

УДК 631.4

DOI 10.21685/2500-0578-2023-3-1

ВЗАИМОСВЯЗЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА, ОПАДА И ПОЧВ В ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСАХ НИЗКОГОРНОЙ ПОЛОСЫ СРЕДНЕГО УРАЛА

И. Ю. Кудреватых¹, Р. З. Сибгатуллин², В. Н. Коротков³,
А. П. Гераськина⁴, О. В. Смирнова⁵

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

² Висимский государственный природный биосферный заповедник, Кировград, Россия

³ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля, Москва, Россия

^{4, 5} Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

¹ averkieva25@rambler.ru, ² sulem@yandex.ru, ³ korotkovv@list.ru, ⁴ angersgma@gmail.com, ⁵ ovinfo@gmail.com

Аннотация. Исследование закономерностей между элементным составом напочвенного покрова, опада и почв в малонарушенных лесах имеет большое значение для понимания биогеохимических циклов макро- и микроэлементов. Цель данного исследования – оценить изменчивость химического состава растений напочвенного покрова, опада и почв в пихто-ельниках среднеуральской низкогорной южной тайги при вариативности экологических условий. Объектами исследования являются пихто-ельник с липой разнотравный и пихто-ельник высокотравно-папоротниковый на бурой горнолесной почве в Висимском государственном природном биосферном заповеднике. В пробах растений, опада и почвы измеряли концентрацию K, Fe, Ca, Mn, Cl, S, P, Ti, Zn, Ni, Mg, Ba, Sr, Rb и Cr методом рентгено-флуоресцентного анализа с помощью настольного WD-XRF кристалл-дифракционного сканирующего спектрометра «СПЕКТРОСКАН МАКС – GV». В образцах почвы дополнительно измеряли содержание углерода и pH. В каждом типе леса было изучено видовое разнообразие и изменчивость химического состава растений напочвенного покрова и опада в разные сезоны, а также оценена взаимосвязь химического состава растений с химическим составом почв. Выявлено, что весной в растениях напочвенного покрова выше содержание Fe, Cr, Rb, Ti, Zn, Ni, Al, S и P, а к концу сезона вегетации возрастает содержание Mn, Sr, Ca, K, Mg и Cl. Растения напочвенного покрова изученных лесов способствуют накоплению в почве Fe, Al, Mg, Ba, Ti, Mn, Ni, Cr и Zn за счет их концентрации в корневых системах. В химическом составе опада пихто-ельника с липой разнотравного выше содержание Ca, S, Sr, Ba, Mg, Fe, Ba и Ti по сравнению с таковым пихто-ельника высокотравно-папоротникового, что отражается на увеличении содержания этих элементов в органогенном горизонте изученных почв.

Ключевые слова: пихто-ельник, напочвенный покров, химический состав, почва, опад

Благодарности: авторы выражают глубокую признательность сотрудникам Висимского государственного природного биосферного заповедника за помощь и содействие в проведении полевых исследований.

Финансирование: полевой материал собран в рамках темы государственного задания ЦЭПЛ РАН «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем», регистрационный номер НИОКТР 121121600118-8. Подготовка материала к химико-аналитическим исследованиям, анализ данных и интерпретация результатов проведены в рамках государственного задания ИФХиБПП РАН «Биогеохимические процессы трансформации минерального и органического вещества в почвах на различных стадиях эволюции биосферы и техногенеза» регистрационный номер НИОКТР 121041500050-3.

Для цитирования: Кудреватых И. Ю., Сибгатуллин Р. З., Коротков В. Н., Гераськина А. П., Смирнова О. В. Взаимосвязь химического состава напочвенного покрова, опада и почв в хвойно-широколиственных лесах низкогорной полосы Среднего Урала // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2023. Vol. 8 (3). <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2023-3-1>

INTERRELATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE GROUND COVER, LITTER AND SOILS IN THE CONIFEROUS-BROAD-LEAVED FORESTS OF THE LOW-MOUNTAIN OF THE MIDDLE URALS

I. Yu. Kudrevatykh¹, R. Z. Sibgatullin², V. N. Korotkov³,
A. P. Geraskina⁴, O. V. Smirnova⁵

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science RAS, Pushchino, Russia

²Visimsky State Natural Biosphere Reserve, Kirovgrad, Russia

³Institute of Global Climate and Ecology named after Academician Yu. A. Izrael, Moscow, Russia

^{4, 5}Center for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow, Russia

¹averkieva25@rambler.ru, ²sulem@yandex.ru, ³korotkovv@list.ru, ⁴angersgma@gmail.com, ⁵ovsinfo@gmail.com

Abstract. A fir-spruce-linden herbs forest and fir-spruce tall herbs forest on brown mountain soil in the Visimsky State Natural Biosphere Reserve were studied. In each type of forest, the biodiversity and variability of the chemical composition of ground cover and litter plants in different seasons were studied, and the relationship between the chemical composition of plants and the chemical composition of soils was assessed. Found that in spring the content of Fe, Cr, Rb, Ti, Zn, Ni, Al, S and P in the ground cover is higher, and by the end of the growing season the content of Mn, Sr, Ca, K, Mg and Cl increases. Ground cover plants of the studied forests contribute to the accumulation of Fe, Al, Mg, Ba, Ti, Mn, Ni, Cr and Zn in the soil due to their concentration in roots. In the chemical composition of the litter of the fir-spruce-linden herbs forest, the content of Ca, S, Sr, Ba, Mg, Fe, Ba, and Ti is higher than that of the fir-spruce tall herbs forest, which is reflected in the increase in the content of these elements in the organic horizon of the studied soils.

Keywords: fir-spruce forest, ground cover, chemical composition, soil, litter

Acknowledgments: the authors express their deep gratitude to the staff of the Visimsky State Natural Biosphere Reserve for their help and assistance in conducting field research.

Funding: field material was collected within the framework of the state task of the Center for Forest Ecology and Productivity RAS "Methodological approaches to assessing the structural organization and functioning of forest ecosystems", registration number NIOKTR 121121600118-8. Preparation of the material for chemical-analytical studies, data analysis and interpretation of the results were carried out within the framework of the state task of the Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences "Biogeochemical processes of transformation of mineral and organic matter in soils at various stages of biosphere evolution and technogenesis" registration number NIOKTR 121041500050-3.

For citation: Kudrevatykh I. Yu., Sibgatullin R. Z., Korotkov V. N., Geraskina A. P., Smirnova O. V. Interrelation of the chemical composition of the ground cover, litter and soils in the coniferous-broad-leaved forests of the low-mountain of the Middle Urals. Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2023;8(3). (In Russ.). Available from: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2023-3-1>

Введение

Во всем мире лесные экосистемы достаточно быстро реагируют на природные и антропогенные изменения, в результате которых происходит изменение циклов химических элементов. Разнообразие растений в живом напочвенном покрове отражает состав, структуру и стадию развития лесного сообщества, обнаруживая при этом его динамическую адаптацию к окружающей среде [1, 2]. Уровень поступления элементов с опадом растений напрямую зависит от видового и химического состава представителей растительных сообществ и вклада отдельных видов в состав экосистемы в целом [3, 4]. На основе учета объемов вовлечения элементов растениями в жизненный цикл и отслеживания трансформационных процессов при поступлении

в почву растительных остатков в разных типах леса можно научно обосновать рекомендации для лесного хозяйства [5–8]. В этой связи исследование закономерностей между элементным составом напочвенного покрова, опада и почв имеет большое значение для понимания роли растений в циклах макро- и микроэлементов с целью сохранения экосистемных функций лесных экосистем.

Особо охраняемые природные территории обычно включают наиболее сохранившиеся экосистемы, развивающиеся в спонтанном режиме без активного антропогенного воздействия. Висимский государственный природный биосферный заповедник был создан в 1971 г. с целью сохранения и изучения типичных и уникальных экосистем низкогорной полосы Среднего Урала [9]. Территория Висимского

заповедника служит базой для широкого круга исследований [10–14], что определяет его разностороннюю изученность. Одна из приоритетных задач научных исследований этого резервата – сохранение эталонного участка среднеуральской низкогорной южной тайги, что делает данную территорию хорошим модельным объектом для изучения особенностей круговорота химических элементов в системе «растение-опад-почва».

Цель данной работы – исследование изменчивости химического состава растений напочвенного покрова, опада и почв в пихто-ельниках среднеуральской низкогорной южной тайги при вариативности экологических условий.

Задачи:

1) оценка растительного покрова двух типов леса: пихто-ельник высокотравно-папоротниковый и пихто-ельник с липой разнотравный;

2) исследование химического состава растений напочвенного покрова в зависимости от периода вегетации (весна, лето) и типа леса;

3) изучение химического состава опада пихто-ельников в летний и осенний сезоны;

4) анализ связей химического состава растений с химическим составом почв.

Объекты и методы

В качестве объекта исследования выбрана восточная часть Висимского государственного природного биосферного заповедника на склоне г. Большой Сутук ($57,3705^{\circ}$ N, $59,8125^{\circ}$ E) (рис. 1). Территория относится к Уральской горной стране, Среднеуральской низкогорной провинции, южно-таежному лесорастительному округу с соответствующими природно-климатическими характеристиками [11]. Отмечают, что склон г. Большой Сутук не имеет техногенного загрязнения [10].

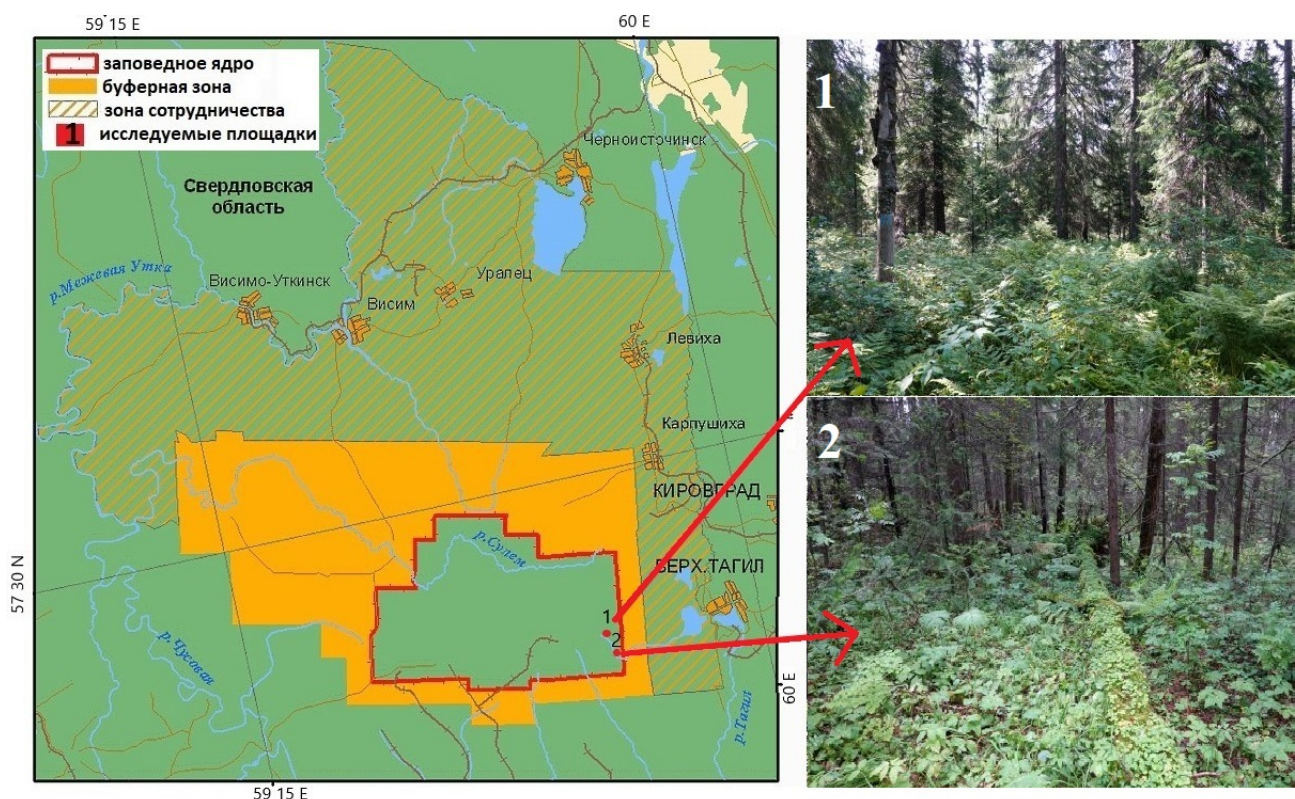


Рис. 1. Расположение объектов исследования в пределах Висимского государственного природного биосферного заповедника:

1 – пихто-ельник высокотравно-папоротниковый; 2 – пихто-ельник с липой разнотравный

Fig. 1. Location of research objects within Visimsky State Natural Biosphere Reserve:

1 – tall-grass-fern fir-spruce forest; 2 – fir-spruce forest with mixed-grass linden

Объектами исследования выбраны пихто-ельник с липой разнотравный (ПЕЛР) и пихто-ельник высокотравно-папоротниковый (ПЕВП), в которых были заложены постоянные пробные площади размером 1,0 га и 0,5 га соответственно. ПЕВП приурочен к выположенному

склону юго-западной экспозиции на высоте 610 м над уровнем моря, ПЕЛР – к пологому склону юго-восточной экспозиции на высоте 480 м над уровнем моря. На каждой из пробных площадей в мае и августе 2019 г. проведен отбор почвенных монолитов (50×50 см², $n = 24$)

до глубины корнеобитаемого слоя, из которых выбирали живые растения всех видов трав, кустарничков и мохообразных, определяли их видовую принадлежность [15]. На этих же участках проводили отбор опада (июль и октябрь, $n = 24$) и закладывали почвенные разрезы ($n = 20$), из которых отбирали смешанный образец каждого горизонта до горной породы. Геоботанические описания в пределах пробных площадей выполнены в десятикратной повторности на площадках размером по 100 м^2 .

Отобранные пробы растений, опада и почвы готовили к химическим анализам [16]. В полученных образцах измеряли концентрацию K, Fe, Ca, Mn, Cl, S, P, Ti, Zn, Ni, Mg, Ba, Sr, Rb и Cr методом рентгено-флуоресцентного анализа с помощью настольного WD-XRF кристалл-дифракционного сканирующего спектрометра «СПЕКТРОСКАН МАКС – GV» (Россия). В образцах почвы дополнительно измеряли содержание общего углерода ($C_{\text{общ}}$) и pH [17]. Определение содержания химических элементов в растениях, опаде и почве проводили в двукратной повторности, результаты выражали как среднее $\pm$ стандартное отклонение. Соответствие экспериментальных данных нормальному распределению проверяли графически (гистограмма) и критерием Шапиро – Уилка.

Результаты

В составе разновозрастного древостоя ПЕВП преобладают ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) и пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.). Формула древостоя 7Е 3П, возраст деревьев варьирует от 40 до 230 лет, сомкнутость крон – 0,3–0,4. В ярусе подроста и подлеска, который отличается низкой сомкнутостью (0,1–0,3), преобладает пихта с участием ели, а также *Padus avium* Mill., *Sorbus aucuparia* L., *Lonicera xylosteum* L., *Sambucus sibirica* Nakai.

В составе разновозрастного древостоя ПЕЛП преобладают ель, пихта, а также липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) с единичным участием *Pinus sibirica* Du Tour., *P. sylvestris* L., *Betula pubescens* Ehrh., *Populus tremula* L. Формула древостоя 6Е 2П 2Лп, возраст деревьев варьирует от 60 до 170 лет, сомкнутость крон – 0,5–0,6. Ярус подроста и подлеска отличается большей сомкнутостью крон (0,4–0,5) и большим

числом видов. В подросте преобладает пихта с участием ели, липы, рябины, березы, осины, кедра, а из кустарников отмечены те же виды, что и в ПЕВП.

В ПЕЛП значения видовой насыщенности ($43 \pm 7,2$ видов на 100 м^2) и видового богатства (81 вид) сосудистых растений были выше, чем в ПЕВП ($36 \pm 6,7$ видов на 100 м^2 и 62 вида соответственно). По числу видов во всех типах леса преобладала неморальная эколого-ценотическая группа (*Aegopodium podagraria* L., *Asarum europaeum* L., *Carex digitata* L., *Melica nutans* L., *Milium effusum* L., *Paris quadrifolia* L., *Pulmonaria obscura* Dumort. и др.).

В весеннее время в травяном покрове обоих типов леса встречались эфемероиды: *Anemonoides altaica* (C. A. Mey.) Holub, *Anemonoides reflexa* (Steph.) Holub. Заметную роль в травяном покрове, особенно в ПЕВП, играют крупные папоротники *Athyrium filix-femina* (L.) Roth, *Dryopteris expansa* (C. Presl) Fraser-Jenk. & Jermy, а также высокотравье (*Aconitum septentrionale* Koelle, *Cacalia hastata* L., *Cicerbita macrophylla* subsp. *uralensis* (Rouy) P. D. Sell. Бореальное мелкотравье (*Circaea alpina* L., *Luzula pilosa* (L.) Willd., *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt, *Oxalis acetosella* L., *Viola selkirkii* Pursh ex Goldie) обычно было приурочено к разлагающейся мертвой древесине.

При сравнении химического состава растений напочвенного покрова в начале (май) и в конце периода вегетации (август) выявлено, что в надземной части растений выше содержание K, S, P, Cl, Br и Rb, а в подземной – Fe, Al, Mg, Ba, Ti, Mn, Cr и Zn (рис. 2, 3). При этом в течение периода вегетации перераспределяется из подземной в надземную часть растений напочвенного покрова Ba, Sr, Br, Mn, Rb, Cr и, наоборот, из надземной в подземную – Fe, Ti и Zn.

При сравнении среднего химического состава растений напочвенного покрова в разных типах леса выявлено, что в ПЕВП выше содержание K, Ca, Cl, Mn и Mg, а в ПЕЛП – S, P, Fe, Ba, Ti, Zn и Ni (рис. 4). Однако стоит отметить, что в среднем химический состав изученного напочвенного покрова обоих типов леса различается незначительно. Ряд распределения элементов среднего химического состава обоих типов леса: $K > Fe > Ca > Mn > Cl > Zn > Ti > S > P > Al > Mg > Ba > Sr > Rb > Cr$.

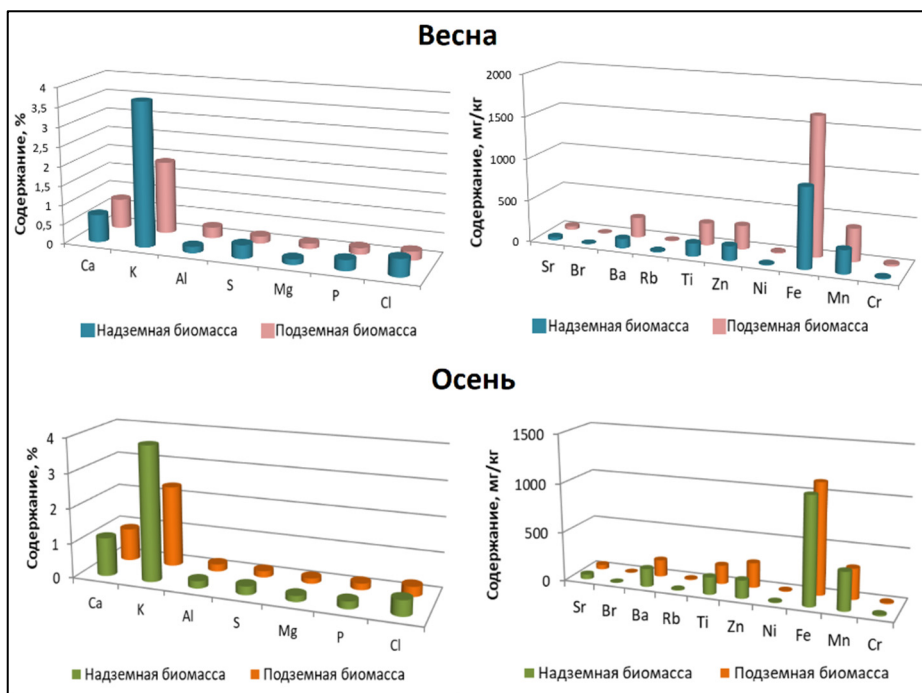


Рис. 2. Химический состав растений напочвенного покрова (средние значения содержания элементов по двум типам леса) в начале и конце периода вегетации

Fig. 2. Chemical composition of ground cover plants (average values of element content for two types of forest) at the beginning and end of the growing season

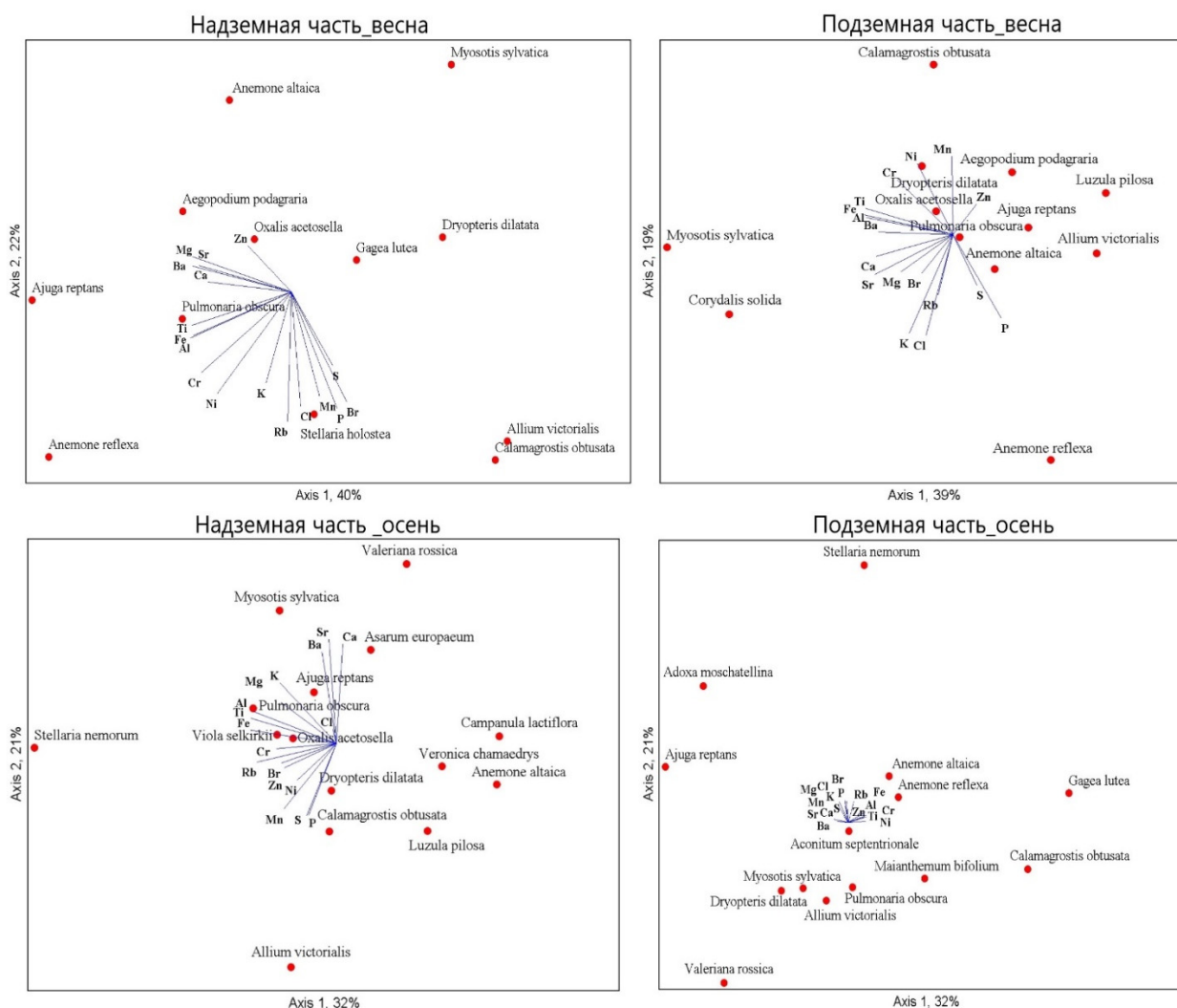


Рис. 3. Многофакторный анализ (PCA) химического состава растений напочвенного покрова в весенний и осенний сезоны

Fig. 3. Multivariate analysis (PCA) of chemical composition of ground cover plants in the spring and autumn seasons

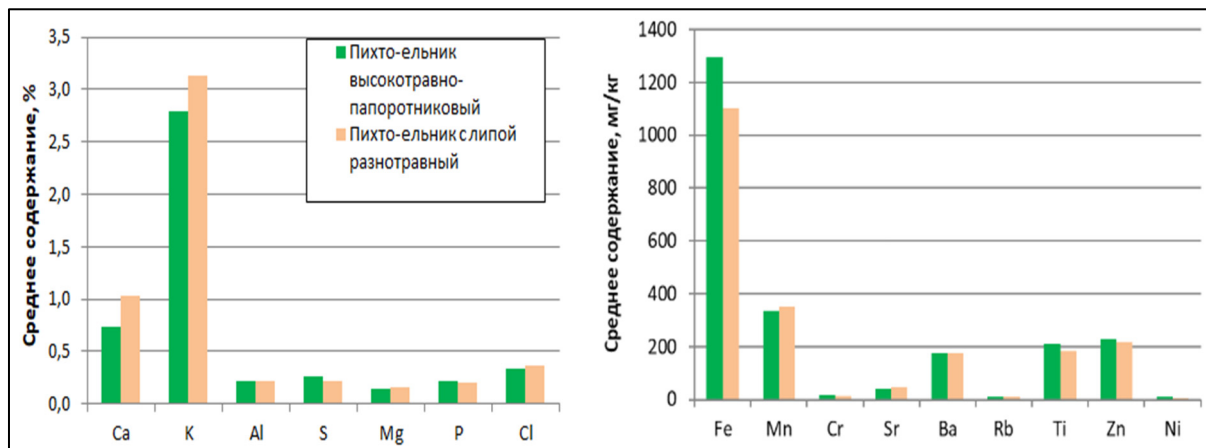


Рис. 4. Химический состав растений напочвенного покрова (средние значения содержания элементов) пихто-ельника с липой разнотравного и пихто-ельника высокотравно-папоротникового

Fig. 4. Chemical composition of ground cover plants (average values of element content) for fir-spruce forest with mixed-grass linden and tall-grass-fern fir-spruce forest

В опаде изученных лесов значительная часть (более 80 %) представлена листьями и/или хвоей. В качественном составе опада в ПЕЛР доминируют листья липы (57 %), березы (33 %) и осины (10 %). В среднем химическом составе опада в летнее время выше содержание K, S, Al, Si, P, Cl, Rb, Zn, Ni, Fe и Mn, а в осеннее – Ca, S, Sr, Ba, Mg, Fe, Ba и Ti (рис. 5). Сравнение между

собой опада разных типов леса показало, что как весной, так и летом выше концентрация всех макро- и микроэлементов под опадом ПЕЛР (рис. 6), что определяется преобладанием опада лиственных деревьев. К осени в опаде ПЕЛР содержание Al, Mg, Ba, Ti и Fe возрастает в 2–3 раза по сравнению с таковым в ПЕВП.

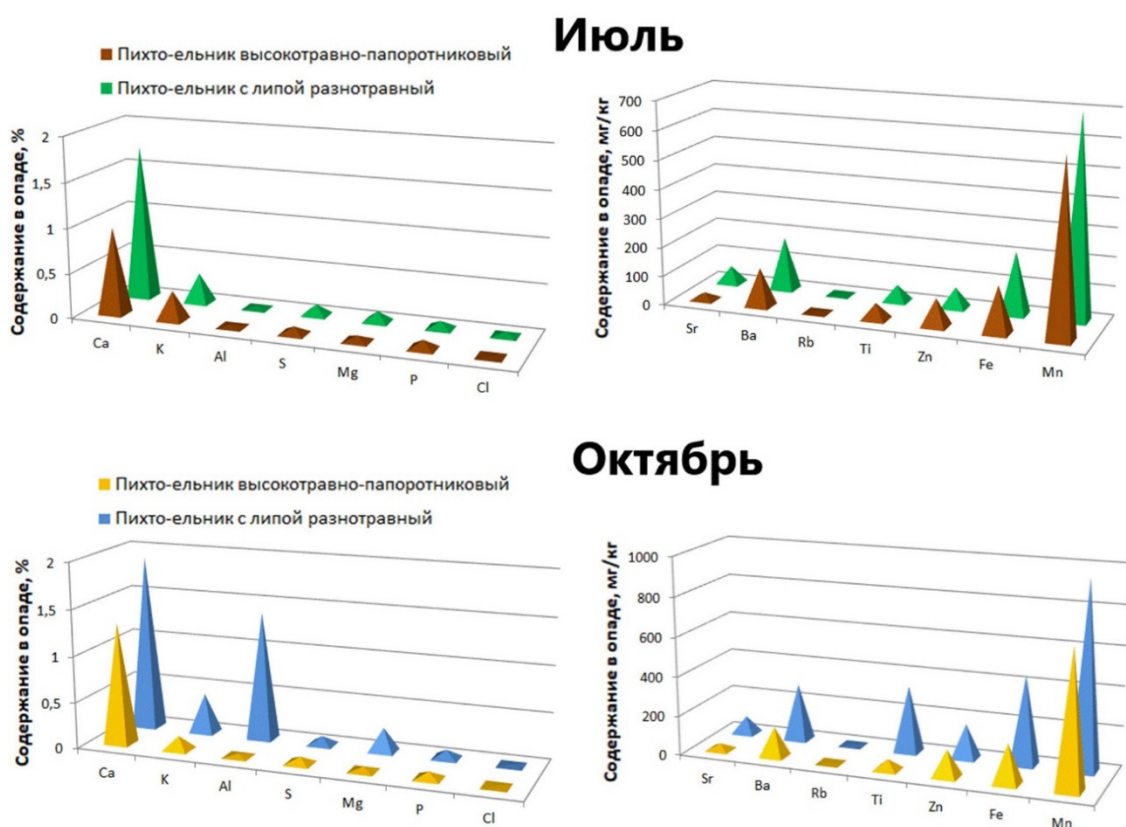


Рис. 5. Химический состав летнего и осеннего опада (средние значения содержания элементов) в пихто-ельнике с липой разнотравном и пихто-ельнике высокотравно-папоротниковом

Fig. 5. Chemical composition of summer and autumn litter (average element contents) in a fir-spruce forest with mixed-grass linden and a tall-grass-fern fir-spruce forest

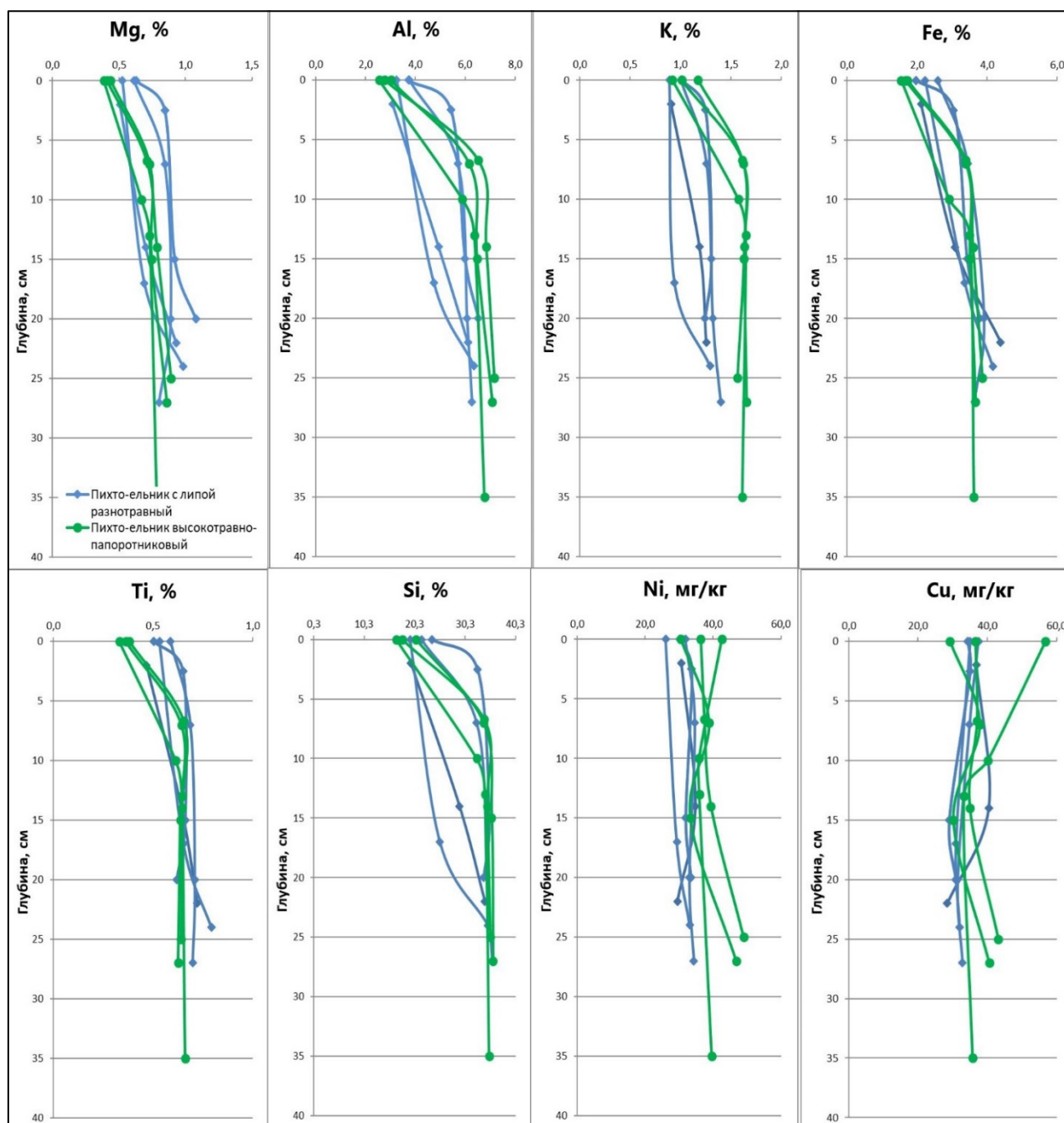


Рис. 6. Элементы с элювиальным распределением в профиле изученных почв

Fig. 6. Elements with eluvial distribution in the profile of the studied soils

На изученных пробных площадях были диагностированы бурые горнолесные почвы. Изученные почвы были полнопрофильные, со значительным развитием аккумулятивного горизонта (до 28 см). Содержание в верхних 20 см почв $S_{\text{общ}}$ варьировало от 6,5–8,9 %, pH почв составил 5,6–6,5. Распределение изученных элементов в профиле почв было сходным между изученными типами леса. Элементы Mg, Al, Si, K, Ti и Fe показали элювиальный тип рас-

пределения, Mn, P, S, Ca, Zn и Pb – аккумулятивный тип, а Na, Ni и Cu равномерно распределялись в профиле изученных почв (рис. 6, 7). При сравнении химического состава почв разных разрезов было выявлено, что в верхних горизонтах (A0 и B) выше содержание Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe и Mn на участках пихто-ельника с липой высокотравного, а в пихто-ельнике высокотравно-папоротниковом – P, S, K, Ni, Cu, Zn и Pb.

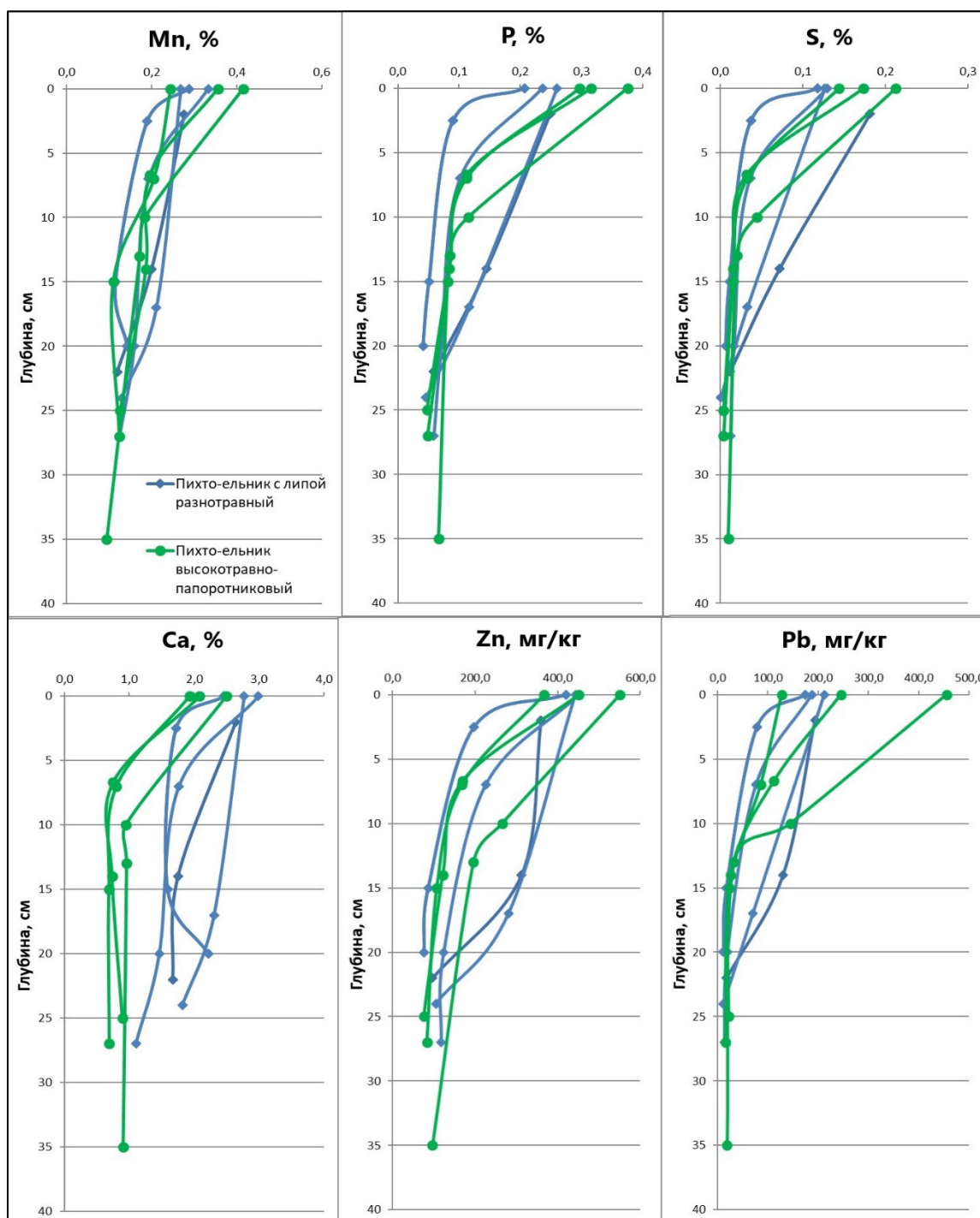


Рис. 7. Элементы с аккумулятивным распределением в профиле изученных почв

Fig. 7. Elements with accumulative distribution in the profile of the studied soils

Обсуждение

Выявлено, что надземная часть растений напочвенного покрова обоих типов леса имеет выше содержание K, S, P, Cl, Br и Rb, а подземная – Fe, Al, Mg, Ba, Ti, Mn, Cr и Zn. В течение периода вегетации среднее содержание элементов в растениях напочвенного покрова незначительно изменяется, и в надземной части увеличивается содержание Ba, Sr, Br, Mn, Rb и Cr, а в подземной – Fe, Ti и Zn. Другие авторы также

отмечали, что в напочвенном покрове бореальных лесов концентрации многих элементов, особенно элементов минерального питания, в корнях выше, чем в надземных частях растений [18–21]. Химический состав растений, как и перераспределение элементов между надземной и подземной частями, во многом зависит от длительности жизни растений: в многолетних частях больше накапливаются Ca, S, Fe и Mn, а подвижные элементы – P и K сильнее всего концентрируются в молодых частях [22]. Для

макроэлементов главным фактором изменчивости является видовая принадлежность растений и физиологические особенности организмов, в то время как для многих микроэлементов важное значение приобретают местные условия произрастания растений [23]. Исследование лесов Северной Европы показало, что разные растения, произрастающие на одних и тех же почвах при одинаковых условиях окружающей среды, показывают очень разные концентрации Cd, V, Co, Pb, Ba и Y, а содержание в них Rb, S, Cu, K, Ca, P и Mg имеет сходное значение [24]. Особенно отмечают видоспецифичность в накоплении отдельных элементов, например, кустарнички накапливают Ca, Mg, Mn и Al, разнотравье – K, P и Fe, полукустарнички – Mn [25, 26]. В цветковых растениях лучше аккумулируется Mn и Fe, а в папоротниках – Zn [26].

Некоторые исследователи показывают, что, как правило, для пихто-ельников характерен кальциево-калиевый ряд распределения химических элементов в растениях напочвенного покрова: $Ca > K > Mn > Mg \geq P > Fe > Na > Zn > Pb > Ni$ [21, 25, 28]. Однако для наших объектов исследования ряд распределения элементов в растениях калиево-железистый: $K > Fe > Ca > Mn > Cl > S > P > Ti > Zn > Mg > Ba > Sr > Rb > Cr$. Высокие значения Fe можно объяснить, с одной стороны, особенностями химического состава почв, а с другой – характером подстилающих пород. Для других областей горного Урала показано, что Fe преобладает в растениях, растущих на ультраосновных горных породах [29], к которым относятся габбро – почвообразующая порода изученных лесов [10]; также высокое содержание Fe в почве и соответственно в растениях определяется глеевыми процессами, характерными для бурых лесных почв исследуемого региона [30].

Выявлено, что летом в химическом составе опада изученных лесов было выше содержание K, S, Al, Si, P, Cl, Rb, Zn, Ni, Fe и Mn, а осенью – Ca, S, Sr, Ba, Mg, Fe, Ba и Ti. Отмечают, что увеличение в опаде таких элементов, как Ca, Na, K, Mg, Mn, Zn, Fe и Al в основном происходит за счет увеличения скорости разложения органического вещества [31]. На увеличение содержания элементов в опаде смешанных лесов также влияет наличие листьев лиственных пород и ветвей осины. Ветви осины являются концентраторами Ca (выше 3 %), а листья березы и осины – Mn и Mg [28].

Показано, что в опаде верхних частей склонов выше накопление большинства макро- и микроэлементов по сравнению с участками, расположенными ниже по склону [23]. Однако наше исследование выявило, что как весной, так

и летом выше концентрация всех изученных макро- и микроэлементов была в опаде ПЕЛР, который располагается ниже по склону. Выявлено также, что к осени в опаде ПЕЛР содержание Al, Mg, Ba, Ti и Fe возрастает в 2–3 раза по сравнению с таковым в опаде ПЕВП. Полученные результаты подтверждают, что наличие лиственных пород в составе древостоев определяет увеличение поступления большинства элементов. Замечено, что в ПЕЛР выше видовая насыщенность и богатство сосудистых растений, что, в свою очередь, увеличивает концентрационную способность опада. Исследования в лесах северо-запада России показали, что травы увеличивают в органических горизонтах почвы содержание многих макро- и микроэлементов по сравнению с кустарничками, лишайниками и мхами [4].

Было показано, что в изученных почвах Mg, Al, K, Ti и Fe распределяются в профиле по элювиальный типу, а Mn, P, S, Ca, Zn и Pb – по аккумулятивному. Накопление Mn, P, S, Ca, Zn и Pb в верхней части профиля связано с большим количеством органики и повышением кислотности почв. Отмечают, что в буроземах Среднего Урала оглинение происходит по всей толще профиля, что способствует накоплению Fe, Al, P, Mg и Ca [30]. Известно, что растения по способности аккумуляции элементов делятся на две группы: исключатели, у которых элементы накапливаются главным образом в корневой системе, и аккумуляторы, у которых они накапливаются в больших количествах в надземных органах [32]. Принимая во внимание, что в подземных органах изученных растений в обоих типах леса накапливается K, S, P, Cl, Br и Rb, можно предположить увеличение концентрации этих элементов в почве, особенно в органогенных горизонтах.

Заключение

Результаты исследования показали, что в начале вегетационного сезона в растениях напочвенного покрова выше содержание Fe, Cr, Rb, Ti, Zn, Ni, Al, S и P, а к концу сезона возрастает содержание Mn, Sr, Ca, K, Mg и Cl. В надземной части растений напочвенного покрова выявлено более высокое содержание K, S, P, Cl, Br и Rb, в то время как в подземной части больше аккумулируются Fe, Al, Mg, Ba, Ti, Mn, Ni, Cr и Zn, что способствует накоплению последних элементов в верхних горизонтах почв.

В химическом составе опада изученных лесов осенью увеличивается содержание Ca, S, Sr, Ba, Mg, Fe, Ba и Ti, что определяется ускорением разложения органического вещества в этот

период. Как весной, так и летом содержание всех изученных макро- и микроэлементов выше в опаде пихто-ельника с липой разнотравного, что определяется примесью лиственных пород деревьев, которые являются концентраторами ряда элементов минерального питания.

Выявлено, что распределение изученных элементов в профиле почв сходное в обоих типах леса. Элементы Mg, Al, Si, K, Ti и Fe имеют элювиальный тип распределения и их содержание

в почве выше в пихто-ельнике с липой разнотравного, что, скорее всего, связано с большим поступлением этих элементов вместе с опадом лиственных пород. Элементы Mn, P, S, Ca, Zn и Pb показали аккумулятивный тип накопления в почвенном профиле пихто-ельника с липой разнотравного, что связано с большим количеством органики в верхних горизонтах почв и их подкислением.

Список литературы

1. Ares A., Neill A. R., Puettmann K. J. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands // *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 260, № 7. P. 1104–1113.
2. Gamfeldt L., Snäll T., Bagchi R. [et al.]. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species // *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. P. 1–8. doi: 10.1038/ncomms2328
3. Muukkonen P., Angervuori A., Virtanen T. [et al.]. Loss and fragmentation of Siberian jay (*Perisoreus infaustus*) habitats // *Boreal Environment Research*. 2012. Vol. 17, № 1. P. 59–71.
4. Lukina N. V., Tikhonova E. V., Orlova M. A. [et al.]. Associations between forest vegetation and the fertility of soil organic horizons in northwestern Russia // *Forest ecosystems*. 2019. Vol. 6, № 1. P. 1–19. doi: 10.1186/s40663-019-0190-2
5. Лукина Н. В., Никонов В. В. Биохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты : Кольский ИЦ РАН, 1996. Ч. 1. 216 с. ; Ч. 2. 194 с.
6. Hedwall P.-O., Grip H., Linder S. [et al.]. Effect of clear-cutting and slash removal on soil water chemistry and forest-floor vegetation in a nutrient optimised Norway spruce stand // *Silva Fennica*. 2013. Vol. 47, № 2. P. 933.
7. Grand S., Hudson R., Lavkulich L. M. Effect of forest harvest on soil nutrients and labile ions in Podzols of south-western Canada: Mean and dispersion effects // *Catena*. 2014. Vol. 122. P. 18–26. doi: 10.1016/j.catena.2014.06.004
8. Бобкова К. С., Лиханова Н. В. Потоки азота и зольных элементов в системе «почва-фитоценоз» на вырубках среднетаежных ельников республики Коми // *Лесоведение*. 2019. № 6. С. 512–523. doi: 10.1134/S0024114819060020
9. Мишин А. С. Висимский биосферный заповедник: альбом. Екатеринбург: Лаб. издат. технологий, 2006. 38 с.
10. Кайгородова С. Ю. Висимский государственный природный биосферный заповедник // *Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации*. М. : «Фонд Инфосфера» НИА-Природа, 2012. С. 259–262.
11. Янцер О. В., Скок Н. В. Ландшафтная структура территории Висимского заповедника // *Вестник ТюмГУ. Экология и природопользование*. 2015. Т. 1, № 4. С. 41–48.
12. Сибгатуллин Р. З. Заращение вырубок разного возраста в Висимском заповеднике (Свердловская область) // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2021. Т. 13, № 6. С. 57–62. doi: 10.37614/2307-5252.2021.6.12.9.007
13. Lukyanova L. E., Ukhova N. L., Ukhova O. V., Gorodilova Yu. V. Common Shrew (*Sorex araneus*, Eulipotyphla) Population and the Food Supply of Its Habitats in Ecologically Contrasting Environments // *Russian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 52. P. 316–328. doi: 10.1134/S106741362104007X
14. Braslavskaya T. Yu., Geraskina A. P., Aleinikov A. A. [et al.]. Long-term effect of wildfires on vascular plant and soil invertebrate diversity in primary fir-spruce forests of the Ural Mountains (North Eurasia) // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2022. Vol. 7, № 1. P. 41–60. doi: 10.21685/2500-0578-2022-1-5
15. Смирнова О. В., Заугольнова Л. Б., Ханина Л. Г. [и др.]. Популяционные и фитоценотические методы анализа биоразнообразия растительного покрова // *Сохранение и восстановление биоразнообразия*. М. : Издательство Научного и учебно-методического центра, 2022. С. 78–107.
16. Kalra Y. P., Maynard D. G. Methods manual for forest soil and plant analysis. Inf. Rep. NOR-X-319. Alberta : Northern Forestry Centre, 1991. 116 p.
17. Van Reeuwijk L. P. Technical Paper 09: Procedures for Soil Analysis, Sixth Edn. Wageningen : International Soil Reference and Information Centre, 2002. 2 p.
18. Ушакова Г. И. Биогеохимическая миграция элементов и почвообразование в лесах Кольского полуострова. Апатиты : Карел. науч. центр РАН, 1997. 150 с.
19. Shangeeva I., Alber D., Bukalis G., Zepezauer F. Multivariate statistical analysis of nutrients and trace elements in plants and soil from northwestern Russia // *Plant Soil*. 2009. Vol. 322. P. 219–228.
20. Бобкова К. С., Робакидзе Е. А., Торлопова Н. В. Круговорот элементов минерального питания в экосистеме коренного разнотравно-черничного ельника Средней Тайги (Республика Коми) // *Сибирский лесной журнал*. 2020. № 2. С. 40–54. doi: 10.15372/SJFS20200205
21. Kudrevatykh I. Yu., Geraskina A. P. Comparison of structure and chemical composition of ground cover and soils of fir-spruce forests in Pechora-Ilych state nature reserve, Northern Urals // *Nature Conservation Research*. 2021. Vol. 6, № 2. P. 80–92. doi: 10.24189/ncr.2021.030

22. Ильин Б. В. Элементарный химический состав растений. Новосибирск : Наука, 1991. 151 с.
23. Ахметова Г. В. Особенности распределения макро- и микроэлементов в системе «почва-растение» в среднетаежных условиях восточной Фенноскандии // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 5. С. 5–19. doi: 10.17076/eco1228
24. Reimann C., Koller F., Frengstad B. [et al.]. Comparison of the element composition in several plant species and their substrate from a 1 500 000-km² area in Northern Europe // The Science of the Total Environment. 2001. Vol. 278. P. 87–112. doi: 10.1016/S0048-9697(00)00890-1
25. Лиханова Н. В., Бобкова К. С. Изменение содержания макро и микроэлементов в растениях напочвенного покрова ельников средней тайги после сплошной рубки // Растительные ресурсы. 2013. № 49. С. 223–232.
26. Осипов А. Ф., Манова С. О., Бобкова К. С. Запасы и элементный состав растений напочвенного покрова в среднетаежных сосняках послепожарного происхождения (Республика Коми) // Растительные ресурсы. 2014. Т. 50, № 1. С. 3–11.
27. Сибгатуллина М. Ш., Валиев В. С. Микроэлементы в дикорастущих растениях национального парка «Нижняя Кама» // Социально-экологические технологии. 2019. № 3. С. 325–342. doi: 10.31862/2500-2961-2019-9-3-325-342
28. Пристова Т. А. Биологический круговорот веществ во вторичном лиственно-хвойном насаждении Средней Тайги // Экология. 2008. № 3. С. 189–195.
29. Алексеева-Попова Н. В., Дроздова И. В. Микроэлементный состав растений полярного Урала в контрастных геохимических условиях // Экология. 2013. № 2. С. 90–98. doi: 10.7868/S0367059713020030
30. Самофалова И. А., Лузянина О. А. Горные почвы Среднего Урала (на примере ГПЗ «Басеги»). Пермь : Прокрость, 2014. 154 с.
31. Пристова Т. А., Загирова С. В. Элементный состав растений в предгорных лесах Приполярного Урала Республики Коми // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20, № 2. С. 142–146.
32. Baker A. J. M. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals // Journal of Plant Nutrition. 1981. Vol. 3. P. 643–654. doi: 10.1080/01904168109362867

References

1. Ares A., Neill A.R., Puettmann K.J. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands. *Forest Ecology and Management*. 2010;260(7):1104–1113.
2. Gamfeldt L., Snäll T., Bagchi R. et al. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature Communications*. 2013;4:1–8. doi: 10.1038/ncomms2328
3. Muukkonen P., Angervuori A., Virtanen T. et al. Loss and fragmentation of Siberian jay (*Perisoreus infaustus*) habitats. *Boreal Environment Research*. 2012;17(1):59–71.
4. Lukina N.V., Tikhonova E.V., Orlova M.A. et al. Associations between forest vegetation and the fertility of soil organic horizons in northwestern Russia. *Forest ecosystems*. 2019;6(1):1–19. doi: 10.1186/s40663-019-0190-2
5. Lukina N.V., Nikonov V.V. *Biokhimicheskie tsikly v lesakh Severa v usloviyakh aerotekhnogennoy zagryazneniya* = Biochemical cycles in the forests of the North under conditions of aerotechnogenic pollution. Apatity: Kol'skiy NTs RAN, 1996;(part 1):216, (part 2):194. (In Russ.)
6. Hedwall P.-O., Grip H., Linder S. et al. Effect of clear-cutting and slash removal on soil water chemistry and forest-floor vegetation in a nutrient optimised Norway spruce stand. *Silva Fennica*. 2013;47(2):933.
7. Grand S., Hudson R., Lavkulich L.M. Effect of forest harvest on soil nutrients and labile ions in Podzols of southwestern Canada: Mean and dispersion effects. *Catena*. 2014;122:18–26. doi: 10.1016/j.catena.2014.06.004
8. Bobkova K.S., Likhonova N.V. Flows of nitrogen and ash elements in the “soil-phytocenosis” system in clearings of middle taiga spruce forests of the Komi Republic. *Lesovedenie* = Forest science. 2019;(6):512–523. (In Russ.). doi: 10.1134/S0024114819060020
9. Mishin A.S. *Visimskiy zapovednik* = Visimsky Nature Reserve. Ekaterinburg, 2006:38. (In Russ.)
10. Kaygorodova S.Yu. Visimsky State Natural Biosphere Reserve. *Pochvy zapovednikov i natsional'nykh parkov Rossiyskoy Federatsii* = Soils of nature reserves and national parks of the Russian Federation. Moscow: «Fond In-fosfera» NIA-Priroda, 2012:259–262. (In Russ.)
11. Yantser O.V., Skok N.V. Landscape structure of the territory of the Visimsky Nature Reserve. *Vestnik TyumGU. Ekologiya i prirodopol'zovanie* = Tyumen State University. Herald Natural Resource Use and Ecology. 2015;1(4):41–48. (In Russ.)
12. Sibgatullin R.Z. Overgrowing of clearings of different ages in the Visimsky Nature Reserve (Sverdlovsk region). *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* = Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2021;13(6):57–62. (In Russ.). doi: 10.37614/2307-5252.2021.6.12.9.007
13. Lukyanova L.E., Ukhova N.L., Ukhova O.V., Gorodilova Yu.V. Common Shrew (*Sorex araneus*, Eulipotyphla) Population and the Food Supply of Its Habitats in Ecologically Contrasting Environments. *Russian Journal of Ecology*. 2021;52:316–328. doi: 10.1134/S106741362104007X
14. Braslavskaya T.Yu., Geraskina A.P., Aleinikov A.A. et al. Long-term effect of wildfires on vascular plant and soil invertebrate diversity in primary fir-spruce forests of the Ural Mountains (North Eurasia). *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2022;7(1):41–60. doi: 10.21685/2500-0578-2022-1-5

15. Smirnova O.V., Zaugol'nova L.B., Khanina L.G. et al. Population and phytocenotic methods for analyzing vegetation biodiversity. *Sokhranenie i vosstanovlenie bioraznoobraziya* = Conservation and restoration of biodiversity. Moscow: Izdatel'stvo Nauchnogo i uchebno-metodicheskogo tsentra, 2022:78–107. (In Russ.)
16. Kalra Y.P., Maynard D.G. *Methods manual for forest soil and plant analysis. Inf. Rep. NOR-X-319*. Alberta: Northern Forestry Centre, 1991:116.
17. Van Reeuwijk L.P. *Technical Paper 09: Procedures for Soil Analysis, Sixth Edn.* Wageningen: International Soil Reference and Information Centre, 2002:2.
18. Ushakova G.I. *Biogekhimicheskaya migratsiya elementov i pochvoobrazovanie v lesakh Kol'skogo poluostrova* = Biogeochemical migration of elements and soil formation in forests of the Kola Peninsula. Apatity: Karel. nauch. tsentr RAN, 1997:150. (In Russ.)
19. Shtangeeva I., Alber D., Bukalis G., Zepezauer F. Multivariate statistical analysis of nutrients and trace elements in plants and soil from northwestern Russia. *Plant Soil*. 2009;322:219–228.
20. Bobkova K.S., Robakidze E.A., Torlopova N.V. Cycle of mineral nutrition elements in the ecosystem of indigenous forb-blueberry spruce forest in the Middle Taiga (Komi Republic). *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Forest Journal. 2020;(2):40–54. (In Russ.). doi: 10.15372/SJFS20200205
21. Kudrevatykh I.Yu., Geraskina A.P. Comparison of structure and chemical composition of ground cover and soils of fir-spruce forests in Pechora-Ilych state nature reserve, Northern Urals. *Nature Conservation Research*. 2021;6(2):80–92. doi: 10.24189/ncr.2021.030
22. Il'in B.V. *Elementarnyy khimicheskiy sostav rasteniy* = Elementary chemical composition of plants. Novosibirsk: Nauka, 1991:151. (In Russ.)
23. Akhmetova G.V. Features of the distribution of macro- and microelements in the “soil-plant” system in the middle taiga conditions of eastern Fennoscandia. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2021;(5):5–19. (In Russ.). doi: 10.17076/eco1228
24. Reimann C., Koller F., Frengstad B. et al. Comparison of the element composition in several plant species and their substrate from a 1 500 000-km² area in Northern Europe. *The Science of the Total Environment*. 2001;278:87–112. doi: 10.1016/S0048-9697(00)00890-1
25. Likhanova N.V., Bobkova K.S. Changes in the content of macro and microelements in plants of the ground cover of spruce forests in the middle taiga after clear cutting. *Rastitel'nye resursy* = Plant resources. 2013;(49):223–232. (In Russ.)
26. Osipov A.F., Manova S.O., Bobkova K.S. Stocks and elemental composition of ground cover plants in mid-taiga pine forests of post-fire origin (Komi Republic). *Rastitel'nye resursy* = Plant resources. 2014;50(1):3–11. (In Russ.)
27. Sibgatullina M.Sh., Valiev V.S. Microelements in wild plants of the Nizhnyaya Kama National Park. *Sotsial'no-ekologicheskie tekhnologii* = Social and environmental technologies. 2019;(3):325–342. (In Russ.). doi: 10.31862/2500-2961-2019-9-3-325-342
28. Pristova T.A. Biological circulation of substances in secondary deciduous-coniferous plantations of the Middle Taiga. *Ekologiya* = Ecology. 2008;(3):189–195. (In Russ.)
29. Alekseeva-Popova N.V., Drozdova I.V. Microelement composition of plants of the polar Urals in contrasting geochemical conditions. *Ekologiya* = Ecology. 2013;(2):90–98. (In Russ.). doi: 10.7868/S0367059713020030
30. Samofalova I.A., Luzyanina O.A. *Gornye pochvy Srednego Urala (na primere GPZ «Basegi»)* = Mountain soils of the Middle Urals (using the example of the Basegi State Nature Reserve). Perm: Prokrost", 2014:154. (In Russ.)
31. Pristova T.A., Zagirova S.V. Element composition of plants in the foothill forests of the Subpolar Urals of the Komi Republic. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2018;20(2):142–146. (In Russ.)
32. Baker A.J.M. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*. 1981;3:643–654. doi: 10.1080/01904168109362867