

УДК 630*1

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-24-37

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ХВОЙНЫХ ПОРОД

В.Л. Гавриков¹, д-р биол. наук, доц.; *ResearcherID*: [M-5431-2013](https://orcid.org/0000-0002-7816-0536),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7816-0536>

А.И. Фертиков¹, аспирант; *ResearcherID*: [AAX-2390-2020](https://orcid.org/0000-0001-8958-795X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8958-795X>

Р.А. Шарафутдинов¹, канд. геогр. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAW-9994-2020](https://orcid.org/0000-0002-0068-6458),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0068-6458>

Е.А. Ваганов^{1,2}, д-р биол. наук, акад. РАН, проф.; *ResearcherID*: [U-2379-2019](https://orcid.org/0000-0001-9168-1152),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9168-1152>

¹Сибирский федеральный университет, просп. Свободный, д. 79, г. Красноярск, Россия, 660041; e-mail: vgavrikov@sfu-kras.ru, fert_ov@mail.ru, ruslanate@mail.ru, eavaganov@hotmail.com

²Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 01.04.20 / Принята к печати 18.06.20

Аннотация. Распределение химических элементов в годичных кольцах деревьев несет важную информацию о многих биогеохимических процессах. Для надежной интерпретации этой информации необходимо обладать сведениями о степени вариации содержания химических элементов как на уровне всего вида, так и на уровне отдельных деревьев. Цель исследования – установить, какие химические элементы имеют устойчивый характер распределения в стволах ряда хвойных пород: ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour). Данные для анализа получены на основе многолетнего опыта лесовыращивания. Экспериментальная площадка заложена в 1971–1972 гг. в окрестностях г. Красноярска Институтом леса СО РАН. Перед посадкой саженцев почвенный фон механически выровнен, и таким образом для всех посадок созданы достаточно равные условия роста. Из трех нормально развивающихся деревьев каждой породы взяты керны диаметром 12 мм, проведен их анализ современными рентгенофлуоресцентными методами. Относительные величины содержания элементов (отсчеты) получены на мультисканере Itrax Multiscanner (COX Analytical Systems). Содержание элементов в годичных кольцах характеризовалось концентрацией и запасом элементов. Концентрация рассчитывалась как количество отсчетов на 1 мм² площади кольца; запас – как количество отсчетов на всей площади кольца. Каждая из этих переменных описывалась параметрами линейного наклона в ряду календарных лет и стандартного отклонения. Кластерный анализ проводился в 4-мерном пространстве полученных параметров. Это позволило установить, группируются ли ряды распределения элементов из различных деревьев и различных пород. Три элемента (Са, Со, Р) демонстрируют высокую устойчивость параметров распределения независимо от породы дерева. Ряд других элементов (Mn, Pb, Cl, Cr, Ni, Sr, W) устойчиво группируется в зависимости от породы. Результаты исследования позволяют сконцентрироваться на изучении элементов, устойчиво распределяющихся в стволах хвойных.

Для цитирования: Гавриков В.Л., Фертиков А.И., Шарафутдинов Р.А., Ваганов Е.А. Изменчивость элементного состава годичных колец хвойных пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 24–37. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-24-37

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Финансирование: Исследование было поддержано РФФИ, Правительством Красноярского края, Красноярским краевым фондом науки по проекту «Прогноз регионально-специфичных откликов бореальных лесов горных районов Сибири на глобальные изменения природной среды и траекторий эволюции ландшафтов для снижения экологических рисков и эффективного долгосрочного планирования деятельности различных отраслей экономики», номер гранта – 18-45-240001; и РФФИ по проекту: «Позднеголоценовая динамика бореальных лесов Азии на фоне меняющихся геохимических и климатических условий», номер гранта – 19-05-00091.

Ключевые слова: химические элементы дерева, древесные кольца, временной тренд, кальций, свинец, сосна обыкновенная, ель сибирская, сосна сибирская, лиственница сибирская, кластерный анализ.

VARIABILITY IN ELEMENTAL COMPOSITION OF CONIFER TREE RINGS

Vladimir L. Gavrikov¹, Doctor of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [M-5431-2013](https://orcid.org/0000-0002-7816-0536),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7816-0536>

Alexey I. Fertikov¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAX-2390-2020](https://orcid.org/0000-0001-8958-795X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8958-795X>

Ruslan A. Sharafutdinov¹, Candidate of Geography, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAW-9994-2020](https://orcid.org/0000-0002-0068-6458), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0068-6458>

Evgenii A. Vaganov^{1,2}, Doctor of Biology, Academician of RAS, Prof.;

ResearcherID: [U-2379-2019](https://orcid.org/0000-0001-9168-1152), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9168-1152>

¹Siberian Federal University, prosp. Svobodnyy, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; e-mail: vgavrikov@sfu-kras.ru, fert_ov@mail.ru, ruslanate@mail.ru, eavaganov@hotmail.com

²Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

Original article / Received on April 1, 2020 / Accepted on June 18, 2020

Abstract. Distribution of chemical elements in tree rings bears important information on various biogeochemical processes. In order to achieve a reliable interpretation of the information, it is necessary to know the degree of variation in the content of chemical elements both at the level of the entire species and at the level of individual trees. The research aims to determine which chemical elements have a stable distribution in the trunks of a number of conifers: Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.), and Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour). The data for the analysis were obtained on the basis of the long-term experiment in forest growing. The experimental site was laid out in 1971–1972 in the vicinity of Krasnoyarsk by the staff of the Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Before planting the seedlings, the soil ground was mechanically levelled, and thus, sufficiently equal growth conditions were created for all plantings. Cores with a diameter of 12 mm were sampled from three normally developing trees of each species and analyzed using modern X-ray fluorescence methods. Content relative values of elements (counts) were obtained with the Itrax Multiscanner (COX Analytical Systems). The content of elements in the tree rings was characterized by the concentration and reserve of elements. Concentration was calculated as the number of counts per 1 mm² of the ring area; reserve was calculated as the number of counts over the entire ring area. Each of these variables was defined by the parameters of linear slope in the calendar year series and the standard deviation. The cluster analysis was performed in the 4-dimensional space of the obtained parameters. This allowed determining whether the series of element distributions from different trees and species are grouped. Three elements (Ca, Co, and P)

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

show high stability of distribution parameters in tree rings with no regard to tree species. A number of other elements (Mn, Pb, Cl, Cr, Ni, Sr, and W) are stably grouped depending on the species. The results of the research enable to focus on the study of the elements stably distributed in the conifer trunks.

For citation: Gavrikov V.L., Fertikov A.I., Sharafutdinov R.A., Vaganov E.A. Variability in Elemental Composition of Conifer Tree Rings. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 24–37. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-24-37

Funding: The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), the Government of Krasnoyarsk Krai and the Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the project “Forecasting the Region-Specific Responses of Boreal Forests of Mountainous Areas of Siberia to Global Changes in the Natural Environment and Trajectories of Landscape Evolution for Reduction of Environmental Risks and Effective Long-term Planning of Various Economic Sectors”, grant No. 18-45-240001; and the RFBR within the project “Late Holocene Dynamics of Asian Boreal Forests against Changing Geochemical and Climatic Conditions”, grant No. 19-05-00091.

Keywords: tree chemical elements, tree rings, temporal trend, calcium, lead, Scots pine, Siberian spruce, Siberian pine, Siberian larch, cluster analysis.

Введение

Ствол многолетнего дерева представляет собой естественную летопись сведений о явлениях, которые оказывают значимое влияние на рост. К этим явлениям относятся как погодно-климатические колебания, так и геохимический фон подстилающих пород, ландшафтов и атмосферы в районах произрастания лесной растительности. Если 1-я группа явлений определяет в основном количественные характеристики годичных колец, т. е. скорость роста, то 2-я группа в значительной степени воздействует на качественные свойства древесных тканей.

Дендрохимическое направление исследований годичных колец активно развивается с 70–80-х гг. XX в., когда стали массово доступны эффективные методы химического анализа. Одно из направлений связано с изучением потоков основных биогенных элементов в лесных биогеоценозах [2, 3, 5]. Вместе с тем, в силу технических ограничений, не было акцента на распределение элементов в высоком разрешении (например, масштаб годичного кольца или внутрисезонные колебания).

Поскольку годичные кольца представляют собой шкалу времени, изучение их характеристик позволяет выявлять и исследовать различного рода временные аномалии в содержании химических элементов. Эти аномалии часто связываются с промышленной эмиссией [6, 7, 9, 12, 17, 23], фертилизацией почв [18], последствиями вулканической деятельности [14, 15], а также с влиянием на растения стрессовых факторов [25]. В последние годы внимание исследователей обращается на зависимость содержания химических элементов от возраста деревьев [1, 4].

Установление надежных фактов относительно того, как те или иные химические элементы распределены во временных сериях годичных колец, представляет принципиальную проблему в дендрохимических исследованиях. Рост содержания некоторых элементов (например, тяжелых металлов) кажется естественным объяснить развитием промышленности или интенсификацией транспортных потоков. Вместе с тем ряд исследований показывает, что такие

интерпретации могут быть необоснованны. Так, К.Л. Падила и К.А. Андерсон [21] установили, что содержание некоторых тяжелых металлов (Sr, Ba, Zn, Cd) показывает восходящий тренд в годовых кольцах сосны желтой (*Pinus ponderosa* Dougl. ex C.Lawson) с начала 1800-х гг., который продолжался около 50 лет. Согласно литературным данным, увеличение уровня тяжелых металлов в древесной ткани часто связывается с выпадением кислотных осадков. Однако для района исследований сведений о кислотных дождях нет, т. е. данный фактор является маловероятной причиной роста содержания указанных элементов. Ю.П. Демаков с соавторами [1] зафиксировали пик концентрации Ni в годовых кольцах сосны обыкновенной, относящийся к 1890–1909 гг., хотя никакой промышленности, связанной с Ni, в районе исследований в это время не существовало.

Временные ряды содержания элементов в годовых кольцах могут быть исследованы различными методами. В частности, в ряде работ [1, 13, 22, 26] применялся кластерный анализ, который является классическим методом разведочного анализа. Основная цель использования этого метода – упорядочение большого числа объектов-наблюдений, каждое из которых описывается множеством параметров. В дендрохимии такими объектами-наблюдениями могут быть временные ряды содержания химических элементов.

В работах [26] и [22] по лиственнице сибирской (*Larix gmelinii* Rupr.) выделялись кластеры элементов по особенностям их динамики в хронологиях колец. Среди обозначенных кластеров важно отметить группы биологически важных элементов (типичные представители – К и Р), а также щелочноземельных металлов (Ca, Mg, Sr, Ba). 1-я группа, как правило, характеризуется увеличением содержания элементов от сердцевины ствола к его периферии, в то время как 2-я – уменьшением их содержания в более молодых кольцах.

Цель исследования – установление групп элементов, которые имеют сходную форму изменчивости в сериях годовых колец, и степени видоспецифичности изменчивости содержания элементов в годовых кольцах различных древесных пород.

Объекты и методы исследования

Долговременный эксперимент по лесовыращиванию. В 1971–1972 гг. группа лесных почвоведов Института леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР заложила долговременный эксперимент для исследования воздействия различных древесных пород на формирование почвенного покрова [8, 20, 24]. На площади 1,5 га верхний 50-сантиметровый слой почвы был удален, гомогенизирован и равномерно распределен, чтобы уравнивать условия роста. На подготовленную территорию высадили с плотностью 0,5×0,5 м 2–3-летние саженцы нескольких древесных пород. Чистое насаждение каждой породы занимало 2400 м². Площадь эксперимента расположена приблизительно в 50 км к северо-западу от г. Красноярск, ее координаты N 56°12'8,49" E 92°20'48,97" (рис. 1).



Рис. 1. Географическое расположение долговременного эксперимента (положение на карте России отмечено красным квадратом)

Fig. 1. Geographical location and situation plan of the study area. A red square on the left is the geographical position of the study area

Отборы проб проводились в древостоях 4 широко распространенных хвойных видов: ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour).

Отбор проб и определение содержания элементов. После окончания сезонного роста 2017 г. по 3 внешне здоровых дерева каждой породы были случайным образом отобраны для взятия проб. С помощью бурава Haglöf на высоте груди извлечены керны диаметром 12 мм. В дальнейшем керны высушивались до воздушно-сухого состояния, и с помощью циркулярной пилы из них перпендикулярно волокнам выпиливались планки толщиной 2 мм. Планки сканировались с помощью установки Itrax Multiscanner (COX Analytical Systems) в сочетании с программным комплексом Multi Scanner Navigator. Ширина луча сканирования составляла 2 мм, а расстояние между точками измерений (пространственное разрешение) – 100 мкм.

Результатом сканирования образцов в мультисканере являются так называемые отсчеты (counts). Они представляют собой относительные показатели, пропорциональные количеству фотонов, испускаемых атомами определенных химических элементов. Иными словами, отсчеты пропорциональны количеству атомов выбранного химического элемента и отражают его содержание в сканируемых образцах древесины. В настоящем исследовании рассматривался следующий набор химических элементов: P, S, Cl, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, W, Pb.

Параллельно с определением количества отсчетов мультисканер осуществляет измерение рентгеновской плотности образца древесины. Рентгеновские снимки использовались для установления границ между годовыми кольцами, при этом резкое падение рентгеновской плотности считалось внешней границей кольца.

Статистическая обработка данных. Предварительная подготовка данных состояла в том, что все отсчеты в пределах одного годовичного кольца суммировались, что должно отражать содержание какого-либо элемента в конкретном кольце. Отсчеты представляют собой относительный показатель, поэтому имеет смысл не его значение в отдельном кольце, а сравнение количества отсчетов в серии годовичных колец, т. е. рассмотрение серии показателя как временного ряда.

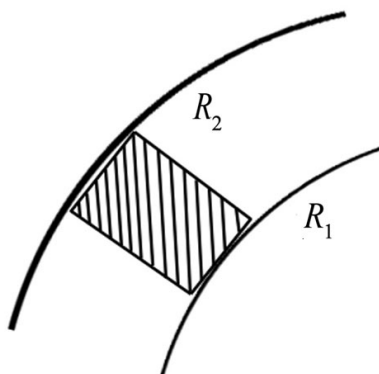
Для описания содержания элементов в годичных кольцах использовались две базовые переменные: концентрация отсчетов в полосе сканирования и запас отсчетов в полном годичном кольце. Под концентрацией отсчетов понимается плотность отсчетов на единицу площади (мм^2) в полосе сканирования. Под запасом отсчетов – общее количество отсчетов в полном годичном кольце, показатель оценивался в предположении, что границы колец представляют собой правильные окружности.

На рис. 2 представлена схема вычисления концентрации и запаса отсчетов. Заштрихованная область обозначает фрагмент полосы сканирования, приходящийся на данное годичное кольцо. Площадь фрагмента – площадь прямоугольника с шириной 2 мм и длиной, равной разнице между радиусами соседних колец ($R_2 - R_1$). Количество отсчетов на 1 мм^2 этого прямоугольника – концентрация отсчетов. Запас отсчетов – оценка общего количества отсчетов на площади полного кольца в предположении, что соседние кольца – правильные окружности с радиусами R_1 и R_2 .

Очевидно, что 2 переменные, концентрация и запас, имеют следующие отличия. Концентрация не зависит от скорости роста, т. к. является относительной величиной и рассчитывается на единицу площади. Запас в значительной степени зависит от скорости роста и при постоянной концентрации пропорционален площади годичного кольца.

Рис. 2. Схема вычисления концентрации и запаса отсчетов

Fig. 2. Scheme for calculating the concentration and reserves of counts



Обе переменные, вычисленные для каждого годичного кольца, представляют собой временные ряды, которые должны быть охарактеризованы количественными параметрами. Каждый временной ряд описывался двумя простыми и наглядными параметрами: временным линейным трендом и стандартным отклонением. Линейный тренд является показателем роста среднего значения ряда в более молодых кольцах: остаются ли они приблизительно одинаковыми или уменьшаются. Стандартное (среднеквадратическое) отклонение оценивает степень варьирования значений ряда относительно среднего значения.

Таким образом, изменчивость каждого элемента в ряду годичных колец характеризовалась 4 параметрами отсчетов: стандартным отклонением запасов, линейным трендом запасов, стандартным отклонением концентраций, линейным трендом концентраций. Иными словами, последующий анализ проводился в 4-мерном пространстве указанных параметров.

Вместе с тем, имея в виду особенность методов многомерной классификации, для получения неискаженного результата исходные данные должны быть преобразованы. Суть метода состоит в оценивании расстояний между объектами в многомерном пространстве. На основании этих расстояний и формируются группы (кластеры). Отсюда следует, численно большие параметры станут более значимыми в процессе кластеризации и в ходе анализа в целом, подавят влияние других параметров – конечные данные будут неверными. Например, количество отсчетов для S_a всегда на порядок больше, чем для N_i . Значения параметров необходимо трансформировать так, чтобы они были численно сравнимы друг с другом.

Трансформация данных осуществляется в 2 этапа. Во-первых, исходные данные (концентрация и запас) нормируются на собственные максимумы. Это приводит к тому, что абсолютно все значения оказываются между 0 и 1. На основе полученных результатов вычисляются наклоны и стандартные отклонения. Во-вторых, полученные значения наклонов и стандартных отклонений стандартизируются, т. к. стандартные отклонения всегда численно гораздо больше, чем наклоны, и первые получают слишком большой вес при анализе. Стандартизация приводит к тому, что среднее набора данных становится равным 0, а среднеквадратическое отклонение – 1.

В таком образом трансформированном виде исходные данные подвергались кластерному анализу в 4-мерном пространстве указанных параметров. Процедура анализа следовала предложению И.П. Панюшкиной с соавторами [22]. На 1-м этапе строится древовидная диаграмма, которая позволяет предположить, сколько кластеров будет сформировано из имеющихся данных. Установлено, что оптимальное количество кластеров для полученного нами материала – 4. В дальнейшем используется метод Уорда с оценкой расстояний как $1 - r$, где r – коэффициент корреляции Пирсона.

В ходе анализа каждый элемент в одиночном дереве считался отдельным независимым наблюдением, т. е. в анализе участвовало 192 наблюдения (16 элементов в 12 деревьях). Они маркировались таким образом, чтобы однозначно идентифицироваться с элементом, породой и номером дерева. Например, $Sa-sr3$ читается как «кальций в ели, дерево № 3». Породы имели следующие обозначения: sc , sp , l , ps для сосны обыкновенной, ели сибирской, лиственницы сибирской и сосны сибирской соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение

При использовании кластерного анализа существенное значение имеет выбор набора параметров, формирующих многомерное пространство для проведения классификации. Простые и наглядные параметры позволяют в дальнейшем осуществить ясную интерпретацию полученных данных. В частности, высказать предположения о распределении наблюдений по заданным кластерам. Ниже будут рассмотрены 3 аспекта результатов кластеризации: видоспецифичность распределения элементов, а также содержание Sa и Pb как важных представителей биогенных и антропогенных агентов.

Видоспецифичность распределения элементов в стволах деревьев.
В таблице сведены результаты группировки наблюдений по 4 кластерам.

Распределение элементов по кластерам

№ кластера	Элемент в дереве
1	Ca-sc1, Ca-sc3, Ca-sp1, Ca-sp2, Ca-sp3, Ca-l1, Ca-l2, Ca-l3, Ca-ps1, Ca-ps2
	Co-sc1, Co-sc2, Co-sc3, Co-sp1, Co-sp2, Co-sp3, Co-l1, Co-l2, Co-l3, Co-ps1, Co-ps2
	Cl-l3, Cl-ps1; K-l1, K-l3
	<i>Mn-sc1, Mn-sc2, Mn-sc3, Mn-l1, Mn-l2</i>
	<i>Pb-sc1, Pb-sc2, Pb-sc3, Pb-sp1, Pb-sp2, Pb-sp3</i>
	Zn-sp3, Zn-ps2
2	Cl-l1, Cl-ps2
	Cr-sc1, <i>Cr-sp1, Cr-sp2, Cr-sp3</i> , Cr-l1, Cr-ps2
	Cu-sc1, Cu-sp1, Cu-sp3, Cu-l1, Cu-ps1, Cu-ps2
	Fe-sc1, Fe-sp3, Fe-l1, Fe-ps2; K-sc1, K-sp2, K-sp3, K-ps2
	<i>Mn-sp1, Mn-sp2, Mn-sp3</i> , Mn-ps2
	Ni-sc1, <i>Ni-sp1, Ni-sp2, Ni-sp3</i> , Ni-l1, Ni-ps2
	S-sc1, S-sp1, S-sp3, S-l1, S-ps2
	Sr-sc1, <i>Sr-sp1, Sr-sp2, Sr-sp3</i> , Sr-l1, Sr-ps2
	V-sc1, <i>V-sp1, V-sp2, V-sp3</i> , V-l1, V-ps2
	W-sc1, <i>W-sp1, W-sp2, W-sp3</i> , W-l1, W-ps2
Zn-sc1, Zn-sp1, Zn-sp2, Zn-l1	
3	<i>Cl-sc1, Cl-sc2, Cl-sc3, Cl-sp1, Cl-sp2, Cl-sp3</i> , Cl-ps3
	Co-ps3; Cr-l2; Fe-sc3, Fe-sp2, Fe-l2, Fe-ps3
	K-l2, K-ps1, K-ps3
	<i>Pb-l1, Pb-l2, Pb-l3, Pb-ps1, Pb-ps2, Pb-ps3</i>
	P-sc1, P-sc2, P-sc3, P-sp1, P-sp2, P-sp3, P-l1, P-l2, P-l3, P-ps2, P-ps3
	S-ps3; Sr-sc2, Sr-l2, Sr-ps3; Zn-ps3
4	Ca-sc2, Ca-ps3; Cl-l2
	Cr-sc2, Cr-sc3, Cr-l3, Cr-ps1, Cr-ps3
	Cu-sc2, Cu-sc3, Cu-sp2, Cu-l2, Cu-l3, Cu-ps3
	Fe-sc2, Fe-sp1, Fe-l3, Fe-ps1; K-sc2, K-sc3, K-sp1
	Mn-l3, Mn-ps1, Mn-ps3
	Ni-sc2, Ni-sc3, Ni-l2, Ni-l3, Ni-ps1, Ni-ps3; P-ps1
	S-sc2, S-sc3, S-sp2, S-l2, S-l3, S-ps1
	Sr-sc3, Sr-l3, Sr-ps1
	V-sc2, V-sc3, V-l2, V-l3, V-ps1, V-ps3
	W-sc2, W-sc3, W-l2, W-l3, W-ps1, W-ps3
Zn-sc2, Zn-sc3, Zn-l2, Zn-l3, Zn-ps1	

Примечание: Полу жирным отмечены элементы с высокой кросс-видовой кластеризацией; полу жирным курсивом – с устойчивой внутривидовой кластеризацией.

Как видно из данных, некоторые элементы демонстрируют высокую степень концентрации в одном кластере независимо от породы дерева. К ним относятся: Са (10 из 12 наблюдений попадают в один кластер), Со (11 из 12 наблюдений) и Р (11 из 12). Наибольший интерес представляют важные биогенные элементы, Са и Р, которые отнесены по результатам анализа в кластеры № 1 и 3 соответственно.

Кластер № 1 характеризуется тем, что как запасы элементов, так и их концентрации уменьшаются от сердцевины ствола к его периферии (линейные тренды имеют отрицательный наклон). Кроме того, вариабельность и запасов, и концентраций выше средней. В кластере № 3 запасы и концентрации, напротив, растут от сердцевины ствола к периферии. При этом вариабельность концентраций выше средней, а запасов – около среднего значения.

Распределение ряда других элементов показывает известную привязку к породе дерева, по меньшей мере в рамках вида. Так, Мп, Рb и Сl в древесине сосны обыкновенной группируются всегда в одном и том же кластере (Мп и Рb – в кластере № 1, Сl – в кластере № 3). Аналогично ведут себя Рb, Сr, Мп, Ni, Sr, V, W и Сl в ели, Рb в лиственнице, Рb в сосне сибирской.

В работах, выполненных с применением кластерного анализа [1, 13, 22, 26], исходный материал, как правило, касался одного вида деревьев. В настоящем исследовании благодаря закладке долговременного эксперимента получены данные по нескольким видам, что позволяет поставить вопрос о видоспецифичности распределения химических элементов в стволах деревьев.

На основе представленных в таблице данных можно сделать вывод, что для некоторых элементов (Са, Со, Р) весьма вероятно отсутствие какой-либо видоспецифичности, поскольку почти все наблюдения по этим элементам группируются в одном и том же кластере. Вместе с тем в распределении Рb, Сr, Мп, Ni, Sr, V, W и Сl вероятно ожидать видоспецифичности. Иными словами, характер их распределения в стволах может быть связан с видовой природой породы.

Распределение Са. Са является важным биогенным элементом, задействованным во множестве физиологических процессов [19]. Из полученных данных следует, что в большинстве случаев содержание Са уменьшается от сердцевины ствола к его периферии. Даже отдельные наблюдения, не попавшие в кластер № 1 (сосна обыкновенная № 2 и сосна сибирская № 3), тем не менее в целом демонстрируют нисходящий тренд (рис. 3). Можно заключить, распределение Са в стволах деревьев, по меньшей мере хвойных, подчиняется указанной закономерности.

Причина этого феномена пока не нашла удовлетворительного объяснения. Т.В. Бергер с соавторами [10] изучали круговорот Са и его содержание в стволах ели обыкновенной в чистых и смешанных насаждениях. Одна из рассмотренных учеными причин уменьшения содержания Са от сердцевины ствола к периферии состояла в возможной связи между депонированием Са и скоростью роста. Предположительно, при высокой скорости роста Са «разбавляется» прирастающей древесиной.

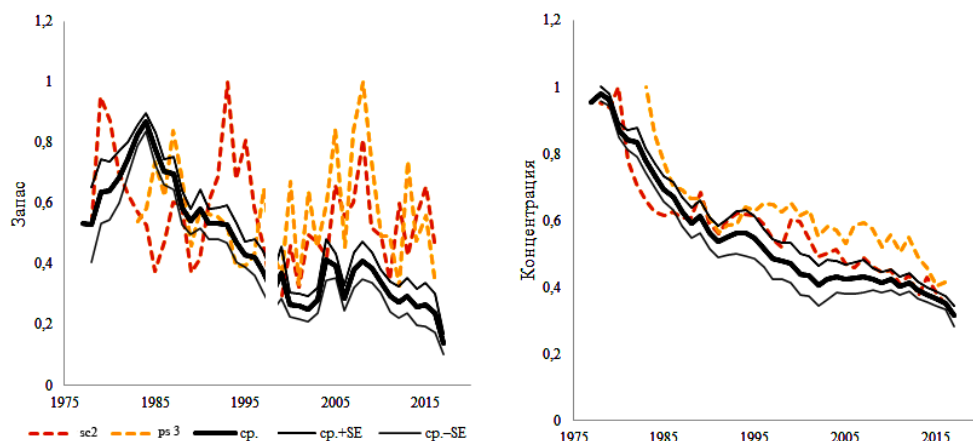


Рис. 3. Распределение запасов (слева) и концентраций (справа) Ca в годичных кольцах пород: ср. – среднее значение по деревьям кластера № 1; SE – стандартная ошибка среднего

Fig. 3. Distribution of reserves (left) and concentrations (right) of Ca in tree rings of studied species: ср. – mean value for trees in cluster no. 1; SE – standard error of mean

На рис. 4 приведено соотношение площади годичного кольца (как оценки скорости роста) и концентрации отсчетов по Ca в стволе ели № 3. Представленные данные свидетельствуют о том, что однозначной отрицательной связи между этими показателями не наблюдается. Можно ожидать положительной связи концентрации Ca в годичных кольцах ели и более высокой скорости роста.

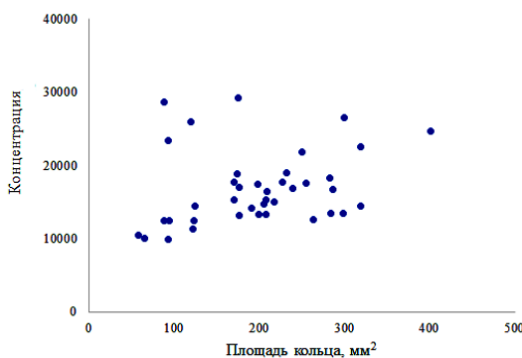


Рис. 4. Соотношение площади кольца и концентрации Ca в годичных кольцах ели № 3

Fig. 4. Relationship of ring area and Ca concentration in tree rings of spruce no. 3

Распределение Pb. Свинец принадлежит к группе тяжелых металлов которые являются типичными антропогенными загрязнителями. Основные источники этих поллютантов – транспорт и промышленные предприятия [16]. Вопрос, насколько методы дендрохимии применимы для мониторинга загрязнения среды свинцом, представляет существенный интерес ввиду доступности элементного анализа и широкого распространения зеленых насаждений.

Данные, полученные в ходе исследования, свидетельствуют о том, что распределение свинца в сериях годичных колец может зависеть от породы дерева (см. таблицу). В частности, для сосны обыкновенной и ели характерно снижение содержания свинца, в то время как содержание свинца в стволах лиственницы и сосны сибирской увеличивается от сердцевины к периферии (рис. 5).

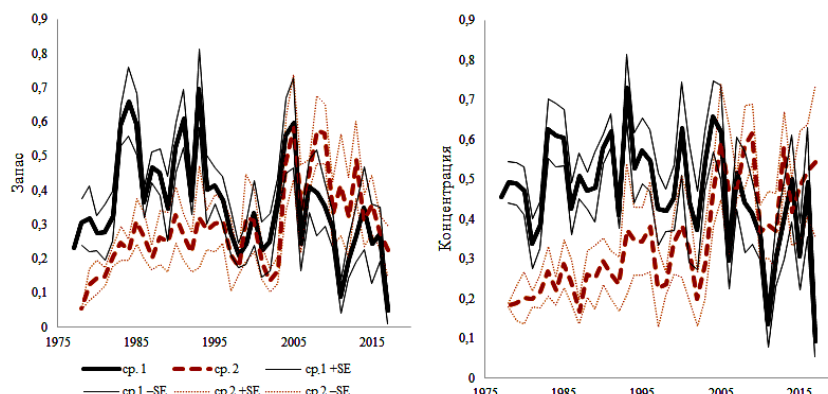


Рис. 5. Распределение запасов (слева) и концентраций (справа) Pb в годичных кольцах исследованных пород: cp. 1 и cp. 2 – средние значения для деревьев из кластера № 1 и № 2 соответственно

Fig. 5. Distribution of reserves (left) and concentrations (right) of Pb in tree rings of the studied species: cp. 1 and cp. 2 – mean values for trees in clusters no. 1 and no. 2, respectively

Важно отметить, что нарастание количества свинца в годичных кольцах не может быть объяснено усилением загрязнения окружающей среды этим элементом, т. к. исследованные древостои находятся в непосредственной близости друг от друга. Если за свинцовым загрязнением предполагается следить посредством анализа годичных колец, то для сравнимости результатов методика должна подразумевать изучение одной и той же породы дерева. Ранее Р. Биндлер с соавторами [11] пришли к выводу, что использование годичных колец сосны в целях мониторинга свинцового загрязнения (в основном атмосферного происхождения) весьма затруднительно, т. к. деревья значительную часть свинца поглощают из глубоких горизонтов почвы.

Заключение

Содержание химических элементов в годичных кольцах хвойных деревьев характеризуется существенной вариабельностью. Закономерности распределения элементов могут быть изучены с помощью методов многомерной классификации, таких как кластерный анализ.

Привлечение в настоящем исследовании материалов многолетнего многовидового эксперимента позволяет значительно расширить представления о распределении различных химических элементов в стволах хвойных деревьев. В подобных исследованиях часто наблюдается значительная вариабельность результатов. Особенно важно установить по крайней мере некоторые устойчивые факты, а также задействовать более широкий спектр видов, что поможет сконцентрироваться на отдельных надежных направлениях исследований и избежать неверных интерпретаций в силу разнообразности наблюдаемых в стволах процессов.

В ходе изучения изменчивости содержания элементов в годичных кольцах был установлен ряд потенциально перспективных закономерностей. Два важнейших биогенных макроэлемента, Са и Р, демонстрируют существенную

устойчивость распределения в стволах рассмотренных хвойных пород независимо от породы и индивидуального дерева. Как правило, содержание Са падает от центра ствола к периферии, а содержание Р – растет.

Изменчивость ряда важных элементов – Mn, Cl и в особенности Pb – по-видимому, связана с фактором вида. Эта связь выражается в том, что данные, относящиеся к виду (деревьям одной породы), часто концентрируются в одном и том же кластере, т. е. обладают схожими характеристиками распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. 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 // Вестн. МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 3. С. 25–35. Demakov Yu.P., Shvetsov S.M., Talantsev V.I., Kalinin K.K. Dynamics of Ash Constituents Content in Annual Rings of Old-Growth Pines Growing at the Floodplain Biotopes. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Bulletin of the Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2011, no. 3, pp. 25–35.

2. 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. 302 с. Kazimirov N.I., Volkov A.D., Zybchenko S.S., Ivanchikov A.A., Morozova R.M. *Exchange of Matter and Energy in Pine Forests of European North*. Leningrad, Nauka Publ., 1977. 302 p.

3. Казимиров Н.И., Морозова Р.М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука. 1973. 176 с. Kazimirov N.I., Morozova R.M. *Biological Cycle of Substances in Spruce Forests of Karelia*. Leningrad, Nauka Publ., 1973. 176 p.

4. Медведев И.Ф., Деревягин С.С., Козаченко М.А., Гусакова Н.Н. Оценка содержания химических элементов в древесине различных пород деревьев // Аграр. науч. журн. 2015. № 11. С. 12–14. Medvedev I.F., Derevyagin S.S., Kozachenko M.A., Gusakova N.N. Estimation of Chemical Elements Content in the Various Trees Wood. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [The Agrarian Scientific Journal], 2015, no. 11, pp. 12–14.

5. Осипов А.Ф., Манова С.О., Бобкова К.С. Запасы и элементный состав растений почвенного покрова в среднетаежных сосняках послепожарного происхождения (Республика Коми) // Растит. ресурсы. 2014. Т. 50, вып. 1. С. 3–11. Osipov A.F., Manova S.O., Bobkova K.S. Reserves and Element Composition in Ground Cover Plants in the Pine Forests of Post-Fire Origin (The Komi Republic). *Rastitelnye Resursy*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 3–11.

6. Хантемиров Р.М. Биоиндикация загрязнения среды в прошлом на основе анализа содержания химических элементов в годичных слоях древесины // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 1996. Т. 16. С. 153–164. Hantemirov R.M. Bioindication of Environmental Pollution History through Tree Rings Chemical Analysis. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 1996, vol. 16, pp. 153–164.

7. Четвериков А.Ф. Химический состав годичных слоев прироста деревьев и условия природной среды // Дендрохронология и дендроклиматология. Новосибирск: Наука, 1986. С. 126–130. Chetverikov A.F. Chemical Composition of Annual Layers of Tree Growth and Environmental Conditions. *Dendrochronology and Dendroclimatology*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. pp. 126–130.

8. Шугалей Л.С., Семечкина М.Г., Яшихин Г.И., Дмитриенко В.К. Моделирование развития искусственных лесных биогеоценозов. Новосибирск: Наука, 1984. 152 с. Shugaley L.S., Semechkina M.G., Yashikhin G.I., Dmitriyenko V.K. Modeling the Development of Artificial Forest Biogeocenoses. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 152 p.
9. Baes C.F., McLaughlin S.B. Trace Elements in Tree Rings: Evidence of Recent and Historical Air Pollution. *Science*, 1984, vol. 224, iss. 4648, pp. 494–497. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.224.4648.494>
10. Berger T.W., Köllensperger G., Wimmer R. Plant-Soil Feedback in Spruce (*Picea abies*) and Mixed Spruce-Beech (*Fagus sylvatica*) Stands as Indicated by Dendrochemistry. *Plant and Soil*, 2004, vol. 264, no. 1-2, pp. 69–83. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047714.43253.25>
11. Bindler R., Renberg I., Klaminder J., Emteryd O. Tree Rings as Pb Pollution Archives? A Comparison of $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ Isotope Ratios in Pine and Other Environmental Media. *Science of The Total Environment*, 2004, vol. 319, iss. 1-3, pp. 173–183. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00397-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00397-8)
12. 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. DOI: <https://doi.org/10.1139/x89-092>
13. Goldberg E.L., Zolotarev K.B., Maksimovskaya V.V., Kondratyev V.I., Ovchinnikov D.V., Naurzbaev M.M. Correlations and Fixation of Some Elements in Tree Rings. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, vol. 575, iss. 1-2, pp. 196–198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.01.066>
14. 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02164193>
15. Hevia A., Sánchez-Salguero R., Camarero J.J., Buras A., Sangüesa-Barreda G., Galván J.D., Gutiérrez E. Towards a Better Understanding of Long-Term Wood-Chemistry Variations in Old-Growth Forests: A Case Study on Ancient *Pinus uncinata* Trees from the Pyrenees. *Science of The Total Environment*, 2018, vol. 625, pp. 220–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.229>
16. Hou S., Zheng N., Tang L., Ji X., Li Y., Hua X. Pollution Characteristics, Sources, and Health Risk Assessment of Human Exposure to Cu, Zn, Cd and Pb Pollution in Urban Street Dust across China between 2009 and 2018. *Environment International*, 2019, vol. 128, pp. 430–437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.046>
17. Liu Y., Ta W.Y., Bao T.Y., Yang Z.Y., Song H.M., Liu N., Wang W.P., Zhang H.Y., Zhang W., An Z.S. Trace Elements in Tree Rings and Their Environmental Effects: A Case Study in Xi'an City. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, vol. 52, pp. 504–510. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0048-5>
18. 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, pp. 880–888. DOI: <https://doi.org/10.1139/x89-134>
19. McLaughlin S.B., Wimmer R. Calcium Physiology and Terrestrial Ecosystem Processes. *New Phytologist*, 1999, vol. 142, iss. 3, pp. 373–417. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00420.x>

20. Menyailo O.V., Hungate B.A., Zech W. Tree Species Mediated Soil Chemical Changes in a Siberian Artificial Afforestation Experiment. *Plant and Soil*, 2002, vol. 242, iss. 2, pp. 171–182. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016290802518>

21. Padilla K.L., Anderson K.A. Trace Element Concentration in Tree-Rings Biomonitoring Centuries of Environmental Change. *Chemosphere*, 2002, vol. 49, iss. 6, pp. 575–585. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00402-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00402-2)

22. Panyushkina I.P., Shishov V.V., Grachev A.M., Knorre A.A., Kirdyanov A.V., Leavitt S.W., Vaganov E.A., Chebykin E.P., Zhuchenko N.A., Hughes M.K. Trends in Elemental Concentrations of Tree Rings from the Siberian Arctic. *Tree-Ring Research*, 2016, vol. 72, no. 2, pp. 67–77. DOI: <https://doi.org/10.3959/1536-1098-72.02.67>

23. Prohaska T., Stadlbauer C., Wimmer R., Stinger G., Latkoczy C., Hoffmann E., Stephanowitz H. Investigation of Element Variability in Tree Rings of Young Norway Spruce by Laser-Ablation-ICPMS. *The Science of the Total Environment*, 1998, vol. 219, iss. 1, pp. 29–39.

24. Schugalei L.S. The Siberian Afforestation Experiment: History, Methodology, and Problems. Ed. by D. Binkley, O. Menyailo. *Tree Species Effects on Soils: Implications for Global Change*. Springer, Dordrecht, 2005, pp. 257–268. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-3447-4_15

25. Selin E., Standzenieks P., Boman J., Teeyasoontranont V. Multi-Element Analysis of Tree Rings by EDXRF Spectrometry. *X-Ray Spectrometry*, 1993, vol. 22, iss. 4, pp. 281–285. DOI: <https://doi.org/10.1002/xrs.1300220420>

26. Vaganov E.A., Grachev A.M., Shishov V.V., Panyushkina I.P., Leavitt S.W., Knorre A.A., Chebykin E.P., Menyailo O.V. Elemental Composition of Tree Rings: A New Perspective in Biogeochemistry. *Doklady Biological Sciences*, 2013, vol. 453, pp. 375–379. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0012496613060203>