5	-0,7	0,6	0,2	-0,5	-0,1
G3	0,0	0,5	0,4	0,4	0,1	-0,7	-0,7	0,2	-0,7	0,2	-0,1	0,4	-0,4	0,6	-0,6	0,5	0,2	-0,4	-0,2
G2	0,0	0,4	0,4	0,4	0,1	-0,6	-0,8	0,1	-0,7	0,2	-0,2	0,4	-0,5	0,6	-0,6	0,6	0,2	-0,4	-0,2
G1	-0,2	0,1	0,1	0,3	0,0	-0,5	-0,8	-0,1	-0,6	0,0	-0,3	0,1	-0,5	0,5	-0,8	0,5	0,1	-0,5	-0,2
pH	0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,2	0,1	-0,3	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,2	0,5	-0,1	0,5	-0,3
Сорг	0,6	0,4	0,3	0,2	0,5	0,3	0,6	0,5	0,4	0,4	0,8	0,3	0,7	-0,2	0,8	-0,3	0,4	0,5	0,3
ЕL-горизонт																			
G6	-0,2	0,2	0,1	0,6	-0,1	0,0	-0,3	0,1	-0,3	-0,2	0,0	0,4	0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	-0,2	-0,1
G5	0,2	-0,1	0,1	-0,4	0,2	0,2	0,2	0,0	0,4	0,2	0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,2	0,2	-0,1	-0,2	0,3
G4	0,2	-0,3	-0,2	-0,4	0,2	0,1	0,4	-0,2	0,2	0,1	0,1	-0,4	-0,3	0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,3	-0,1
G3	-0,2	0,2	0,1	0,4	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,4	-0,2	-0,1	0,3	0,1	0,0	-0,2	-0,3	0,0	0,1	-0,2
G2	-0,3	0,2	0,1	0,5	-0,3	-0,2	-0,4	0,2	-0,3	-0,2	-0,2	0,2	0,2	-0,1	0,0	0,0	0,1	-0,1	0,0
G1	-0,1	0,5	0,2	0,6	-0,2	-0,1	-0,5	0,4	-0,3	0,1	0,0	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4	-0,1	0,0
pH	-0,1	0,5	0,3	0,3	-0,2	0,0	-0,7	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3	-0,1	0,8	0,3	0,4	-0,2	0,5
Сорг	0,3	-0,1	0,0	-0,2	0,4	0,0	0,4	-0,7	-0,1	0,1	0,3	0,4	-0,6	0,5	-0,6	-0,5	-0,1	0,3	-0,7
ВТ-горизонт																			
G7	-0,3	0,1	-0,3	0,1	0,3	-0,3	0,1	-0,3	0,1	-0,1	-0,3	-0,3	0,1	-0,3	-0,1	0,2	-0,2	-0,1	0,3
G6	-0,1	0,1	-0,2	0,2	0,3	-0,4	-0,1	-0,4	0,1	-0,1	-0,3	0,0	0,1	-0,4	-0,1	0,3	-0,1	-0,1	0,5
G5	-0,1	-0,3	-0,2	0,0	0,4	0,1	0,6	0,0	0,1	0,2	-0,2	-0,5	-0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	0,5	-0,1
G4	0,0	0,1	0,1	-0,2	0,2	0,6	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	-0,4	-0,3	0,4	0,3	-0,3	0,1	0,4	-0,4
G3	0,1	0,1	0,1	0,1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,1	-0,2	-0,3	-0,2	0,7	0,2	-0,2	-0,1	0,4	0,0	-0,7	0,2
G2	0,0	0,1	0,1	0,2	-0,4	-0,5	-0,5	0,0	-0,2	-0,3	-0,2	0,6	0,3	-0,3	-0,1	0,3	0,0	-0,7	0,3
G1	0,1	0,2	0,2	0,1	-0,4	-0,3	-0,6	0,1	-0,3	-0,2	-0,1	0,7	0,3	0,0	0,0	0,4	0,2	-0,6	0,2
pH	0,3	0,5	0,2	0,1	-0,1	0,1	-0,7	-0,2	-0,3	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,3	0,0	0,4
Сорг	0,2	0,2	-0,1	-0,4	-0,1	0,2	0,1	0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	0,1	0,1	0,0	0,3	0,1	-0,2	-0,5
Сса-горизонт																			
G7	-0,3	0,2	-0,1	-0,2	0,0	-0,2	-0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-0,2	0,0	-0,2	0,3	0,0	0,1	0,2	0,0	-0,1
G6	-0,1	0,3	0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	0,6	-0,1	0,5	-0,1	-0,1	-0,3	-0,2	0,1	0,0	0,2
G5	0,5	-0,2	-0,1	0,4	-0,3	0,4	0,2	0,1	0,3	0,4	0,5	0,0	0,2	-0,2	-0,2	-0,1	0,1	0,3	0,3
G4	0,0	-0,4	-0,1	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	-0,3	0,1	-0,5	0,3	-0,1	0,0	0,0	-0,2	-0,1	0,1
G3	-0,4	0,2	0,1	-0,3	0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	0,0	-0,2	0,1	0,3	0,2	-0,1	-0,2	-0,3
G2	-0,3	0,2	0,0	-0,3	0,2	-0,4	-0,1	0,0	-0,2	-0,3	-0,3	0,0	-0,1	0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,3	-0,3
G1	-0,2	0,4	0,5	-0,6	0,6	-0,2	-0,5	-0,4	-0,6	-0,3	-0,7	0,2	-0,5	0,4	0,6	0,3	0,0	0,0	-0,6
pH	0,1	0,2	0,7	-0,6	0,4	0,2	-0,8	-0,7	-0,8	-0,5	-0,5	0,1	-0,8	0,9	0,6	0,4	0,1	0,4	-0,8
Сорг	-0,3	-0,4	-0,4	0,3	-0,4	-0,2	0,4	0,4	0,3	-0,3	0,2	-0,5	0,4	-0,2	-0,6	-0,4	-0,1	-0,5	0,2

Примечание. Гранулометрические фракции (%): G7 – крупнопесчаная (1000–500 мкм), G6 – среднеспесчаная (500–250), G5 – мелкочесчаная (250–50), G4 – крупнопылевая (50–10), G3 – среднеспылевая (10–5), G2 – мелкопылевая (5–1), G1 – илистая (<1). Сорг – содержание углерода органических соединений (%). Красным выделены значимые коэффициенты корреляции при  $p < 0,05$

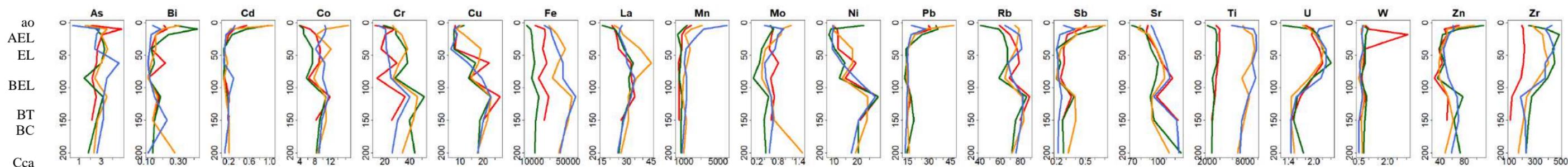
**Приложение Е. Сезонная динамика радиального распределения элементов в текстурно-дифференцированных почвах катены**

**Е.1. Радиальное распределение валового содержания химических элементов (мг/кг) в почвах**

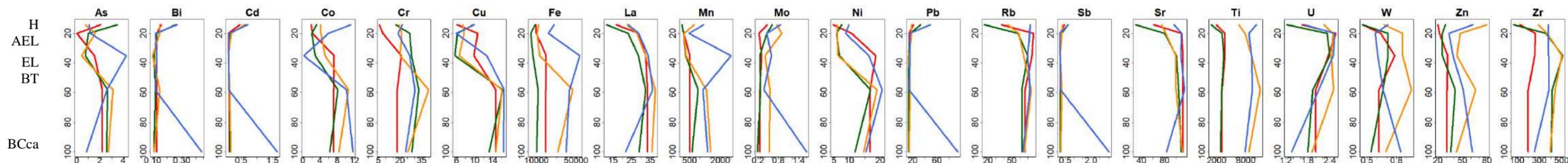
**Грубогумусированная палево-подзолистая почва автономного ландшафта**



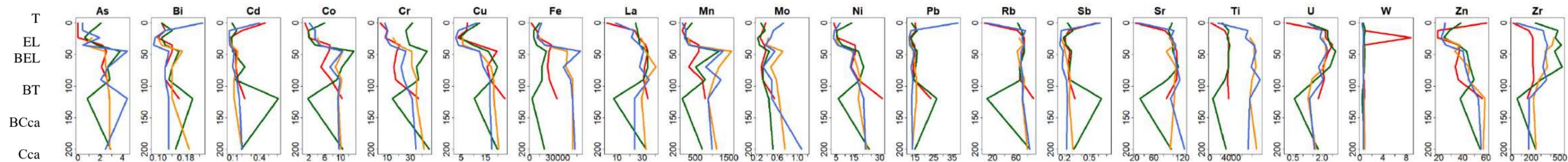
**Дерново-палево-подзолистая почва трансэлювиального ландшафта**



**Торфянисто-перегнойная подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта нижней части склона**



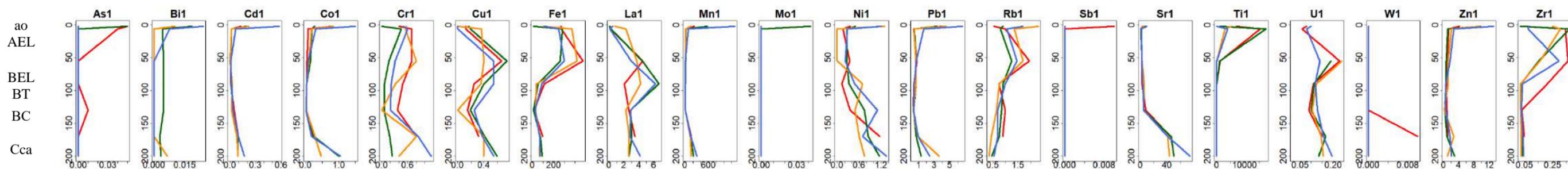
**Торфянистая подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта потяжины**



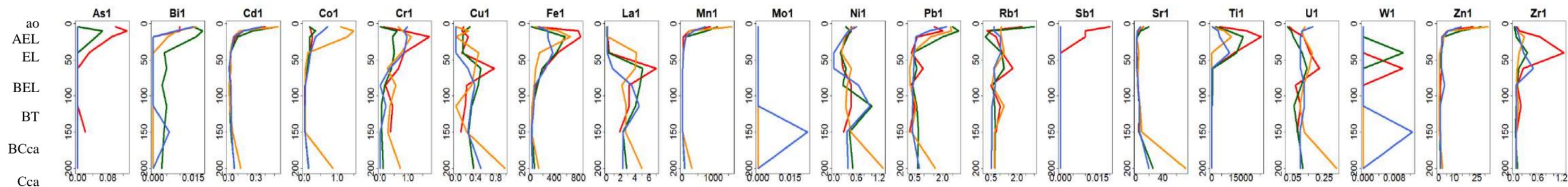
Цвета́ми показаны сезоны опробования: красным – сентябрь (2016), зеленым – июнь (2017), оранжевым – ноябрь (2017), синим – май (2018)

Е.2. Радиальное распределение обменных (F1) форм химических элементов (мг/кг) в почвах

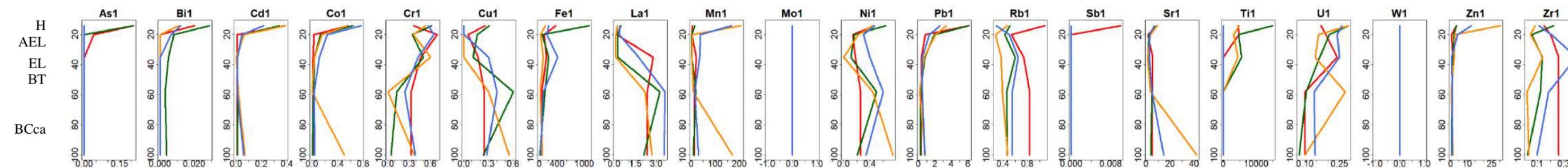
Грубогумусированная палево-подзолистая почва автономного ландшафта



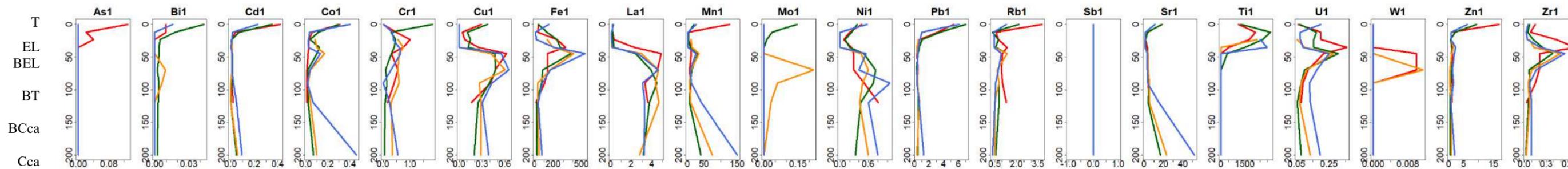
Дерново-палево-подзолистая почва трансэлювиального ландшафта



Торфянисто-перегнойная подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта нижней части склона



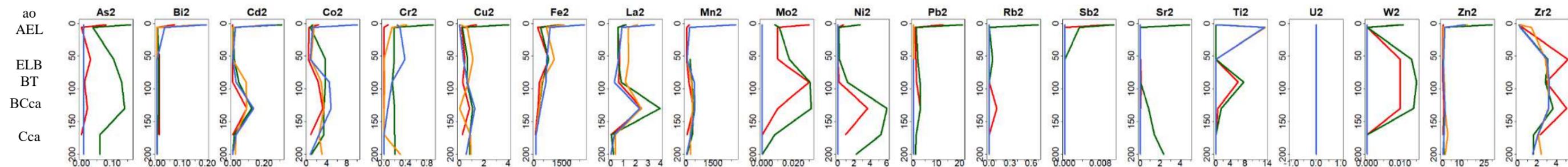
Торфянистая подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта потяжины



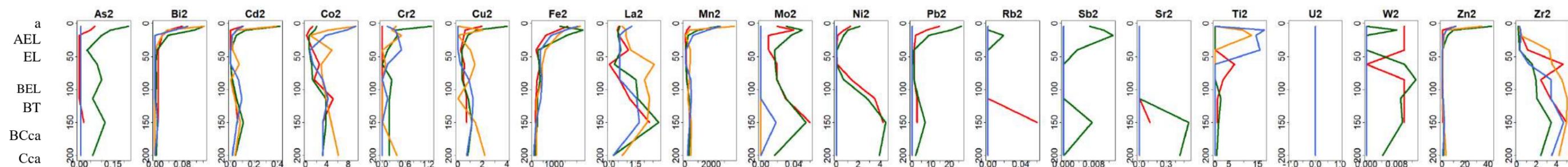
Цвета́ми показаны сезоны опробования: красным – сентябрь (2016), зеленым – июнь (2017), оранжевым – ноябрь (2017), синим – май (2018)

Е.3. Радиальное распределение органоминеральных (F2) форм химических элементов (мг/кг) в почвах

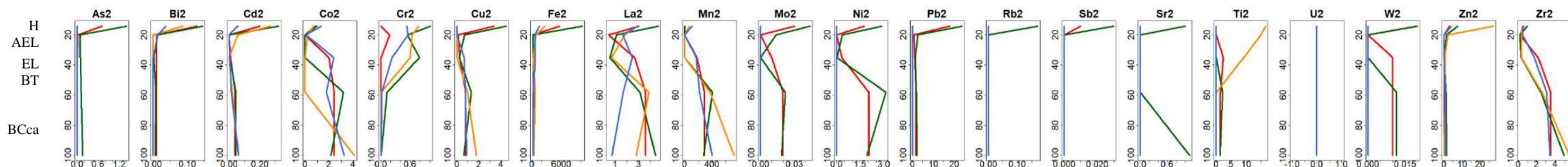
Грубогумусированная палево-подзолистая почва автономного ландшафта



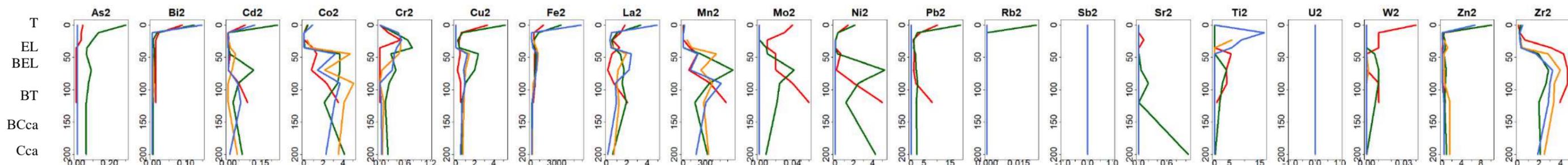
Дерново-палево-подзолистая почва трансэлювиального ландшафта



Торфянисто-перегнойная подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта нижней части склона



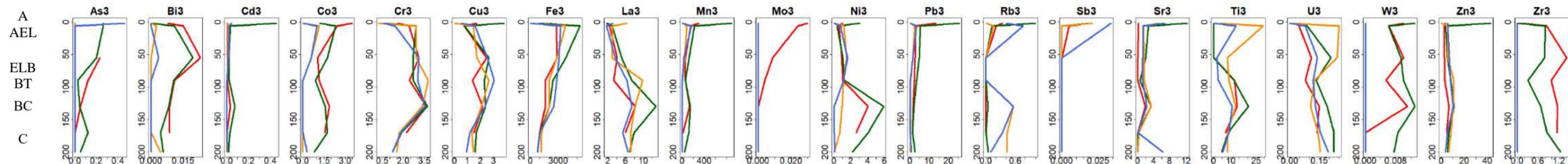
Торфянистая подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта потяжины



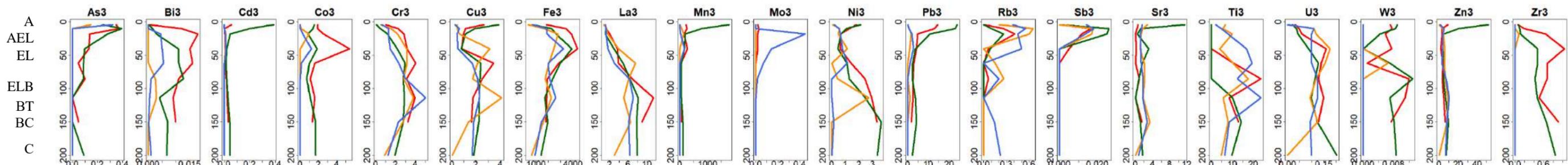
Цвета́ми показаны сезоны опробования: красным – сентябрь (2016), зеленым – июнь (2017), оранжевым – ноябрь (2017), синим – май (2018)

Е.4. Радиальное распределение сорбированных гидроксидами Fe и Mn (F3) форм химических элементов (мг/кг) в почвах

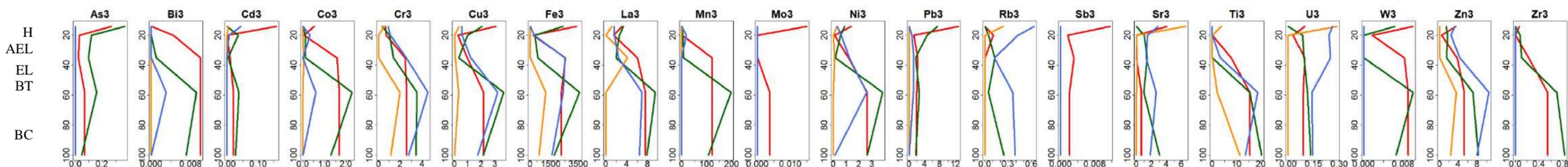
Грубогумусированная палево-подзолистая почва автономного ландшафта



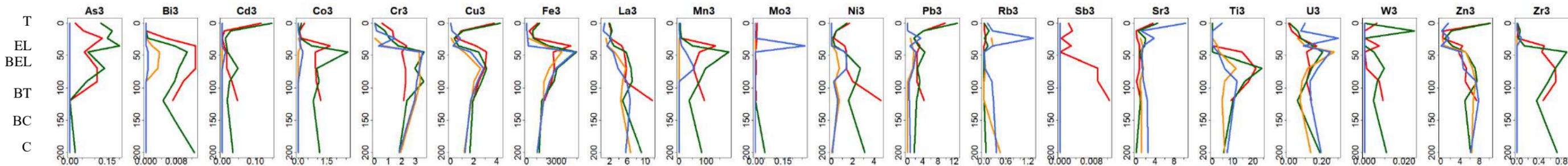
Дерново-палево-подзолистая почва трансэлювиального ландшафта



Торфянисто-перегнойная подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта нижней части склона



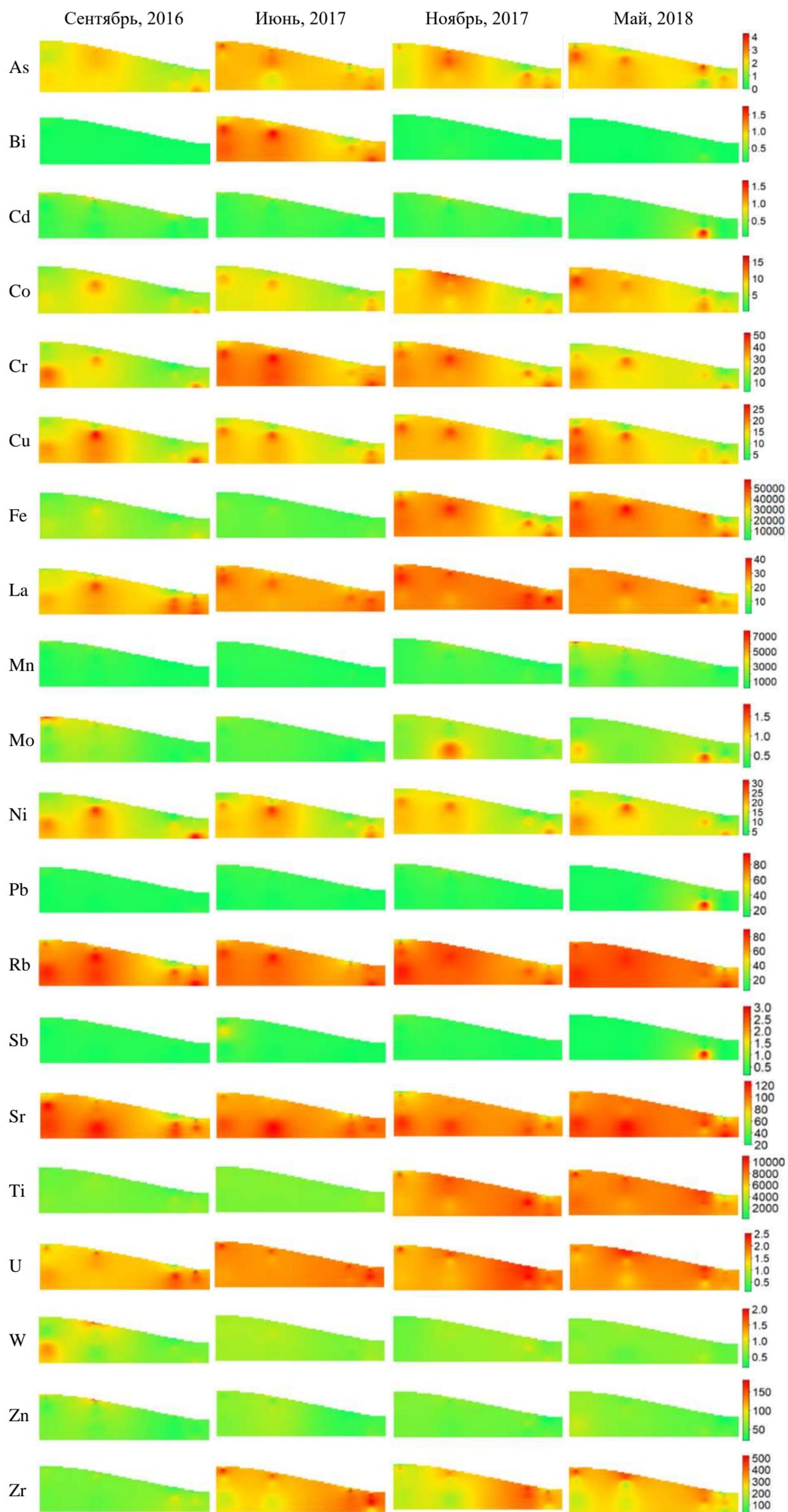
Торфянистая подзолистая профильно-оглеенная почва трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта потяжины



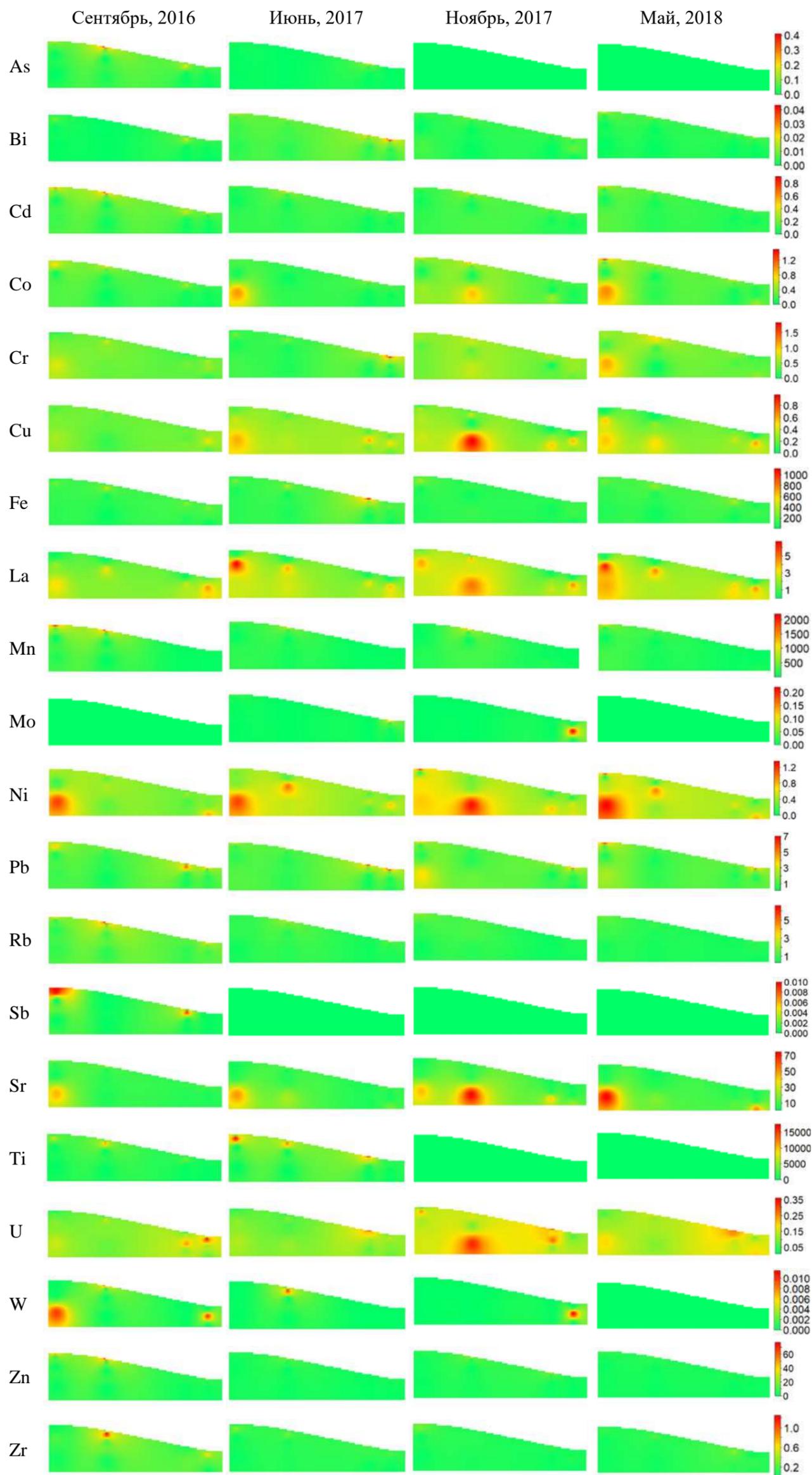
Цветами показаны сезоны опробование: красным – сентябрь (2016), зеленым – июнь (2017), оранжевым – ноябрь (2017), синим – май (2018).

**Приложение Ж. Сезонная динамика латерального распределения элементов в почвах катены Центрально-Лесного заповедника**

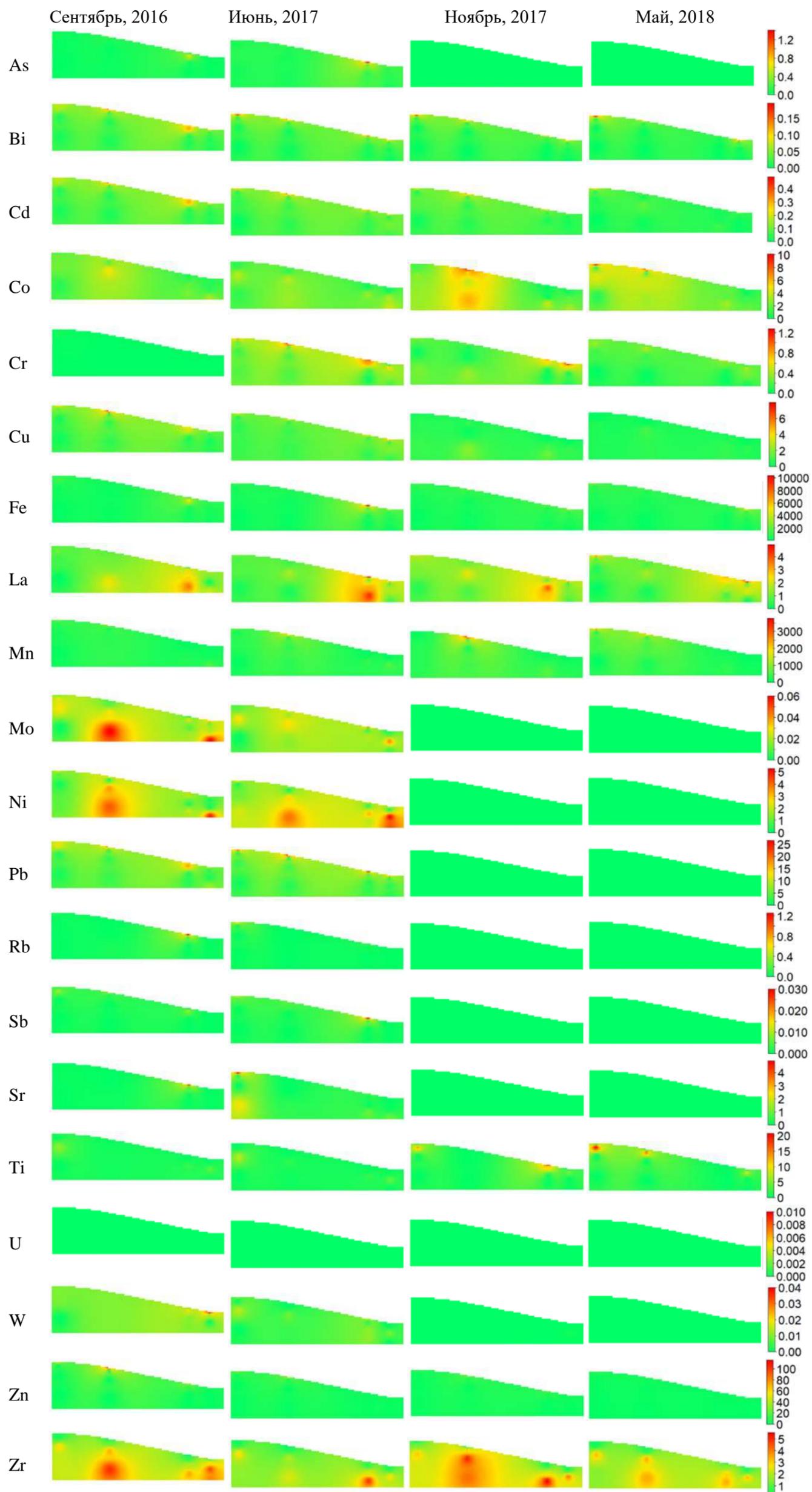
*Ж.1. Латеральное распределение валового содержания химических элементов (мг/кг) в почвах.*



## Ж.2. Латеральное распределение обменных (F1) форм химических элементов (мг/кг) в почвах.



Ж.3. Латеральное распределение комплексных (F2) форм химических элементов (мг/кг) в почвах.



Ж.4. Латеральное распределение сорбированных гидроксидами Fe и Mn (F3) форм химических элементов (мг/кг) в почвах.

