УДК 581.192

DOI: 10.21779/2542-0321-2025-40-2-85–94

О. В. Черникова[1], Ю. А. Мажайский[2]

Элементный состав сосновых фитоценозов Мещерского полесья

[1] Академия ФСИН России; Россия, 390000, г. Рязань, ул. Сенная, 1; chernikova_olga@inbox.ru;

[2] Мещерский филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова»; Россия, г. Рязань, ул. Мещерская, 1а

Аннотация. В статье представлены данные о содержании химических элементов (Ca, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn) в разнообразных компонентах сосновых экосистем Мещеры: древесных породах разных возрастов, подлеске и напочвенном покрове. Исследование охватывает два периода наблюдений – 2004 и 2024 гг., что позволило провести сравнительный анализ минерального состава растений. Общая последовательность накопления элементов во всех изученных видах: Ca > Mg > Mn > Fe > Zn > Cu. Геохимическая специализация растений: лиственные породы (берёза, черника) аккумулируют кальций, магний, цинк и марганец. Растения напочвенного покрова (мхи, лишайники) накапливают медь и железо. У сосны отмечен дефицит магния, кальция и меди при повышенном содержании марганца и железа в хвое. Лишайники выделяются минимальной концентрацией зольных элементов. Динамика за 20 лет показала, что суммарное содержание зольных элементов в фитоценозах осталось практически неизменным.

Устойчивость экосистемы обеспечивается активным поглощением элементов растениями и их эффективной переработкой в системе «растение–почва», несмотря на исходно низкую доступность питательных веществ. Выявленные закономерности подчёркивают роль биогенных факторов в круговороте элементов и адаптацию фитоценозов к бедным песчаным почвам Мещеры.

Полученные данные могут быть использованы для мониторинга состояния лесных экосистем в условиях антропогенных нагрузок.

Ключевые слова: элементный состав, сосновые фитоценозы, химическая экспертиза, биологическое поглощение.

Введение

Растения способны поглощать из окружающей среды практически все элементы периодической системы Д. И. Менделеева. При этом для нормального прохождения жизненного цикла им необходимы лишь 17 из них: C, H, O, N, P, K, Si, S, Ca, Mg, Fe, Mn, B, Co, Zn, Cu, Mo.

Растения играют ключевую роль в биогеохимическом круговороте веществ в природе. В научной литературе по-разному трактуется роль химических элементов в растительных организмах. Ряд учёных настаивает на вовлеченности всех элементов в физиологические процессы растений, тогда как их оппоненты ограничивают необходимость только теми компонентами, которые выполняют ключевые физиологические функции [1–3]. Дискуссионным остается вопрос о стабильности элементного состава: отдельные исследования фиксируют его константность у конкретных видов вне зависимости от внешних условий [4], в то время как альтернативный подход подчеркивает изменчивость концентраций элементов под комплексным влиянием генетических особенностей и экологических факторов, чьё воздействие варьирует в зависимости от усло-

вий окружающей среды [5]. При значительном объёме работ, анализирующих корреляцию между загрязнением окружающей среды и элементным составом древесины, остаётся недостаточно изученной изменчивость химических характеристик растений в контексте сезонной динамики и функционального состояния экосистем [6; 7].

Территории Мещеры относятся к Национальному парку. Поскольку они расположены достаточно далеко от источников антропогенного загрязнения, то могут являться естественным «фоновым» геохимическим образцом [8].

В природных условиях на химический состав растений оказывает влияние целый ряд факторов. Ключевыми из них выступают видовая принадлежность растений и экологические условия, в которых существуют растительные сообщества. Экологические условия, в свою очередь, определяются характеристиками почв и материнских пород, а также глубиной залегания подземных вод. В Мещере преобладают почвы, сформированные на древних аллювиальных и водно-ледниковых отложениях, представленных супесями и песками. Основным минералом, определяющим состав этих почв, является кварц – его содержание достигает 98–99 %.

Фитоценозы Мещерского полесья, расположенного на бедных песчаных и супесчаных почвах с кислой реакцией (pH 3.5–4.5), характеризуются специфическим элементным составом.

Содержание кальция низкое (0.1–0.3 % в хвое сосны) из-за интенсивного вымывания из кислых подзолистых почв. Кислая среда усиливает вынос Ca^{2+} из корневой зоны. Дефицит усугубляется медленным разложением органики и слабым поступлением элементов из подстилки. Магний содержится крайне ограниченно (0.05–0.1 % в хвое), т. к. Mg^{2+} также вымывается в условиях кислых почв. Недостаток Mg приводит к межжилковому хлорозу, особенно на старых листьях. Антагонизм с калием и кальцием дополнительно снижает усвоение. Железа содержится до 200 мг/кг в хвое благодаря подвижности Fe^{3+} в кислой среде. Несмотря на высокую концентрацию, часть железа связывается в нерастворимые формы при pH > 6.5. Антагонизм с марганцем и цинком может приводить к ограничению его доступности растениям. Содержание марганца высокое (до 500 мг/кг в хвое) вследствие активной мобилизации в кислых почвах. Его избыток вызывает некроз листьев и подавляет усвоение Fe, Cu, Zn. Цинк содержится в низких количествах (20–50 мг/кг), т. к. в песчаных почвах Zn^{2+} легко вымывается, а его доступность снижается при pH < 5.5. Антагонизм с фосфором и железом приводит к образованию нерастворимых соединений. Симптомы дефицита цинка включают укорочение междоузлий и бронзовый оттенок листьев. Концентрация меди составляет 2–5 мг/кг из-за ограниченной доступности в кислых почвах и антагонизма с Mn и Zn. Таким образом, кислотность почв Мещеры усиливает подвижность Fe и Mn, при этом снижает доступность Ca, Mg, Cu, Zn. Например, избыток Mn подавляет усвоение Fe, а высокий уровень Zn блокирует поглощение Cu. Также грубая подстилка из хвои замедляет минерализацию, ограничивая поступление элементов в растения. В отличие от богатых гумусом почв, в Мещерских фитоценозах: в 2–3 раза ниже содержание Ca и Mg, в 5–10 раз выше концентрация Fe и Mn, а дефицит Zn и Cu выражен сильнее из-за песчаного субстрата.

В сосновых лесах биогеоценозы формировались на субстрате, который минералогически беден, где дефицит питательных веществ очень сильно выражен. Большую роль в таких условиях играет уровень грунтовых вод, а также положение фитоценозов в рельефе [9–11].

Сосняки лишайниковые формируются в верхних частях песчаных холмов и гряд, которые лишены в корнеобитаемой толще обогащенных элементами питания слоев.

Основные элементы питания, такие, как кальций и магний, присутствуют в почве в ограниченных количествах, из-за чего главным источником их поступления в растения служит минерализация органического опада. Исследования демонстрируют, что в лесных фитоценозах большая часть химических элементов поступает через опад древесных растений. При этом 80 % минеральных веществ высвобождается при разложении хвойного опада, тогда как на долю древесины приходится лишь 7 % от общего объёма [12].

По мере развития биогеоценозов происходят увеличение мощности почвенного профиля и формирование напочвенного покрова, представленного преимущественно зелёными мхами. Несмотря на их высокую зольность и повышенное содержание химических элементов (по сравнению с лишайниками), мхи практически не участвуют в питании древесных растений из-за крайне низкой способности к минерализации [8].

Сосняки черничные и брусничные формируются на слабоволнистых участках или в нижних частях склонов возвышенностей. Эти сообщества отличаются высокой продуктивностью (II класс бонитета) и плотностью древостоя [10; 13]. Близкое залегание грунтовых вод компенсирует дефицит минералов в почве, обеспечивая растения дополнительным источником питания. Оптимальные условия аэрации и увлажнения способствуют медленному разложению растительного опада: часть элементов вымывается в глубокие почвенные горизонты, другая включается в биологический круговорот, а значительная доля сохраняется в виде полуразложившихся остатков, формирующих лесную подстилку [11; 14].

Долинные ландшафты и пониженные участки междуречий, характеризующиеся минимальными абсолютными высотами, часто подвержены заболачиванию, что приводит к аккумуляции торфяных отложений.

В таких условиях развиваются сфагновые сосняки – низкопродуктивные лесные сообщества, относящиеся к IV классу бонитета [15]. Причинами низкой продуктивности являются изоляция корневых систем сосен от минерального горизонта, ограничивающая доступ к питательным веществам, следовательно, возможность корней поглощать элементы только из поверхностного слоя, где их содержание минимально [16]. Данные факторы создают экологический стресс, замедляющий рост деревьев и снижающий устойчивость экосистемы.

Содержание химических элементов в фитомассе растений служит индикатором продуктивности растительного сообщества и отражает материально-энергетический потенциал фитоценозов [17; 18].

Цель исследования: анализ динамики элементного состава доминирующих видов растений в сосновых фитоценозах Мещеры.

Методика проведения эксперимента

Исследования проводились в Рязанской и Владимирской Мещере на постоянных пробных площадях (ППП). В ходе работ выделены доминирующие типы сосновых фитоценозов, после чего осуществлён отбор образцов растительности: хвоя сосны, листья берёзы, дуба, черники, брусники, зелёные и сфагновые мхи, лишайники. Материал собирали в период конца июня – июля в 2004 и 2024 гг. Надземную фитомассу растений напочвенного покрова отбирали методом срезания [19]. Пробы хвои и листьев брали с южной стороны из средней части кроны у 12 деревьев на каждой ППП. Влажность образцов определяли методом, основанным на определении потери в массе за счет гигроскопической влаги и летучих веществ при высушивании образцов до абсолютно сухого состояния. Минерализацию растительных проб проводили мокрым озолением с раство-

рением их в 10% соляной кислоте. Зольность определяли в соответствии с ГОСТ 24027.2-80 [20]. Валовое содержание элементов (Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu) в растительном материале устанавливали методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) [21].

Химический анализ выполнен в аккредитованной лаборатории экологического анализа ООО «Мещерский научно-технический центр» с применением аттестованных методик, одной средней пробы с каждой ППП, с доверительной вероятностью 0,95.

Обсуждение экспериментальных данных

Растения являются чувствительными биоиндикаторами окружающей среды. Долгосрочные изменения их влажности сигнализируют о климатических сдвигах (потепление, засухи) или антропогенных воздействиях (изменение гидрологического режима).

Температурные данные за 2004 год (средняя годовая +5.8 °C, июнь +15.3 °C, июль +18.7 °C) рисуют картину климатически умеренного, нежаркого года, особенно в ключевые летние месяцы. 2024 год характеризуется средней годовой температурой +7.5 °C, июнь +20.0 °C, июль +21.5 °C. Изменение на +1.7 °C за 20 лет при практически равной сумме выпавших осадков в год (2004 год – 552 мм, 2024 год – 548 мм) является существенным повышением. Особенно сильное потепление в июне (+4.7 °C). Общий рост летних температур объясняют снижение влажности растений исследуемых фитоценозов.

В хвое сосны, которая наиболее чувствительна к раннелетним засухам и летнему тепловому стрессу, снижение влажности произошло на 1.8–3.2 %, в листьях деревьев и кустарничков – на 1.4–2.3 %. Отмечается относительная устойчивость мхов к такому повышению температуры: зеленые мхи показали меньшее снижение влажности (0.4–1.5 %), т. к. способны впитывать влагу из воздуха (туманы, роса) и быстро реагировать на кратковременные осадки; сфагновые мхи – уменьшение данного показателя на 1.1 %. Благодаря уникальной гигроскопичности сфагновые мхи лучше удерживают воду в переувлажненных местообитаниях, но небольшое падение влажности все равно указывает на снижение доступности влаги даже в болотных условиях (табл. 1).

Таблица 1. Влажность и зольность растений фитоценозов Мещеры

Фитоценоз	Растение, орган	Влажность, %			Зольность, %		
		2004 г.	2024 г.	среднее	2004 г.	2024 г.	среднее
Сосняк лишайниковый	сосна (хвоя)	91.7	89.1	90.4	1.5	1.6	1.55
	лишайник	88.8	87.2	88.0	1.2	1.4	1.3
Сосняк зеленомошный	сосна (хвоя)	92.1	90.2	91.2	1.3	1.5	1.4
	береза (листья)	68.3	66.7	67.5	2.9	3.1	3.0
	брусника (листья)	68.5	66.5	67.5	2.4	2.6	2.5
	зеленые мхи	73.1	72.7	72.9	5.2	5.6	5.4
Сосняк черничный	сосна (хвоя)	91.8	89.3	90.6	1.9	2.2	2.05
	береза (листья)	69.4	67.1	68.3	3.9	4.2	4.05
	дуб (листья)	70.1	68.9	69.5	3.2	3.4	3.3
	черника (листья)	69.8	68.5	69.2	3.8	4.2	4.0
	зеленые мхи	73.4	71.9	72.7	4.4	4.8	4.6
Сосняк сфагновый	сосна (хвоя)	92.4	89.2	90.8	2.1	2.4	2.25
	береза (листья)	68.7	66.8	67.8	2.4	2.8	2.6
	сфагновые мхи	98.4	97.3	97.9	2.9	3.2	3.05

Величина снижения влажности варьируется от 0.4 % (зеленые мхи в зеленомошном сосняке) до 3.2 % (хвоя сосны в сфагновом сосняке). Наиболее типичное снижение находится в диапазоне 1.5–2.5 %.

Ранжированный ряд изменения влажности в растениях выглядит следующим образом: хвоя сосны > сфагнум >> лишайники > зеленые мхи >> листья деревьев и кустарничков.

Зольность растений, отражающая содержание минеральных веществ, является важным количественным показателем питательных элементов. На уровень зольности влияют внутренние генетические и структурные особенности растений, а также внешние факторы окружающей среды, включая режим увлажнения, температуру, степень техногенного загрязнения воздуха, солевой баланс, кислотность почвы и содержание азота [8].

Среди изученных в Мещере видов растений наименьшей зольностью характеризуются лишайники и хвоя сосны в лишайниковом сосняке. Это свидетельствует об их олиготрофности и объясняет, почему лишайниковые сосняки являются первичной стадией освоения песчаных территорий растительностью. В 2004 году зольность лишайника составила 1.2 % (табл. 1).

К 2024 году зольность лишайника возросла на 0.2 %, составив 1.4 %. В период с 2004 по 2024 г. зольность хвои сосны варьировалась от 1.3 до 2.25 %. Наивысший уровень зольности у хвои сосны был зарегистрирован в фитоценозе сосняка сфагнового и составил 2.25 %. Также максимальные показатели зольности наблюдаются у лиственных пород: березы и черники (от 3.0 до 4.05 %), а также у зеленых мхов (от 4.6 до 5.4 %) (табл. 1).

В среднем зольность увеличивалась на 0.3–0.4 % в динамике с 2004 по 2024 г.

Анализ распределения химических элементов питания показал определенные тенденции. Для всех изученных растений характерно превалирующее содержание магния и кальция.

При этом наиболее высокие показатели содержания определяемых элементов наблюдаются в листве березы и дуба, а также в зеленых мхах (табл. 2).

Хвоя сосны и сфагновые мхи отличаются наибольшей концентрацией исследуемых элементов. Лишайники демонстрируют минимальное содержание кальция и магния – в среднем за период исследований эти показатели составили 0.035 и 0.04 % от массы абсолютно сухого вещества соответственно.

При этом различия в накоплении кальция и магния растительностью невелики: как правило, содержание кальция превышает уровень магния в 1.1–1.5 раза. Ранжированный ряд аккумуляции данных элементов растениями выглядит следующим образом: лишайники < сфагновые мхи < хвоя сосны < листья брусники < зелёные мхи < листья берёзы < листья черники < листья дуба.

Таблица 2. Содержание химических элементов в растениях сосновых фитоценозов Мещеры (% от массы абсолютно сухого вещества) в 2024 г.

Растение, орган	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Сумма
сосна (хвоя)	0.37	0.08	0.011	0.03	0.002	0.0003	0.4933
	0.38	0.09	0.010	0.02	0.003	0.0003	0.5033
лишайник	0.04	0.04	0.006	0.005	0.002	0.0002	0.0932
	0.03	0.04	0.007	0.006	0.002	0.0002	0.0852

сосна (хвоя)	0.25	0.21	0.03	0.03	0.002	0.0002	0.5222
	0.26	0.22	0.02	0.03	0.003	0.0003	0.5333
береза (листья)	0.45	0.18	0.02	0.11	0.0044	0.0004	0.7648
	0.46	0.19	0.02	0.12	0.0043	0.0003	0.7946
брусника (листья)	0.50	0.12	0.01	0.1	0.0028	0.0002	0.7330
	0.51	0.13	0.01	0.1	0.0027	0.0002	0.7529
зеленые мхи	0.36	0.24	0.07	0.01	0.02	0.0003	0.7003
	0.35	0.25	0.08	0.01	0.03	0.0004	0.7204
сосна (хвоя)	0.19	0.07	0.03	0.01	0.002	0.0002	0.3022
	0.18	0.08	0.04	0.02	0.003	0.0002	0.3232
береза (листья)	0.65	0.41	0.021	0.12	0.0038	0.0004	1.2052
	0.66	0.43	0.022	0.12	0.0037	0.0003	1.2360
дуб (листья)	1.43	0.22	0.02	0.12	0.0041	0.0004	1.7844
	1.44	0.21	0.02	0.13	0.0040	0.0003	1.8043
черника (листья)	0.33	0.43	0.06	0.04	0.001	0.0003	0.8613
	0.34	0.45	0.07	0.04	0.002	0.0002	0.9022
зеленые мхи	0.88	0.41	0.07	0.02	0.002	0.0006	1.3826
	0.89	0.42	0.06	0.03	0.003	0.0005	1.4035
сосна (хвоя)	0.23	0.21	0.02	0.03	0.001	0.0004	0.4914
	0.24	0.22	0.03	0.03	0.001	0.0005	0.5215
береза (листья)	0.47	0.41	0.02	0.06	0.002	0.0005	0.9625
	0.48	0.42	0.03	0.06	0.003	0.0005	0.9935
сфагновые мхи	0.15	0.12	0.07	0.007	0.002	0.0004	0.3494
	0.16	0.12	0.07	0.008	0.003	0.0006	0.3494

Наибольшей способностью к аккумуляции железа отличаются сфагновые и зелёные мхи: среднее содержание этого элемента в их тканях достигает 0.08 % от массы абсолютно сухого вещества.

Высокая концентрация железа придает золе мхов характерный красно-коричневый оттенок, что связано с образованием оксидов железа. Иерархия аккумуляции железа в экосистеме следующая: мхи (сфагновые и зелёные) – лидеры по накоплению, хвоя сосны – умеренное содержание, растения подлеска – сниженные показатели. Листья наземных кустарничков (например, черники, брусники) – минимальные значения. Такое распределение отражает различия в физиологии видов и их адаптацию к условиям среды, где железо часто присутствует в трудноусвояемых формах.

Отличительной особенностью растительности Мещеры является высокое содержание марганца. Среди рассмотренных микроэлементов для полесских ландшафтов марганец – типоморфный (табл. 2). Концентрация марганца практически во всех исследуемых растительных образцах превышает концентрацию железа. Исключение составили сфагновые мхи, зеленые мхи, лишайник, листья черники (исследование проводилось в 2024 г.), а также хвоя сосны в черничном сосняке. Накопление марганца в растениях фитоценозов Мещеры имеет следующий порядок: лишайники < сфагновые мхи < < хвоя сосны < листья березы < зеленые мхи < листья черники.

Среднее содержание марганца в абсолютно сухом веществе за 2004–2024 гг. в хвое сосны находится в пределах 0.01–0.02 %, в листьях напочвенных кустарничков – 0.04–0.1 %, тогда как в лишайниках его концентрация не превышает 0.01 %.

Исследования выявили, что на вершинах песчаных гряд, где почвы наиболее

обеднены микроэлементами, растительность демонстрирует повышенную активность поглощения марганца по сравнению с другими биотопами.

Цинк и медь аккумулируются растительностью мещерских сосняков значительно менее активно, чем марганец. Наибольшее накопление цинка (в среднем за 2004–2024 гг.) зафиксировано в листьях дуба (0.004 %). Далее по убывающей следуют: листья берёзы – 0.0035 %, сфагновые мхи – 0.0025 %, листья дуба и хвоя сосны – 0.002 %, лишайники – 0.002 %, листья черники – 0.0015 %, зелёные мхи – 0.0013 %.

Повышенное содержание меди наблюдается в зелёных мхах (0.00045 %) и листьях берёзы (0.0004 %). В остальных исследуемых видах концентрация элемента не превышает диапазона 0.0002–0.0003 %.

Анализ данных 2004–2014–2024 гг. показывает устойчивую тенденцию к незначительному увеличению содержания большинства исследуемых элементов (Ca, Mg, Fe, Mn, Zn) в золе растений различных сосновых фитоценозов Мещеры к 2024 году по сравнению с 2004 годом. Наиболее заметны увеличения Fe (особенно в хвое сосны и листьях некоторых растений) и Zn (в мхах и ветвях сосны). Концентрации Cu остаются стабильно очень низкими.

Содержание химических элементов в золе растений не всегда точно отражает уровень их поглощения из почвы. Это связано со способностью живых организмов избирательно аккумулировать определённые элементы в своих тканях. В результате такой биохимической селективности их концентрация в минеральной части организмов (зольном составе) существенно отличается от фоновых значений в окружающей среде. Зольный состав отражает лишь часть элементного обмена, так как не учитывает органические соединения и процессы биотрансформации. Растения и другие организмы регулируют поглощение элементов в зависимости от физиологических потребностей и адаптаций. Например, кальций может накапливаться в золе даже при его дефиците в почве, а тяжёлые металлы – блокироваться на уровне корней.

Биогеохимический показатель: интенсивность поглощения химического элемента (также известен как коэффициент биологического поглощения (КБП)) был введён в научный оборот Б. Б. Полыновым (1948) и детализирован А. И. Перельманом (1975). Он отражает способность живых организмов избирательно концентрировать химические элементы из окружающей среды, что играет ключевую роль в биогенной миграции веществ – перемещении элементов в биосфере при участии растений, животных и микроорганизмов.

Коэффициент биологического поглощения рассчитывают по формуле:

$$K_б = \frac{\text{Концентрация элемента в золе растения (мг/кг)}}{\text{Концентрация элемента в почве (мг/кг)}}.$$

Чем выше значение коэффициента, тем активнее организм аккумулирует элемент.

Коэффициент биологического поглощения позволяет выявить элементы, которые активно вовлекаются в биологический круговорот (например, Ca, Mg, Mn в сосновых лесах Мещеры), а также характеризует адаптацию растений к дефициту питательных веществ. У берёзы и черники КБП для Ca и Mn может превышать фоновые значения почвы в 100 раз, тогда как у мхов и лишайников – лишь в 10 раз. Хвойные растения (сосна) демонстрируют низкое поглощение Mg и Cu, но повышенное накопление Fe и Mn. Указанный коэффициент помогает оценить влияние антропогенных факторов (загрязнение тяжёлыми металлами, деградация почв).

Наибольшую активность поглощения среди изученных элементов демонстрируют кальций (Ca), магний (Mg) и марганец (Mn). Коэффициент биологического по-

глощения варьирует в зависимости от вида растений: максимальные значения характерны для берёзы и черники (превышение фоновых показателей в 100 раз), минимальные – для зелёных мхов и лишайников (в 10 раз). Специфика аккумуляции элементов заключается в том, что листья берёзы и черники активно извлекают из субстрата марганец и кальций. Хвоя сосны концентрирует преимущественно марганец и магний, что отражает адаптацию к условиям бедных почв. Несмотря на низкое содержание подвижных форм Cu и Zn в почвообразующих породах, их биологическое поглощение остаётся интенсивным (КБП ≈ ×10). Высокая скорость поглощения меди растениями (особенно берёзой и мхами) компенсирует её дефицит в почвах, предотвращая развитие хлороза листьев. Цинк активно накапливается в лиственных видах, но его доступность снижается из-за конкуренции с Fe и Mn.

Таким образом, даже при ограниченной доступности элементов в почве биологические механизмы растений обеспечивают их эффективное усвоение, поддерживая стабильность экосистем.

Заключение

В экосистемах, формирующихся на бедных почвах, растения вырабатывают адаптации, позволяющие эффективно извлекать дефицитные элементы питания. Основная часть веществ, высвобождаемых при разложении органического опада, реутилизируется в биологическом круговороте, минимизируя их вымывание из ландшафта. Однако дисбаланс между потреблением элементов растениями и их возвратом в почву, усугубляемый изначальной минералогической бедностью субстрата, создает напряженный режим минерального питания.

Несмотря на это, сосновые биогеоценозы отличаются высокой замкнутостью круговорота веществ, что отражает их способность экономно расходовать ресурсы на синтез биомассы. Интенсивное поглощение химических элементов корневыми системами и их быстрое вовлечение в цикл «растение – почва» компенсируют исходно низкий уровень доступных питательных веществ. Это обеспечивает устойчивое функционирование экосистем сосновых лесов Мещерского полесья даже в условиях длительного дефицита элементов. Ключевыми механизмами устойчивости являются – реутилизация питательных веществ через разложение опада, минимизация потерь элементов за счёт замкнутого цикла, оптимизация метаболизма растений для работы в условиях стресса.

Литература

1. Helmisari, H. S. Spatial and age-related variation in nutrient concentration of *Pinus sylvestris* needles / H. S. Helmisari // Silva Fennica. 1992. № 26 (3). – С. 145–153.

2. Ji, H. Comparison of the nutrient resorption stoichiometry of Quercus variabilis Blume growing in two sites contrasting in soil phosphorus content / H. Ji, J. Wen, B. Du, N. Sun, B. Berg, C. Liu // Annals of Forest Science. 2018. Vol. 75, № 2. – P. 59.

3. Linnik, V. G. Geochemical assessment and spatial analysis of heavy metals pollution around coal-fi red power station / V. G. Linnik, T. M. Minkina, T. V. Bauer, A. A. Saveliev, S. S. Mandzhieva // Environmental Geochemistry and Health. 2019. Vol. 42, no. 2. – Pp. 4087–4100.

4. Turkyilmaz, A. Use of tree rings as a bioindicator to observe atmospheric heavy metal deposition / A. Turkyilmaz, H. Sevik, K. Isinkaralar, M. Cetin // Environmental Science and Pollution Research. 2019. Vol. 26, no. 5. – Pp. 5122–5130.

5. Goyal, D. Effect of heavy metals on plant growth: an overview / D. Goyal,

A. Yadav, M. Prasad, T. B. Singh, P. Shrivastav, A. Ali, S. Mishra // Contaminants in agriculture: sources, impacts and management. 2020. – Pp. 79–101.

6. Zribi, I. Biochemical composition of Tunisian Nigella sativa L. at different growth stages and assessment of the phytotoxic potential of its organic fractions / I. Zribi, N. Ghezal, H. Sbai, G. Richard, M. L. Fauconnier, R. Haouala // Plant Biosystems – An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology. 2019. Vol. 153, no. 2. – Pp. 205–212.

7. Habashi, H. Chemical content and seasonal variation of throughfall and litterfl ow under individual trees in the Hyrcanian forests of Iran / H. Habashi, M. Moslehi, E. Shabani, T. Pypker, R. Rahmani // Journal of Sustainable Forestry. 2019. Vol. 38, no. 2. – Pp. 183–197.

8. Подоль, С. Р. Распределение и динамика химических элементов в сосновых биогеоценозах Мещерского полесья / С. Р. Подоль, З. И. Попова // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2015. № 2. – С. 87–92.

9. Решетникова, Т. В. Лесные подстилки как депо биогенных элементов / Т. В. Решетникова // Вестник КрасГАУ. 2011. № 12. – С. 75–82.

10. Колмогорова, Е. Ю. Некоторые особенности химического состава опада сосны обыкновенной, произрастающей в условиях породного отвала / Е. Ю. Колмогорова, В. И. Уфимцев // Успехи современного естествознания. 2018. № 11-2. – С. 267–272.

11. Коломиец, Н. Э. Оценка элементного профиля листьев, корней, семян и сухих экстрактов Arctium lappa и Arctium tomentosum / Н. Э. Коломиец, Р. С. Боев, Л. В. Жалнина, Али Абдуджалил Каид Хасан, А. А. Марьин // Химия растительного сырья. 2024. № 2. – С. 138–147.

12. Робакидзе, Е. А. Элементный состав листьев Vaccinium vitis-idaea и V. myrtillus (Ercaceae) в сосняках зеленомошной группы типов в условиях аэротехногенного загрязнения в Республике Коми / Е. А. Робакидзе // Самарский научный вестник. 2023. Т. 12, № 4. – С. 107–113.

13. Иванова Е. А. Влияние воздушного промышленного загрязнения на химический состав опада хвои сосны в сосновых лесах на северном пределе распространения / Е. А. Иванова, Н. В. Лукина, В. Э. Смирнов, Л. Г. Исаева // Лесоведение. 2022. № 2. – С. 157–171.

14. Килюшева, Н. В. Сравнительный анализ содержания минеральных элементов в древесине сосны и ели / Н. В. Килюшева, П. А. Феклистов, Н. В. Ежова, И. Н. Болотов, Б. Ю. Филиппов // Лесной журнал. 2017. № 5. – С. 64–72.

15. Хох, А. Н. Особенности элементного состава древесины сосны обыкновенной в зависимости от условий местопроизрастания и фазы вегетации / А. Н. Хох, В. Б. Звягинцев // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 1. – С. 47–56.

16. Кучеров, И. Б. Лишайниковые сосняки средней и северной тайги европейской России / И. Б. Кучеров, А. А. Зверев // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 3 (19). – С. 46–80.

17. Воскресенская, О. Л. Большой практикум по биоэкологии. Ч. 1: учеб. пособие / О. Л. Воскресенская, Е. А. Алябышева, М. Г. Половникова. Мар. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2006. – 107 с.

18. Агрохимия биогенных элементов: учеб. пособие / Шеуджен А. Х., Бондарева Т. Н., Лебедовский И. А., Осипов М. А. – Краснодар: КубГАУ, 2020. – 223 с.

19. Методы изучения лесных сообществ / Андреева Е. Н., Баккал И. Ю., Горшков В. В. и др. Рос. акад. наук. Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова. – Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ. 2002. – 240 с.

20. ГОСТ 24027.2-80. Сырье лекарственное растительное Методы определения

влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирного масла. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 10 с.

21. ГОСТ 32343-2013 (ISO 6869:2000). Корма, комбикорма. Определение содержания кальция, меди, железа, магния, марганца, калия, натрия и цинка методом атомно-абсорбционной спектрометрии. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 21 с.

Поступила в редакцию 26 мая 2025 г.
Принята 10 июня 2025 г.

UDC 581.192

DOI: 10.21779/2542-0321-2025-40-2-85–94

The Elemental Composition of Pine Phytocenoses of the Meshchersky Polesie

O. V. Chernikova[1], Yu. A. Mazhayskyi[2]

[1] The Academy of the FPS of Russia; Russia, 390000, Ryazan, Sennaya st., 1; chernikova_olga@inbox.ru

[2] Meshchersk branch of the Federal State Budgetary Budgetary Institution FNTS VNIIGiM named after A.N. Kostyakov; Russia, 390021, Ryazan, Meshcherskaya st., 1a

Abstract. The paper presents the data on the content of chemical elements (Ca, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn) in various components of pine ecosystems of Meschera: tree species of different ages, undergrowth and ground cover. The study covers two observation periods, 2004 and 2024, which allowed to perform comparative analysis of the mineral composition of plants. The general sequence of accumulation of elements in all the studied types is: Ca > Mg > Mn > Fe > Zn > Cu. Geochemical specialization of plants has shown that hardwoods (birch, blueberry) accumulate alkaline earth elements (Ca, Mg), zinc and manganese. Plants of the ground cover (mosses, lichens) accumulate copper and iron. The pine tree has a deficiency of magnesium, calcium and copper with an increased content of manganese and iron in the needles. Lichens are distinguished by a minimal concentration of ash elements. The dynamics over 20 years has shown that the total content of ash elements in phytocenoses has remained almost unchanged. Ecosystem stability is ensured by the active absorption of elements by plants and their efficient processing in the plant-soil system, despite the initially low availability of nutrients. The revealed patterns emphasize the role of biogenic factors in the circulation of elements and the adaptation of phytocenoses to the poor sandy soils of Meschera. The data obtained can be used to monitor the state of forest ecosystems under anthropogenic stress.

Keywords: elemental composition, pine phytocenoses, chemical examination, biological absorption.

Received 26 May, 2025
Accepted 10 June, 2025.