

DOI: 10.31509/2658-607x-202473-153  
УДК 630\*181+582.475(470.343)

## СОДЕРЖАНИЕ ЗОЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДРЕВЕСИНЕ, КОРЕ И ХВОЕ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ

© 2024

Ю. П. Демаков, О. В. Шейкина\*, Е. С. Шарапов

*Поволжский государственный технологический университет  
Россия, 424000 Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3*

\*E-mail: ShejkinaOV@volgatech.net

Поступила в редакцию: 11.06.2024

После рецензирования: 15.09.2024

Принята к печати: 25.09.2024

Приведены данные по содержанию ряда металлов в образцах древесины, коры и хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей на территории Республики Марий Эл в древостоях разного возраста, происхождения и лесорастительных условий. Анализ, проведенный на атомно-абсорбционном спектрометре AAnalyst 400, показал, что в коре, по сравнению с древесиной, содержится в 7-8 раз больше Ca и Sr, в 4 раза – Cd, а в 2 раза – Fe и Zn. По содержанию остальных металлов кора существенно не отличается от древесины, однако ее зольность в 6.4 раза выше. Зольность хвои в 6.7 раза выше, чем древесины, однако в ней значительно выше содержание K, Mn, Ca и Zn, а по сравнению с корой – Sr, Ni и Pb. Содержание каждого из металлов изменяется в больших пределах в зависимости от возраста и индивидуальных особенностей деревьев, а также условий внешней среды. Особенно велика вариация содержания в древесине Ni (CV = 92 %), за которым следуют Mg, Pb, Co и Fe (CV = 83-89 %), меньше всего изменяется содержание в ней Ca (CV = 38 %). В коре наиболее значительно варьирует концентрация Cd и Ni (CV = 172 %), за которыми следуют Sr, Mg и K (CV = 88-111 %). Наименее варьирует содержание в ней Ca и Cu (CV = 55-62 %). В хвое более всего изменяется содержание Sr, Ni и Co (CV = 85-96%), менее всего варьирует содержание K и золы (CV = 18-24 %).

**Ключевые слова:** Республика Марий Эл, сосна обыкновенная, древесина, кора, хвоя, зольность, элементный состав, варьирование

Элементный состав организмов, в том числе и древесных растений, который у каждого вида сугубо специфичен, несет большой объем информации о типе их метаболизма, характере влияния на него абиотических и биоценологических факторов, а также роли в формировании и развитии сообществ (Bowen, 1966; Ильин, 1985, 1991; Кист, 1987; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Вернадский, 1994; Алексеенко, 2000, 2001; Никонов и др., 2004; Баргальи, 2005; Авесаломова, 2007; Ермаков, 2018). Его изучение, базирующееся на фундаментальном принципе химического единства организмов и среды их обитания, необходимо для решения многих научных и прикладных задач: 1) оптимизации минерального питания и водоснабжения растений; 2) познания законов почвообразования, развития биогеоценозов и биогеохимической эволюции видов; 3) оценки ответных реакций организмов и биогеоценозов в целом на загрязнение окружающей среды продуктами техногенной деятельности человека; 4) селекционного отбора особей по типу их метаболизма и другим хозяйственно ценным признакам, связанным с их химизмом. Сложные сообщества лесных экосистем, состоящие из большого числа

принципиально разных групп организмов, существенно изменяют качественное состояние исходной природной среды в результате биологического круговорота, в котором участвуют все химические элементы, содержащиеся в земной коре, а также непрерывного обмена с ней энергией и информацией (Никонов и др., 2004).

Несмотря на длительную историю изучения элементного состава древесных растений и его изменения под влиянием внешних и внутренних факторов, многие вопросы остаются еще слабо освещенными. Каждая новая работа в этом направлении будет, несомненно, актуальной, вносящей вклад в развитие фундаментальных знаний о состоянии ценопопуляций древесных растений как сложных самоорганизующихся и саморазвивающихся систем, закономерностях их функционирования и развития, на основе которых могут быть приняты адекватные управленческие решения.

В данной статье, **цель** которой заключалась в оценке пределов изменчивости содержания основных биологически важных металлов в древесине, коре и хвое деревьев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в лесах Республики Марий Эл под влиянием комплекса при-

родных и антропогенных факторов, мы сделали попытку обобщения наших прежних разрозненных работ (Демаков и др., 2010а, 2010б, 2011, 2012а, 2012б, 2012в, 2012г, 2013б, 2013в; Демаков, Швецов, 2013), связать их между собой и сопоставить с результатами других исследователей, а также выделить наиболее важные элементы-индикаторы.

## ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Изучением элементного состава тканей разных частей древесных растений ученые начали заниматься еще во второй половине XIX в. Обобщение работ ученых того времени, посвященных в основном выяснению степени требовательности разных древесных пород к минеральному питанию, было проведено Морицем Генрихом Бюсгеном (1858-1921). В своей монографии, первое издание которой вышло на немецком языке в 1897 г., он показал, что эта прикладная задача может быть решена либо с помощью специально поставленных опытов над сеянцами или саженцами древесных растений, либо на основе *химического анализа элементного состава золы их тканей* (Бюсген, 1961). Причем второй из этих методов является, по его мне-

нию, менее трудоемким и более надежным.

Зольность и элементный состав тканей растений, как было показано этим исследователем, изменяются в зависимости от условий их произрастания. Установлены различия в содержании золы в древесине по радиусу и длине ствола (зольность заболони выше, чем сердцевины), а также сезонные и суточные изменения содержания кальция в коре и листе деревьев, свидетельствующие о его подвижности и активном участии в метаболизме. Им было также отмечено, что химические элементы из окружающей среды растения поглощают очень избирательно. Так, к примеру, содержание алюминия в тканях деревьев очень мало, хотя он является одним из наиболее распространенных элементов в земной коре. Первое место в ранговом ряду элементов по содержанию в древесине сосны обыкновенной занимает Са, за которым следуют в порядке снижения его величины К, Mg, P, S, Mn, Si, Na и Fe.

В монографии М. Бюсгена показано также, что истощение запасов калия в сосняках Баварии в результате использования человеком запасов древесины может происходить, в зависимости от плодородия почв, через 4-7 тыс. лет, P –

7.5-9.8 тыс. лет (63-70 оборотов), а Са – 57 тыс. лет (более 400 оборотов рубки). Наши исследования (Демаков и др., 2013б) показали ошибочность этого утверждения, поскольку вынос из почвы элементов минерального питания аборигенными древесными растениями в типичных для них биотопах полностью восполняется за счет их выпадения из атмосферы с пылью и водными осадками.

В XX-XXI вв. изучение элементного состава тканей растений было направлено в основном на познание закономерностей протекания в экосистемах биологического круговорота веществ, процесса почвообразования, формирования структуры и развития растительных сообществ (Ремезов и др., 1959; Родин, Базилевич, 1965; Смольянинов, 1969; Казимиров, Морозова, 1973; Гришина, 1974; Казимиров и др., 1977; Мананов, Никонов, 1981; Кожевникова, Второва, 1988; Лукина, Никонов, 1996, 1998; Ушакова, 1997; Винокурова и др., 1999, 2002; Фокин, 1999; Винокурова, 2003; Авессаломова, 2007; Базилевич, Титлянова, 2008; Пугачев, 2009; Титлянова, 2014; Бобкова и др., 2020). Затем тренд исследований сместился в сторону геохимии ландшафтов и геохимической

экологии (Ковальский, 1974; Воздействие выбросов ..., 1989; Ковалевский, 1991; Елпатьевский, 1993; Лукина, Никонов, 1996, 1998; Добровольский, 1998; Ермаков, 1999; Перельман, Касимов, 1999; Алексеенко, 2000; Авессаломова, 2007; Кузьмин и др., 2007; Каманина, Савватеева, 2014).

В работах современных авторов, в которых, кстати, нет ни одного упоминания монографии М. Бюсгена, а также работ Р. Гартига, Р. Вебера и других ученых XIX в., занимавшихся изучением элементного состава тканей древесных растений и участием химических элементов в их метаболизме, показано, что каждый химический элемент играет определенную роль в обеспечении жизнедеятельности растений (Кретович, 1980; Веретенников, 1987; Кист, 1987; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Баргальи, 2005; Авессаломова, 2007). Так, к примеру, кальций является основой оболочки растительных клеток, а его соединения с пектиновыми веществами служат для склеивания соседних клеток. Он используется в растительных клетках как вторичный посредник для контроля многих процессов (закрытие устьиц, тропизм, рост пыльцевых трубок, акклиматизация к холоду и экспрес-

сия генов, фотоморфогенез). Функция кальция заключается также в поддержании структуры рибосом, в которых происходит синтез белка. Он, в отличие от других элементов, в растениях малоподвижен и накапливается в стареющих органах. Калий участвует в синтезе углеводов и большинстве ферментативных процессов, происходящих в тканях растений, повышает водоудерживающую способность цитоплазмы, интенсивность фотосинтеза и отток ассимилянтов. Он необходим для работы устьичного аппарата и включения фосфора в органические соединения, участвует в синтезе рибофлавина, а также в создании разности электрических потенциалов между клетками, нейтрализуя отрицательные заряды неорганических и органических анионов. Накапливается калий в основном в молодых тканях растений, не образуя прочных органических соединений, а вступает лишь в слабые адсорбционные взаимодействия с белками и в обменные реакции с органическими кислотами.

Магний, как показано отмеченными выше исследователями, играет существенную роль в обмене веществ, особенно в молодых органах растений. Он входит в состав хлорофилла, активизирует

ферменты, переносящие фосфат с АТФ на молекулу сахара. Его недостаток приводит к уменьшению содержания в растениях фосфора, даже если фосфаты в достаточных количествах имеются в питательном субстрате. При недостатке магния тормозится превращение моносахаров в крахмал, слабо функционирует механизм синтеза белков, нарушается формирование пластид. Конкурентами в процессе поглощения магния растениями являются кальций, калий и марганец, последний из которых входит в состав многих окислительных ферментов растений, принимает активное участие в тканевом дыхании, окислительных процессах и восстановлении нитратов в процессе фотосинтеза. Железо входит в состав ряда ферментов, в том числе дыхательных цитохромов, участвует в синтезе хлорофилла, хотя и не входит в его состав, а также участвует в процессе восстановления нитратов и фиксации N клубеньковыми бактериями.

Цинк играет важную роль в процессе тканевого дыхания растений, входит в состав хлоропластов, участвует в фотосинтезе и образовании триптофана. При дефиците цинка у растений подавляется скорость деления клеток, нарушается фосфорный обмен, уменьшается содер-

жание сахарозы и крахмала, увеличивается количество органических кислот и небелковых соединений азота. Цинк нужен не только для каталитической активности, но и для стабилизации структуры белков, связывая между собой молекулы РНК и ДНК (Никитин, 2016). Из 49 универсальных белков 37 содержат Zn, 19 – Mn и только три – Fe.

Медь входит в состав ферментов, катализирующих окисление аскорбиновой кислоты, дифенолов и гидроксирование монофенолов, активирует витамины группы В, влияет на белковый и углеводный обмен, защищает от распада хлорофилл, способствует синтезу белка. В физиологических процессах растений происходит антагонизм между Mn и Fe: при недостатке первого из них увеличивается содержание закисной формы второго элемента, а при избытке его, наоборот, повышается содержание окисных форм. В ферментативных окислительно-восстановительных реакциях происходит также антагонистическое взаимодействие между Cu и Fe.

Элементный состав является, по мнению многих исследователей (Bowen, 1966; Ильин, 1985, 1991; Кист, 1987; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Вернадский, 1994; Алексеенко, 2000, 2001; Ви-

ноградов, 2001; Никонов и др., 2004; Баргальи, 2005; Авессаломова, 2007; Ермаков, 2018), не менее важным признаком биологического вида, чем другие, отражая многие его специфические свойства, в том числе состояние жизнеспособности и способность к адаптациям. Формирование особенностей сложения элементной структуры организма заложено в геноме каждой особи, но зависит также от ее физиологических потребностей в конкретный момент времени и сложившихся условий среды обитания. Все биологические виды в процессе длительной эволюции выработали механизмы активного селективного извлечения необходимых элементов из среды и выведения за пределы организма токсичных избытков, однако эта избирательность имеет пределы, в результате чего содержание химических элементов в их органах и тканях варьирует в определенных границах, отступление от которых свидетельствует о наличии патологии метаболизма особи и снижении ее жизнеспособности. При этом вариации химического состава биологического вида тем больше, чем ниже стоит он на эволюционной лестнице (Кист, 1987; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Ильин, 1991).

Определенное представление об элементной структуре биологических видов можно получить, как первоначально предполагалось учеными (Вернадский, 1994), на основе химического анализа морской воды, где предположительно и зародилась жизнь. Исследования химического состава морских организмов, проведенные в начале XX в., показали ошибочность такого подхода, выявив большую способность организмов к формированию своего сугубо специфического химического состава (Виноградов, 2001). Несмотря на то, что характер распределения концентрации элементов в организмах и окружающей среде различен, в целом все же имеются общие черты (Ковальский, 1974; Ильин, 1985; Романкевич, 1988; Ковальский, 1991; Никонов и др., 2004; Баргальи, 2005; Ермаков, Тютиков, 2008; Markert, Fränzle, Wünschmann, 2015; Ермаков, 2018). Так, в частности, достоверно установлено, что концентрация их во всех средах закономерно уменьшается с увеличением атомной массы и заряда (Кист, 1987; Ильин, 1991; Вернадский, 1994). Отмечено также, что между содержанием элементов в растениях и почвенных растворах наблюдается четко выраженная линейная зависимость (Bowen, 1966; Лу-

кина, Никонов, 1996, 1998), которая с увеличением их концентрации в среде нарушается (Кист, 1987). Между содержанием основных макроэлементов в растениях и почвах, как отмечает В. В. Ермаков (2018), наблюдается довольно тесная корреляция. Показано, что основными химическими элементами в ранговом ряду у организмов являются С, О, N, H, Ca, Mg, Na, K, P, S, Cl и Si, за которыми следуют Fe, Al, Mn, Cu, Zn, Sr, Ba и I. Мала концентрация в тканях многих биологических видов Mo, Ni, Ti, U, Cr, Cs, Se, Co и W, которые являются катализаторами важных жизненных процессов. Для обоснованной оценки степени биофильности элементов применительно к растениям целесообразно использовать коэффициенты биофильности и биологического поглощения, представляющие собой отношение их концентрации в зольном остатке организма, почве и кларке литосферы (Перельман, 1975, 1989; Перельман, Касимов, 1999; Авессаломова, 2007).

Элементный состав древесины, коры и хвои деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), которая является одной из наиболее распространенных древесных растений в бореальных лесах Евразии (Усольцев, 2008, 2014), изучен

довольно глубоко (Leyton, Armson, 1955; Бутузова, 1964; Вараксина и др., 1967; Митрофанов, 1973; Казимиров и др., 1977; Козлов, 1978; Грибовская и др., 1984; Адаменко и др., 1982; Мейстрик, 1988; Хантемиров, 1991, 1996; Лукина и др., 1994; Второва, Маркет, 1995; Маркет, Второва, 1995; Корбукова, 1996; Лукина, Никонов, 1996, 1998; Баргальи, 2005; Авессаломова, 2007; Дейнеко и др., 2007; Сибиркина, 2013; Миронова, 2014, 2018; Медведев и др., 2015; Храмченкова и др., 2016; Килюшева и др., 2017; Хох, 2018; Хох, Позняк, 2019; Миронова и др., 2020; Гавриков и др., 2021; Хох, Звягинцев, 2022; Пристова, Федорков, 2023), однако приведенные в них данные порой трудно сопоставимы, поскольку исследования проведены в насаждениях, различающихся между собой по возрасту, густоте, типу лесорастительных условий и техногенной нагрузке. Во многих работах авторы использовали, кроме того, разные методики и средства химического анализа, а также набор оцениваемых элементов. Все это, несомненно, отразилось на полученных результатах.

На текущий момент времени исследователями установлены пределы изменчивости содержания довольно большого числа химических элементов (око-

ло 60) в тканях различных органов этой древесной породы и показано, что первые семь мест в их ранговых рядах занимают обычно Ca, K, P, S, Mg, Si и Mn, что полностью подтверждает в принципе результаты работ ученых XIX в. (Бюсген, 1961). Установлено, что содержание Ca, Mn, Cu, Zn и Sr, активно участвующих в процессах метаболизма деревьев, в большинстве случаев почти монотонно снижается от сердцевины ствола к его периферии, а содержание K, P и Rb, напротив, возрастает (Хвостов и др., 2011; Килюшева и др., 2017). В результате физиологического ослабления деревьев в их древесине происходит снижение содержания золы и Ca, а содержание Zn и Cu, наоборот, увеличивается (Килюшева и др., 2017). Достоверно значимы также сезонные различия содержания в древесине Mn, Cu, Sr и Ni (Хох, Позняк, 2019; Хох, Звягинцев, 2022). Некоторые исследователи (Хох, 2018; Хох, Позняк, 2019; Хох, Звягинцев, 2022) показали, что с возрастанием увлажненности экотопа происходит снижение концентрации в древесине Ca и K, а содержание Zn, Sr, Pb и Ag, наоборот, увеличивается.

В настоящее время у исследователей появилась возможность оценивать содержание большого набора химиче-

ских элементов даже у каждого отдельно взятого годичного кольца деревьев и анализировать динамику его значений за длительный период времени (Хвостов и др., 2011; Миронова, 2014, 2018; Миронова и др., 2020; Гавриков и др., 2021). Было показано, в частности, что концентрация многих элементов даже в соседствующих годичных кольцах деревьев варьирует в очень больших пределах (до 8-10 крат), представляя собой бессистемный набор значений, причиной чего являются, вероятно, колебания погодных условий, оказывающие большое влияние на процессы метаболизма у деревьев. Содержание ряда микроэлементов в годичных кольцах сосны обыкновенной четко отражает геохимическую обстановку в районе проведения исследования. Так, к примеру, специфичными для Кемеровской области являются Cr, Fe, As, Sb, La, Sm, Lu и U, Томской области – Ba, Rb, Ce, Cs, Eu и Ta, а Республики Бурятия – Br, Sr, Ag, Tb, Yb, Hf, Au и Th (Миронова, 2018; Миронова и др., 2020). Между содержанием элементов в слоях ранней и поздней древесины в пределах одного биотопа существует очень тесная связь, а элементный состав их в образцах из удаленных друг от друга географических регионов очень сходен (Хвостов и др., 2011).

Динамика поступления химических элементов в годовые кольца позволяет изучать историю трансформации химического элементного состава окружающей среды. Так, тренды в них Fe и Cr в Кемеровской области ярко отражают развитие черной металлургии, а тренды As, Ag, Cs, Sb, U, Sm, Th и Br – угольной промышленности региона, тренды же в Томской области Rb, Cs, U, Nd, Sm, Eu – предприятий ядерно-топливного комплекса (Миронова и др., 2020). Восходящий тренд содержания в годичных кольцах деревьев сосны желтой (*Pinus ponderosa* Dougl. ex C. Lawson) Sr, Ba, Zn и Cd, начавшийся в 1800 г. и продолжавшийся около 50 лет, отмечен также иностранными исследователями (Padilla, Anderson, 2002), которые связали его с выпадением продуктов вулканических извержений.

Следует отметить, что содержание довольно редких в окружающей среде элементов составляет в древесине, по данным этих исследователей, 2-5 мг·кг<sup>-1</sup>, что не может не вызывать определенных сомнений. Ни один из авторов, использовавших новые подходы к анализу содержимого образцов, не провел сравнения с прежними методиками химического анализа. Данные же, полученные

нами с помощью атомно-абсорбционного спектрометра AAnalyst 400 (Perkin Elmer, США), масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой iCAP Qc (Thermo Fisher Scientific, Германия) и рентгенофлуоресцентного волнодисперсионного спектрометра S8 Tiger (Bruker, Германия), показали большие различия (в 3.5-4 раза) содержания в почве ряда элементов (Демаков и др., 2017).

Возникает также другой вопрос: нужна ли вообще оценка содержания в древесине редких в окружающей среде элементов и что это в итоге дает? Насколько обоснованы выводы авторов вышеупомянутых публикаций, которые попытались связать изменение его величины с развитием промышленности в этих регионах России? Подобные сомнения возникли и у других исследователей, установивших факт большой вариабельности содержания свинца в годовых кольцах деревьев на стационарном опытном объекте с выровненным агрофоном, что не может быть связано с загрязнением окружающей среды, поскольку все они произрастают в непосредственной близости друг от друга (Гавриков и др., 2021). Ранее иностранные исследователи (Bindler et al., 2004) пришли к выводу, что для оценки свинцового за-

грязнения среды годовые кольца деревьев сосны не подходят. Не имела успеха также попытка выявления последствий падения Тунгусского метеорита и аварии на Чернобыльской АЭС на основе анализа зольного состава древесины сосны обыкновенной рентгенофлуоресцентным методом с использованием синхротронного излучения (Хвостов и др., 2011), хотя другими исследователями (Бузынный и др., 1996; Щеглов, 1999; Архангельская и др., 2000; Рихванов и др., 2002, 2015; Архангельская, 2004), использовавшими метод нейтронно-активационного анализа, удалось доказать увеличение концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в годовых кольцах деревьев. Необходимо, на наш взгляд, оптимизировать количество оцениваемых элементов, связав вариабельность их концентрации с особенностями протекания метаболизма у оцениваемых деревьев, а также с их хозяйственно-ценными признаками, в том числе с физико-техническими параметрами древесины. При изучении влияния экологических факторов на элементный состав древесины целесообразно, исходя из поставленных целей, оценивать содержание в ней физиологически важных Fe, Mn и Zn, поскольку его вариабельность у них особенно велика (Хох,

2018; Хох, Позняк, 2019; Хох, Звягинцев, 2022).

Зольность коры у деревьев сосны обыкновенной оказалась выше, чем у древесины, но основным элементом в ней является также Ca (Казимиров и др., 1977; Лукина, Никонов, 1998; Никонов и др., 2004; Авессаломова, 2007), доля которого в составе золы увеличивается у них от комля к вершине, а доля K, Fe и Cu, напротив, снижается (Храмченкова и др., 2016). Зольность хвои тоже выше, чем древесины. С увеличением ее возраста происходит снижение содержания N, P, K, а содержание Ca, Al, Fe и Mn возрастает (Эколого-физиологические..., 1993; Робакидзе и др., 2020). Установлено, что в фоновых районах северных лесов содержание в хвое Mn ниже, чем в средней и южной частях таежной зоны, а содержание других элементов, особенно Ca, S, Mg, Fe и Ni, наоборот, выше (Лукина и др., 1994; Лукина, Никонов, 1998; Никонов и др., 2004). Ряд исследователей (Тараканов и др., 2011; Рогозин и др., 2014; Рогозин, Жекина, 2016; Рогозин и др., 2017) утверждают, что химический состав хвои не связан с химическим составом почвы, а зависит в основном от густоты древостоев, с увеличением

которой содержание Ca, Zn и Sr снижается, а зольность, наоборот, возрастает.

В географических культурах сосны обыкновенной элементный состав хвои определяет географическое происхождение деревьев (Тараканов и др., 2011). Влияние клоновой принадлежности статистически значимо для многих химических элементов, особенно для Ca, K, Mn, Zn, Sr и Cu, которые тесно связаны также с диаметром ствола деревьев (Тараканов и др., 2007). Содержание в хвое Fe, Ni, Pb и ряда более тяжелых элементов не связано с клоновой принадлежностью деревьев. С зольностью хвои связано только содержание в ней Ca ( $r=0.712$ ), K ( $r=0.571$ ) и Cu ( $r=0.574$ ), а с содержанием Ca тесно сопряжено только содержание K ( $r=0.894$ ). Большое влияние на химический состав хвои оказывает техногенное загрязнение окружающей среды (Лукина и др., 1994; Лукина, Никонов, 1996, 1998; Никонов и др., 2004; Сухарева, Лукина, 2004). Так, при загрязнении среды выбросами алюминиевого завода отмечено увеличение содержания в ней Ca, который может участвовать в процессе нейтрализации подвижного фтора.

Каждая особь в ценопопуляции растений отличается от других многими

признаками, в том числе и химическим составом (Leyton, Armson, 1955; Forrest, Ovington, 1971; Мамаев, 1972; Ковальский, 1974; Goddard et al., 1976; Митрофанов, 1977; Kleinsmit, 1978; Ильин, 1985; Никонов и др., 1987; Ковалевский, 1991; Петрунина, Гаранина, 1995; Ермаков, 1999), однако систематических исследований по оценке степени гетерогенности ценопопуляций древесных растений по элементному составу их органов пока не проведено. В полной мере это относится и к сосне обыкновенной, которая является, как известно, сборным полиморфным видом, образующим много разновидностей, форм, рас и экотипов (Курдиани, 1908; Козубов, 1962; Правдин, 1964; Мишуков, 1966; Мамаев, 1973; Шульга, 1974; Ирошников, 1978; Божок, 1979; Тарханов и др., 2006; Абдуллина, Петрова, 2012; Тарханов, Бирюков, 2013), одни из которых лучше переносят сухость, другие, наоборот, избыток влаги и недостаток тепла. Для некоторых экотипов существенное значение имеет фотопериодизм местности. В каждом сосновом древостое, представляющем собой локальную ценопопуляцию, встречаются деревья, отличающиеся по морфологическим, физиологическим, фенотипическим и генотипическим призна-

кам (Романовский, 1994; Романовский, Щёкалев, 2014). Изучение структуры ценопопуляций позволяет, таким образом, получить ценную информацию, имеющую важное значение в области лесного хозяйства, ресурсоведения и лесной селекции.

В основе генетической изменчивости растений по химическому составу их органов лежат наследственно обусловленные особенности абсорбции, транспорта и использования элементов питания (Ковалевский, 1991), а также способности к симбиозу с почвенными микроорганизмами (Никонов и др., 2004). Данное направление исследований является актуальным, позволяющим глубже понять механизмы естественного отбора особей по степени приспособленности их к условиям среды, а также повысить эффективность селекции видов по хозяйственно-ценным признакам, в том числе отзывчивости на минеральное питание (Тараканов и др., 2007).

Анализ литературы показывает, таким образом, что элементный состав тканей органов сосны обыкновенной зависит от обширного комплекса почвенно-экологических, климатических, биоценологических, генетических и антропогенных факторов, которые воздействуют

на него прямо или же косвенно, изменяя течение у деревьев обменных процессов и приводя к снижению их производительности. В каждом регионе на них воздействует свой специфический набор факторов, что вызывает необходимость разработки местных шкал (стандартов сравнения) концентрации химических элементов в их органах, необходимых для целей экологического мониторинга и селекционной работы.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходным материалом для проведения химического анализа являлись 216 образцов древесины, 29 образцов коры и 127 образцов хвои сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., взятые с деревьев на 17 пробных площадях в чистых по составу древостоях разного возраста, происхождения и ТЛУ (типов лесорастительных условий) Марийского Заволжья, климат на территории которого умеренно-континентальный, среднегодовая температура воздуха составляет 3.1°C, сумма эффективных температур – 2200°C, сумма осадков – 566 мм. На каждой пробной площадке было проведено описание почвы, подпологовой растительности, источников техногенного

загрязнения и степени воздействия их на состояние фитоценозов, а также оценены таксационные показатели древостоя. Все необходимые сведения об этом приведены ниже при описании результатов исследований.

Образцы древесины для проведения химического анализа были представлены в основном кернами, взятыми у 10-12 деревьев с помощью бурава Пресслера, и в небольшом количестве спилами с разных частей их ствола, которые разделяли на слои по 10 или 20 лет. Отбор образцов коры проводили на каждой пробной площади у 10 деревьев на высоте 1.3 м от земли, используя высечку для пыжей ружейных патронов 16 калибра. Для анализа использовали сводный образец коры всех деревьев, произраставших на пробной площади. Образцы хвои отбирали у деревьев с боковых побегов верхней части кроны. На пробных площадях проведен также отбор проб почвы для определения ее зольного состава. Все образцы сразу же укладывали в чистые полиэтиленовые пакеты и снабжали соответствующими этикетками.

Процедуру подготовки образцов и оценку содержания в них химических элементов, набор которых был выбран

нами весьма ограниченным, проводили по типовым методикам (Ермаков и др., 1987; Методика ..., 2007) в лаборатории Центра коллективного пользования Поволжского государственного технологического университета. Образцы вначале измельчали, высушивали в термошкафу при температуре  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  до постоянной массы, взвешивали на аналитических весах VibraNT/HTR-120E (Shinko-Densy, Japan, 2008) с точностью до  $1^{-4}$  г, помещали в фарфоровые тигли и озоляли в муфельной печи (Nabertherm GmbH) при температуре  $500 \pm 10^\circ\text{C}$  в течение 8 часов. После озоления тигли помещали в эксикаторы с безводным хлоридом кальция для охлаждения, после которого определили массу золы и вычисляли зольность образцов. Полученную золу растворяли в смеси кислот: 1 мл концентрированной химически чистой азотной и 3 мл концентрированной особо чистой соляной. Полученные растворы пропускали в мерные колбы через обеззоленные фильтры и разбавляли дистиллированной водой, доводя объем до 25 мл.

Определение содержания в золе ионов металлов проводили на атомно-абсорбционном спектрометре AAnalyst 400 (PerkinElmer, USA, 2008) методом градуировочного графика, для построе-

ния которого использованы государственные стандартные образцы растворов с гарантийным сроком годности. Стандартные калибровочные растворы и растворы исследуемых образцов вводили в пламя горелки последовательно через распылительное устройство. В качестве горючего газа использовали ацетилен, газа-окислителя – воздух, а калибровочного раствора – 0.1M раствор  $\text{HNO}_3$ . Для пересчета содержания каждого из оцениваемых элементов в сухом образце использовали формулу  $C_{\text{э}} = C_{\text{Р}} \times V_{\text{Р}} \times (M_{\text{з}} : M_{\text{н}}) \times M_{\text{с}}$ , в которой  $C_{\text{э}}$  – содержание элемента в сухом образце,  $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $C_{\text{Р}}$  – концентрация элемента в растворе,  $\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ;  $V_{\text{Р}}$  – объем раствора (50 мл для Ca, K, Mg, Mn, Zn, Fe, Cu и 25 мл для Pb, Ni, Cd и Co);  $M_{\text{з}}$  – масса золы, г;  $M_{\text{н}}$  – масса навески, г;  $M_{\text{с}}$  – масса высушенного образца, г. Каждую пробу анализировали на спектрометре три раза и вычисляли среднее значение по образцу. Всю мерную посуду предварительно калибровали по дистиллированной воде. Погрешность измерения концентрации ионов большинства металлов не превышала  $\pm 5\%$ .

Цифровой материал обработан на компьютере с использованием стандартных методов математической ста-

тики (Дрейпер, Смит, 1973; Ким и др., 1989; Лакин, 1990; Зайцев, 1991; Гринин и др., 2003) и пакетов прикладных программ Microsoft Excel® 2016 и Statistica 10 (Dell, Раунд-Рок, ТХ, США), позволивших провести корреляционный, регрессионный и кластерный анализы. Дендрограммы сходства строили методом Варда на основе матрицы нормированных данных, используя меры расстояния Евклида и  $1 - r$  ( $r$  – коэффициент корреляции Пирсона). Для оценки степени сходства химического состава тканей органов сосны обыкновенной между разными биотопами или периодами образования годичных колец деревьев использовали коэффициент Жаккара, широко применяемый в биогеоценологии (Миркин, Розенберг, 1983) и вычисляемый по формуле  $KG = \sum [\min(A, B)] / \sum [\max(A, B)]$ , в которой  $A$  и  $B$  – сравниваемые пары рядов. Исходные данные предварительно нормировали, выражая их значения в долях от среднего по каждому химическому элементу.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Элементный состав древесины.** Анализ исходного материала показал, что из всех оцененных нами химических элементов более всего содержится в древе-

сине Са (табл. 1), который является основной оболочкой растительных клеток (Ковальский, 1974; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Баргальи, 2005). За ним в порядке убывания следуют Mg, K, Mn, Fe и Zn, активно участвующие в процессе метаболизма. Замыкают ранговый ряд элементов Pb, Co, Cr, Ni и Cd, которые в основном токсичны для растений. Содержание каждого химического элемента в образцах изменяется под действием различных факторов в очень больших пределах. Особенно велика его вариация у никеля (CV = 92.1%), за которым следуют Mg, Pb, Co и Fe (83-89%). Менее же всего варьирует содержание в древесине Са (38.1%) и золы (26.5%).

Не является стабильным и сам зольный состав древесины в целом, о чем убедительно свидетельствует очень слабая взаимная сопряженность рядов концентрации в ней набора оцененных элементов. Величина коэффициента корреляции между всеми элементами в выборке образует практически непрерывный ряд чисел от -0.44 до 0.86, среди которых наиболее часто встречаются значения от -0.20 до 0.40 (рис. 1а). Более всего сопряжено с зольностью древесины содержание в ней Са (рис. 1б), хотя и в этом случае трудно говорить о нали-

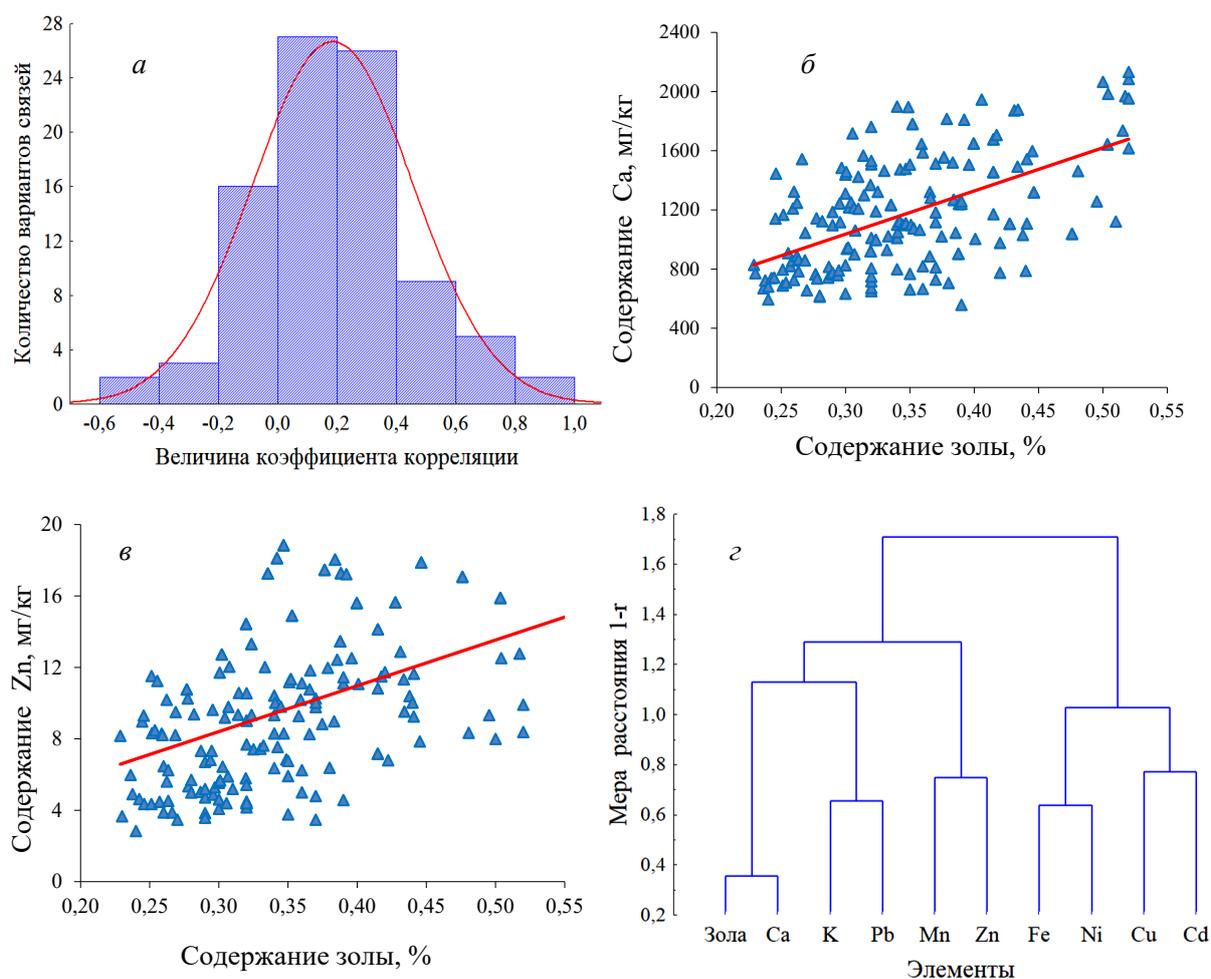
чи функциональной зависимости. У всех последующих элементов связь рядов их концентрации с зольностью еще ниже (рис. 1в) или же полностью отсутствует. Очень тесная корреляционная зависимость отмечается между рядами содержания в древесине Mg и Co ( $r = 0.86$ ), Cr и Cd ( $r = 0.82$ ), Mg и Sr ( $r = 0.78$ ), Cr и Co ( $r = 0.76$ ), однако связано это с малым объемом выборок их совместной встречаемости. Все элементы в исследованной нами совокупности образцов группируются между собой

по рядам значений их концентрации в древесине в два довольно «рыхлых» кластера, разбитых в свою очередь на ряд подкластеров (рис. 1г). В один кластер с золой входят в основном элементы, которые особо нужны деревьям для поддержания своей жизнедеятельности. Странно, но в него вошел также свинец, который умеренно сопряжен с калием ( $r = 0.36$ ). Во второй кластер вошли элементы, в которых деревья нуждаются очень слабо, а также токсичные для них.

**Таблица 1.** Элементный состав древесины сосны обыкновенной на объектах исследования

Элемент	Значения статистических параметров содержания элементов в древесине*						
	N	M ± m	min	max	S	CV	p
Зола	216	0.35 ± 0.01	0.16	0.92	0.09	26.5	1.8
Ca	188	1196 ± 33	238.9	2926	455.7	38.1	2.8
Mg	152	909 ± 66	99.9	3502	811.2	89.3	7.2
K	186	375 ± 14	31.1	1005	192.3	51.3	3.8
Mn	212	22.6 ± 1.2	1.92	97.9	17.24	76.4	5.2
Fe	216	20.3 ± 1.2	3.53	119.3	16.96	83.4	5.7
Zn	216	9.91 ± 0.33	1.17	29.8	4.91	49.6	3.4
Sr	110	1.30 ± 0.09	0.048	4.953	0.967	74.4	7.1
Cu	216	0.96 ± .04	0.297	7.041	0.582	60.5	4.1
Pb	214	0.86 ± 0.05	0.019	3.814	0.738	86.0	5.9
Co	150	0.56 ± 0.04	0.061	3.410	0.473	85.2	7.0
Cr	15	0.38 ± 0.07	0.057	0.852	0.284	75.3	19.4
Ni	209	0.37 ± 0.02	0.023	1.760	0.339	92.1	6.4
Cd	216	0.16 ± 0.01	0.011	1.042	0.118	75.8	5.2

\*N – количество исследованных образцов древесины, M ± m – среднее значение и ошибка содержания золы (%) и химических элементов ( $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ) в абсолютно сухой древесине; min, max – минимальное и максимальное значения; S – среднеквадратическое отклонение; CV – коэффициент вариации, %; p – относительная ошибка оценки, %.



**Рисунок 1.** Характер сопряженности содержания элементов в древесине сосны обыкновенной

Одной из причин варьирования зольного состава древесины может являться среда обитания деревьев, из которой они извлекают химические элементы, необходимые для осуществления жизнедеятельности и формирования тканей своего тела. Так, к примеру, специфичными для деревьев сосны обыкновенной Республики Бурятия являются Br, Sr, Ag, Tb, Yb, Hf, Au и Th, Томской области – Rb, Cs, Ba, Ce, Nd, Eu и Ta, а Кеме-

ровской области – Cr, Fe, As, Sb, La, Sm, Lu и U (Миронова, 2018; Миронова и др., 2020). Дифференциация фактических данных по типам лесорастительных условий (ТЛУ) подтвердила влияние этого фактора в условиях Республики Марий Эл (табл. 2), четко проявляющееся и в других регионах. Так, в условиях Карелии древесина сосны в брусничниковом типе леса имеет более высокое содержание многих химических элемен-

тов, чем в черничниковом (Казимиров и др., 1977). На верховых болотах Березинского биосферного заповедника (Беларусь) содержание их ниже, чем на сухих почвах, а свинца, наоборот, выше (Хох, 2018; Хох, Позняк, 2019). На верховых же болотах нашей Республики в древесине

сосны обыкновенной содержание золы, Са, К, Mg, Zn, Pb и Со существенно выше, чем в других типах лесорастительных условий, особенно в богатых питательными элементами свежих раменах (ТЛУ С<sub>2</sub>), где содержание в древесине Fe и Cu, наоборот, наиболее велико.

**Таблица 2.** Элементный состав древесины сосны обыкновенной в разных типах лесорастительных условий

Элемент	Содержание элементов в древесине и его варьирование в разных ТЛУ*					
	ТЛУ С <sub>2</sub>		ТЛУ А <sub>2</sub>		ТЛУ А <sub>5</sub>	
	М ± m	CV	М ± m	CV	М ± m	CV
Зола	0.32 ± 0.02	20.9	0.33 ± 0.02	39.5	0.36 ± 0.01	21.0
Са	803.4 ± 61	30.3	1123.4 ± 92	51.9	1268.1 ± 35	31.9
К	251.7 ± 30	48.2	303.8 ± 27	57.0	413.4 ± 30	46.8
Mg	307.0 ± 31	42.7	279.4 ± 30	50.5	1138.1 ± 79	73.5
Mn	17.5 ± 4.9	118.0	33.6 ± 3.7	77.5	19.1 ± 0.8	49.3
Fe	33.3 ± 2.8	35.4	19.0 ± 1.5	58.5	19.2 ± 1.6	97.4
Zn	4.97 ± 0.71	60.5	7.48 ± 0.65	63.7	11.5 ± 0.37	38.2
Cu	1.10 ± 0.08	30.8	0.91 ± 0.04	32.3	0.96 ± 0.06	70.6
Sr	-	-	1.86 ± 0.28	82.5	1.08 ± 0.05	43.7
Pb	0.29 ± 0.13	183.1	0.77 ± 0.10	92.9	0.96 ± 0.06	76.7
Со	0.11 ± 0.01	41.9	0.21 ± 0.02	59.8	0.78 ± 0.05	59.1
Cd	0.16 ± 0.02	57.1	0.16 ± 0.01	56.2	0.15 ± 0.01	84.6
Ni	0.31 ± 0.10	133.5	0.39 ± 0.06	108.3	0.37 ± 0.02	80.7

\*Здесь и далее содержание золы выражено в %, а остальных элементов – в мг/кг.

Объективное представление о роли элементов в поддержании жизнедеятельности растений дает коэффициент биологического поглощения (КБП), представляющий собой отношение содержания каждого из них в золе их тканей к содержанию в почве (Перельман, 1975). Расчеты, проведенные на основе полученных нами данных по элементному составу почв в разных ТЛУ Респуб-

лики Марий Эл (Демаков и др., 2012б; Демаков, Исаев, 2021а, 2021б), показали, что способность деревьев к поглощению химических элементов из окружающей среды в разных ТЛУ неодинакова (табл. 3): наиболее велика она в свежих сураменах, а на верховых болотах их содержание в золе древесины гораздо ниже, чем в торфе, основную роль в сложении элементного состава которого иг-

рают кустарнички и мхи (Демаков и др., 2012б). Деревья более всего поглощают из почвы Ca, Zn, Mn и Mg, а Fe в золе древесины содержится, наоборот, во много раз меньше, чем в почве. Содержание зольных элементов в древесине варьирует в каждом ТЛУ в очень больших пределах, что свидетельствует о неоднородности в них ценопопуляций деревьев

по свойствам к поглощению различных веществ из окружающей среды. В свежих раменах и борах коэффициент вариации наиболее велик у Pb, Ni и Mn, а на болотах еще и у Fe. Меньше всего изменяется содержание в древесине золы, Ca и K, хотя оно у них может различаться в одном ТЛУ между разными биотопами в 1.5-2 раза.

**Таблица 3.** Величина поглощения химических элементов древесиной деревьев сосны обыкновенной в разных типах лесорастительных условий Республики Марий Эл

ТЛУ	Среднее значение коэффициента биологического поглощения элементов							
	Ca	Zn	Mn	Mg	Cu	K	Ni	Fe
A <sub>2</sub>	5.40	1.29	1.14	0.85	0.09	0.31	0.05	0.01
A <sub>5</sub>	0.37	0.26	0.37	0.24	0.04	0.34	0.03	<0.01
C <sub>2</sub>	31.6	19.2	8.32	7.23	4.99	4.56	1.01	0.23

Исследования показали, что большее влияние на формирование зольного состава древесины сосны обыкновенной в условиях Марий Эл оказывает исходная густота искусственно созданных насаждений. Так, на опытном объекте в 40-летних насаждениях содержание золы в стволовой древесине изменялось прямо пропорционально густоте насаждений и обратно пропорционально диаметру деревьев: в варианте с густотой 10 тыс. экз. га<sup>-1</sup> оно было в 5.7 раза выше, чем в насаждении с густотой 500 экз. га<sup>-1</sup>, где их средний диаметр был в 2.4 раза ниже. Содержание всех зольных элементов в густом насаждении было в 1.7-2.9 раза

выше, чем в редком. Исключением являлся лишь Mn, содержание которого в древесине сравниваемых вариантов опыта было практически одинаковым. Другими исследователями (Тараканов и др., 2011) установлено, что увеличение густоты древостоев приводит к снижению содержания в древесине Fe и Ni.

Зольный состав древесины зависит, по данным некоторых авторов (Килушева и др., 2017), также от состояния жизнеспособности деревьев, с ухудшением которого содержание некоторых элементов, особенно кальция, в целом снижается, а содержание цинка и меди, наоборот, увеличивается. Выявлено так-

же достоверное влияние места происхождения деревьев сосны обыкновенной на элементный состав их древесины, коры и хвои в географических культурах и показана перспективность его использования для отбора наиболее ценных генотипов (Тараканов и др., 2011).

**Элементный состав древесины в зоне воздействия техногенных источников загрязнения окружающей среды.** В древесине деревьев сосны обыкновенной, произрастающих в зоне пылевых выбросов Марийского завода силикатного кирпича, больше всего содержится, как показали наши исследования (Демаков и др., 2013б), Са, за которым с большим отставанием следуют К и Fe (табл. 4). Замыкают ранговый ряд Со, Ni и Cd. Содержание большинства зольных элементов в образцах древесины на прилегающем к источнику загрязнения участке леса незначительно отличается от фонового уровня, хотя концентрация их в почве, особенно Са, многократно превышает его, что свидетельствует о большой избирательной способности растений к их поглощению из окружающей среды. Небольшое превышение по сравнению с фоном отмечается лишь по Са, К и Со. Значительно превышает фо-

новый уровень содержание Pb и Ni у деревьев на расстоянии 190-340 м от источника загрязнения. Содержание Mn в древесине на фоновом участке леса значительно выше, чем в загрязненной зоне. Содержание его, как свидетельствуют приведенные данные, с возрастом деревьев увеличивается, а золы и основных химических элементов, наоборот, снижается.

Весьма интересные результаты были получены при сравнении элементного состава разных слоев древесины старых деревьев, появившихся в зоне действия завода задолго до его пуска в действие, состоявшегося в 1953 г. (табл. 5). Так, в слоях древесины, возникших после пуска предприятия, у деревьев, непосредственно примыкающих к нему, увеличилось содержание К, Pb, Со и Ni, а ряда других элементов, особенно Mn, снизилось. На фоновом же участке увеличение содержания К в этих слоях древесины было выше, а Pb и Со, наоборот, ниже. На фоновом участке дополнительно произошло увеличение содержания золы, Fe и Cd. Характер изменения зольного состава древесины зависел, таким образом, не только от действия источника загрязнения, но и от особенностей самих деревьев.

**Таблица 4.** Содержание золы и зольных элементов в древесине сосен, произрастающих на разном удалении от источника загрязнения

Элемент	Среднее содержание элементов на разном удалении от источника загрязнения*					
	80 м	100 м	190 м	340 м	1100 м	1500 м
Молодые деревья возрастом 35 лет						
Зола	-	0.52	0.52	0.52	0.50	-
Ca	-	1953.7	2133.4	2085.2	2065.7	-
K	-	354.9	234.4	359.7	282.8	-
Fe	-	33.6	26.2	28.3	14.5	-
Zn	-	9.91	6.17	7.31	8.00	-
Sr	-	4.16	3.68	3.40	3.38	-
Mn	-	1.93	2.11	2.70	11.25	-
Cu	-	1.10	1.31	0.85	1.12	-
Pb	-	0.662	0.622	0.617	0.629	-
Co	-	0.241	0.230	0.216	0.233	-
Ni	-	0.104	0.057	0.026	0.062	-
Cd	-	0.113	0.106	0.125	0.119	-
Деревья возрастом 60 лет						
Зола	0.31	0.36	0.34	0.30	-	0.32
Ca	2196	1589	1898	1439	-	1532
K	260.1	258.9	209.0	174.4	-	201.7
Fe	9.6	14.0	15.8	7.6	-	16.9
Zn	5.17	6.24	6.36	5.58	-	7.68
Sr	2.58	3.02	2.26	2.05	-	2.79
Mn	1.92	4.70	5.34	14.9	-	25.6
Cu	0.786	0.924	0.879	0.905	-	0.862
Pb	0.383	0.621	1.313	0.854	-	0.37
Co	0.17	0.163	0.302	0.164	-	0.150
Ni	0.023	0.246	0.450	0.765	-	0.128
Cd	0.069	0.114	0.127	0.114	-	0.147

\*Примечание: здесь и во всех последующих таблицах содержание золы выражено в %, а химических элементов – в мг кг<sup>-1</sup> абс. сухого вещества.

**Таблица 5.** Зольный состав разных слоев древесины старого поколения деревьев сосны, возникших задолго до пуска предприятия, состоявшегося в 1953 г.

Элемент	Содержание элементов в разных слоях и на разном удалении от источника загрязнения					
	До пуска предприятия		После пуска предприятия		Отношение после : до	
	100 м	1500 м	100 м	1500 м	100 м	1500 м
Зола	0.33	0.26	0.31	0.29	0.94	1.12
Ca	1465	1324	1423	1186	0.97	0.90
K	195.3	86.3	335.4	302.7	1.72	3.51
Fe	8.30	11.1	8.90	13.4	1.07	1.21
Zn	7.45	6.47	5.20	5.20	0.70	0.80
Sr	4.95	4.86	1.40	1.61	0.28	0.33
Mn	20.0	21.4	3.89	16.14	0.19	0.75
Cu	1.231	1.140	1.035	0.881	0.84	0.77
Pb	0.406	0.307	0.648	0.379	1.60	1.23
Co	0.138	0.126	0.222	0.149	1.61	1.18
Ni	0.103	0.061	0.151	0.061	1.47	1.00
Cd	0.199	0.111	0.161	0.184	0.81	1.66

Мощным источником загрязнения окружающей среды является автотранспорт. Так, в частности, установлено (Воздействие выбросов ..., 1989; Кузьмин, Феденя, Рудь, 2007; Каманина, Саватеева, 2014), что в почве придорожных полос увеличивается содержание многих химических элементов (Ca, Na, Mg, K, Fe, Zn, Mn, Cu, Pb, Co, Cd, Cr и Ni), что связано не только с выбросами выхлопных газов автомобилей, но также с использованием различных антиобледенителей. Наши исследования, объектом которых явились деревья сосны, произрастающие в защитной опушке леса с северной стороны автомагистрали Йошкар-Ола – Казань (ТЛУ А<sub>2</sub>), показали, что содержание зольных элементов в слоях их древеси-

ны, образовавшихся в разные годы, непостоянно (табл. 6). Отношение максимального значения к минимальному варьировало у разных элементов от 1.75 (Zn) до 10.9 (Ni). Наиболее высокое содержание золы и многих элементов (Ca, K, Mg, Fe, Cu и Co) отмечено в последнее десятилетие, что связано, вероятно, с остатками почвенных растворов их солей, перемещаемых от корней по данному слою древесины. Содержание Pb, Ni и Cd было наиболее велико в слое древесины, образовавшемся в пятом десятилетии (1960-1969 гг.), когда стал широко использоваться бензин с антидетонационными присадками и поток автомобилей по данной автомагистрали резко увеличился.

**Таблица 6.** Возрастные изменения зольного состава древесины сосен, произрастающих в защитной опушке леса с северной стороны автомагистрали Йошкар-Ола – Казань в ТЛУ А<sub>2</sub>

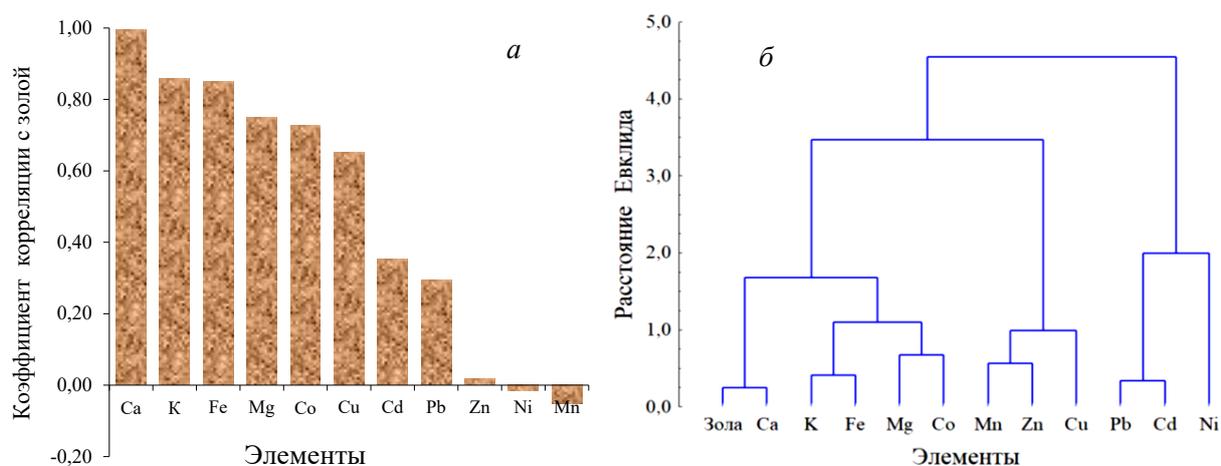
Элемент	Содержание золы (%) и химических элементов (мг×кг <sup>-1</sup> ) с 1921 года по десятилетиям*								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Зола	0.33	0.29	0.24	0.24	0.29	0.26	0.28	0.25	0.84
Ca	929	743	740	724	759	785	737	689	2119
K	204	186	179	154	291	332	361	376	703
Mg	110	116	100	113	136	180	122	130	208
Fe	22.5	22.6	15.8	17.3	23.8	28.4	29.9	44.2	68.6
Mn	60.8	44.8	40.3	37.2	38.2	36.8	31.5	22.2	33.9
Zn	7.6	5.0	4.6	4.9	6.8	6.2	5.3	4.4	5.3
Pb	0.81	0.77	0.78	0.96	2.57	1.18	1.17	1.38	1.69
Cu	1.21	0.62	1.22	0.90	0.93	1.00	0.89	1.01	1.44
Ni	0.46	0.32	0.23	0.16	1.76	0.46	0.37	0.60	0.44
Cd	0.09	0.09	0.10	0.13	0.30	0.18	0.14	0.14	0.22
Co	0.24	0.21	0.18	0.24	0.26	0.47	0.39	0.41	0.64

\*Примечание: I – 1921-1930 гг., II – 1931-1940 гг., и т.д.

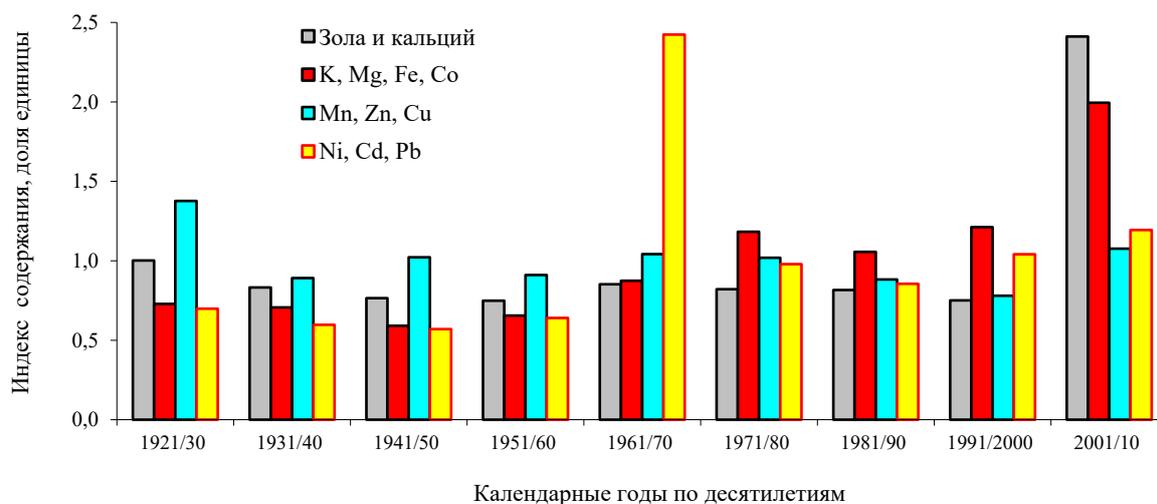
Содержание золы, Са и К в этой выборке деревьев особенно высоким было, как следует из приведенных данных, в первое десятилетие их жизни, а затем постепенно снижалось, опустившись до минимума в 1950-1959 гг. Содержание Мп в древесине все время неуклонно снижалось, а Fe с 1950 г., наоборот, возрастало. Концентрация остальных элементов в годичных слоях древесины варьировала в основном бессистемно.

Расчеты показали, что изменения содержания в древесине многих элементов, особенно Са, К, Fe и Mg, довольно тесно коррелируют с изменением ее зольности (рис. 2а). Все элементы в исследованной совокупности группируются между собой по характеру изменения нормированной величины (выраженных по отношению к среднему значению

каждого конкретного элемента) их содержания в древесине в три четко выраженных кластера (рис. 2б). В первый из них вместе с золой вошли Са, К, Fe, Mg и Со. Второй кластер, который ближе всего примыкает к первому, слагают Мп, Zn и Сu, являющиеся для растений катализаторами их многих жизненных процессов. В обособленный от них третий кластер вошли Pb, Cd и Ni, которые в основном токсичны для растений. Характер изменения содержания в древесине элементов каждой из этих групп, нормированного по отношению к среднему их значению за весь оцененный промежуток времени, сугубо специфичен (рис. 3). Наиболее резко выделяется на общем фоне зольный состав древесины годичных слоев, образовавшихся в 1960-1969 гг. и, особенно, в 2000-2009 гг. (табл. 7).



**Рисунок 2.** Сопряженность содержания элементов в древесине сосен, произрастающих возле автодороги



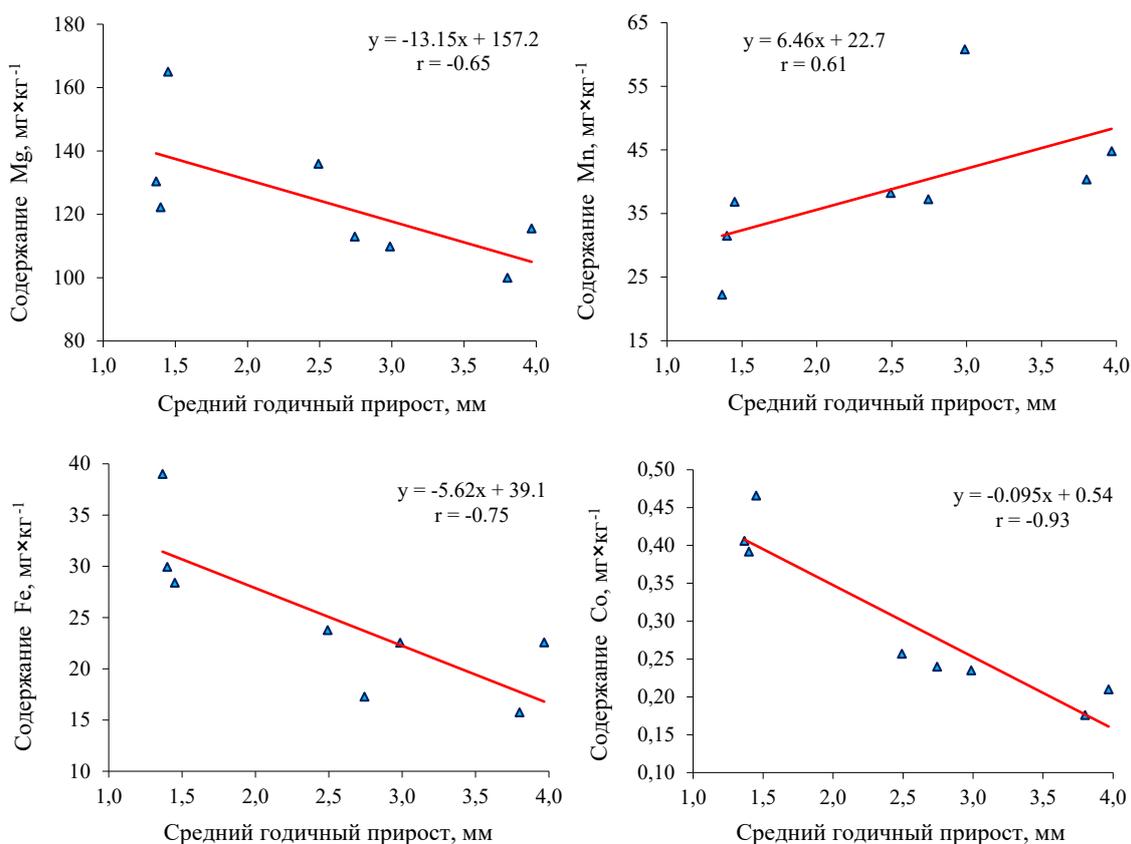
**Рисунок 3.** Изменение нормированной величины содержания разных групп элементов в древесине сосен, растущих возле автомагистрали Йошкар-Ола – Казань в ТЛУ А<sub>2</sub>

**Таблица 7.** Степень сходства зольного состава слоев древесины сосен у автомагистрали, образовавшихся в разные периоды времени

Период, годы	Значение коэффициента сходства Жаккара между периодами времени*							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1920-1929	1.00							
1930-1939	0.80	1.00						
1940-1949	0.77	0.83	1.00					
1950-1959	0.72	0.82	0.86	1.00				
1960-1969	0.58	0.56	0.52	0.56	1.00			
1970-1979	0.70	0.69	0.66	0.71	0.65	1.00		
1980-1989	0.70	0.75	0.70	0.77	0.62	0.87	1.00	
1990-1999	0.63	0.64	0.63	0.67	0.61	0.80	0.85	1.00
2000-2009	0.48	0.44	0.43	0.44	0.49	0.61	0.56	0.58

Изменение содержания элементов в древесине связано не только с поступлением веществ из окружающей среды, но и со скоростью нарастания биомассы деревьев, зависящей от интенсивности протекания у них физиологических процессов, а также потребности в элементах питания на разных этапах их жизни. Так, в частности, оказалось, что увеличение

годового прироста деревьев приводит к снижению содержания в древесине Mg, Fe, Co и к возрастанию концентрации Mn (рис. 4). Содержание золы и остальных элементов не зависело от величины прироста деревьев, а определялось, возможно, особенностями погодных условий в тот или иной отрезок времени и действием иных факторов.



**Рисунок 4.** Зависимость между величиной годичного прироста деревьев в разные периоды их жизни и содержанием зольных элементов в этих слоях древесины

Исследования показали, что и в других биотопах, где отсутствовало техногенное загрязнение окружающей среды, тоже отмечалось довольно четко выраженное изменение содержания золы и многих зольных элементов в годичных слоях древесины, образовавшихся в разные периоды времени. Так, к примеру, у деревьев на берегу оз. Яльчик в НП «Марий Чодра» (рис. 5) зольность древесины годичных колец, образовавшихся в 1831-1850 гг., и содержание в ней Fe, Zn и Sr были минимальны, а содержание Ca, Cr, Co, Cd и Ni, наоборот, максимально

(табл. 8). Второе двадцатилетие характеризовалось очень высоким содержанием в древесине Mn, Zn, Cu и, особенно, Pb, хотя в то время техногенное воздействие на биогеоценозы отсутствовало. В четвертое двадцатилетие (1891-1910 гг.) зольность древесины, а также содержание в ней Fe и Sr достигли максимальных отметок. Содержание же в ней Ca, Mn, Co и Cd в этот период времени опустилось до минимума. В пятое двадцатилетие их жизни, в середине которого (1921 г.) в данном регионе происходили массовые лесные пожары, характеризо-

валось минимумом содержания в древесине Cu, Pb, Cr и Ni, а в девятом двадца-

тилетии отмечались максимальные значения K, Mn и Si.



**Рисунок 5.** Общий вид древостоев, произрастающих на берегах озер в НП «Марий Чодра»

**Таблица 8.** Возрастные изменения зольного состав древесины сосен, произрастающих на берегу оз. Яльчик в злаково-мелкотравном типе леса (ТЛУ А<sub>2</sub>)

Элемент	Содержание золы (%) и химических элементов (мг×кг <sup>-1</sup> ) с 1831 года по двадцатилетиям								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Зола	0.23	0.29	0.35	0.39	0.28	0.28	0.30	0.38	0.36
Ca	772.7	766.4	768.3	558.8	620.0	613.3	634.6	706.6	666.5
K	252.1	227.3	360.2	365.4	279.5	183.9	299.8	488.5	618.0
Fe	18.19	38.12	31.01	47.56	27.98	29.74	26.22	29.68	22.56
Mn	14.98	20.68	16.02	12.12	12.75	12.90	17.79	20.36	23.77
Zn	3.659	6.710	5.916	4.576	4.995	5.698	5.541	6.376	4.997
Cu	0.802	0.991	0.765	0.691	0.633	0.669	0.750	0.983	1.201
Pb	0.276	1.811	0.333	0.121	0.099	0.135	0.140	0.219	0.197
Cr	0.852	0.648	0.370	0.177	0.105	0.464	0.118	0.298	0.202
Sr	0.001	0.048	0.632	0.754	0.420	0.369	0.314	0.253	0.215
Co	0.526	0.200	0.108	0.077	0.096	0.102	0.100	0.139	0.134
Cd	0.351	0.162	0.077	0.040	0.077	0.080	0.067	0.114	0.090
Ni	0.301	0.095	0.068	0.071	0.065	0.099	0.089	0.109	0.121

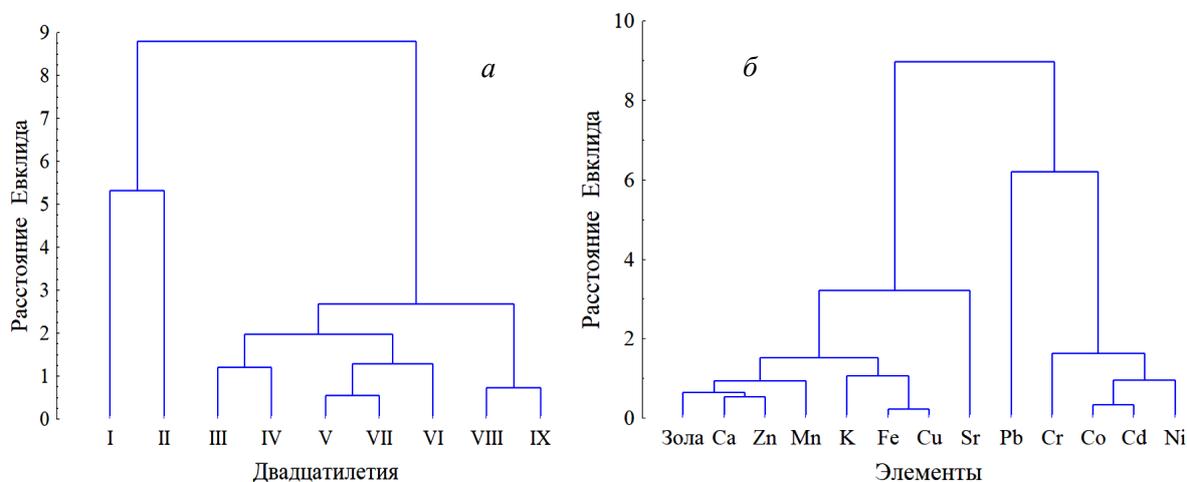
Значительные изменения содержания химических элементов в годичных кольцах деревьев, достигающие в соседних слоях иногда восьмикратных значений, которые при этом не связаны с загрязнением среды, отмечают и другие исследователи (Padilla, Anderson, 2002;

Миронова, 2014, 2018; Миронова и др., 2020; Гавриков и др., 2021). Так, к примеру, ни для одного из 31 оцененного элемента не отмечен всплеск концентраций после падения Тунгусского метеорита (1908 г.) и аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.), превышающий

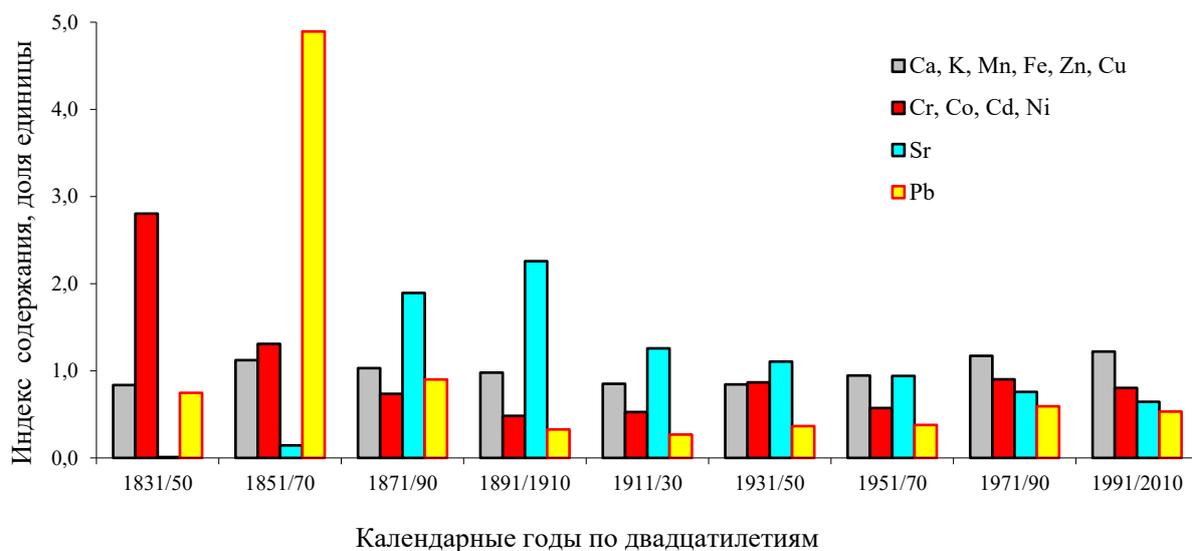
их обычный естественный разброс (Хвостов и др., 2011). Сглаживание экспериментальных данных позволило исследователям выявить существование положительных и отрицательных трендов концентраций элементов, которые в большинстве случаев были синхронны для ранней и поздней древесины. Так, по мере приближения к коре содержание Ca, Mn, Zn, Cu и Sr уменьшалось, а K и Rb возрастало.

По зольному составу древесины разные слои деревьев на берегу оз. Яльчик объединяются между собой, как показали расчеты, в два четко выраженных кластера, в первый из которых вошли слои, образовавшиеся в период с 1831 по 1870 гг. (рис. 6а). Второй кластер сложен тремя подкластерами, в каждый из которых вошли слои, образовавшиеся

в смежные двадцатилетия. Элементы группируются друг с другом в два разновеликих кластера (рис. 6б). Изменения содержания в древесине многих элементов, особенно Ca, Zn, Mn, K, Fe и Cu, довольно тесно сопряжены с изменением ее зольности. Во второй кластер вошли Ni, Cd, Co и Cr, а также несколько удаленный от них Pb. По характеру объединения элементов дерева этого биотопа несколько отличаются от предыдущего. Изменения величины индекса содержания элементов, входящих в каждый кластер, происходили во времени неодинаково (рис. 7), что указывает на разную потребность в них деревьев, зависящую от их физиологического состояния, а также сложившихся погодных условий и иных факторов среды.



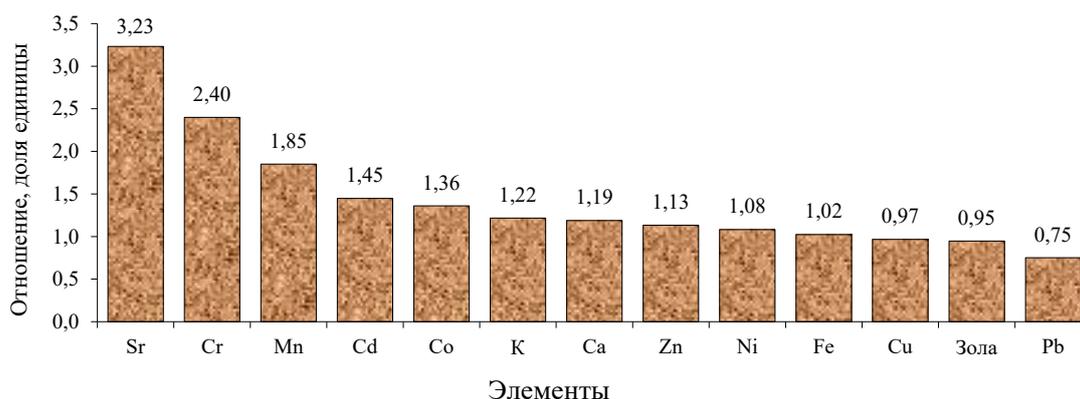
**Рисунок 6.** Сопряженность слоев древесины и содержания элементов в ней у сосен, произрастающих на берегу оз. Яльчик



**Рисунок 7.** Изменение величины индекса содержания разных групп элементов в древесине сосен, растущих в НП «Марий Чодра» на берегу оз. Яльчик в ТЛУ А<sub>2</sub>

Зольный состав древесины сосен, произрастающих в этом же национальном парке на берегу оз. Глухое в более жестких лесорастительных условиях, имеет ряд существенных отличий от деревьев на оз. Яльчик, хотя ранговое распределение элементов по их концентрации у них практически сходно. Наибольшие отличия между деревьями этих биотопов отмечаются по содержанию в их древесине Sr и Cr, в которых растения особо не нуждаются (рис. 8). Велики также различия между деревьями по содержанию Mn, Co и Cd. Первые два элемента участвуют в процессах жизнедеятельности растений и крайне необходимы для них, а Cd же для них в

общем-то токсичен. По содержанию Ca, K и Zn, играющих важную роль в жизненных процессах растений, деревья различаются между собой незначительно. Содержание Pb в древесине сосен на берегу оз. Глухое, наоборот, гораздо ниже, чем на берегу оз. Яльчик. Содержание большинства элементов в слоях древесины, образовавшихся до 1950 г. у деревьев на берегу оз. Глухое было ниже, чем у сосен на берегу оз. Яльчик, а затем соотношение кардинально поменялось (табл. 9). Особенно большие различия отмечаются по содержанию Sr, Cr и Mn. Причины этих различий нами пока не выявлены и связаны, вероятно, с физиологическими особенностями деревьев.



**Рисунок 8.** Содержание элементов в древесине сосен на берегу оз. Глухое по отношению к деревьям, растущим на берегу оз. Яльчик в лучших лесорастительных условиях

**Таблица 9.** Зольный состав разных слоев древесины сосен, произрастающих на берегу оз. Глухое в лишайниково-мшистом типе леса (ТЛУ А<sub>1</sub>), по отношению к деревьям в предыдущем биотопе

Элемент	Относительное содержание элементов с 1891 г. по двадцатилетиям, доля единицы					
	1891-1910 гг.	1911-1930 гг.	1931-1950 гг.	1951-1970 гг.	1971-1990 гг.	1991-2010 гг.
Зола	0.90	<b>1.04</b>	0.93	<b>1.03</b>	0.84	0.94
Ca	0.54	0.41	0.48	<b>1.90</b>	<b>2.13</b>	<b>1.65</b>
K	0.26	0.37	<b>1.61</b>	<b>2.92</b>	<b>1.33</b>	0.81
Fe	0.79	0.62	<b>1.01</b>	<b>1.41</b>	<b>1.45</b>	0.85
Mn	0.33	0.49	0.41	<b>5.61</b>	<b>2.11</b>	<b>2.15</b>
Zn	0.64	0.48	0.42	<b>1.93</b>	<b>1.65</b>	<b>1.66</b>
Cu	0.56	0.55	0.80	<b>1.57</b>	<b>1.36</b>	0.96
Pb	0.85	0.25	0.47	<b>1.29</b>	0.70	0.95
Cr	<b>1.06</b>	0.86	0.12	<b>6.68</b>	<b>1.57</b>	<b>4.10</b>
Sr	0.36	0.43	0.51	<b>5.75</b>	<b>7.14</b>	<b>5.20</b>
Co	<b>1.04</b>	0.68	0.93	<b>2.03</b>	<b>1.79</b>	<b>1.69</b>
Cd	<b>1.13</b>	0.74	0.75	<b>2.40</b>	<b>1.71</b>	<b>1.96</b>
Ni	<b>1.24</b>	0.80	0.58	<b>2.22</b>	<b>1.04</b>	0.61

На объектах исследования в приозерных экотопах содержание в древесине сосен К, Fe и Cu, как показали расчеты, возрастает прямо пропорционально возрасту деревьев (А, лет) и обратно

пропорционально величине их годовичного прироста (Z, мм), хотя влияние этих факторов в целом небольшое, описываемое следующими уравнениями регрессии:

$$[K] = 1.02 \times A - 94.2 \times Z + 461.3; R^2 = 0.301;$$

$$[Fe] = 2.10 \times 10^{-2} \times A - 3.17 \times Z + 21.2; R^2 = 0.319;$$

$$[Cu] = 1.65 \times 10^{-3} \times A - 0.12 \times Z + 0.92; R^2 = 0.314.$$

На содержание в древесине остальных элементов эти факторы практически не влияют, что противоречит данным некоторых исследователей (Адаменко и др., 1982; Четвериков, 1986), выявивших зависимость между величиной прироста деревьев и уровнем зольности древесины, а также содержанием в ней кальция.

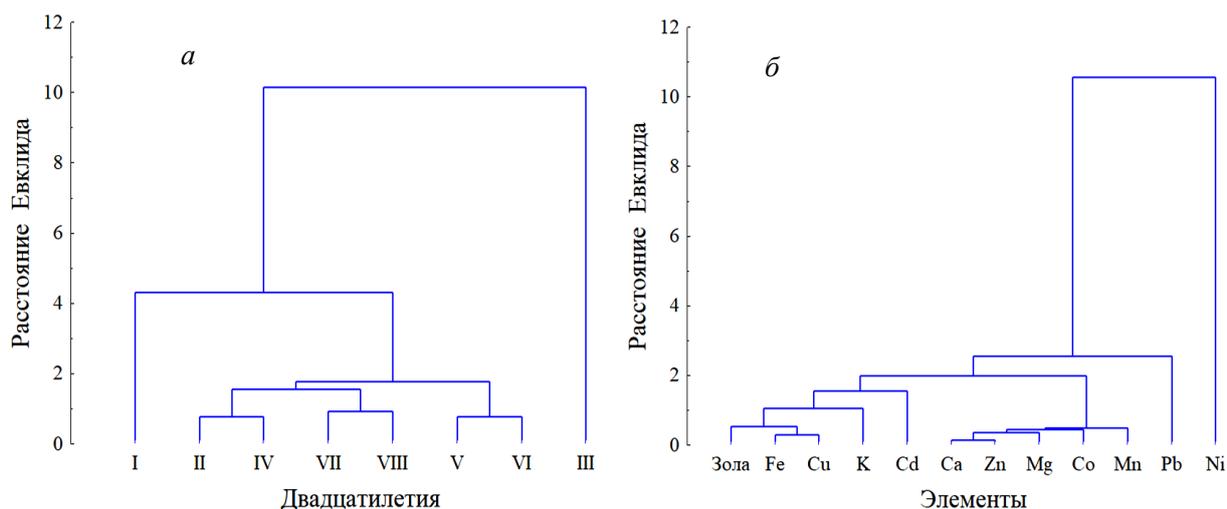
Исследования, проведенные нами в краткочеренных экотопах р. М. Кокшага в смешанных древостоях лесопарков г. Йошкар-Олы, показали также довольно четко выраженное изменение во времени содержания золы и многих металлов в разных слоях древесины сосен. Так, у деревьев, произрастающих на дерново-аллювиальных тяжелосуглинистых почвах в лесопарке «Сосновая роща», в первые двадцать лет их жизни (1851-1870 гг.) зольность древесины и содержание большинства элементов были максимальными (табл. 10). Содержание калия максимальным было в 1991-2010 гг., никеля – в 1891-1910, свинца – в 1911-1930, а кадмия – в 1951-1970 гг. Минимум содержания Mg, K, Mn и Cd отмечался в

1891-1910 гг., Mn и Zn – в 1911-1930, Fe, Cu и Ni – в 1931-1950, а Pb и Co – в 1951-1970 гг.

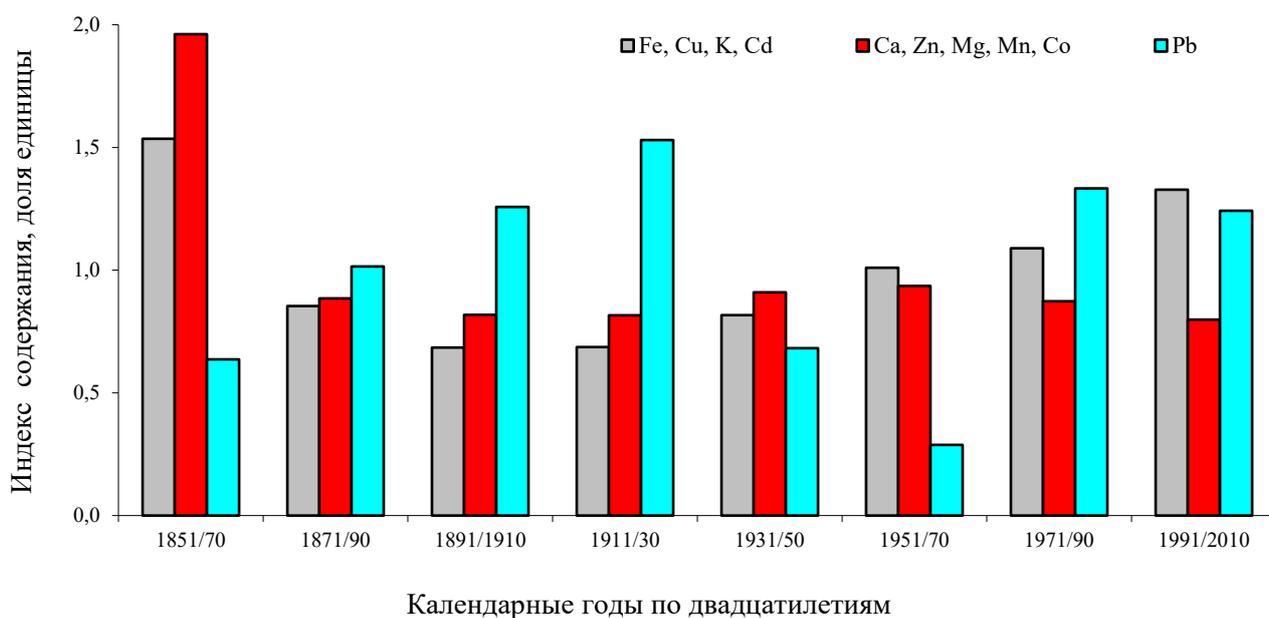
По зольному составу древесины разные слои деревьев объединяются между собой в два четко выраженных кластера, отдельно от которых находятся слои, образовавшиеся в первое и третье десятилетия (рис. 9а). Наиболее тесно сопряжен зольный состав слоев, образовавшихся во второе и четвертое, пятое и шестое, седьмое и восьмое десятилетия. В два кластера группируются друг с другом также и элементы, от которых значительно удалены по характеру изменения значений Pb, а особенно Ni (рис. 9б). Изменения содержания в древесине Fe, Cu, Ca и Cd наиболее тесно сопряжены с изменением зольности. Изменения величины индекса содержания элементов, входящих в каждый кластер, происходили во времени неодинаково (рис. 10), что указывает на разную потребность в них деревьев, зависящую от их физиологического состояния, а также сложившихся погодных условий и иных факторов среды.

**Таблица 10.** Возрастные изменения зольного состав древесины сосен, произрастающих в лесопарке «Сосновая роща» на богатых гумусом дерново-аллювиальных тяжелосуглинистых почвах

Элемент	Содержание золы (%) и химических элементов (мг·кг <sup>-1</sup> ) с 1851 г. по двадцатилетиям							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Зола	0.52	0.30	0.29	0.29	0.29	0.32	0.32	0.37
Ca	1617	826	769	768	777	806	750	729
Mg	640	285	256	288	373	301	292	273
K	416	150	147	176	221	226	321	458
Fe	59.8	36.5	25.3	23.4	22.2	26.6	31.2	48.8
Mn	27.9	10.7	9.8	9.6	11.2	15.1	12.7	10.0
Zn	8.38	4.08	3.94	3.58	3.84	4.38	4.16	3.47
Cu	2.18	1.32	1.05	0.88	0.85	1.03	1.13	1.44
Ni	0.16	0.12	3.21	0.06	0.03	0.06	0.13	0.18
Cd	0.16	0.11	0.09	0.10	0.16	0.23	0.20	0.15
Pb	0.04	0.07	0.08	0.10	0.05	0.02	0.09	0.08
Co	0.26	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10



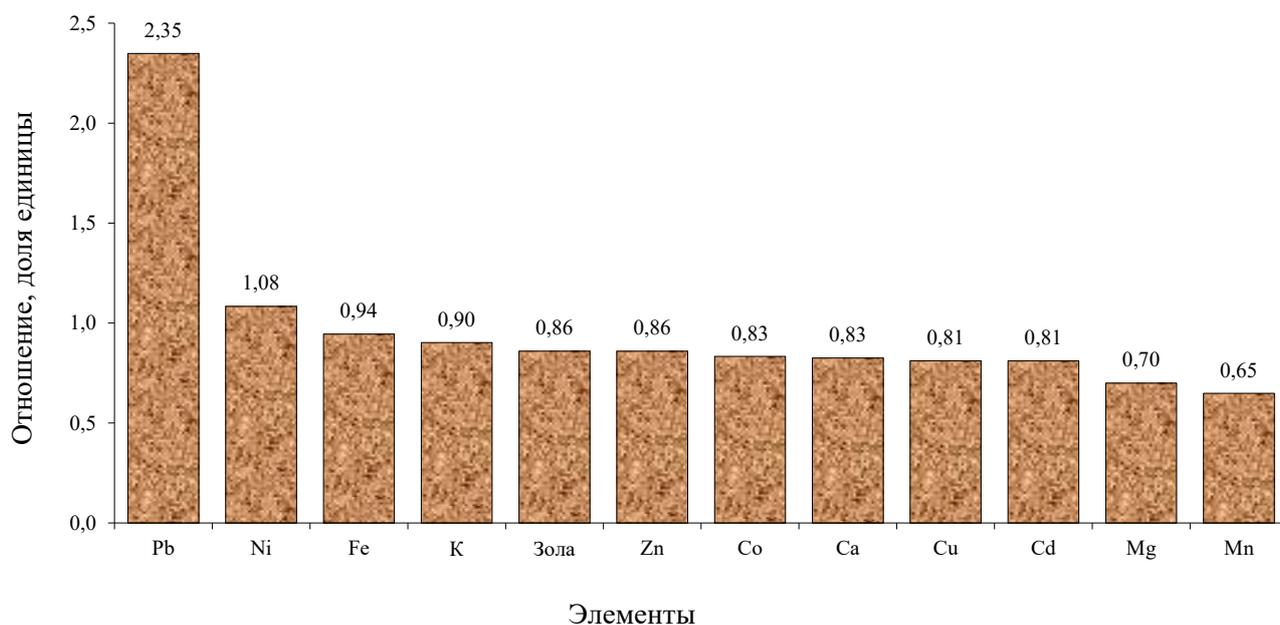
**Рисунок 9.** Сопряженность слоев древесины и содержания элементов в ней у сосен, произрастающих на высокогумусированных дерново-аллювиальных тяжелосуглинистых почвах в лесопарке «Сосновая роща»



**Рисунок 10.** Изменение величины индекса содержания разных групп элементов в древесине сосен, произрастающих на дерново-аллювиальных тяжелосуглинистых почвах в лесопарке «Сосновая роща»

Зольный состав древесины сосен, произрастающих на более тяжелых глинистых почвах в лесопарке «Дубовая роща», находящемся выше по течению р. М. Кокшага на расстоянии всего 3.5 км, имеет ряд существенных отличий, особенно по содержанию Pb (рис. 11), концентрация которого была очень высокой в 1931-1950 гг. (табл. 11). Причина этого связана, возможно, с ружейной охотой на уток, проводившейся вплоть до 1960 г., тогда как в лесопарке «Сосновая роща», примыкающем к

г. Йошкар-Ола, она давно уже была запрещена из-за постоянного нахождения людей. Велики также различия между деревьями по содержанию в их древесине Ni, концентрация которого была особенно высокой в тот же период, что и у Pb. Содержание в древесине остальных элементов, особенно Mg и Mn, у сосен в лесопарке «Дубовая роща» было ниже, чем в лесопарке «Сосновая роща», что связано, вероятно, с их наследственно обусловленными физиологическими особенностями.



**Рисунок 11.** Содержание элементов в древесине сосен лесопарка «Дубовая роща» по отношению к деревьям в лесопарке «Сосновая роща»

**Таблица 11.** Зольный состав разных слоев древесины сосен, произрастающих в лесопарке «Дубовая роща» по отношению к деревьям в лесопарке «Сосновая роща»

Элемент	Содержание элементов с 1851 года по двадцатилетиям							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Зола	0.56	0.87	0.83	0.83	0.93	1.00	1.00	0.95
Ca	0.68	0.88	0.77	0.89	0.85	0.89	0.90	0.91
Mg	0.68	0.69	0.59	0.50	0.46	0.77	0.98	1.00
K	0.44	0.98	0.90	0.72	0.83	1.29	1.12	1.06
Fe	0.41	1.47	1.34	1.11	0.84	1.06	0.88	0.95
Mn	0.38	0.80	0.80	0.99	0.83	0.62	0.62	0.63
Zn	0.56	0.95	0.82	0.79	0.91	1.03	1.06	1.08
Cu	0.57	0.74	0.82	0.88	0.88	0.91	0.94	0.97
Ni	0.33	0.86	0.82	2.73	22.42	2.88	2.90	1.14
Cd	0.60	0.82	0.66	0.98	0.93	0.78	0.87	0.84
Pb	3.43	2.40	1.98	1.25	5.38	7.42	1.70	1.35
Co	0.69	0.75	0.79	0.60	0.70	1.01	1.23	1.17

Содержание зольных элементов в древесине сосен этих экотопов изменялось по мере их роста нелинейно и не зависело от величины радиального годовичного прироста, которая здесь неуклонно снижалась (Демаков, 2023). В первое

двадцатилетие жизни деревьев содержание в древесине Ca, Mg, K, Mn, Zn, Cu, Cd и Co было очень высоким, а затем стало снижаться, опустившись до минимума у Ca, Mg, K, Mn, Cd в третье, у Zn и Co в четвертое, а у Cu в пятое двадцатиле-

тие. После этого отметки значений этих элементов начали неуклонно увеличиваться. Исключением являлся Cd, у которого с 1951-1970 гг. вновь началось их снижение. В динамике содержания Fe отмечается один минимум в 1931-1950 гг. и две высокие отметки (1871-1890 и 1991-2010 гг.). Содержание Ni и Pb изменялось волнообразно с гребнями волн в 1891-1910 и 1931-1950 гг.

Не оставался постоянным во времени зольный состав древесины также и в сосняках сфагновых, но характер динамики содержания элементов в ней был иной, нежели в других биотопах. Так, на верховом болоте «Илюшкино» зольность древесины в пределах оцененного отрезка времени в целом неуклонно снижалась вплоть до 1891-1910 гг., а затем вновь повышалась (табл. 12). Период колебаний значений показателя, как показали расчеты, превышал 500 лет и причины его остаются пока неясными. Содержание в ней кальция изменялось с периодичностью порядка 240 лет, а калия – 160 лет (значения первого из них до 1810 г. возрастали, а затем неуклонно снижались, гребни

же волны содержания калия приходились на 1831-1850 и 1991-2010 гг.).

Сугубо специфична динамика содержания в древесине микроэлементов, особенно Pb: до 1810 г. происходило неуклонное его снижение, а затем небольшой подъем и флуктуации вокруг уровня  $1.05 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$  (табл. 13). Содержание в древесине Cu вначале возрастало, достигнув максимума в период с 1791 по 1810 гг., а затем резко снизилось, флуктуируя с 1831 г. вокруг отметки  $0.87 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ . Содержание Co, Ni и Cd было наиболее высоко в начальный период роста деревьев, а затем постепенно снижалось, опустившись до минимума в 1851-1870 гг. После этого отмечается небольшой подъем и флуктуации относительно некоторого стабильного уровня. Содержание Sr до 1870 г. возрастало, затем в течение 60 лет удерживалось на довольно высоком уровне, составляющем  $0.87 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$  сухого вещества. После этого вновь произошло снижение значений параметра до  $0.52 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ . Содержание в древесине Mn, Fe и Zn изменялось бессистемно, флуктуируя вокруг некоторого среднего уровня.

**Таблица 12.** Возрастные изменения содержания золы и макроэлементов в древесине сосен, произрастающих на верховом олиготрофном болоте «Илюшкино»

Годы	Содержание золы (%) и макроэлементов (мг·кг <sup>-1</sup> )						
	Зола	Ca	Mg	K	Mn	Fe	Zn
1731-1750	0.510	1122	-	-	17.0	-	9.3
1751-1770	0.420	776	-	-	20.3	-	9.3
1771-1790	0.437	1413	687	268	20.8	10.0	12.8
1791-1810	0.411	1566	271	353	15.3	18.5	12.0
1811-1830	0.370	1491	399	334	19.2	9.9	13.4
1831-1850	0.426	1885	156	404	17.5	11.4	10.2
1851-1870	0.344	1341	370	354	19.7	8.1	11.3
1871-1890	0.341	1389	368	280	19.1	7.8	12.2
1891-1910	0.293	1202	156	181	11.6	20.1	8.6
1911-1930	0.344	1251	431	326	21.1	8.4	12.3
1931-1950	0.306	1197	299	239	11.1	8.4	8.7
1951-1970	0.339	1138	457	419	19.5	10.3	12.4
1971-1990	0.311	1056	289	388	9.8	8.4	9.5
1991-2010	0.395	1073	483	687	15.9	15.6	12.8

**Таблица 13.** Возрастные изменения содержания микроэлементов в древесине сосен на верховом олиготрофном болоте «Илюшкино»

Годы	Содержание микроэлементов, мг·кг <sup>-1</sup>					
	Pb	Cu	Co	Ni	Cd	Sr
1731-1750	2.13	0.57	3.41	4.26	1.04	-
1751-1770	0.92	1.03	1.97	2.02	0.72	-
1771-1790	0.41	1.71	0.46	0.35	0.14	-
1791-1810	0.41	3.95	0.32	0.97	0.59	0.03
1811-1830	0.39	1.13	0.31	0.62	0.32	0.04
1831-1850	1.23	0.91	0.30	0.66	0.51	0.64
1851-1870	0.86	0.71	0.25	0.42	0.29	0.53
1871-1890	1.08	0.76	0.28	0.67	0.34	0.86
1891-1910	1.07	0.91	0.34	0.74	0.48	0.87
1911-1930	0.87	0.90	0.43	0.49	0.31	0.86
1931-1950	1.04	0.97	0.45	0.68	0.48	0.71
1951-1970	0.89	0.70	0.51	0.47	0.28	0.72
1971-1990	1.32	1.02	0.59	0.67	0.48	0.60
1991-2010	1.12	0.96	0.60	0.44	0.32	0.52

Зольный состав древесины у каждого дерева в ценопопуляции, как и его динамика, были сугубо специфичными. Существенно различаются они между собой по содержанию Mg, Mn, Fe, Pb и Ni, а

разные слои древесины – лишь по содержанию K и Zn (табл. 14): значения у первого из элементов постоянно возрастают (рис. 12), а у второго повышенное содержание отмечается в период с 1870

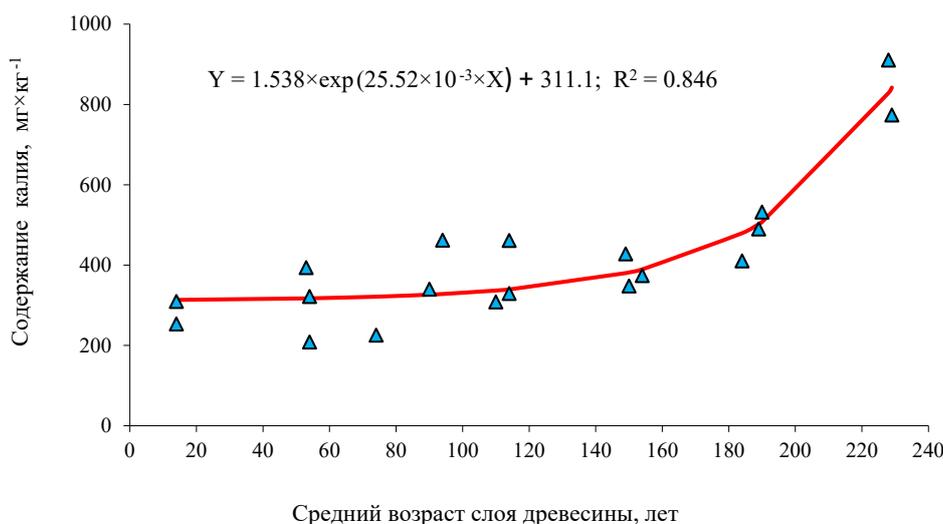
по 1970 гг. Содержание остальных зольных элементов не зависело от возраста конкретного слоя древесины и средней ширины в нем годичных колец. Исследования показали, что четкого увеличения содержания в древесине зольных

элементов, особенно токсичных для деревьев, в современный период, по сравнению с предшествующим, в целом не наблюдается, а его изменения происходили у каждого из них во времени несинхронно.

**Таблица 14.** Факторы дисперсии содержания золы и зольных элементов в древесине сосен на верховом олиготрофном болоте «Илюшкино»

Элемент	Фактор дисперсии и доля его влияния*				Доля ошибки, %
	Особенности физиологии дерева ( $F_{0.05}=4.10$ )		Время образования древесины ( $F_{0.05} = 3.33$ )		
	$F_{\text{факт.}}$	Доля влияния, %	$F_{\text{факт.}}$	Доля влияния, %	
Зола	0.71	10.6	0.39	14.6	74.8
Ca	2.21	19.8	1.58	35.4	44.8
K	2.50	11.9	<b>5.37</b>	64.2	23.9
Mg	<b>7.01</b>	45.5	1.36	22.1	32.4
Mn	<b>14.4</b>	54.4	2.83	26.7	18.9
Fe	<b>4.96</b>	29.4	2.77	41.0	29.6
Zn	0.71	4.6	<b>3.86</b>	62.9	32.5
Pb	<b>4.71</b>	38.5	1.01	20.7	40.8
Cu	0.53	6.1	1.26	36.3	57.6
Ni	<b>8.07</b>	48.2	1.47	21.9	29.9
Cd	1.95	14.8	2.48	47.2	38.0

\*Жирным шрифтом выделены значения, достоверность которых доказана с вероятностью 95%.



**Рисунок 12.** Характер возрастных изменений содержания калия в древесине сосен на верховом олиготрофном болоте «Илюшкино»

Содержание золы и зольных элементов изменялось у деревьев не только в радиальном направлении, т.е. во времени, но и по градиенту длины их ствола (табл. 15 и 16). Время образования исследуемого слоя заболонной древесины, расположенного на разном удалении от комля дерева было одно, но биологический возраст разный: чем ближе точка к вершине, тем исходно моложе древесина. Содержание в древесине многих зольных элементов бессистемно флуктуирует вокруг определенного уровня, что связано с погрешностями оценки и индивидуальными особенностями дере-

вьев, доля влияния которых на общую дисперсию показателей превышает в большинстве случаев влияние градиента длины ствола (табл. 17). Более или менее закономерно изменяется в вертикальном направлении по стволу деревьев только содержание золы, Са, К, Mg, Mn и особенно Sr (зольность древесины и содержание в ней Са наиболее высоки на расстоянии 4-5 м от основания ствола, Mg – на 2 м, Sr – 2-5 м, Mn – на 7-8 м, а К – вблизи вершины дерева), однако достоверность различий значений показателей между различными точками доказана только по содержанию К и Mn.

**Таблица 15.** Изменение содержания золы и макроэлементов в заболонном слое древесины по градиенту длины ствола деревьев на верховом олиготрофном болоте «Илюшкино»

Расстояние от комля, м	Содержание золы (%) и макроэлементов (мг·кг <sup>-1</sup> )					
	Зола	Са	К	Fe	Mn	Zn
0	0.374	1408	607	33.3	9.6	7.15
1	0.396	1338	599	27.6	8.0	12.8
2	0.379	1507	525	27.9	10.3	8.61
3	0.365	1448	467	14.5	10.0	8.45
4	0.433	1636	437	31.4	10.9	9.53
5	0.414	1621	441	15.9	12.1	9.18
6	0.356	1596	428	34.2	12.4	13.9
7	0.406	1756	448	13.3	13.1	9.23
8	0.458	1656	737	16.2	15.3	10.53
9	0.374	1181	529	19.4	15.0	9.32
10	0.357	1275	507	16.2	13.4	9.80
11	0.350	1104	627	18.9	10.9	9.78
12	0.413	1281	731	23.6	15.6	9.07

**Таблица 16.** Изменение содержания микроэлементов в заболонном слое древесины по градиенту длины ствола деревьев на верховом олиготрофном болоте «Илюшкино»

Расстояние от комля, м	Содержание микроэлементов, мг·кг <sup>-1</sup>					
	Pb	Cu	Sr	Co	Ni	Cd
0	1.32	1.07	0.92	0.76	0.33	0.09
1	1.64	1.12	0.94	0.78	0.29	0.11
2	1.63	1.00	1.18	1.02	0.38	0.08
3	1.60	0.94	1.05	0.91	0.41	0.11
4	1.50	1.03	1.10	0.89	0.28	0.13
5	1.58	0.92	1.05	0.96	0.79	0.11
6	1.37	0.94	1.09	0.87	0.42	0.08
7	1.30	0.95	1.10	0.92	0.41	0.10
8	1.38	1.60	0.92	1.05	0.43	0.12
9	1.66	1.44	0.81	0.98	0.41	0.12
10	1.67	1.06	0.83	0.97	0.41	0.14
11	1.04	0.90	0.78	0.73	0.39	0.10
12	1.16	1.17	0.82	0.78	0.34	0.11

**Таблица 17.** Факторы изменчивости содержания золы и зольных элементов в древесине сосен по градиенту длины их ствола на верховом болоте «Илюшкино»

Элемент	Фактор дисперсии и доля его влияния				
	Особенности дерева ( F <sub>0.05</sub> =3.49 )		Градиент длины ( F <sub>0.05</sub> = 2.35 )		Доля ошибки, %
	F <sub>факт.</sub>	Доля влияния, %	F <sub>факт.</sub>	Доля влияния, %	
Зола	<b>5.48</b>	29.6	0.60	16.3	54.1
Ca	2.99	18.4	0.66	20.3	61.3
K	<b>38.19</b>	50.1	<b>5.61</b>	36.8	13.1
Mg	<b>75.50</b>	84.9	0.64	3.7	11.4
Mn	<b>13.67</b>	31.5	<b>3.96</b>	45.5	23.0
Zn	<b>8.77</b>	41.1	0.52	12.1	46.8
Pb	<b>61.94</b>	82.1	0.70	4.6	13.3
Cu	1.57	8.4	1.42	38.1	53.5
Ni	2.39	14.7	0.78	23.9	61.4
Cd	<b>99.68</b>	86.1	1.21	5.2	8.6
Sr	<b>34.70</b>	73.1	0.56	5.9	21.0
Co	<b>52.25</b>	77.5	1.04	7.7	14.8

Расчеты показали, что значение коэффициента вариации содержания золы и зольных элементов в древесине сосны по градиенту радиуса и длины ствола деревьев изменяется на верховых болотах в очень больших пределах, состав-

ляющих от 9.3 до 78.9 % (табл. 18). Больше всего изменяется содержание в древесине Ni и Fe, а меньше всего – Mg и золы. Содержание большинства зольных элементов варьирует в пределах от 34 до 60 %.

**Таблица 18.** Вариабельность содержания золы и зольных элементов в древесине сосен по радиусу и градиенту длины ствола деревьев на верховом болоте «Илюшкино»

Элемент	Значение коэффициента вариации у выбранных трех модельных деревьев. %					
	По радиусу			По длине ствола		
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
Зола	29.2	23.6	20.7	19.7	13.4	23.3
Ca	33.3	24.4	20.3	24.5	25.1	34.3
K	39.3	54.6	52.9	22.9	17.2	26.9
Mg	19.7	15.9	12.0	20.4	20.6	9.3
Mn	41.9	18.7	21.8	30.1	13.2	17.3
Fe	41.3	42.3	38.9	53.4	68.6	37.2
Zn	26.4	40.0	24.1	24.4	44.9	15.7
Pb	19.8	18.8	14.9	21.1	35.3	17.7
Cu	28.4	45.2	48.2	18.7	39.6	32.0
Ni	35.8	57.8	42.5	33.7	78.9	14.9
Cd	18.6	31.9	59.6	16.6	33.5	46.9
Sr	44.4	16.4	15.2	42.7	29.4	21.9
Co	26.7	35.3	14.2	26.5	19.5	13.2

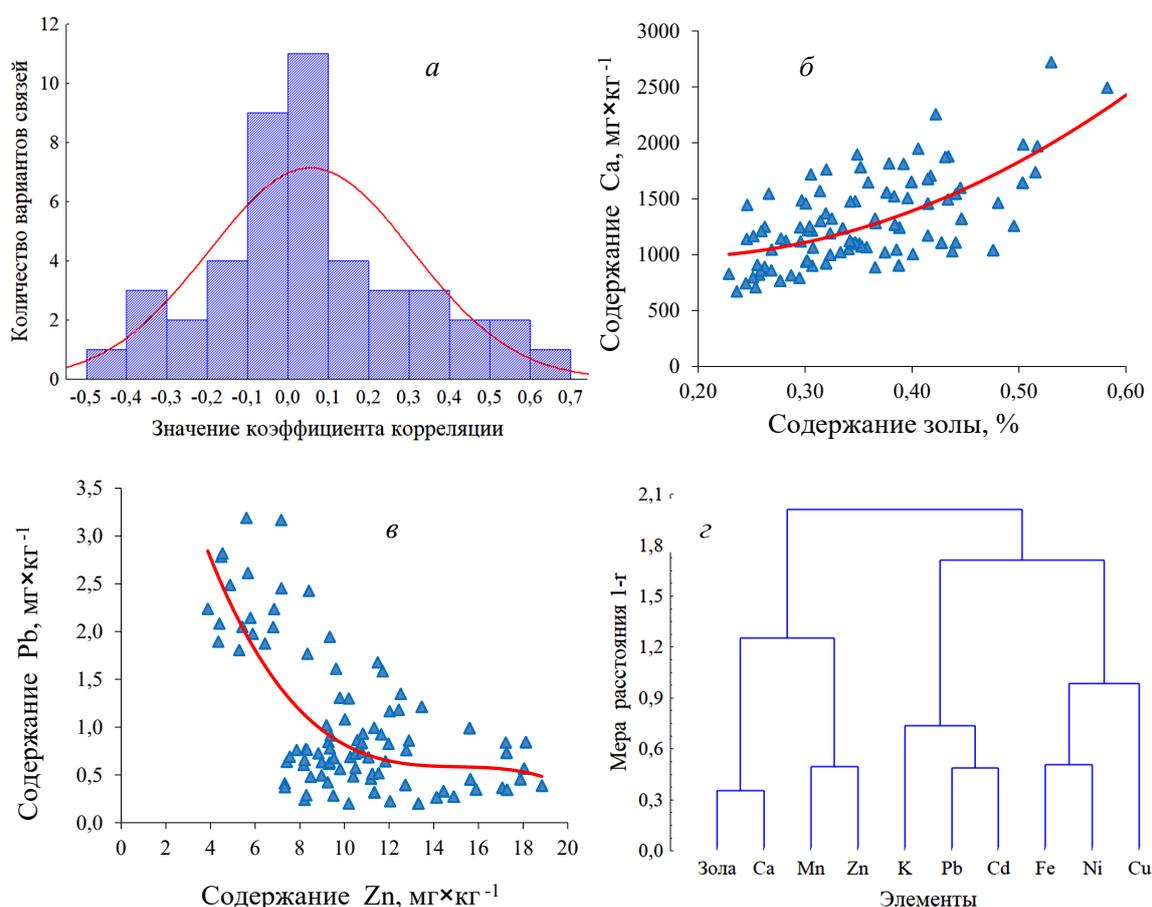
Приведенные данные показывают, что оценка накопления зольных элементов сосновым древостоем сопряжена со значительными трудностями методического и технического характера, обусловленными значительным варьированием их значений под влиянием различных внутренних и внешних факторов. Так, даже для достижения точности оценки  $\pm 20\%$  необходимо отобрать не менее 16 образцов древесины, что на практике осуществить не всегда возможно. Проводить же исследования с меньшей точностью не имеет смысла.

Зольный состав древесины сосен на верховых болотах, как и в других биотопах, не является стабильным, изменяясь между деревьями в ценопопуляции, го-

дичными слоями и местом их нахождения относительно градиента длины ствола, о чем свидетельствует очень слабая взаимная сопряженность рядов концентрации в ней всей совокупности элементов. Величина коэффициента корреляции между рядами содержания всех элементов друг с другом в выборке изменяется от -0.43 до 0.65, среди которых наиболее часто встречаются значения от -0.10 до 0.10 (рис. 13а). Более всего сопряжены с зольностью древесины значения содержания в ней кальция (рис. 13б), хотя и в этом случае трудно говорить о наличии функциональной зависимости. У всех последующих элементов связь рядов их концентрации с зольностью еще ниже. Обратная зависи-

мость отмечается между рядами содержания в древесине Zn и Pb (рис. 13в), Mn и Cu ( $r = -0.39$ ), Mn и Pb ( $r = -0.37$ ), Mn и Fe ( $r = -0.34$ ). Все элементы в исследованной нами совокупности образцов группируются между собой по рядам значений их концентрации в древесине в три кластера (рис. 13г). В один кластер с

золой входят элементы, особо нужные деревьям для поддержания своей жизнедеятельности. Во второй кластер вошли крайне важный для деревьев K, а также токсичные для них Pb и Cd, в третий – Fe, Ni и Cu, которые также необходимы растениям для своей жизнедеятельности.



**Рисунок 13.** Характер взаимной сопряженности содержания элементов в древесине сосны обыкновенной на верховых болотах Республики Марий Эл

Химический состав древесины, как следует из приведенных данных, не является отражением распределения элементов в окружающей среде, а формиру-

ется деревьями избирательно в результате физиологических процессов, в которых каждый из них вступает друг с другом в сложные отношения. Недоста-

ток или же избыток какого-либо химического элемента в среде и самом организме отражается на поглощении растением других элементов (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Так, к примеру, Са, К и Мп действуют как антагонисты в процессе поглощения растениями Mg, а при дефиците Zn у них нарушается фосфорный обмен.

#### Элементный состав грубой коры.

Основной функцией коры деревьев является защита слоя камбия от негативного воздействия факторов внешней среды, главным образом от повреждения дикими животными. Кора, как и древесина, является продуктом деятельности

камбия, но и в тоже время пористым абсорбентом, поглощающим из окружающей среды ряд химических элементов, выпадающих с атмосферными осадками и пылью. В связи с особенностями функций и свойств коры ее зольный состав имеет свою специфику (Казимиров и др., 1977). Так, в сосняках Республики Марий Эл ее зольность в 6.4 раза выше, чем у древесины (табл. 19). В коре, по сравнению с древесиной, содержится в 7-8 раз больше Са и Sr, в 4 раза – Cd, в 2 раза – Fe и Zn. По содержанию остальных элементов кора существенно не отличается от древесины, но ранговое распределение их в ней иное.

**Таблица 19.** Содержание золы и зольных элементов в коре деревьев сосны обыкновенной в лесах Марий Эл

Элемент	Значения статистических параметров содержания элементов*						Отношение к древесине
	N	M ± m	min	max	Sx	CV	
Зола	23	2.24 ± 0.26	0.76	4.86	1.23	55.0	6.40
Са	23	9581 ± 1229	2881	20670	5895	61.5	8.01
Mg	12	988.8 ± 275	188.5	3347	953	96.3	1.09
К	23	347.9 ± 64	85.9	1153	307	88.3	0.93
Fe	29	42.6 ± 6.2	9.15	114.9	33.1	77.8	2.09
Mn	29	27.0 ± 3.5	8.83	78.3	18.9	69.8	1.20
Zn	29	18.6 ± 1.9	6.32	40.9	10.0	53.7	1.88
Sr	20	9.68 ± 2.4	0.13	31.8	10.7	111.0	7.45
Cu	29	1.70 ± 0.19	0.03	2.95	1.02	60.0	1.77
Cd	29	0.66 ± 0.21	0.15	4.92	1.14	172.4	4.25
Pb	26	0.63 ± 0.10	0.14	2.44	0.53	83.9	0.74
Co	20	0.46 ± 0.07	0.07	1.41	0.32	70.0	0.82
Ni	26	0.35 ± 0.12	0.04	2.00	0.60	171.9	0.94

\*Примечание: содержание золы выражено в %, а всех химических элементов – в мг×кг<sup>-1</sup> абсолютно сухой массы коры.

Факторами вариабельности содержания зольных элементов в коре деревьев, как и в древесине, являются их индивидуальные особенности в отношении обмена веществ, а также степень загрязнения окружающей среды. Так, на участке леса, прилегающего к заводу силикатного кирпича, содержание золы и большинства зольных элементов в коре деревьев значительно превышает фоновый уровень (табл. 20). На первом месте по превышению концентрации над фоном находится, в отличие от древесины, Cr (в 9.33 раза), хотя абсолютное его содержание в коре очень мало. Велико также превышение содержания в коре Fe (в 6.16 раза). Содержание Ca, который

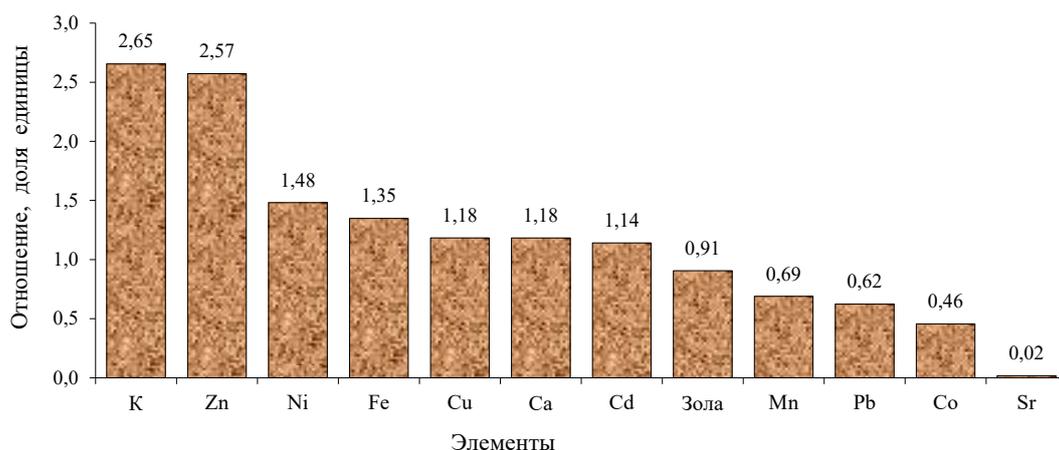
доминирует по массе в пылевых выбросах предприятия, превышает фоновый уровень всего в 3.0-4.75 раза. Концентрация в коре деревьев на прилегающей к заводу территории Pb, Sr, K, Ni и Co в 1.9-2.3 раза выше фонового уровня. Содержание Cu немногим выше, а Zn, Cd и Mn, наоборот, ниже, чем на фоновом участке. Стабилизация содержания в коре большинства зольных элементов происходит на расстоянии 400-700 м от источника выбросов, четко убывая по мере удаления от него. Данной закономерности не подчиняются только Ca и Cd, концентрация которых наиболее велика на расстоянии 190 м от границы территории предприятия.

**Таблица 20.** Изменение относительного содержания золы и зольных элементов в коре деревьев сосны обыкновенной по градиенту распространения выбросов завода силикатного кирпича

Элемент	Фоновое содержание, мг·кг <sup>-1</sup>	Содержание элементов по отношению к фону на разном удалении от источника загрязнения, доля единицы					
		100 м	130 м	190 м	280 м	340 м	390 м
Зола	1.790	2.38	2.28	2.51	1.32	1.42	1.35
Cr	0.154	9.33	7.21	9.08	2.19	1.66	2.73
Fe	16.59	6.16	5.10	5.37	1.36	1.13	0.99
Ca	4349	3.04	4.15	4.75	3.67	4.13	4.07
Pb	0.505	2.28	2.23	2.24	1.12	1.53	1.23
Sr	12.39	2.15	2.01	1.70	0.94	0.89	0.89
K	121.1	1.97	1.99	1.16	1.69	0.98	0.71
Ni	0.096	1.96	1.92	1.44	1.08	1.15	0.51
Co	0.370	1.90	1.89	1.85	1.27	1.40	1.29
Cu	1.962	1.27	1.46	1.33	1.19	1.40	0.75
Zn	8.10	0.85	1.08	0.79	0.78	0.90	0.85
Cd	0.264	0.80	0.80	0.88	0.65	0.65	0.59
Mn	33.61	0.35	0.34	0.38	0.43	0.54	0.53

Зольный состав коры деревьев сосны обыкновенной, как и их древесины, в определенной мере зависит от условий их произрастания. Так, на верховых олиготрофных болотах Марийского Полесья концентрация в ней K и Zn в 2.6 раза выше, чем на фоновом участке Силикатного лесничества в условиях сухого бора (рис. 14). На болотах выше также концентрация Ni, Fe, Ca и Cd, а содержание в коре золы, Mn, Pb, Co, а особенно Sr, наоборот, ниже. Роль условий произрастания в формировании

элементного состава коры сосны обыкновенной отмечена и другими исследователями. Так, к примеру, на Европейском Севере России в черничном типе леса концентрация элементов в коре выше, чем в брусничниковом (Казимиров и др., 1977). Установлено также достоверное влияние географического происхождения деревьев (Тараканов и др., 2011) и выявлено закономерное изменение содержания элементов по градиенту длины их ствола (Храмченкова и др., 2016).



**Рисунок 14.** Содержание элементов в коре сосен, произрастающих на верховых олиготрофных болотах, по отношению к деревьям в сухом бору Силикатного лесничества (фоновый участок)

**Элементный состав хвои деревьев.** Хвоя деревьев сосны – их основной орган, благодаря которому осуществляется трансформация солнечной энергии, ассимиляция необходимых для жизни органических веществ и круговорот химических элементов в биогеоценозах. Хвоя является зоной раздела между

внешней средой и внутренним миром дерева, выступая в качестве активного поглотителя эмиссий различной природы и фильтра атмосферных осадков, которые смывают с нее осевшую пыль и продукты жизнедеятельности организмов, а также выщелачивают часть питательных веществ из живых клеток (Сви-

ридова, 1960; Мина, 1965; Соколов, 1972; Сысуев, 1975; Карпачевский и др., 1998; Никонов, Лукина, 2000; Пристова, 2005; Марунич и др., 2006; Арчегова, Кузнецова, 2011; Робакидзе и др., 2013; Демаков и др., 2013а). Хвоя деревьев участвует в процессе их питания не только за счет фотосинтеза, но и посредством выделения в окружающую среду водорастворимых ферментов (экзометаболитов), способствующих разложению находящихся в лесной подстилке и почве минеральных и органических соединений, переводя их в доступную для растений форму. Она, в отличие от других органов деревьев, очень быстро возвращает накопленные минеральные вещества обратно во внешнюю среду, поскольку продолжительность ее жизни мала.

Анализ полученного материала показал, что содержание многих зольных элементов в хвое деревьев сосны обыкновенной значительно выше, чем в древесине и коре. Особенно велики различия по К и Mn (табл. 21), принимающих активное участие в большинстве ферментативных процессов. В хвое, по сравнению с древесиной, также значительно выше концентрация Ca и Zn, а по сравнению с корой – Sr, Ni и Pb. Хвоя несколько отличается от древесины и коры также

по ранговому расположению элементов в их ряду, хотя доминирующее положение в нем по-прежнему занимает Ca, составляющий основу оболочки растительных клеток. Существенно повышается ранг K, Zn и Cu, а у Fe он, наоборот, понижается.

Содержание золы и зольных металлов в хвое деревьев сосны, как свидетельствуют приведенные данные, очень изменчиво. Особенно высока вариабельность содержания в ней Sr, Ni и Co. Меньше же всего изменяется содержание в хвое золы, K и Fe. Одним из факторов вариабельности значений содержания являются геохимические особенности биотопов, достоверное влияние которых для многих элементов, кроме Zn, Cu, Pb и Ni, подтверждено статистически (табл. 22). Наиболее велики различия между биотопами по содержанию в хвое Mn и Cd. Фактором изменчивости содержания зольных элементов в хвое сосны являются, как следует из приведенных данных, также индивидуальные особенности деревьев. Особенно сильно варьирует содержание в ней Sr и Ni (рис. 15), что отчасти связано с большими погрешностями их оценки. Меньше всего изменяется в ней содержание K, Zn, Fe и золы.

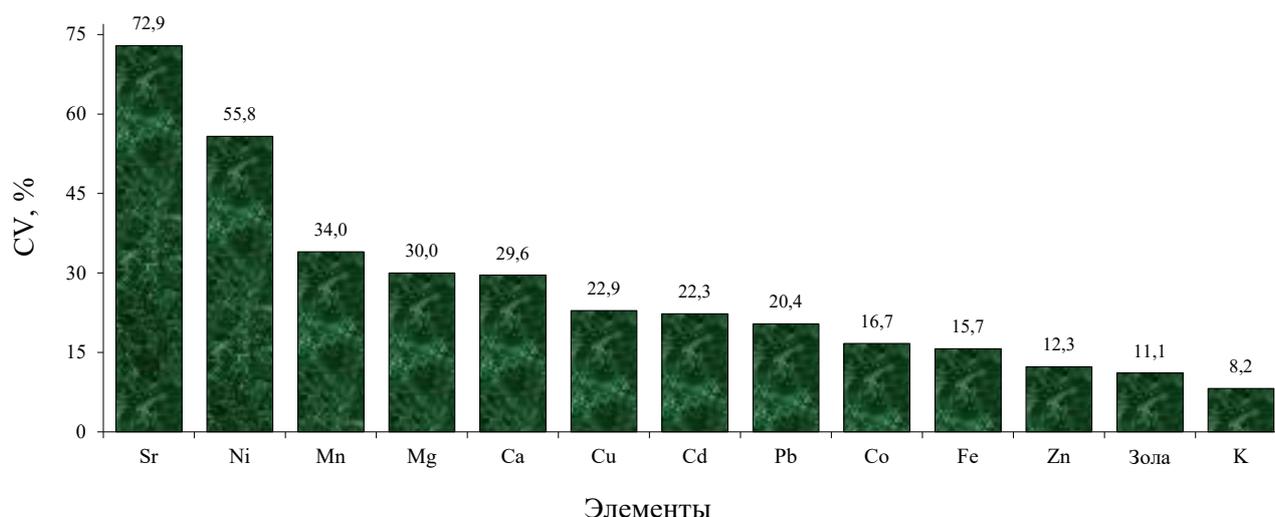
**Таблица 21.** Содержание золы и зольных элементов в хвое сосны обыкновенной Марийского Заволжья

Элемент	Значения статистических показателей* (N = 127)					Отношение к	
	M ± m	min	max	S	CV	древесине	коре
Зола	2.35 ± 0.04	1.46	3.70	0.42	17.8	6.72	1.45
Ca	5016 ± 322	1120	13354	2747	54.8	4.19	0.97
K	4169 ± 116	2198	6210	993	23.8	11.1	13.0
Mg	1841 ± 65	530	3320	568	30.9	2.03	-
Mn	214 ± 12.9	2.64	846	146	67.9	11.1	10.8
Zn	48.8 ± 1.9	18.9	169	21.3	43.6	4.93	2.34
Fe	45.1 ± 1.3	23.8	89.8	14.2	31.5	2.22	2.02
Cu	2.39 ± 0.1	0.93	7.75	0.99	41.3	2.48	1.03
Sr	1.91 ± 0.22	0.18	8.13	1.84	96.4	1.47	8.68
Pb	1.75 ± 0.10	0.11	5.28	1.06	60.7	2.04	5.57
Ni	0.84 ± 0.07	0.06	4.81	0.75	89.0	2.28	5.89
Co	0.51 ± 0.05	0.14	1.42	0.43	84.6	0.92	3.03
Cd	0.24 ± 0.01	0.04	0.93	0.14	57.7	1.55	0.80

\*Примечание: содержание золы выражено в %, а всех зольных элементов – в мг·кг<sup>-1</sup> абсолютно сухой массы хвои.

**Таблица 22.** Факторы дисперсии содержания зольных элементов в хвое деревьев сосны обыкновенной

Элемент	Фактор дисперсии и доля его влияния				Доля ошибки, %
	Биотоп ( F <sub>0.05</sub> = 6.94 )		Возраст хвои ( F <sub>0.05</sub> = 6.94 )		
	F <sub>факт.</sub>	Доля влияния, %	F <sub>факт.</sub>	Доля влияния, %	
Зола	11.28	45.6	11.45	46.3	8.1
Ca	9.37	10.6	76.88	87.1	2.3
K	165.2	73.7	56.8	25.4	0.9
Mn	15.80	84.3	0.95	5.1	10.6
Zn	5.57	63.9	1.15	13.2	22.9
Fe	32.49	60.9	18.89	35.4	3.7
Cu	4.66	67.0	0.30	4.3	28.7
Sr	7.55	31.8	14.20	59.8	8.4
Pb	1.68	31.9	1.58	30.1	38.0
Ni	1.08	32.4	0.25	7.5	60.1
Cd	15.62	87.8	0.17	1.0	11.2



**Рисунок 15.** Ранговое распределение элементов по величине коэффициента вариации их содержания в однолетней хвое деревьев сосны на верховых олиготрофных болотах Марийского Заволжья

Вторым по значимости фактором вариабельности содержания химических элементов в хвое является ее собственный возраст, достоверное влияние которого подтверждено статистически только по золе, Ca, K, Fe и Sr: их значения в старой хвое по всем элементам, кроме калия, выше, чем в молодой (табл. 23 и 24). Это полностью согласуется с данными других исследователей (Лукина и др., 1994). Содержание золы, K, Cu и Cd наиболее велико в хвое деревьев на вырубке в болоте «Илюшкино», Ca, Mn, Zn и Sr – на гары 1972 г. этого же болота, а Fe, Pb и Co – в сосняке лишайниково-мшистом.

Наличие индивидуальной вариабельности зольного состава хвои и других органов деревьев, которая хорошо

выражена в их ценопопуляциях (Leyton, Armson, 1955; Forrest, Ovington, 1971; Мамаев, 1972; Митрофанов, 1973; Ковальский, 1974; Goddard, Zobel, Hollis, 1976; Kleinsmit, 1978; Ильин, 1985; McKeand, Allen, 1991; Петрунина, Гаранина, 1995; Ермаков, 1999), обусловлена наследственными особенностями особей к абсорбции, транспорту и использованию элементов питания (Ковалевский, 1991), а также способностями их к симбиозу с почвенными микроорганизмами (Никонов и др., 2004). Она свидетельствует о возможности целенаправленного отбора особей, однако систематических исследований в этом направлении пока немного. Показано, в частности, что влияние клоновой принадлежности статистически значимо для большин-

ства проанализированных элементов, особенно для Ca, K, Mn, Zn, Sr и Cu, которые тесно связаны также с диаметром ствола деревьев (Тараканов и др.,

2007). Содержание в хвое Fe, Ni, Pb и ряда более тяжелых элементов с клоновой принадлежностью деревьев не связано.

**Таблица 23.** Среднее содержание золы и зольных элементов в хвое сосны обыкновенной, произрастающей в разных биотопах Республики Марий Эл

Элемент	Содержание элементов в хвое разного возраста, мг·кг <sup>-1</sup> (N = 127)								
	Биотоп А			Биотоп В			Биотоп С		
	1 год	2 года	3 года	1 год	2 года	3 года	1 год	2 года	3 года
Зола	2.02	2.26	2.45	2.31	2.53	2.62	2.10	2.29	2.24
Ca	3126.0	4721.1	6592.8	2418.1	4265.3	4993.2	3179.8	5005.1	6278.2
K	3665.5	3083.3	2966.1	5565.6	4754.1	4429.6	4776.7	4056.0	3757.1
Mg	-	-	-	2155.9	1411.0	1444.0	2128.4	1803.6	-
Mn	36.50	44.10	49.80	199.8	280.8	133.8	218.2	295.5	308.2
Zn	24.40	29.60	29.40	43.77	63.12	36.29	42.84	58.45	68.80
Fe	51.20	62.20	62.10	33.32	48.77	42.21	33.16	45.50	49.66
Cu	2.127	1.555	1.469	2.614	2.502	3.661	2.237	2.135	1.900
Sr	0.341	0.880	1.366	0.757	1.409	2.039	0.754	2.128	3.109
Pb	1.709	1.822	2.149	1.938	2.379	1.256	1.483	1.782	0.508
Ni	0.991	0.696	1.909	1.289	0.841	1.345	0.628	1.028	0.223
Cd	0.036	0.058	0.107	0.304	0.337	0.339	0.248	0.253	0.124

\*Примечание: биотоп А – 30-летние культуры сосны в сухом бору; биотоп В – 20-летний сосняк на вырубке в болоте «Илюшкино» (Старожильское лесничество); биотоп С – 38-летний сосняк на гари 1972 г. на болоте «Илюшкино».

**Таблица 24.** Показатели изменчивости содержания золы и зольных элементов в двухлетней хвое сосны обыкновенной по отношению к однолетней на верховом болоте «Илюшкино»

Элемент	Значения статистических показателей отношения содержания элементов (N = 44)					
	M ± m	min	max	S	CV	p
Зола	1.10 ± 0.03	0.97	1.28	0.10	9.0	2.8
Ca	1.78 ± 0.12	1.33	2.52	0.39	22.1	7.0
K	0.85 ± 0.01	0.80	0.91	0.04	4.4	1.4
Mg	0.80 ± 0.05	0.44	1.00	0.16	20.1	6.3
Mn	1.32 ± 0.08	0.89	1.65	0.26	20.0	6.3
Zn	1.16 ± 0.07	0.82	1.47	0.22	18.8	6.0
Fe	1.22 ± 0.04	0.96	1.40	0.14	11.2	3.5
Cu	0.97 ± 0.03	0.82	1.12	0.09	9.3	2.9
Sr	2.18 ± 0.31	1.32	4.27	0.99	45.5	14.4
Pb	1.25 ± 0.08	0.96	1.71	0.26	21.1	6.7
Ni	0.94 ± 0.16	0.16	2.04	0.51	54.5	17.2
Co	1.11 ± 0.03	0.94	1.23	0.11	9.8	3.1
Cd	1.09 ± 0.08	0.82	1.57	0.25	22.7	7.2

Способность к накоплению элементов в хвое деревьев сосны обыкновенной, чем в их древесине. Расчеты, проведенные на основе полученных нами данных по элементному составу песчаных почв (Демаков, Исаев, 2021б), показали, что содержание в золе хвои большинства оцененных нами элементов, особенно Ca, Mg, Zn, K и Mn, гораздо выше, чем в почве сухих и свежих боров Марийского Заволжья (табл. 25). В золе хвои, как это ни странно, содержится больше, чем в почве, также Pb, Cu, Ni и Sr.

Железа, входящего в состав ряда ферментов и активно участвующего в синтезе хлорофилла, а также в процессе восстановления нитратов, в том числе дыхательных цитохроматов, в золе хвои сосны содержится, наоборот, во много раз меньше, чем в почве. Низок также коэффициент биологического поглощения кадмия (0.74-0.75) и кобальта (0.61-0.64). В золе однолетней хвои накопление большинства химических элементов, за исключением Ca, Zn, Mn и Sr, выше, чем в двухлетней.

**Таблица 25.** Соотношение между содержанием элементов в золе хвои сосны обыкновенной и песчаной почве в сухих и свежих борах Республики Марий Эл

Возраст хвои	Значение коэффициента биологического поглощения элементов									
	Ca	Mg	Zn	K	Mn	Pb	Cu	Ni	Sr	Fe
1 год	157.1	98.0	85.7	82.3	48.5	6.64	3.41	1.69	1.56	0.18
2 года	226.0	65.2	94.4	65.4	57.7	3.55	2.87	0.95	3.56	0.22

Элементный состав хвои деревьев сосны обыкновенной зависит, как показано исследователями (Тараканов и др., 2011), от географического происхождения деревьев и густоты древостоев, с увеличением которой содержание в ней Ca, Zn и Sr снижается. Показано также, что в северных лесах содержание в ней Mn ниже, чем в средней и южной частях таежной зоны, а содержание остальных элементов, особенно S, K, Ca, Ni, Mg и Fe,

выше (Лукина и др., 1994; Лукина, Никонов, 1998; Никонов и др., 2004).

Анализ рассмотренных выше литературных источников и материалов наших собственных исследований позволяет построить ранговый ряд химических элементов, содержащихся в хвое деревьев сосны обыкновенной:  $C > O > N > H \gg Ca > K > P > S > Mg > Si > Mn \gg Al > Fe > Na \gg Zn > Sr > Ti > Br > Cu > Ni > Pb > Rb > Co > Cd > Bi > Se > U$ . В ней

могут содержаться также Ag, Au, Ir и прочие элементы периодической системы Д. И. Менделеева, однако точно оценить их концентрацию способны далеко не все современные средства химического анализа. Для изучения биологического круговорота веществ, а также решения задач по генетике и селекции этого вида растения, достаточно оценивать небольшой набор химических элементов, имеющих наиболее высокое информативное значение. К их числу следует отнести Ca, K, P, S, Mg, Mn, а также Zn, Cu и Ni, принимающих активное участие в протекании физиологических процессов.

На элементный состав хвои большее влияние оказывает техногенное загрязнение окружающей среды, который у нее изменяется гораздо значительнее, чем у древесины, но слабее, чем у коры (Демаков и др., 2012а). Так, исследования, проведенные нами в зоне выбросов завода силикатного кирпича (рис. 16), показали, что зольность хвои деревьев и содержание в ней большинства химических элементов закономерно снижаются по градиенту известкового загрязнения

(табл. 26). Наибольшее превышение в зоне загрязнения, по сравнению с фоновым уровнем, имеет содержание Sr, хотя в хвое оно очень мало. На втором месте в ранговом ряду элементов по их превышению над фоном находится Ca, абсолютное содержание которого в хвое самое высокое. Значительно превышает фоновый уровень содержание в хвое, особенно однолетней, Cd. Вблизи завода отмечается также повышенное содержание в хвое Fe, Zn и Pb. Резко отличается от остальных элементов характер динамики Mn, содержание которого в хвое неуклонно возрастает по мере удаления от источника загрязнения. Расстояние от источника загрязнения не оказывает в целом существенного влияния лишь на изменение содержания в хвое Cu, Co и Ni (табл. 27). В однолетней хвое деревьев сосны, произрастающих в пределах всего градиента загрязнения, содержится гораздо больше Mn и K, чем в двухлетней, но гораздо меньше Ca, Fe, Pb, а особенно Sr. Возраст хвои не оказывает существенного влияния на изменение содержания в ней Fe, Zn, Mn, Co и Ni.



**Рисунок 16.** Сосновый лес в зоне выбросов Марийского завода силикатного кирпича

**Таблица 26.** Изменение содержания золы и зольных элементов в хвое деревьев по градиенту загрязнения

Элемент	Фоновое содержание элемента	Содержание элементов по отношению к фону на разном удалении от завода				
		100 м	130 м	190 м	280 м	340 м
<i>Хвоя первого года жизни</i>						
Зола	2.02	1.71	1.54	1.09	1.04	1.01
K	3665	1.10	1.06	1.14	1.03	0.95
Ca	3126	3.40	2.38	0.97	0.90	1.11
Fe	51.2	1.70	1.39	1.30	1.17	1.07
Mn	36.5	0.15	0.16	0.25	0.62	0.50
Zn	24.4	1.54	1.20	1.14	0.82	0.87
Cu	2.13	1.30	1.35	1.19	1.38	3.64
Pb	1.71	1.21	1.21	0.93	1.08	0.84
Co	1.38	0.85	0.94	0.88	0.93	1.00
Ni	0.99	0.98	0.67	1.02	0.61	0.61
Sr	0.34	5.86	4.92	1.32	1.36	1.23
Cd	0.04	2.83	2.31	1.39	1.42	1.19
<i>Хвоя второго года жизни</i>						
Зола	2.26	1.54	1.59	0.97	1.04	0.99
Ca	4721	2.81	2.66	1.03	1.04	1.35
K	3083	1.10	1.04	1.07	1.11	0.82
Fe	62.2	1.44	1.25	0.96	1.29	0.99
Mn	44.1	0.07	0.09	0.11	0.45	0.39
Zn	29.6	1.24	1.06	0.79	0.80	0.93
Pb	1.82	1.32	1.14	1.08	0.98	0.94
Cu	1.56	1.10	1.20	1.18	1.22	1.36
Co	1.35	0.82	0.83	1.05	0.91	0.88
Sr	0.88	3.52	3.80	1.23	1.18	1.68
Ni	0.70	1.40	0.54	0.74	0.72	0.66
Cd	0.06	1.97	1.93	1.52	0.98	1.95

**Таблица 27.** Влияние факторов дисперсии значений содержания золы и зольных элементов в хвое деревьев сосны на объекте исследования

Элемент	Фактор дисперсии и доля его влияния*				Ошибка, %
	Расстояние от завода ( $F_{0.05}=3.33$ )		Возраст хвои ( $F_{0.05} = 4.10$ )		
	$F_{\text{факт.}}$	Доля влияния, %	$F_{\text{факт.}}$	Доля влияния, %	
Зола	<b>104.8</b>	91.4	<b>19.8</b>	6.9	1.7
Ca	<b>33.5</b>	70.3	<b>30.3</b>	25.5	4.2
K	<b>5.67</b>	17.3	<b>62.9</b>	76.6	6.1
Fe	<b>8.55</b>	72.5	3.14	10.6	16.9
Zn	<b>8.96</b>	76.4	1.91	6.5	17.1
Mn	<b>38.9</b>	94.6	0.52	0.5	4.9
Cu	1.24	24.9	<b>4.39</b>	35.1	40.0
Pb	<b>3.80</b>	42.0	<b>8.13</b>	35.9	22.1
Sr	<b>40.6</b>	61.3	<b>59.2</b>	35.7	3.0
Co	1.09	32.6	0.65	7.8	59.6
Ni	2.25	48.5	0.97	8.4	43.1
Cd	<b>6.36</b>	44.7	<b>14.7</b>	41.3	14.0

\*Примечание: жирным шрифтом выделены значения, достоверно значимые при  $P > 95\%$ .

Известковое загрязнение среды приводит также к изменению величины соотношений между содержанием в хвое разных элементов, что является отражением изменения протекающих в ней физиологических процессов. Так, доля Ca, как основного загрязняющего элемента, в зольном остатке хвои наиболее велика в непосредственной близости от источника выбросов (табл. 28). Минимальное ее значение отмечается на расстоянии 250-300 м. Сходным образом изменяется также величина отношений Ca : K, K : Mn, Zn : Mn и Zn : Cu. Характер отношений K : Zn, K : Fe и Co : Cd иной: минимум величины показателя отмечается в непосредственной близости от завода, а максимум на расстоянии 200-300 и даже

1100 м от него. Наиболее значительно изменяются отношения K : Mn и Zn : Mn, которые целесообразно использовать при оценке степени воздействия загрязнения на изменение протекания у деревьев процессов обмена веществ.

Деревья сосны обыкновенной для обеспечения жизнедеятельности хвои и всего организма поглощают из окружающей среды химические элементы очень избирательно, о чем весьма убедительно свидетельствуют данные, приведенные в табл. 29. Более всего потребляется ими на образование хвои калия, содержание которого в ней в 50-60 раз выше, чем в индикаторных тканевых повязках на стволах деревьев, хотя общее содержание в них зольных элементов

**Таблица 28.** Изменение соотношения между содержанием зольных элементов в хвое деревьев по градиенту известкового загрязнения

Отношение между элементами	Величина соотношения на разном удалении от источника загрязнения					
	100 м	130 м	190 м	280 м	340 м	1100 м
Однолетняя хвоя						
Ca: зола, %	30.7	23.9	13.7	13.4	17.0	15.5
Ca : K	2.64	1.92	0.72	0.74	0.99	0.85
K : Mn	752	646	460	166	189	100
K : Zn	107	132	151	190	164	150
K : Fe	46.1	54.5	63.1	63.4	63.8	71.6
Zn : Mn	7.04	4.89	3.05	0.88	1.15	0.67
Zn : Cu	13.6	10.3	11.0	6.80	2.73	11.5
Co : Cd	11.5	15.7	24.4	25.3	32.2	38.4
Двухлетняя хвоя						
Ca : зола, %	38.2	35.0	22.1	21.0	28.4	20.9
Ca : K	3.90	3.92	1.47	1.45	2.51	1.53
K : Mn	1080	856	710	173	148	70
K : Zn	92.4	102	141	144	92.0	104
K : Fe	37.9	41.4	55.3	42.4	41.4	49.6
Zn : Mn	11.7	8.40	5.02	1.20	1.60	0.67
Zn : Cu	21.5	16.9	12.7	12.4	13.1	19.0
Co : Cd	9.71	10.1	16.1	21.7	10.5	23.3

**Таблица 29.** Содержание зольных элементов в хвое деревьев в наиболее загрязненной зоне по отношению к содержанию их в древесине, коре и индикаторных повязках из хлопчатобумажной ткани

Элемент	Значения показателя по отношению к разным субстратам					
	индикаторным повязкам		древесине		коре	
	однолетняя	двухлетняя	однолетняя	двухлетняя	однолетняя	двухлетняя
Зола	0.74	0.79	10.27	11.03	0.76	0.81
K	62.8	52.6	14.88	12.46	14.33	11.99
Zn	8.71	8.88	5.30	5.40	4.30	4.39
Ni	2.42	2.00	6.45	5.32	3.48	2.87
Co	1.93	1.75	6.86	6.21	1.72	1.55
Cu	1.89	1.20	2.48	1.58	1.08	0.69
Pb	1.54	1.67	3.92	4.25	1.69	1.84
Mn	0.68	0.41	0.47	0.29	0.55	0.33
Cd	0.48	0.59	0.51	0.63	0.41	0.50
Fe	0.43	0.46	9.22	9.75	0.82	0.87
Ca	0.35	0.49	6.25	8.94	0.60	0.86
Sr	0.10	0.18	0.58	1.01	0.07	0.12

больше. В хвое, по отношению к древесине и коре деревьев, содержание калия

тоже гораздо выше. На образование хвои растения из окружающей среды погло-

щают также много Zn, Ni, Co, Cu и, как это ни странно, Pb. Концентрация в хвое остальных зольных элементов гораздо ниже, чем в окружающей среде, но по отношению к древесине содержание в ней Fe и Ca ниже.

Зольный состав хвои сосны обыкновенной зависит, таким образом, от ее собственного возраста и индивидуальных особенностей дерева, а также густоты древостоев, условий их произрастания и загрязнения окружающей среды продуктами техногенной деятельности человека. Все эти факторы необходимо принимать во внимание при отборе в насаждениях наиболее ценных в селекционном отношении особей по особенностям протекания у них обменных процессов и отзывчивости на минеральное питание.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных источников и собранного эмпирического материала свидетельствует о том, что элементный состав древесины, коры и хвои сосны обыкновенной является важной эколого-физиологической характеристикой деревьев и ценопопуляций, отражающей особенности протекания у них процесса обмена веществ и степени приспособленности к условиям среды.

Зольные элементы, содержащиеся в древесине, коре и хвое сосны обыкновенной, произрастающей на территории Марийского Заволжья вне источников техногенного загрязнения среды, выстраиваются в следующий ранговый ряд: Ca > Mg > K >> Mn > Fe >> Zn >> Sr >> Cu > Pb > Co > Cr > Ni >> Cd. В зависимости от индивидуальных особенностей деревьев и условий внешней среды некоторые соседствующие в ряду элементы могут меняться между собой местами. В коре по сравнению с древесиной содержится в 7-8 раз больше Ca и Sr, в 4 раза – Cd, в 2 раза – Fe и Zn, однако ее зольность в 6.4 раза выше. Зольность хвои выше, чем древесины и коры (в 6.7 и 1.45 раза соответственно). В ней, по сравнению с древесиной, значительно выше концентрация K, Mn, Ca и Zn, а по сравнению с корой – Sr, Ni и Pb.

Содержание каждого химического элемента в тканях и органах деревьев сосны изменяется в зависимости от их индивидуальных особенностей и биоценологических условий под влиянием факторов внешней среды в довольно больших, но строго ограниченных пределах. Особенно велика вариация содержания в древесине Ni (CV = 92 %), за которым следуют Mg, Pb, Co и Fe (CV = 83-89 %).

Менее всего изменяется содержание в древесине Са (CV = 38 %) и золы (CV = 26.5 %). В коре наиболее значительно варьирует концентрация Cd и Ni (CV = 172 %), за которыми следуют Sr, Mg и K (CV = 88-111 %). Менее всего изменяется содержание в ней Са, Cu и золы (CV = 55-62 %). В хвое наиболее значительно изменяется содержание Sr, Ni и Co (CV = 85-96 %), менее всего изменяется содержание калия и золы (CV = 18-24 %). Содержание в древесине, коре и хвое сосны обыкновенной золы, Са, Mg, Zn, K и Mn, а также величина отношений K : Mn и Zn : Mn хорошо отражает особенности протекания у деревьев обменных процессов, в связи с чем эти показатели можно использовать при селекционном отборе хозяйственно-ценных фенотипов в дополнение к другим феноти-

пическим признакам. Для целей биомониторинга зольный состав тканей деревьев, особенно древесины, не подходит, поскольку во многом зависит от внутриценотических факторов, а не техногенного загрязнения.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В. И. Таланцеву и С. М. Швецову за проведение анализа химического состава образцов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-16-00220 <https://rscf.ru/project/23-16-00220/> с использованием оборудования ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абдуллина Д. С., Петрова И. В. Дифференциация популяций сосны обыкновенной по фенотипическим признакам на северо-восточном пределе ареала // Аграрный вестник Урала. 2012. № 9. С. 34–36.

Авессаломова И. А. Биогеохимия ландшафтов. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 162 с.

Адаменко В. Н., Журавлева Е. Л., Четвериков А. Ф. Химический состав годовых колец деревьев и состояние природной среды // Доклады АН СССР. 1982. Т. 265. № 2. С. 507–512.

Алексеев В. А. Основные факторы накопления химических элементов организмами // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 8.

- Алексеев В. А.* Экологическая геохимия. М.: Логос, 2000. 626 с.
- Архангельская Т. А.* Радиографическое исследование срезов деревьев для ретроспективной оценки радиоэкологической ситуации // Радиоктивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы II Международной конференции (Томск, 18–22 октября, 2004 г.). Томск: Тандем-Арт, 2004. С. 55–59.
- Арчегова И. Б., Кузнецова Е. Г.* Влияние древесных растений на химический состав атмосферных осадков в процессе восстановления среднетаежных лесов // Лесоведение. 2011. № 3. С. 34–43.
- Базилевич Н. И., Титлянова А. А.* Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 381 с.
- Баргальи Р.* Биогеохимия наземных растений. М.: ГЕОС, 2005. 454 с.
- Божок А. А.* Внутривидовая изменчивость сосны обыкновенной в различных экологических условиях Львовской области: Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Рига, 1979. 16 с.
- Бузынный М. Г., Демчук В. В., Лось И. П., Несветайло В. Д.* Особенности распределения  $^{90}\text{Sr}$  в древесине // Радиоктивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы II Международной конференции (Томск, 22–24 мая 1996 г.). Томск: Изд-во ТПУ, 1996. С. 403–407.
- Бутузова О. В.* О содержании зольных элементов в различных частях деревьев сосны и ели // Ботанический журн. 1964. Т. 49. С. 7–12.
- Бюсген М.* Строение и жизнь наших лесных деревьев. М.-Л.: Гослесбумиздат, 1961. 424 с.
- Вараксина Т. Н., Холькин Ю. И., Баженов В. А.* О зависимости химического состава древесины от условий произрастания // ИВУЗ: Лесн. журн. 1967. № 2. С. 137–139.
- Веретенников А. В.* Физиология растений с основами биохимии. Воронеж: ВГУ, 1987. 256 с.
- Вернадский В. И.* Живое вещество и биосфера / Отв. ред. А.Л. Яншин. М.: Наука, 1994. 671 с.
- Виноградов А. П.* Избранные труды. Химический элементарный состав организмов моря. М.: Наука, 2001. 619 с.

- Винокурова Р. И.* Закономерности накопления и распределения химических элементов в фитомассе елово-пихтовых насаждений зоны смешанных лесов Среднего Поволжья: дисс. ... д.б.н.: 03.00.32. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 277 с.
- Винокурова Р. И., Андриянова О. В., Латыпова В. З.* Параметры биологического круговорота химических элементов в средневозрастных елово-пихтовых насаждениях Республики Марий Эл // Экологические основы рационального лесопользования в Среднем Поволжье: Материалы научно-практ. конф. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. С. 188–193.
- Винокурова Р. И., Осипова В. Ю., Латыпова В. З.* Содержание микроэлементов в структурных частях хвойных деревьев // Экологические проблемы и пути их решения в зоне Среднего Поволжья: Материалы Всерос. науч. конф. Саранск, 1999. С. 61–62.
- Воздействие выбросов автотранспорта на природную среду / Под ред. Качаловой О. Л. Рига: Зинатне, 1989. 137 с.
- Второва В. Н., Маркет Б.* Мультиэлементный анализ растений лесных экосистем Восточной Европы // Известия РАН. Серия биологическая 1995. № 4. С. 447–454.
- Гавриков В. Л., Фертников А. И., Шарафутдинов Р. А., Ваганов Е. А.* Изменчивость элементного состава годичных колец хвойных пород // ИВУЗ: Лесной журнал. 2021. № 6. С. 24–37.
- Грибовская И. В., Сулимова О. А., Устюгова Т. Т.* Экологическая изменчивость микроэлементного состава древесины сосны в сравнении с сезонной и индивидуальной // Биофизические методы исследования экосистем. Новосибирск: Наука, 1984. С. 104–114.
- Гринин А. С., Орехов Н. А., Новиков В. Н.* Математическое моделирование в экологии. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 269 с.
- Гришина Л. А.* Биологический круговорот и его роль в почвообразовании. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. 128 с.
- Дейнеко И. П., Дейнеко И. В., Белов Л. П.* Исследование химического состава коры сосны // Химия растительного сырья. 2007. № 1. С. 9–24.
- Демаков Ю. П.* Влияние факторов среды на рост деревьев в сосняках Республики Марий Эл. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. 480 с.

Демаков Ю. П., Винокурова Р. И., Таланцев В. И., Швецов С. М. Изменчивость содержания зольных элементов в древесине, коре и хвое сосны обыкновенной // Лесные экосистемы в условиях изменяющегося климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: материалы международной конференции с элементами научной школы для молодёжи. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010а. С. 32–37. URL: <http://csfm.marstu.net/publications.html> (дата обращения 15.07.2024).

Демаков Ю. П., Сафин М. Г., Винокурова Р. И., Таланцев В. И., Швецов С. М. Хвоя как индикатор состояния сосновых молодняков на олиготрофных болотах // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2010б. № 3. С. 95–107.

Демаков Ю. П., Исаев А. В. Изменение валового содержания химических элементов в ходе эволюции почв лесных биогеоценозов Среднего Поволжья // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Эколо-

гия. Природопользование. 2021а. № 3 (51). С. 79–99.

Демаков Ю. П., Исаев А. В. Элементный состав песчаных почв лесных биогеоценозов Марийского Заволжья // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2021б. № 4 (52). С. 54–69.

Демаков Ю. П., Исаев А. В., Гареев Б. И., Баталин Г. А. Использование рентгенофлуоресцентного анализа для оценки содержания химических элементов в почве лесных биогеоценозов // Научные труды государственного природного заповедника «Большая Кокшага». 2017. Вып. 8. С. 56–75.

Демаков Ю. П., Исаев А. В., Таланцев В. И. Использование тканевых повязок для оценки аэральных поступлений зольных элементов // Научные труды государственного природного заповедника «Большая Кокшага». 2013а. Вып. 6. С. 48–55.

Демаков Ю. П., Исаев А. В., Швецов С. М. Потребление и вынос древесными растениями зольных элементов в пойменном биотопе // Вестник По-

- волжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2013б. № 1 (17). С. 36–49.
- Демаков Ю. П., Майшанова М. И., Гончаров Е. А., Богданов Г. А., Краснобаев Ю. П., Швецов С. М., Чемерис А. Н.* Воздействие завода силикатного кирпича на состояние и структуру соснового биогеоценоза. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2013в. 192 с.
- Демаков Ю. П., Майшанова М. И., Швецов С. М.* Изменение зольного состава хвои, коры и древесины сосны в зоне выбросов завода силикатного кирпича // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2012а. № 1 (13). С. 85–95.
- Демаков Ю. П., Сафин М. Г., Швецов С. М.* Сосняки сфагновые Марийского Полесья: структура, рост и продуктивность. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2012б. 276 с.
- Демаков Ю. П., Швецов С. М.* Содержание зольных элементов в годичных слоях деревьев сосны в приозерных биотопах Национального парка «Марий Чодра» // Эко-потенциал. 2013. № 3-4. С. 127–135.
- Демаков Ю. П., Швецов С. М., Сафин М. Г.* Содержание зольных элементов в торфе верховых болот Марийского Полесья / Болотные экосистемы: фундаментальные аспекты охраны и рационального природопользования. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2012в. С. 156–161.
- Демаков Ю. П., Швецов С. М., Швецов А. М.* Содержание зольных элементов в торфе верховых болот Марийского Полесья // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012г. № 31. С. 125–129.
- Демаков Ю. П., Швецов С. М., Таланцев В. И., Калинин К. К.* Динамика содержания зольных элементов в годичных слоях старовозрастных сосен, произрастающих в пойменных биотопах // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 3. С. 25–35.
- Добровольский В. В.* Основы биогеохимии. М.: Высшая школа, 1998. 413 с.
- Дрейпер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.
- Елпатьевский П. В.* Геохимия миграционных потоков в природных и при-

- родно-техногенных геосистемах. М.: Наука, 1993. 252 с.
- Ермаков А. И., Арасимович В. В., Ярош Н. П.* Методы биогеохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 450 с.
- Ермаков В. В.* Геохимическая экология как следствие системного изучения биосферы // Труды биохимической лаборатории. 1999. Т. 23. С. 152–158.
- Ермаков В. В.* Масса и элементный химический состав живого вещества // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах: материалы III Международной школы-семинара молодых исследователей / под ред. В. А. Боева, А. И. Сысо, В. Ю. Хорошавина. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2018. С. 11–26.
- Ермаков В. В., Тютиков С. Ф.* Геохимическая экология животных. М.: Наука, 2008. 310 с.
- Зайцев Г. Н.* Математический анализ биологических данных. М.: Высшая школа, 1991. 182 с.
- Замятина Ю. Л.* Изучение истории поступления радионуклидов в окружающую среду на основе ф-радиографического анализа годовых колец деревьев: автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2008. 26 с.
- Ильин В. Б.* Тяжелые металлы в системе почва-растения. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
- Ильин В. Б.* Элементный химический состав растений. Новосибирск: Наука, 1985. 129 с.
- Ирошников А. И.* О генотипическом составе популяций сосны обыкновенной в юго-восточной части ее ареала // Селекция хвойных пород Сибири. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1978. С. 76–95.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
- Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С., Иванчиков А. А., Морозова Р. М.* Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.
- Казимиров Н. И., Морозова Р. М.* Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука, 1973. 176 с.
- Каманина И. З., Савватеева О. А.* Воздействие автотранспорта на окружающую среду г. Дубны // Фундамен-

- тальные исследования. 2014. № 7-8. С. 1612–1616.
- Карпачевский Л. О., Зубкова Т. А., Пройслер Т., Кеннел М., Гитл Г., Гончарук Н. Ю., Минаева Т. Ю.* Воздействие полога ельника сложного на химический состав осадков // *Лесоведение*. 1998. № 1. С. 50–59.
- Килюшева Н. В., Феклистов П. А., Ежова Н. В., Болотов И. Н., Филиппов Б. Ю.* Сравнительный анализ содержания минеральных элементов в древесине сосны и ели // *ИВУЗ: Лесной журнал*. 2017. № 5. С. 64–72.
- Ким Дж. О., Мьюллер Ч. У., Клекка У. Р., Енюков И. С.* Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- Кист А. А.* Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. Ташкент: Фан, 1987. 236 с.
- Ковалевский А. Л.* Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука, 1991. 294 с.
- Ковальский В. В.* Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 298 с.
- Кожевникова Н. Д., Второва В. Н.* Биологический круговорот веществ в ельниках Северного Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1988. 346 с.
- Козлов В. А.* Исследование элементарного состава золы сухостойных деревьев сосны методом эмиссионного спектрального анализа // *Физико-химические исследования древесины и ее комплексное использование*. Петрозаводск, 1978. С. 67–79.
- Козубов Г. М.* Внутривидовое разнообразие сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Карелии и на Кольском полуострове: Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Л.: ЛГУ, 1962. 20 с.
- Корбукова И. В.* Особенности химического состава корки и луба *Pinus sylvestris* L.: Автореф. дисс. ... канд. хим. наук. СПб, 1996. 24 с.
- Кретович В. Л.* Биохимия растений. М.: Высшая школа, 1980. 445 с.
- Кузьмин С. И., Феденя В. М., Рудь А. В.* Оценка экологического состояния почв в придорожных полосах автомагистралей (на примере Минской обл.) // *Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых*. Минск: «Издательский центр БГУ», 2007. С. 127–128.
- Курдиани С. З.* Деление *Pinus sylvestris* на расы // *Лесопромышленный вестник*. 1908. № 26. С. 237–240.
- Лакин Г. Ф.* Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.

- Лукина Н. В., Никонов В. В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэро-техногенного загрязнения: В 2 ч. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. Ч. 1. 213 с.; Ч. 2. 192 с.
- Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. 316 с.
- Лукина Н. В., Никонов В. В., Пайттио Х. Химический состав хвои сосны на Кольском полуострове // Лесоведение. 1994. № 6. С. 10–21.
- Мамаев С. А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений: на примере сем. Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1972. 284 с.
- Манаков К. Н., Никонов В. В. Биологический круговорот минеральных элементов и почвообразование в ельниках Крайнего Севера. Л.: Наука, 1981. 196 с.
- Маркет Б., Второва В. Н. Кадастры концентраций химических элементов растений лесных экосистем Восточной Европы // Известия РАН. Серия биологическая. 1995. № 5. С. 545–553.
- Марунич С. В., Буров А. С., Кузнецова Ю. Н., Недогарко И. В. Трансформация химического состава атмосферных осадков пологом древостоя южно-таежных лесов // Известия РАН. Серия географическая. 2006. № 4. С. 52–57.
- Медведев И. Ф., Деревягин С. С., Козаченко М. А., Гусакова Н. Н. Оценка содержания химических элементов в древесине различных пород деревьев // Аграрный научный журнал 2015. № 11. С. 12–14.
- Мейстрик В. Содержание бария, марганца, кобальта, железа и цинка в хвое сосны (*Pinus sylvestris* L.) // Экологическая кооперация. 1988. № 1. С. 66–69.
- Методика выполнения измерений валового содержания меди, кадмия, цинка, свинца, никеля, марганца, кобальта, хрома методом атомно-абсорбционной спектроскопии. М.: ФГУ ФЦАО, 2007. 20 с.
- Мина В. Н. Выщелачивание некоторых веществ атмосферными осадками из древесных растений и его значение в биологическом круговороте // Почвоведение. 1965. № 6. С. 7–17.
- Миркин Б. М., Розенберг Г. С. Толковый словарь современной фитоценологии. М.: Наука, 1983. 134 с.
- Миронова А. С. Химический элементный состав годовых колец сосны обыкновенной

- новенной (*Pinus sylvestris* L.) различных территорий произрастания // Северная Пальмира: Сб. науч. трудов IX Молодежной экологической конференции. СПб.: НИЦЭБ РАН, 2018. С. 78–82.
- Миронова А. С., Рихванов Л. П., Барановская Н. В., Судыко А. Ф.* Годовые кольца сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – индикатор геохимической обстановки и хронологического изменения химического элементного состава окружающей среды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 1. С. 106–116.
- Митрофанов Д. П.* Содержание макро- и микроэлементов в лесных фитоценозах средней тайги Сибири // Исследование биологических ресурсов средней тайги Сибири. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1973. С. 26–38.
- Мишуков Н. П.* Изменчивость сосны обыкновенной в Приобских борах Новосибирской области и ее значение для лесного семеноводства: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Свердловск, 1966. 26 с.
- Никитин М. А.* Происхождение жизни. М.: Альпина нон-фикшн, 2016. 542 с.
- Никонов В. В., Лукина Н. В.* Влияние ели и сосны на кислотность и состав атмосферных выпадений в северо-таежных лесах индустриально-развитого района // Экология. 2000. № 2. С. 97–105.
- Никонов В. В., Лукина Н. В., Базель В. С. и др.* Рассеянные элементы в бореальных лесах М.: Наука, 2004. 616 с.
- Перельман А. И.* Геохимия ландшафта. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1975. 340 с.
- Перельман А. И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 526 с.
- Перельман А. И., Касимов Н. С.* Геохимия ландшафта. М: Астрейя-2000, 1999. 768 с.
- Петрунина Н. С., Гаранина Н. С.* Внутривидовая изменчивость растений в экстремальных геохимических условиях // Экология популяций. Структура и динамика. М.: РАСХН, 1995. Т. 2. С. 884–893.
- Правдин Л. Ф.* Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 192 с.
- Пристова Т. А.* Влияние древесного полога лиственно-хвойного насаждения

- на химический состав осадков // Лесоведение. 2005. № 5. С. 49–55.
- Пристова Т. А., Федорков А. Л.* Элементный состав *Pinus contorta* Dougl. и *Pinus sylvestris* L. в экспериментальных культурах Сыктывкарского лесничества Республики Коми // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 245. С. 55–70.
- Пугачев А. А.* Биологический круговорот и почвообразование в ландшафтах Крайнего Северо-Востока России. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2009. 116 с.
- Ремезов Н. П., Быкова Л. Н., Смирнова К. М.* Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах европейской части СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1959. 284 с.
- Рихванов Л. П., Архангельская Т. А., Замятина Ю. Л.* Дендрорадиография как метод ретроспективной оценки радиоэкологической ситуации. Томск: Дельтаплан, 2015. 148 с.
- Рихванов Л. П., Архангельская Т. А., Несветайло В. Д.* Изучение уровня и динамики накопления делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев // Геохимия. 2002. № 11. С. 1238–1245.
- Робакидзе Е. А., Бобкова К. С., Наймушина С. И.* Элементный состав доминирующих видов растений в средне-таежных сосняках разного возраста (на примере Республики Коми) // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56. Вып. 1. С. 53–65.
- Робакидзе Е. А., Гормонова Н. В., Бобкова К. С.* Химический состав жидких атмосферных осадков в старовозрастных ельниках средней тайги // Геохимия. 2013. № 1. С. 72–78.
- Рогозин М. В., Голиков А. М., Жекин А. В., Комаров С. С., Жекина Н. В.* Селекция ели финской (*Picea x fennica* (Regel) Kom.): диссимметрия и хемомаркеры. Пермь: Пермский гос. нац. исследовательский ун-т, 2017. 121 с.
- Рогозин М. В., Жекина Н. В.* Устойчивый рост потомства ели финской и химический состав хвои // Успехи современного естествознания. 2016. № 5. С. 79–84.
- Рогозин М. В., Жекина Н. В., Комаров С. С., Кувшинская Л. В.* Химические элементы хвои в потомстве культур и естественных популяций ели финской // Вестник Пермского университета. Сер.: Биология. 2014. № 3. С. 44–50.

- Родин Л. Е., Базилевич Н. И.* Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.; Л.: Наука, 1965. 253 с.
- Романкевич Е. А.* Живое вещество Земли (биогеохимические аспекты проблемы) // Геохимия. 1988. № 2. С. 292–306.
- Романовский М. Г.* Полиморфизм древесных растений по количественным признакам. М.: Наука, 1994. 96 с.
- Романовский М. Г., Щекалев Р. В.* Система вида у древесных растений. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 212 с.
- Свиридова И. К.* Результаты изучения вымывания азота и зольных элементов дождевыми осадками из крон древесных пород // Доклады АН СССР. 1960. Т. 133. № 3. С. 706–708.
- Сибиркина А. Р.* Содержание кадмия в органах сосны обыкновенной ленточных боров Прииртышья Республики Казахстан // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2013. № 2. С. 130–137.
- Соколов А. А.* Химический состав атмосферных осадков, прошедших сквозь полог елового и березового древостоя // Лесоведение. 1972. № 3. С. 103–106.
- Сухарева Т. А., Лукина Н. В.* Химический состав и морфометрические характеристики хвои ели сибирской на Кольском полуострове в процессе деградиционной сукцессии лесов // Лесоведение. 2004. № 2. С. 36–43.
- Сысуев В. В.* О механизме изменения химического состава атмосферных вод под пологом леса // Вестник МГУ. Сер. География. 1975. № 5. С. 107–110.
- Тараканов В. В., Милютин Л. И., Куценогий К. П., Ковальская Г. А., Игнатьев Л. А., Самсонова А. Е.* Элементный состав хвои в разных клонах сосны обыкновенной // Лесоведение. 2007. № 1. С. 28–35.
- Тараканов В. В., Чанкина О. В., Куценогий К. П., Наумова Н. Б., Макарикова Р. П., Милютин Л. И., Rogovcev P. V., Ефимов В. М.* Влияние географических популяций сосны на элементный состав фитомассы и почв // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 11. С. 72–78.
- Тарханов С. Н., Бирюков С. Ю.* Формовое разнообразие *Pinus sylvestris*

- (Pinaceae) в бассейне Северной Двины // Растительные ресурсы. 2013. Вып. 4. С. 481–489.
- Тарханов С. Н., Коровин В. В., Щёкалев Р. В.* Формовое разнообразие хвойных на европейском севере России // Лесной Вестник. 2006. № 5. С. 89–95.
- Титлянова А. А.* Универсальность процессов биотического круговорота // Почвоведение. 2014. № 7. С. 771–780.
- Усольцев В. А.* Лесные арабески, или Этюды из жизни наших деревьев. Екатеринбург: Уральский гос. лесотехнич. ун-т, 2014. 161 с.
- Усольцев В. А.* Этюды о наших лесных деревьях. Екатеринбург: Банк культурной информации, 2008. 188 с.
- Ушакова Г. И.* Биогеохимическая миграция элементов и почвообразование в лесах Кольского полуострова. Апатиты: Карел. науч. центр РАН, 1997. 150 с.
- Фокин А. Д.* Роль растений в перераспределении веществ по почвенному профилю // Почвоведение. 1999. № 1. С. 109–116.
- Хантемиров Р. М.* Биоиндикация загрязнения среды в прошлом на основе анализа содержания химических элементов в годичных слоях древесины / Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1996. Т. 16. С. 153–164.
- Хантемиров Р. М.* Содержание химических элементов в годичных слоях древесины сосны обыкновенной и возможности его использования в ретроспективной биоиндикации техногенных загрязнений: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук, Свердловск, 1991. 25 с.
- Хвостов И. В., Ковальская Г. А., Павлов В. Е.* Элементный состав годовых колец сосны обыкновенной из районов Чернобыля и Подкаменной Тунгуски // Химия растительного сырья. 2011. № 2. С. 153–158.
- Хох А. Н.* Изменчивость элементного состава древесины сосны обыкновенной в зависимости от места произрастания // Вопросы экологии. Наука, образование, практика. Волгоград: ВГАПО, 2018. С. 175–177.
- Хох А. Н., Звягинцев В. Б.* Особенности элементного состава древесины сосны обыкновенной // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22. Вып. 1. С. 47–56.

- Хох А. Н., Позняк С. С. Динамика накопления микроэлементов в древесине сосны обыкновенной в зависимости от условий местопроизрастания и фазы вегетации // Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века. Минск: Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, 2019. С. 204–207.
- Храмченкова О. М., Дроздов Д. Н., Новиков Р. И., Савченко А. М. Высотное распределение зольности и элементного состава корки сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Вестник Полесского государственного университета. Сер. биол. наук. 2016. № 2. С. 34–38.
- Четверигов А. Ф. Химический состав годичных слоев прироста деревьев и условия природной среды // Дендрохронология и дендроклиматология. Новосибирск: Наука, 1986. С. 126–130.
- Шульга В. В. Внутривидовая изменчивость сосны обыкновенной на юге ее ареала (в Казахстане) // Леса и древесные породы Северного Казахстана. Л.: Наука, 1974. С. 66–71.
- Щеглов А. И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М.: Наука, 1999. 268 с.
- Эколого-физиологические основы продуктивности сосновых лесов европейского Северо-Востока / Под ред. К.С. Бобковой. Сыктывкар: КомиНЦ УрО РАН, 1993. 176 с.
- Baes C. F., McLaughlin S. B. Trace elements in tree rings: evidence of recent and historical air pollution // Science. 1984. Vol. 224. No 4648. P. 494–497.
- Bindler R., Renberg I., Klaminder J., Emteryd O. Tree rings as Pb pollution archives? A comparison of 206Pb/207Pb isotope ratios in pine and other environmental media // Science of the Total Environment. 2004. Vol. 319. No 1-3. P. 173–183.
- Bondiatti E. A., Baes III C. F., McLaughlin S. B. Radial trends in cation ratios in tree rings as indicators of the impact of atmospheric deposition on forests // Canadian Journal of Forest Research. 1989. Vol. 19 (5). P. 586–594.
- Bowen H. J. M. Trace Elements in Biogeochemistry. N.Y.; L.: Acad. Press, 1966. 241 p.
- Forrest W. G., Ovington J. D. Variations in dry weight and mineral nutrient content

- of *Pinus radiata* progeny // *Silvae genet.* 1971. Vol. 20. P. 174–179.
- Goddard R. E., Zobel B. J., Hollis C. A.* Response of *Pinus taeda* and *Pinus elliotti* to varied nutrition // *Tree Physiology and Yield Improvement*. N.Y.: Akad. Press, 1976. P. 449–462.
- Hall G. S., Yamaguchi D. K., Rettberg T. M.* Multielemental analyses of tree rings by inductively coupled plasma mass spectrometry // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1990. Vol. 146. P. 255–265.
- Kleinsmit J.* Foliar concentration of ten mineral nutrients in nine *Pinus radiata* clones during 15-month period // *New Zealand Journal of Forestry Science*. 1978. Vol. 8. P. 351–368.
- Leyton L., Armson K. A.* Mineral composition of the foliage in relation to the growth of Scots pine // *Forest Science*. 1955. Vol. 1. No 3. P. 210–218.
- Markert B., Fränzle S., Wünschmann S.* *Chemical Evolution: The Biological System of the Elements*. Springer International Publishing, Switzerland, 2015. 295 p.
- McClenahan J. R., Vimmerstedt J. P., Scherzer A. J.* Elemental concentrations in tree rings by PIXE: statistical variability, mobility, and effects of altered soil chemistry // *Canadian Journal of Forest Research*. 1989. Vol. 19. No 7. P. 880–888.
- Padilla K. L., Anderson K. A.* Trace Element concentration in tree-rings biomonitoring centuries of environmental change // *Chemosphere*. 2002. Vol. 49. No 6. P. 575–585.

#### REFERENCES

- Abdullina D. S., Petrova I. V.*, Differenciacija populjacija sosny obyknovennoj po fenotipicheskim priznakam na severo-vostochnom predele areala (Phenotypic differentiation of the Scots pine populations on the northern-eastern boundary of the habitat), *Agrarnyj vestnik Urala*, 2012, No 9, pp. 34–36.
- Avessalomova I. A.*, *Biogeochemiya landscapev* (Biogeochemistry of landscapes), Moscow: MGU, 2007. 162 p.
- Adamenko V. N., Zhuravleva E. L., Chetverikov A. F., Himicheskij sostav godichnyh kolec derev'ev i sostojanie prirodnoj sredy* (Chemical composition of tree annual rings and the state of the natural environment), *Doklady AN SSSR*, 1982, Vol. 265, No 2. pp. 507–512.
- Alekseenko V. A.*, *Jekologicheskaja geohimija* (Environmental geochemistry), M.: Logos, 2000, 626 p.

- Alekseenko V. A., Osnovnye faktory nakoplenija himicheskikh jelementov organizmami (Main factors of chemical element accumulation by organisms), *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurn*, 2001, No 8, pp. 20–24.
- Archeгова I. B., Kuznecova E. G., Vlijanie drevesnyh rastenij na himicheskij sostav at-mosfernyh osadkov v processe vosstanovlenija srednetaezhnyh lesov (The influence of ligneous plants on the chemical composition of precipitation in the regeneration process of the Middle-Taiga forests), *Lesovedenie*, 2011, No 3. pp. 34–43.
- Baes C. F., McLaughlin S. B., Trace Elements in Tree Rings: Evidence of Recent and Historical Air Pollution, *Science*, 1984, Vol. 224, No 4648, pp. 494–497.
- Bargal'i R., *Biogeochemiya nazemny'x rastenij* (Biogeochemistry of terrestrial plants), Moscow: GEOS, 2005, 454 p.
- Bazilevich N. I., Titljanova A. A., *Bioticheskij krugovorot na pjati kontinentah: azot i zol'nye jelementy v prirodnyh nazemnyh jekosistemah* (The biotical cycle on five continents: nitrogen and ash elements in the natural terrestrial ecosystem), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008, 381 p.
- Bindler R., Renberg I., Klaminder J., Emteryd O., Tree Rings as Pb Pollution Archives? A Comparison of 206Pb/207Pb Isotope Ratios in Pine and Other Environmental Media, *Science of The Total Environment*, 2004, Vol. 319, No 1-3, pp. 173–183.
- Bjusgen M., *Stroenie i zhizn' nashih lesnyh derev'ev* (The structure and life of our forest trees), M.-L.: Goslesbumizdat, 1961, 424 p.
- Bondietti E. A., Baes III C. F., McLaughlin S. B., Radial Trends in Cation Ratios in Tree Rings as Indicators of the Impact of Atmospheric Deposition on Forests, *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, Vol. 19 (5), pp. 586–594.
- Bowen H. J. M., *Trace elements in biogeochemistry*, N.Y.; L.: Acad. press, 1966, 241 p.
- Bozhok A. A., *Vnutrividovaja izmenchivost' sosny obyknovennoj v razlichnyh jekologicheskikh uslovijah L'vovskoj oblasti. Avtoref. diss. kand. s.-h. nauk* (The intra-species variability of Scots pine in the different environmental conditions of the Lvov Region. Abstract of candidate's thesis), Riga, 1979, 16 p.
- Butuzova O. V., O sodержanii zol'nyh jelementov v razlichnyh chastjah derev'ev sosny i eli (The content of ash elements

- in the different parts of pine and spruce trees. The structure and life of our forest trees), *Botanicheskij zhurn*, 1964, Vol. 49, pp. 7–12.
- Buzy`nnyj M. G., Demchuk V. V., Los` I. P., Nesvetajlo V. D., Osobennosti raspredeleniya  $^{90}\text{Sr}$  v drevesine (Features of the distribution of  $^{90}\text{Sr}$  in wood), *Radioaktivnost` i radioaktivny`e e`lementy` v srede obitaniya che-loveka: materialy` II Mezhdunarodnoj konferencii, Tomsk, 22–24 maya 1996*, Tomsk: Izdvo TPU, 1996, pp. 403–407.
- Chetverikov A. F., Himicheskij sostav godichnyh sloev prirosta derev'ev i uslovija prirodnoj sredy (The chemical composition of annual layers in the tree increment and the natural environment), [in:] *Dendrochronologija i dendroklimatologija*, Novosibirsk: Nauka, 1986, pp. 126–130.
- Dejneko I. P., Dejneko I. V., Belov L. P., Issledovanie himicheskogo sostava kory sosny (Study of the chemical composition of pine bark), *Himija rastitel'nogo syr'ja*, 2007, No 1, pp. 19–24.
- Demakov Ju. P., *Vlijanie faktorov sredy na rost derev'ev v sosnjakah Respubliki Marij El* (The impact of the environmental factors on a tree growth in the pine stands of the Republic of Mari El), Joshkar-Ola: Povolzhskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet, 2023, 480 p.
- Demakov Ju. P., Isaev A. V., *Izmenenie valovogo sodержaniya himicheskikh jelementov v hode jevoljucii pochv lesnyh biogeocenzov Srednego Povolzh'ja* (Changes in the total content of chemical elements in soil evolution of the forest biogeocenoses in the Middle Volga region), *Vestnik Povolzhskogo gos-udarstvennogo tehnologicheskogo universiteta, Serija Lesnaya jekologija. Prirodopol'zovanie*, 2021, No 3 (51), pp. 79–99.
- Demakov Ju. P., Isaev A. V., *Jelementnyj sostav peschanyh pochv lesnyh biogeocenzov Marijskogo Zavolzh'ja* (The elemental composition of the sandy soils in the forest biogeocenoses in the Mari trans-Volga region), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta, Serija Lesnaya jekologija. Prirodopol'zovanie*, 2021, No 4 (52), pp. 54–69.
- Demakov Ju. P., Isaev A. V., Gareev B. I., Batalin G. A., *Ispol'zovanie rentgeno-fluorescentnogo analiza dlja ocenki sodержaniya himicheskikh jelementov v pochve lesnyh biogeocenzov* (Assessing chemical elements in soil of

forest biogeocenoses can be achieved through the use of X-ray fluorescence analysis), *Nauchny'e trudy` gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Bol'shaja Kokshaga»*, 2017, No 8, 2017, pp. 56–75.

Demakov Ju. P., Isaev A. V., Shvecov S. M., Potreblenie i vynos drevesnymi rastenija-mi zol'nyh jelementov v pojmennom biotope (The consumption and extraction of ash elements by ligneous plants in the bottom-land biotope), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta, Serija Lesnaya jekologija. Prirodopol'zovanie*, 2013, No 1 (17), pp. 36–49.

Demakov Ju. P., Isaev A. V., Talancev V. I., Ispol'zovanie tkanevyh povjazok dlja ocen-ki ajeral'nyh postuplenij zol'nyh jelementov (The use of textile bandages for assessment of the aerial intake of ash elements), *Nauchny'e trudy` gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Bol'shaja Kokshaga»*, 2013, No 6, pp. 48–55.

Demakov Ju. P., Majshanova M. I., Goncharov E. A., Bogdanov G. A., Krasnobaev Ju. P., Shvecov S. M., Chemeris A. N., Vozdejstvie zavoda silikatnogo kirpicha na sostojanie i strukturu sosno-

vogo biogeocenoza (The impact of vehicle emissions on the natural environment (The impact of the sand-lime brick factory on the state and structure of the pine biogeocenose), Joshkar-Ola: PGTU, 2013, 192 p.

Demakov Ju. P., Majshanova M. I., Shvecov S. M., Izmenenie zol'nogo sostava hvoi, ko-ry i drevesiny sosny v zone vybrosov zavoda silikatnogo kirpicha (Changes in the ash composition of the pine needles, bark and wood in the area affected by the emissions from a sand-lime brick factory), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta, Serija Lesnaya jekologija. Prirodopol'zovanie*, 2012, No 1 (13), pp. 85–95.

Demakov Ju. P., Safin M. G., Shvecov S. M., *Sosnjaki sfagnovyje Marijskogo Poles'ja: struktura, rost i produktivnost'* (Sphagnum pine forests of Mari Polesie: structure, growth and productivity), Joshkar-Ola: PGTU, 2012, 276 p.

Demakov Ju. P., Safin M. G., Vinokurova R. I., Talancev V. I., Shvecov S. M., Hvoja kak indikator sostojanija osnovnyh molodnjakov na oligotrofnyh bolotah (Needles as an indicator of the young pine forest condition in the oligo-

- trophic moors), *Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, Serija Lesnaya jekologija. Prirodopol'zovanie*, 2010, No 3, pp. 95–107.
- Demakov Ju. P., Shvecov S. M., Soderzhanie zol'nyh jelementov v godichnyh slojah dere-v'ev sosny v priozernyh biotopah Nacional'nogo parka «Marij Chodra» (The ash elements content in annual layers of pine trees in lakeside biotopes of the «Mari Chodra» National Park), *Jeko-potencial*, 2013, No 3–4, pp. 127–135.
- Demakov Ju. P., Shvecov S. M., Safin M. G., Soderzhanie zol'nyh jelementov v torfe verhovyh bolot Marijskogo Poles'ja (The ash element contents in the high-moor peats of Mari Polesye), [in:] *Bolotnye jekosistemy: fundamental'nye aspekty ohrany i racional'nogo prirodopol'zovanija*, Joshkar-Ola: PGTU, 2012, pp. 156–161.
- Demakov Ju. P., Shvecov S. M., Shvecov A. M., Soderzhanie zol'nyh jelementov v torfe verhovyh bolot Marijskogo Poles'ja (The ash element contents in the high-moor peats of Mari Polesye), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2012, No 31, pp. 125–129.
- Demakov Ju. P., Shvecov S. M., Talancev V. I., Kalinin K. K., Dinamika sodержanija zol'nyh jelementov v godichnyh slojah starovozrastnyh sosen, proizrastajushhij v pojmyennyh biotopah (Dynamics of the ash element contents in the annual layers of old-aged pines growing in the bottom-land biotopes), *Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, Serija Lesnaya Jekologija. Prirodopol'zovanie*, 2011, No 3, pp. 25–35.
- Demakov Ju. P., Vinokurova R. I., Talancev V. I., Shvecov S. M., Izmenchivost' sodержanija zol'nyh jelementov v drevesine, kore i hvoe sosny obyknovennoj (Variability of the ash element contents in the Scots pine wood, bark and needles), *Lesnye jekosistemy v usloviyah izmenjajushhegosja klimata: biologičeskaja produktivnost', monitoring i adaptacionnye tehnologii: Proc. International Conference s jelementami nauch-noj shkoly dlja molodjozhi*, Joshkar-Ola: MarGTU, 2010, pp. 32–37.
- Dobrovol'skij V. V., *Osnovy biogeohimii* (Basics of biogeochemistry), M.: Vysshaja shkola, 1998, 413 p.
- Drejper N., Smit G., *Prikladnoj regressionnyj analiz* (Applied regression analysis), M.: Statistika, 1973, 392 p.
- Elpat'evskij P. V., *Geohimija migracionnyh potokov v prirodnyh i prirodno-tehno-*

- gennyh geosistemah* (Geochemistry of migration flows in natural and natural-technogenic geosystems), Moscow: Nauka, 1993, 252 p.
- Ermakov A. I., Arasimovich V. V., Yarosh N. P., *Metody biogehimicheskogo issledovaniya rastenij* (Methods of biogeochemical research of plants), Leningrad: Agropromizdat, 1987, 450 p.
- Ermakov V. V., *Geohimicheskaja jekologija kak sledstvie sistemnogo izuchenija biosfery* (Geochemical ecology as a consequence of the systematic study of the biosphere), *Tr. biohimicheskoy laboratorii*, 1999, Vol. 23, pp. 152–158.
- Ermakov V. V., *Massa i jelementnyj himicheskij sostav zhivogo veshhestva* (Mass and elemental chemical composition of living substance), *Biogehimija himicheskikh jelementov i soedinenij v prirodnyh sredah: Materialy 3-rd International Seminar molodyh issledovatelej*, Tyumen': Izdatel'stvo Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2018, pp. 11–26.
- Ermakov V. V., Tjutikov S. F., *Geohimicheskaja jekologija zhivotnyh* (Animals and their geochemical ecology), Moscow: Nauka, 2008, 310 p.
- Fokin A. D., *Rol' rastenij v pereraspredelenii veshhestv po pochvennomu profilju* (Forest arabesques, or Essays on the life of our trees), *Pochvovedenie*, 1999, No 1, pp. 109–116.
- Forrest W. G., Ovington J. D., *Variations in dry weight and mineral nutrient content of Pinus radiata progeny*, *Silvae genetica*, 1971, Vol. 20, pp. 174–179.
- Gavrikov V. L., Fertikov A. I., Sharafutdinov R. A., Vaganov E. A., *Izmenchivost' jelementnogo sostava godichnyh kolec hvojnyh porod IVUZ* (The element composition of annual conifer rings varies), *Lesnoj zhurnal*, 2021, No 6, pp. 24–37.
- Goddard R. E., Zobel B. J., Hollis C. A., *Response of Pinus taeda and Pinus ellioti to varied nutrition*, [in:] *Tree physiology and yield improvement*, N.Y.: Akad. Press, 1976, pp. 449–462.
- Gribovskaja I. V., Sulimova O. A., Ustjugova T. T., *Jekologicheskaja izmenchivost' mikrojelementnogo sostava drevesiny sosny v sravnenii s sezonnoj i individual'noj*, *Biofizicheskie metody issledovaniya jekosistem* (Variability of the microelement composition of pine wood: ecological vs. seasonal or individual), Novosibirsk: Nauka, 1984, pp. 104–114.

- Grinin A. S., Orehov N. A., Novikov V. N., *Matematicheskoe modelirovanie v jekologii* (Mathematical modeling in the ecology), Moscow: JuNITI-DANA, 2003, 269 p.
- Grishina L. A., *Biologicheskij krugovorot i ego rol' v pochvoobrazovanii* (Biological cycle and its function in soil formation), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1974, 128 p.
- Hall G. S., Yamaguchi D. K., Rettberg T. M., Multielemental Analyses of Tree Rings by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1990, Vol. 146, pp. 255–265.
- Hantemirov R. M., Bioindikacija zagraznenija sredy v proshlom na osnove analiza sodержaniya himicheskikh jelementov v godichnyh slojah drevesiny (Biogeochemical migration of elements and soil formation in the forests of the Kola Peninsula), [in:] *Problemy jekologicheskogo monitoringa i modelirovanija jekosistem*, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1996, Vol. 16, pp. 153–164.
- Hantemirov R. M., *Soderzhanie himicheskikh jelementov v godichnyh slojah drevesiny sosny obyknovennoj i vozmozhnosti ego ispol'zovanija v retrospektivnoj bioindikacii tehnogennyh zagraznenij. Aftoreferat diss. cand. nauk* (The chemical element contents in the annual layers of Scots pine wood and the possibilities to use the content data for retrospective bioindication of technogenic pollution. Abstract of candidate's thesis), Sverdlovsk, 1991, 25 p.
- Hoh A. N., *Izmenchivost' jelementnogo sostava drevesiny sosny obyknovennoj v zavisimosti ot mesta proizrastania* (Variability of the elemental composition of Scots pine wood due to a habitat), [in:] *Voprosy jekologii. Nauka, obrazovanie, praktika*, Volgograd: VGAPO, 2018, pp. 175–177.
- Hoh A. N., Poznjak S. S., *Dinamika nakoplenija mikrojelementov v drevesine sosny obyknovennoj v zavisimosti ot uslovij mestoproizrastanija i fazy vegetacii*, (Dynamics of microelement accumulation in Scots pine wood due to the habitat environment and vegetation phases), [in:] *Saharovskie chtenii 2019 goda: jekologicheskie problemy XXI veka*, Minsk: Mezhdunarodnyj gosudarstvennyj jekologicheskij institut im. A. D. Saharova, 2019, pp. 204–207.
- Hoh A. N., Zvjagincev V. B., *Osobennosti jelementnogo sostava drevesiny sosny*

- obykno-vennoj (Specifics of the elemental composition of Scots pine wood), *Izvestija Saratovskogo universiteta. Novaja serija. Serija: Himija. Biologija. Jekologija*, 2022, Vol. 22, No 1, pp. 47–56.
- Hramchenkova O. M., Drozdov D. N., Novikov R. I., Savchenko A. M., Vysotnoe raspredelenie zol'nosti i jelementnogo sostava korki sosny obyknovennoj *Pinus sylvestris* L. (Altitude distribution of the ash content and elemental composition of Scots pine bark), *Vestnik Polesskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya biologicheskie nauki*, 2016, No 2, pp. 34–38.
- Hvostov I. V., Koval'skaja G. A., Pavlov V. E., Jelementnyj sostav godovyh kolec sosny obyknovennoj iz rajonov Chernobylja i Podkamennoj Tunguski (The elemental composition of annual rings of Scots pines from the Chernobyl and Stony Tunguska districts), *Himija rastitel'nogo syr'ja*, 2011, No 2, pp. 153–158.
- Il'in V. B., *Jelementnyj himicheskij sostav rastenij* (Plants chemical composition is essential), Novosibirsk: Nauka, 1985, 129 p.
- Il'in V. B., *Tjzhelye metally v sisteme pochva-rastenija* (The soil-plant system contains heavy metals), Novosibirsk: Nauka, 1991, 151 p.
- Iroshnikov A. I., O genotipicheskom sostave populacij sosny obyknovennoj v jugovostochnoj chasti ee areala (The genetic composition of Scots pine populations in the southern portion of its range is being investigated), [in:] *Selekcija hvojnyh porod Sibiri*, Krasnojarsk: ILiD SO AN SSSR, 1978, pp. 76–95.
- Jekologo-fiziologicheskie osnovy produktivnosti sosnyh lesov evropejskogo Severo-Vostoka* (Ecological and physiological bases of productivity of pine forests of the European North-East) / Pod red. K. S. Bobkovej, Syktyvkar: Komi filial UNC RAN, 1993, 174 p.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., *Mikrojelementy v pochvah i rastenijah* (Identify elements present in both soils and plants), M.: Mir, 1989, 439 p.
- Kamanina I. Z., Savvateeva O. A., Vozdejstvie avtotransporta na okruzhajushhuju sredu g. Dubny (The impact of Dubny's environment is due to road transport), *Fundamental'nye issledovanija*, 2014, No 7–8, pp. 1612–1616.
- Karpachevskij L. O., Zubkova T. A., Projsler T., Kennel M., Gitl G., Goncharuk N. Yu., Minaeva T. Yu., Vozdejstvie pologa

- el'nika slozhnogo na himicheskij sostav osadkov (The impact of the canopy of a composite spruce forest on the chemical composition of precipitation), *Lesovedenie*, 1998, No 1, pp. 50–59.
- Kazimirov N. I., Morozova R. M., *Biologicheskij krugovorot veshhestv v el'nikah Karelii* (Cadastrs of chemical element concentrations in the plants of the Karelian), Leningrad: Nauka, 1973, 176 p.
- Kazimirov N. I., Volkov A. D., Zjabchenko S. S., Ivanchikov A. A., Morozova R. M., *Obmen veshhestv i jenergii v sosnovyh lesah Evropejskogo Severa* (The exchange of substances and energy in the pine stands of the European North), Leningrad: Nauka, 1977, 304 p.
- Kiljusheva N. V., Feklistov P. A., Ezhova N. V., Bolotov I. N., Filippov B. Ju., Sravnitel'nyj analiz sodержaniya mineral'nyh jelementov v drevesine sosny i eli (A comparative study of the mineral element contents in pine and spruce wood), *Lesnoj zhurnal*, 2017, No 5, pp. 64–72.
- Kim Dzh. O., M'juller Ch. U., Klekka U.R., Enyukov I. S., *Faktornyj, diskriminantnyj i klasternyj analiz* (Factor, discriminant and cluster analysis), Moscow: Finansy i statistika, 1989, 215 p.
- Kist A. A., *Fenomenologija biogeohimii i bio-neorganicheskoj himii* (Phenomenology of Biogeochemistry and bioorganic chemistry), Tashkent: Fan, 1987, 236 p.
- Kleinsmit J., Foliar concentration of ten mineral nutrients in nine Pinus radiata clones during 15-month period, *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1978, Vol. 8, pp. 351–368.
- Korbukova I. V., *Osobennosti himicheskogo sostava korki i luba Pinus sylvestris L.* (Specifics of the chemical composition of the Pinus sylvestris L bark and phloem). Avtoref. diss. kand. nauk, SPb, 1996, 24 p.
- Kovalevskij A. L., *Biogeohimija rastenij* (Biogeochemistry of plants), Novosibirsk: Nauka, 1991, 294 p.
- Koval'skij V. V., *Geohimicheskaja jekologija* (Geochemical ecology), Moscow: Nauka, 1974, 298 p.
- Kozhevnikova N. D., Vtorova V. N., *Biologicheskij krugovorot veshhestv v el'nikah Severnogo Tjan'-Shanja* (Biological circulation of substances in the spruce forests of the Northern Tien Shan), Frunze: Ilim, 1988, 346 p.
- Kozlov V. A., Issledovanie jelementarnogo sostava zoly suhostojnyh derev'ev sosny metodom jemissionnogo spek-

- tral'nogo analiza (The study of the elemental composition of ash obtained from dead standing pine trees by emission spectroscopy), [in:] *Fiziko-himicheskie issledovanija drevesiny i ee kompleksnoe ispol'zovanie*, Petrozavodsk, 1978, pp. 67–79.
- Kozubov G. M., *Vnutrividovoe raznoobrazie sosny obyknovennoj Pinus sylvestris L. v Karelii i na Kol'skom poluostrove. Avtoref. diss. kand. s.-x. nauk* (In-species diversity of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Karelia and Kola peninsula. Abstract of candidates agr. sci thesis), Leningrad: LGU, 1962, 20 p.
- Kretovich V. L., *Biohimija rastenij* (Plant biochemistry), M.: Vysshaja shkola, 1980, 445 p.
- Kurdiani S. Z., Delenie *Pinus sylvestris* na rasy (The division of *Pinus sylvestris* into races), *Lesopromyshlennyj vestnik*, 1908, No 26, pp. 237–240.
- Kuz'min S. I., Fedenja V. M., Rud' A. V., Ocenka jekologicheskogo sostojanija pochv v pri-dorozhnyh polosah avtomagistralej (na primere Minskoj obl.) (Assessment of the ecological condition of soils in road lanes), [in:] *Sovremennye problemy geohimii, geologii i poiskov mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh*, Minsk: «Izdatel'skij centr BGU», 2007, pp. 127–128.
- Lakin G. F., *Biometrija* (Biometrics), Moscow: Vysshaja shkola, 1990, 352 p.
- Leyton L., Armson K. A., Mineral composition of the foliage in relation to the growth of Scots pine, *Forest science*, 1955, Vol. 1, No 3, pp. 210–218.
- Lukina N. V., Nikonov V. V., *Biogeochemicheskie cikly v lesah Severa v uslovijah ajero-tehnogennogo zagrjaznenija* (Biogeochemical cycles in the forests of the North under conditions of Aero-technogenic pollution): V 2 ch. Apatity: KNC RAN, 1996, Ch. 1. 213 p.; Ch. 2. 192 p.
- Lukina N. V., Nikonov V. V., *Pitatel'nyj režim lesov severnoj tajgi: prirodnye i tehnogennye aspekty* (Nutritional regime of northern taiga forests: natural and technogenic aspects), Apatity: KNC RAN, 1998, 316 p.
- Lukina N. V., Nikonov V. V., Pajtio H., Himicheskiy sostav hvoi sosny na Kol'skom poluostrove (Chemical composition of pine needles on the Kola Peninsula), *Lesovedenie*, 1994, No 6, pp. 10–21.
- Mamaev S. A., *Formy vnutrividovoj izmenchivosti drevesnyh rastenij na primere Pinaceae na Urale* (Forms of intraspecific variability of woody plants: on

- the example of the Pinaceae family in the Urals), Moscow: Nauka, 1972, 284 p.
- Manakov K. N., Nikonov V. V., *Biologicheskij krugovorot mineral'nyh jelementov i pochvoobrazovanie v el'nikah Krajnego Severa* (The biological cycle of mineral elements and soil formation in the spruce forests of the Extreme North region), Leningrad: Nauka, 1981, 196 p.
- Markert B., Fränzle S., Wünschmann S., *Chemical Evolution: The Biological System of the Elements. Springer International Publishing, Switzerland, 2015, 295 p.*
- Market B., Vtorova V. N., Kadastry koncentracij himicheskikh jelementov rastenij lesnyh jekosistem Vostochnoj Evropy (Cadastres of chemical element concentrations in the plants of the Eastern Europe ecosystems), *Izvestiya RAN. Seriya Biologicheskaya*, 1995, No 5, pp. 545–553.
- Marunich S. V., Burov A. S., Kuznecova Ju. N., Nedogarko I. V., Transformacija himicheskogo sostava atmosferynyh osadkov pologom drevostoja juzhno-taezhnyh lesov (Transformation of the chemical composition of precipitation by a stand canopy in the Southern-Taiga forests), *Izvestija RAN. Serija geograficheskaja*, 2006, No 4, pp. 52–57.
- McClenahen J. R., Vimmerstedt J. P., Scherzer A. J., Elemental Concentrations in Tree Rings by PIXE: Statistical Variability, Mobility, and Effects of Altered Soil Chemistry, *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, Vol. 19, No 7, pp. 880–888.
- Medvedev I. F., Derevjagin S. S., Kozachenko M. A., Gusakova N. N., Ocenka soderzhanija himicheskikh jelementov v drevesine razlichnyh porod derev'ev (Assessment of chemical elements in wood of different tree species), *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*, 2015, No 11, pp. 12–14.
- Mejstrik V., Soderzhanie barija, marganca, kobal'ta, zheleza i cinka v hvoe sosny Pinus sylvestris L. (The content of barium, manganese, cobalt, iron and zinc in pine needles (*Pinus sylvestris* L.)), *E'kologicheskaja kooperacija*, 1988, No 1, pp. 66–69.
- Metodika vypolnenija izmerenij valovogo soderzhanija medi, kadmija, cinka, svinca, nikelja, marganca, kobal'ta, hroma metodom atomno-absorbcionnoj spektroskopii* (A measurement method for a total content of copper, cadmium,

- zinc, lead, nickel, manganese, cobalt, and chromium by atomic absorption spectroscopy), Moscow: FGU FCAO, 2007, 20 p.
- Mina V. N., Vyshhelachivanie nekotoryh veshhestv atmosferynymi osadkami iz drevesnyh rastenij i ego znachenie v biologicheskom krugovorote (Leaching of certain substances from ligneous plants by atmospheric precipitations and its importance in the biological cycle), *Pochvovedenie*, 1965, No 6, pp. 7–17.
- Mirkin B. M., Rozenberg G. S., Tolkovyj slovar' sovremennoj fitocenologii (Explanatory dictionary of modern phytocenology), Moscow: Nauka, 1983, 134 p.
- Mironova A. S., Himicheskij jelementnyj sostav godovyh kolec sosny obyknovennoj *Pinus sylvestris* L. razlichnyh territorij proizrastanija (Chemical elemental composition of annual rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of various growing areas), *Severnaja Pal'mira: Proc. Conference 9-rd Molodezhnoj jekologicheskoj konferencii*, SPb.: NICJeB RAN, 2018, pp. 78–82.
- Mironova A. S., Rihvanov L. P., Baranovskaja N. V., Sudyko A. F., Godovye kol'ca sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L.) – indikator geohimicheskoj obstanovki i hronologicheskogo izmenenija himicheskogo jelementnogo sostava okruzhajushhej sredy (Annual rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as an indicator of the geochemical situation and chronological changes in the chemical composition of the environment), *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2020, Vol. 331, No 1, pp. 106–116.
- Mishukov N. P., *Izmenchivost' sosny obyknovennoj v Priobskih borah Novosibirskoj oblasti i ee znachenie dlja lesnogo semenovodstva. Avtoref. diss. kand. nauk* (Variability of Scots pine in the Ob-River pine stands in the Novosibirsk Region and its importance for the forest seed industry. Abstract of candidates sci. thesis), Sverdlovsk, 1966, 26 p.
- Mitrofanov D. P., *Soderzhanie makro- i mikrojelementov v lesnyh fitocenozah srednej tajgi Sibiri* (The content of macro- and microelements in the forest phytocenoses of the middle taiga of Siberia), Krasnojarsk, 1973, pp. 28–38.
- Nikitin M. A., *Proisxozhdenie zhizni* (The origin of life), M.: Al'pina non-fikshn, 2016, 542 p.

- Nikonov V. V., Lukina N. V., Vlijanie eli i sosny na kislotnost' i sostav atmosferynyh vypadenij v severo-taezhnyh lesah industrial'no-razvitogo rajona (The influence of spruce and pine on the acidity and composition of precipitations in the Northern-Taiga forests of an industrially developed region), *Jekologija*, 2000, No 2, pp. 97–105.
- Nikonov V. V., Lukina N. V., Bazel' V. S., *Rasseyannye jelementy v boreal'nyh lesh* (Trace elements in the boreal forests), Moscow: Nauka, 2004, 616 p.
- Padilla K. L., Anderson K. A., Trace Element Concentration in Tree-Rings Biomonitoring Centuries of Environmental Change, *Chemosphere*, 2002, Vol. 49, No 6, pp. 575–585.
- Perel'man A. I., *Geohimija landshafta*, Moscow: Vysshaja shkola, 1975, 340 p.
- Perel'man A. I., *Geohimija*, Moscow: Vysshaja shkola, 1989, 526 p.
- Perel'man A. I., Kasimov N. S., *Geohimija landshafta*, Moscow: Astreja-2000, 1999, 768 p.
- Petrunina N. S., Garanina N. S., Vnutrividovaja izmenchivost' rastenij v jekstremal'nyh geohimicheskikh uslovijah (Intraspecific variability of plants under extreme geochemical conditions), [in:] *Jekologija populjacij. Struktura i dinamika*, Moscow: RASHN, 1995, Vol. 2, pp. 884–893.
- Pravdin L. F., *Sosna obyknovennaja. Izmenchivost', vnutrividovaja sistematika i selekcija* (Scottish pine. Variability, intraspecific taxonomy and selection), Moscow: Nauka, 1964, 192 p.
- Pristova T. A., Vlijanie drevesnogo pologa listvenno-hvojnogo nasazhdenija na himicheskij sostav osadkov (The influence of a tree canopy in a deciduous and coniferous stand on the chemical composition of precipitation), *Lesovedenie*, 2005, No 5, pp. 49–55.
- Pristova T. A., Fedorkov A. L., Jelementnyj sostav *Pinus contorta* Dougl. i *Pinus sylvestris* L. v jeksperimental'nyh kul'turah Syktyvkarskogo lesnichestva Respubliki Komi (The chemistry of sediment is dependent on the tree canopy), *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoi akademii*, 2023, No 245, pp. 55–70.
- Pugachev A. A., *Biologicheskij krugovorot i pochvoobrazovanie v landshaftah Krajnego Severo-Vostoka Rossii* (Biological cycle and soil formation in the landscapes of the Far North-East of Russia), Magadan: SVNC DVO RAN, 2009, 116 p.
- Remezov N. P., Bykova L. N., Smirnova K. M., *Potreblenie i krugovorot azota i zol'nyh jelementov v lesah evropejskoj*

- chasti SSSR* (The consumption and cycle of nitrogen and ash elements in the forests of the European part of the USSR), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1959, 284 p.
- Rixvanov L. P., Arxangel'skaya T. A., Zamyatina Yu. L., *Dendroradiografiya kak metod retrospektivnoj ocenki radioekologicheskoj situacii* (Dendroradiography as a method of retrospective assessment of the radioecological situation), Tomsk: Del'taplan, 2015, 148 p.
- Rixvanov L. P., Arxangel'skaya T. A., Nesvetajlo V. D., *Izuchenie urovnya i dinamiki nakopleniya delyashhixsya radionuklidov v godovy'x kol'czax der-ev`ev* (Study of the level and dynamics of accumulation of fissile radionuclides in annual tree rings), *Geoximiya*, 2002, No 11, pp. 1238–1245.
- Robakidze E. A., Bobkova K. S., Najmushina S. I., *Jelementnyj sostav dominirujushhix vidov rastenij v srednetaezhnyh sosnjakah raznogo vozrasta (na primere Respubliki Komi)* (The elemental composition of dominant plant species in the Middle Taiga pine forests of different ages), *Rastitel'nye resursy*, 2020, Vol. 56, No 1, pp. 53–65.
- Robakidze E. A., Gormonova N. V., Bobkova K. S., *Himicheskij sostav zhidkih atmosferynyh osadkov v starovozrastnyh el'nikah srednej tajgi*, (The chemical composition of liquid precipitation in the old-aged spruce forests of the Middle Taiga), *Geohimija*, 2013, No 1, pp. 72–78.
- Rodin L. E., Bazilevich N. I., *Dinamika organicheskogo veshhestva i biologicheskij kru-govorot zol'nyh jelementov i azota v osnovnyh tipah rastitel'nosti zemnogo shara* (Dynamics of an organic substance and the biological cycle of ash elements and nitrogen in the main types of global vegetation), Moscow-Leningrad: Nauka, 1965, 253 p.
- Rogozin M. V., Golikov A. M., Zhekin A. V., Komarov S. S., Zhekina N. V. *Selekcija eli finskoj (Picea×fennica (Regel) Kom.): dissimetriya i xemomarkery`* (Selection of Finnish spruce (Picea×fennica (Regel) Kom.): dissymmetry and chemomarkers), Perm': Permskij gos. nac. issledovatel'skij un-t, 2017, 121 p.
- Rogozin M. V., Zhekina N. V., *Ustojchivyy rost potomstva eli finskoj i himicheskij sostav hvoi* (A sustainable growth of Finnish spruce offspring and the chemical composition of needles), *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, No 5, pp. 79–84.

- Rogozin M. V., Zhekina N. V., Komarov S. S., Kuvshinskaja L. V., Himicheskie jelementy hvoi v potomstve kul'tur i estestvennyh populjacij eli finskoj (The chemical elements of needles taken from the offspring of Finnish spruce cultures and natural populations), *Vestnik Permskogo universiteta. Serija Biologija*, 2014, No 3, pp. 44–50.
- Romankevich E. A., Zhivoe veshhestvo Zemli. Biogeoхимические аспекты problem (The living substance of the Earth. Biogeochemical aspects of the problem), *Geohimija*, 1988, No 2, pp. 292–306.
- Romanovskij M. G., *Polimorfizm drevesnyh rastenij po kolichestvennym priznakam* (Quantitative polymorphism of ligneous plants), Moscow: Nauka, 1994, 96 p.
- Romanovskij M. G., Shhjokalev R. V., *Sistema vida u drevesnyh rastenij* (The species system of ligneous plants), Moscow: Tovarishhestvo nauchnyh izdanij KMK, 2014, 212 p.
- Shheglov A. I., *Biogeoхимия texnogenny'x radionuklidov v lesny'x e'kosistemax: po materialam 10-letnix issledovanij v zone vliyaniya avarii na ChAE'S* (Biogeochemistry of technogenic radionuclides in forest ecosystems: based on the materials of 10 years of research in the zone of influence of the Chernobyl accident), Moscow: Nauka, 1999, 268 p.
- Shul'ga V. V., Vnutrividovaja izmenchivost' sosny obyknovennoj na juge ee areala (v Kazahstane) (Intraspecies variability of Scots pine in the south of its habitat) [in:] *Lesy i drevesnye porody Severnogo Kazahstana*, Leningrad: Nauka, 1974, pp. 66–71.
- Sibirskina A. R., Soderzhanie kadmija v organah sosny obyknovennoj lentochnyh borov Priirtysh'ja Respubliki Kazahstan (The cadmium content in Scots pine organs in the ribbon-like pine forests in Irtysh Land of the Republic of Kazakhstan), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Himija. Biologija. Farmacija*, 2013, No 2, pp. 130–137.
- Sokolov A. A., Himicheskiy sostav atmosferynyh osadkov, proshedshih skvoz' polog elovogo i berezovogo drevostoja (The chemical composition of precipitation passing through the canopy of a spruce or birch stand), *Lesovedenie*, 1972, No 3, pp. 103–106.
- Suhareva T. A., Lukina N. V., Himicheskiy Sostav i morfometricheskie harakteristiki hvoi eli sibirskoj na Kol'skom poluostrove v processe degradacionnoj

- sukcessii lesov (The chemical composition and morphometrical characteristics of Siberian spruce needles on the Kola Peninsula in the forest degradation succession process), *Lesovedenie*, 2004, No 2, pp. 36–43.
- Sviridova I. K., Rezul'taty izuchenija vymyvanija azota i zol'nyh jelementov dozhdevymi osadkami iz kron drevnyh porod (The study results of nitrogen and ash element leaching from wood species crowns by rain precipitation), *Paper AN SSSR*, 1960, Vol. 133, No 3, pp. 706–708.
- Sysuev V. V., O mehanizme izmenenija himicheskogo sostava atmosferynyh vod pod pologom lesa (The mechanism of changes in the chemical composition of precipitation water under the forest canopy), *Vestnik MGU. Ser. Geografija*, 1975, No 5, pp. 107–110.
- Tarakanov V. V., Chankina O. V., Kucenogij K. P., Naumova N. B., Makarikova R. P., Milyutin L. I., Rogovcev R. V., Efimov V. M., Vliyanie geograficheskix populyacij sosny` na e`lementny`j sostav fitomassy` i pochv (The influence of geographical pine populations on the elemental composition of phytomass and soils), *Poverxnost`. Rentgenovskie, sinxrotronny`e i nejtronny`e issledovaniya*, 2011, No 11, pp. 72–78.
- Tarakanov V. V., Miljutin L. I., Kucenogij K. P., Koval'skaja G. A., Ignat'ev L. A., Samsonova A. E., Jelementnyj sostav hvoi v raznyh klonah sosny obyknovennoj (The elemental composition of needles in the different clones of Scots pine), *Lesovedenie*, 2007, No 1, pp. 28–35.
- Tarhanov S. N., Birjukov S. Ju., Formovoe raznoobrazie Pinus sylvestris (Pineaceae) v bassejne Severnoj Dviny (The form diversity of Pinus sylvestris (Pineaceae) in the Northern Dvina basin), *Rastitel'nye resursy*, 2013, No 4, pp. 481–489.
- Tarhanov S. N., Korovin V. V., Shhokalev R. V., Formovoe raznoobrazie hvojnnyh na evropejskom severe Rossii (The form diversity of conifers in the European North of Russia), *Lesnoj Vestnik*, 2006, No 5, pp. 89–95.
- Titljanova A. A., Universal'nost' processov bioticheskogo krugovorota (Universalism of the biological cycle processes), *Pochvovedenie*, 2014, No 7, pp. 771–780.
- Ushakova G. I., *Biogehimicheskaja migracija jelementov i pochvoobrazovanie v lesah Kol'skogo poluostrova* (Biogeochemical migration of elements and soil formation in forests of the Kola

- Peninsula), Apatity: Karel. nauch. centr RAN, 1997, 150 p.
- Usoľ'cev V. A., *Jetjudy o nashih lesnyh derev'jah* (Sketches about our forest trees), Ekaterinburg: Bank kul'turnoj in-formacii, 2008, 188 p.
- Usoľ'cev V. A., *Lesnye arabeski, ili Jetjudy iz zhizni nashih derev'ev* (Forest arabesques, or Sketches from the life of our trees), Ekaterinburg: Ural'skij gos. lesotehnich. un-t, 2014, 161 p.
- Varaksina T. N., Hol'kin Ju. I., Bazhenov V. A., O zavisimosti himicheskogo sostava drevesiny ot uslovij proizrastanija IVUZ (Dependence of the chemical composition of wood on the growing conditions), *Lesnoj zhurnal*, 1967, No 2, pp. 137–139.
- Veretennikov A. V., *Fiziologija rastenij s osnovami biohimii* (Plant physiology with basics of biochemistry), Voronezh: VGU, 1987, 256 p.
- Vernadskij V. I., *Zhivoe veshhestvo i biosfera* (Living things and the biosphere), M.: Nauka, 1994, 671 p.
- Vinogradov A. P., *Izbranny'e trudy. Ximicheskij e'lementarnyj sostav organizmov morya* (Selected works. Chemical elementary composition of marine organisms), Moscow: Nauka, 2001, 619 p.
- Vinokurova R. I., *Zakonomernosti nakoplenija i raspredelenija himicheskikh jelementov v fitomasse elovo-pihtovyh nasazhdenij zony smeshannyh lesov Srednego Povolzh'ja*. Diss. doct. biol. nauk (Regular patterns in the accumulation and distribution of chemical elements in the phytomass of the spruce and abies stands in the mixed forest zone in the Middle Volga region. Doctoral's boil. sci. thesis), Joshkar-Ola: MarGTU, 2003, 277 p.
- Vinokurova R. I., Andrijanova O. V., Latypova V. Z., Parametry biologicheskogo krugo-vorota himicheskikh jelementov v srednevozzrastnyh elovo-pihtovyh nasazhdenijah Respubliki Marij Jel, Jekologicheskie osnovy racional'nogo lesopol'zovanija v Srednem Povolzh'e (Parameters of the biological cycle of the chemical elements in the middle-aged spruce and abies stands in the Republic of Mari El), *Materialy nauchno-prakt. konf.*, Joshkar-Ola: MarGTU, 2002, pp. 188–193.
- Vinokurova R. I., Osipova V. Ju., Latypova V. Z., Soderzhanie mikrojelementov v strukturnykh chastjah hvojnnyh derev'ev, Jekologicheskie problemy i puti ih reshenija v zone Srednego Povolzh'ja (The microelement contents in the structural parts of conifer trees. The influence of pine geographical populations on the elemental composition of the phytomass and soils), *Materialy*

*Vseros. nauch. konf.*, Saransk, 1999, pp. 61–62.

*Vozdejstvie vybrosov avtotransporta na prirodnuju sredu* (Impact of car emissions on the natural environment), Pod red. Kachalovoy O. L., Riga: Zinatne, 1989, 137 p.

Vtorova V. N., Market B., *Mul'tijelementnyj analiz rastenij lesnyh jekosistem Vostochnoj Evropy* (Multielemental analysis of plants from the forest ecosystems of Eastern Europe), *Izvsetiya*

*RAN. Seriya Biologicheskaya*, 1995, No 4, pp. 447–454.

Zamyatina Yu. L., *Izuchenie istorii postupleniya radionuklidov v okruzhayushhuyu sredu na osnove f-radiograficheskogo analiza godichny'x kolecz derev'ev. Af-toreferat diss. cand. geol.-mineral. nauk* (Study of the history of radionuclide release into the environment based on f-radiographic analysis of annual tree rings, Abstract of candidate's geol.-mineral. sci. thesis), Tomsk, 2008, 26 p.

## ELEMENTAL COMPOSITION OF SCOTS PINE WOOD, BARK AND NEEDLES IN THE MARI EL FORESTS

**Yu. P. Demakov, O. V. Sheikina\*, E. S. Sharapov**

*Volga State University of Technology,  
Lenina Square, 3, Yoshkar-Ola City, Republic of Mari El, 424000, Russia*

\*E-mail: ShejkinaOV@volgatech.net

Received: 11.06.2023

Revised: 15.09.2023

Accepted: 25.09.2023

The article presents the results of assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood (216 pc), bark (29 pc), needle (127 pc) specimens for the content of 13 chemicals (Ca, K, Mg, Mn, Zn, Fe, Cu, Sr, Ni, Pb, Cr, Co, Cd), which were tested using an AAnalyst 400 atomic absorption spectrometer. The specimens were taken from the stands of different ages, origin and forest-growth conditions in the Republic of Mari El. It shows that the elemental composition of organ tissues of this tree species is its essential ecological and physiological characteristic

that represents the peculiarities of the metabolism process in trees and a degree of tree adaptation to the environment. In comparison with the wood, the bark contains seven to eight times more calcium and strontium, four times more cadmium, two times more iron and zinc. As for the content of other elements, the bark does not differ much from the wood, however its ash content is 6.4 times greater. The ash content of the needles is 6.7 times greater than that of the wood, but the needles have a significantly higher concentration of K, Mn, Ca, Zn, and in comparison with the bark a higher concentration of Sr, Ni, Pb. The contents of each chemical element in the tissues and organs of pine trees vary within wide ranges due to the environmental factors and individual features of trees. The variation of the Ni content in the wood is the greatest (CV = 92.1%), it is followed by Mg, Pb, Co and Fe (CV = 83%-89%). The Ca and ash contents in the wood vary the least (CV = 38 % and CV = 26.5%, respectively). The bark has the greatest variation of the Cd and Ni concentrations (CV = 172%), and they are followed by Sr, Mg, K (CV = 88%-111%). The Ca, Cu and ash contents in the bark vary the least (CV = 55%-62 %). The needles have the most significant variation in the Sr, Ni, Co contents (CV = 85%-96%) and the least variation in the K and ash contents (CV = 18%-24%). The contents of ash, Ca, Mg, Zn, K, Mn in the Scots pine wood, bark and needles as well as the ratios of K:Mn and Zn:Mn may be used for selection of economically valuable samples along with the other phenotypic characteristics of trees. It is concluded that the ash composition of tree tissues, especially wood, is not suitable for biomonitoring purposes, since it largely depends on intracenic factors, rather than technogenic pollution. For this purpose, it is better to evaluate the gross content of chemical elements in the litter and soil of biogeocenoses.

**Keywords:** *the Republic of Mari El, Scots pine, wood, bark, needles, ash content, elemental composition, variation*

**Рецензент:** к.б.н. Никерова К. М.