

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Ле Тхи Хонг Шанг

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ
ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОГО РАЙОНА (РОССИЯ) И ЮЖНЫХ ПРОВИНЦИЙ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ

Специальность 1.6.21 – Геоэкология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук,
профессор Барановская Н. В.

Томск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 ПРИМЕНЕНИЕ ДЕНДРОЛОГИЧЕСКИХ И ДЕНДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ	11
2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	29
2.1 Объект исследования	29
2.2 Отбор проб и пробоподготовка.....	31
2.3 Аналитические методы	38
2.3.1 Измерения ширины годовых колец и перекрестная датировка	39
2.3.2 Атомно-абсорбционный анализ ртути	40
2.3.3 Инструментальный нейтронно-активационный анализ	42
2.3.4 Методы плазменной спектроскопии	44
2.3.5 Методика осколочного радиографического исследования	45
2.3.6 Статистическая обработка данных	49
3 СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ В ГОДОВЫХ КОЛЬЦАХ ДЕРЕВЬЕВ КАК ИНДИКАТОР ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ.....	52
3.1 Эколого-геохимическая оценка ртутной нагрузки на территории Томского района по результатам изучения годовых колец деревьев.....	52
3.2 Эколого-геохимическая оценка ртутной нагрузки на территории г. Далат, Социалистическая Республика Вьетнам по результатам изучения годовых колец деревьев	58
3.3 Сравнительная характеристика ртутной нагрузки на территории Сибири и Республики Вьетнам по результатам изучения годовых колец деревьев.....	62
3.4 Влияние климатических характеристик на поступление ртути в годовые кольца	71
4 Зависимость ширины годовых колец от факторов окружающей среды.....	80
5 ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГОДОВЫХ КОЛЬЦАХ ДЕРЕВЬЕВ КАК ИНДИКАТОР ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА ТЕРРИТОРИИ Г. ДАЛАТ, СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА ВЬЕТНАМ.....	93
5.1 Биогеохимическая индикация природных обстановок г. Далат	93
5.2 Биогеохимическая индикация особенностей территории г. Далат, Республики Вьетнам с применением метода инструментального нейтронно – активационного анализа	110
5.3 Биогеохимическая индикация техногенных обстановок.....	122
6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ НАКОПЛЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ГОДОВЫХ КОЛЬЦАХ ДЕРЕВЬЕВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ОСКОЛОЧНОЙ F-РАДИОГРАФИИ. 130	
6.1 Влияние ядерных испытаний на распределение глобальных выпадений	130
6.2 Распределения плотности треков от осколков деления в древесных ядрах на территории провинции Зялай Республики Вьетнам	134
6.3 Распределение плотности треков от осколков деления в древесных ядрах на территории г. Далат Республики Вьетнам.....	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	153

ВВЕДЕНИЕ

Среди всех компонентов живого вещества [1] древесные растения обладают уникальной способностью фиксировать изменения окружающей среды в годовых кольцах, что делает их оптимальными объектами для ретроспективного анализа и индикаторами изменений, происходящих в геосферных оболочках методами дендрохронологии и дендрогеохимии [2-5]. Для территорий со сложной природно – техногенной обстановкой дендрогеохимические исследования, позволяющие определять специфику локальных и глобальных техногенных выпадений и показывать их трансформацию в исторической перспективе, являются весьма актуальными.

Территория Томской области, в частности Томский район и его Северный промышленный узел [6, 7] уже являлись объектом таких исследований [3, 8-13]. В отличие от территорий Томской области, в Республике Вьетнам такие исследования практически не проводились. Локальные радио-эколого-геохимические ситуации территории Республики Вьетнам сформированы под воздействием военных действий прошлого века [14-15], глобальных выпадений токсичных элементов, связанных с расположением региона в одной из интенсивных точек загрязнения Юго-Восточной Азии [16-22], а также близостью к Китайскому ядерному полигону Лобнор. Данные для сравнения уровня накопления элементного состава на территории Сибири и Республики Вьетнам в зависимости от воздействия локального техногенеза на фоне глобальных изменений отсутствуют. В связи с этим актуальность работы обусловлена необходимостью получения новых данных для этих территорий.

Цель данной работы – выявление особенностей динамики изменения дендрогеохимических и дендрохронологических показателей древесных растений в зависимости от эколого-геохимической обстановки территории произрастания (на примере территорий южных провинций Социалистической Республики Вьетнам и территории Томского района Томской области, Россия)

Задачи исследования:

1. Выявить особенности изменения ширины годовых колец в районах Сибири (Томская область, Томский район) и Вьетнама (южные провинции);
2. Провести ретроспективный анализ ртутной нагрузки, обусловленной техногенными и природными факторами, а также особенностями климата на двух изучаемых территориях;
3. Выявить особенности элементного состава годовых колец сосны г. Далат, Социалистической Республики Вьетнам, формирующегося под влиянием антропогенных и естественных факторов;
4. Изучить особенности распределения делящих радиоактивных элементов в годовых кольцах сосны, обусловленных воздействием как глобальных выпадений, так и локальных факторов.

Объектами исследования являются сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и сосна далатенская (*Pinus dalatensis* Ferré) территорий с различными природно-техногенными эколого-геохимическими обстановками Томского района (Россия) и южных провинций Республики Вьетнам.

Фактический материал. Фактическим материалом для написания данной работы послужили образцы, собранные автором в период с 2021 по 2024 годы на территории Томского района и в феврале 2024 года – на территории Республики Вьетнам. Динамика накопления химических элементов под воздействием антропогенных и природных факторов керны сосны была изучена на основании следующего принципиального отбора пробы:

- на территории Томской области выбраны четыре точки. Две точки - с. Пашино («Пашино») и мкр. Тимирязево («Тимирязево») расположены в зоне с минимальным воздействием города, на подветренной стороне от города. Две другие – «Реактор» и «Томскнефтехим» – подвержены воздействию промышленного и коммунального сектора (СПУ) г. Томска.
- на территории г. Далат отобраны шесть точек, характеризующих определенными эколого-геохимическими условиями.

- на территории провинций Даклак и Зялай, расположенных примерно в 280 км и 360 км соответственно к северу от г. Далат и считающихся зонами с наименьшим техногенным воздействием на окружающую среду по одной точке.

Таким образом, за период с 2021 по 2024 гг. проведено опробование 12 пунктов с отбором 24 проб древесных кернов и 1 пробы древесного спила и изучено 2078 годовых колец.

Методы исследования. Границы древесных колец проводилось с помощью прибора ЛИНТАБ с программным обеспечением TSAP-Win (444 пробы годовых колец) при содействии к.г.-м.н. Ляпиной Е.Е. в лаборатории динамики и устойчивости экосистем в Институте мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН (г. Томск). Все анализы пробы выполнены на базе оборудования Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета, включающего атомно-адсорбционный метод (ААС) (к.х.н Осипова Н. А., к.г.-м.н. Ляпина Е. Е.), инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) и осколочную f-радиографию (f-радиография) (с.н.с. Судыко А.Ф.). Масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) определено содержание 72 химических элементов в кернах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии (зав. лаб. к.г.-м.н. Хвощевская А.А., аналитик Куровская В.В.). Всего было проанализировано 600 проб на ртуть, 37 проб с использованием ИНАА, 10 проб на ИСП-МС и 3 пробы (в том числе 2 керна и 1 спил) с применением f-радиографии.

Достоверность защищаемых положений. Достоверность результатов обеспечивается анализом значительного количества образцов древесины с использованием современных высокочувствительных аналитических методов, обработкой значительных экспериментальных данных с использованием статистики и глубиной изучения литературы по теме исследования. Статистическая обработка данных выполнялась при доверительной вероятности 95%.

Научная новизна.

- Впервые использованы биоиндикаторы для проведения исторической реконструкции и сравнения изменения геохимии природно-техногенных факторов территорий Томской области и южных провинций Республики Вьетнам.

- Впервые установлены закономерности ртутной нагрузки в зависимости от разных локальных эколого-геохимических ситуаций исследуемых территорий. Выявлено, что ширина годовых колец хвойных деревьев (*Pinus sylvestris* L. и *Pinus dalatensis* Ferré) не отличается по значениям и имеет тенденцию к уменьшению к современному периоду. Динамика изменения ширины годовых колец зависит от суммы осадков в двух климатических зонах.

- Впервые установлена специфика накопления химических элементов в кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) территорий южных провинций Республики Вьетнам и её зависимость от локальных эколого-геохимических условий с выделением элементов индикаторов этих условий.

- Впервые для территории южных провинций Республики Вьетнам (г. Далат и провинции Зялай) установлена тенденция распределения осколков деления радиоактивных элементов и выявлена специфика их распределения в древесных кольцах, отобранных на территории южных провинций Социалистической Республики Вьетнам.

Практическая значимость

1. Данные ширины годовых колец деревьев могут вносить вклад в Международный банк данных древесных колец (ITRDB; <https://www.ncdc.noaa.gov/>).

2. Полученные результаты могут быть применены для решения глобальных и локальных задач экологического мониторинга, а также разработки практических рекомендаций по улучшению экологической ситуации.

3. Изменение концентрации химических элементов и их пространственное распределение в годовых кольцах деревьев имеет практическое значение поиска и обнаружения локальных геологических особенностей и наличия минералопроизводящих аномалий, обусловленных спецификой минерализации.

4. Результаты научных исследований могут быть использованы для разработки комплексной оценки антропогенного воздействия на окружающую среду и в учебных курсах направления «Экология и природопользование».

Положения, выносимые на защиту:

1. На территории Томского района Томской области (Россия) и южных провинций Социалистической Республики Вьетнам среднее содержание ртути имеет тенденцию к уменьшению к современному периоду. Максимальная концентрация Hg характерна для периода 1930-1970 гг. не зависимо от территорий с различием в медианных содержаниях, обусловленных локальными эколого-геохимическими условиями.

2. Индикаторами природной геохимической обстановки территории г. Далат Социалистической Республики Вьетнам в составе древесины сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) являются элементы, равномерно распределяющиеся по кольцам (K, Ca, Rb, Zn) с преимущественным концентрированием кремния и редкоземельных элементов в древесине. Техногенез отражается в существенном концентрировании на территории городской агломерации хрома и железа в кольцах древесины, а также в накоплении натрия и мышьяка в кольцах древесины, соответствующие военным действиям.

3. Формы распределения делящихся частиц в кольцах сосны далатенской имеют характер равномерный и локальный (в виде «звезд» и скоплений). Метод осколочной f-радиографии позволяет утверждать, что максимальной напряженностью радиоэкологической ситуации на территории расположения г. Далат Социалистической Республики Вьетнам характеризуется период 40-60 х гг. прошлого столетия, для которого характерно максимальное концентрирование «звезд» и скоплений делящихся элементов в составе древесных колец.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались на межвузовских и международных научных и научно-практических конференциях: XIII Международной Биогеохимической школе «Эволюция биосферы, биогеохимические циклы и биогеохимические технологии: связь фундаментальных и прикладных исследований», посвященной 160-летию со

дня рождения Владимира Ивановича Вернадского в 2023г. (г. Москва); XXVI Международной экологической студенческой конференции (МЭСК-2023, г. Новосибирск); VII, VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экология и управление природопользованием» в 2023, 2024 гг. (г. Томск); XXVIII, XXIX Международном молодежном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» в 2024 г (г. Томск). XIV Международной биогеохимической школы-конференции «Проблемы геохимической экологии в условиях техногенеза биосферы» в 2025 г. (г. Томск).

Публикации

1. Ляпина Е.Е., Ле Т.Х.Ш., Крачнакова М.Г., Барановская Н.В., Маркелова А.Н., Золотов С.Ю. Дендрогеохимия Hg по данным изучения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на территории Томского района // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 125–136. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4602
2. Ле Т.Х.Ш., Барановская Н.В., Ляпина Е.Е., Крачнакова М.Г. Закономерности концентрирования ртути в годовых кольцах деревьев территорий Сибири (Россия) и Республики Вьетнам // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 215–230. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4930
3. Барановская Н.В., Ле Т.Х.Ш. Эколого-геохимические исследования территории расположения города Далат Социалистической Республики Вьетнам с использованием метода дендрогеохимии // Вестник Забайкальского государственного университета. 2025 – Т. 31, No 1. – С. 8–20. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-1-8-20

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографии, включающей 287 источников. Изложена на 187 страницах машинописного текста, содержит, в том числе, 25 таблицы, 77 рисунков.

В главе 1 представлен краткий обзор применения дендрогеохимических и дендрохронологических показателей в мониторинге качества окружающей среды.

В главе 2 описаны материалы и методы исследования: полевые, лабораторные методы исследования, а также камеральная обработка данных. В главе 3 дана характеристика распределения ртути и установлена динамика накопления ртутной нагрузки в древесине сосны в зависимости от локальной эколого-геохимической обстановки и особенностями климата в разных изучаемых территориях. В главе 4 приведены сведения о климате Сибири и Республики Вьетнам и приведена характеристика изменения ширины годовых колец на протяжении всего возраста сосен, произрастающих в разных климатических зонах. В главе 5 представлены характеристики распределения химических элементов в древесине сосен на территории, подверженной техногенному воздействию, и в условно-фоновом районе, приведены элементы, являющиеся природными и техногенными индикаторами. В главе 6 описаны особенности распределения делящихся частиц в древесине сосны на территории южных провинций Республики Вьетнам и выявлены накопления плотности треков от осколков деления, связанных с глобальными выпадениями и локальными радиоэкологическими обстановками, обнаруженные с применением метода f-радиографии.

Личный вклад. Автор осуществлял отбор кернов деревьев в Томской области и Вьетнаме с 2021 по 2024 гг., а также лично участвовал в полевых экспедициях. Под руководством научного руководителя автор подготовил образцы к анализу, проводил измерение ширины годовых колец, а также определял содержание ртути и изучал характер распределения треков под микроскопом. Кроме того, автором самостоятельно проведена статистическая обработка результатов, построены графики и схемы размещения точек отбора проб, дана их интерпретация к полученным результатам, сформулированы защищаемые положения, представленные в диссертационной работе, на основе системного анализа полученных фактических данных.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, профессору, д.б.н. Н.В. Барановской, за ценную помощь, консультации, рекомендации и практическую поддержку на протяжении всего периода подготовки диссертации. Более того автор признателен к.г.-м.н. Е.Е.

Ляпиной за помощь в процессе пробоподготовки, измерении ширины колец и анализа ртути, а также за практическую поддержку и существенные замечания в течении всего периода выполнения работы. Особую благодарность автор выражает исполнителям аналитических исследований: А.Ф. Судыко, Л.В. Богутской, к.г.-м.н. А.А. Хващевской и В.В. Куровской. Автор выражает сердечную благодарность сотрудникам ОГ ИШПР за искреннюю помощь и советы: д.г.-м.н. С.И. Арбузову, д.г.-м.н. Е.Г. Языкову, к.г.-м.н. И.С. Соболеву, к.х.н. Н.А. Осиповой, к.г.-м.н. Л.В. Жорняк, к.г.-м.н. Б.Р. Соктоеву, а также всем остальным сотрудникам за поддержку. Особенную благодарность автор приносит магистранту отделения геологии М.Г. Крачнаковой за помощь в процессе пробоподготовки древесного керна и написания статей.

1 ПРИМЕНЕНИЕ ДЕНДРОЛОГИЧЕСКИХ И ДЕНДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Под влиянием развития промышленности и урбанизации окружающая среда становится все более уязвимой. Ухудшение состояния окружающей нас среды представляет собой неизбежный результат этих процессов. Актуальным при устойчивым развитии регионов является вопрос организации экологического мониторинга. Одним из наиболее эффективных и экономичных методов мониторинга состояния окружающей среды являются методы с применением биологических индикаторов [1, 23–24].

Мониторинг с применением стратифицированных природных образований (таких как ледяные керны, торф, донные отложения, кольца деревьев и др.) в последние десятилетия привлекает интерес ученых-экологов и служит важным инструментом для оценки изменений, происходящих в экосистемах [25–37]. Характеристика этих природных образований определяется последовательной записью информации об изменении окружающей среды во времени [38–43]. Каждый из этих индикаторов предоставляет уникальную информацию о состоянии экосистем и позволяет воспроизводить динамику загрязнения за длительный промежуток времени [44–47].

Древесные растения служат чувствительными природными архивами. Они выступают в качестве датчика локального и глобального экологического состояния различных компонентов окружающей среды, включая биосферу, гидросферу, атмосферу и почву, поглощают загрязняющие вещества и накапливают их в древесине [44, 48–50]. Помимо того, что растение отражает физиологическую адаптацию к изменениям колебаний окружающей среды, они закрепляют поллютанты в такни годовых колец во время их формирования [51]. Именно этот факт позволяет использовать метод дендрогеохимии в качестве наиболее информативного при оценке ретроспективных изменений, происходящих в биосфере [52–58]. В качестве эффективного биологического индикатора растения обладают значительными преимуществами высокого разрешения в пространственно-временных масштабах, а также точной временной датировки.

Дендрохронология является наукой, которая занимается изучением годовых колец деревьев с целью реконструкции прошлых климатических условий (дендроклиматология) и датирования времени образования годовых колец и событий прошлого (собственно дендрохронология) [59].

За последние 50 лет на стыке дендрохронологии, дендроклиматологии и геохимии возникла новое направление дендрохронологии – дендрогеохимия [3, 8, 60].

Дендрогеохимия позволяет анализировать концентрацию элементов в кольцах деревьев для оценки химических изменений, происходящих в природной среде [61–63]. Метод дендрогеохимии обладает рядом преимуществ для анализа потенциальных загрязняющих событий. Прежде всего, метод использует простой подход к отбору проб в полевых условиях, не требующий использования сложного оборудования, и объекты исследования имеют широкую сферу распространения. Предыдущие применения дендрогеохимических данных показали, что под влиянием своеобразных погодно-климатических колебаний, геохимического фона подстилающих пород, ландшафтов и выбросов из атмосферы могут изменяться клеточная структура и морфологические характеристики годовых колец [60, 64–67]. Дендрогеохимические данные позволяют восстановить для достаточно длительных отрезков времени локальные, региональные и глобальные экологические тенденции [68, 69]. Все это дает основания предполагать, что дендрогеохимический анализ может служить надежным методом изучения динамики процессов от прошлого к настоящему [70–75].

Биогеохимическая индикация берет свое начало с работ В.И. Вернадского, проводимых с 1918 г. В этих работах он изучал животных и растения для определения содержания химических элементов в зависимости от окружающей их среды. Созданная В. И. Вернадским первая биогеохимическая лаборатория (БИОГЕЛ) начала новые исследования в биогеохимии 1 октября 1928 г.

За рубежом первые работы, в которых начали систематизировать изучение годовых колец деревьев в западной части Северной Америки, были проведены астрономом А. Е. Дугласом еще в XIX в. Он интересовался циклической природой

солнечной активности, особенно солнечных пятен, и ее связью с земным климатом. В 1937 г. А. Е. Дуглас открыл первую в мире лабораторию по изучению древесных колец в Университете Аризоны [76]. А затем, вплоть до своей смерти в 1962 г., полностью посвятил себя разработке методов, использующих датировку колец деревьев для реконструкции гидрологических и климатических условий, определения взаимосвязи между ростом деревьев и солнечной активностью, а также для датировки археологической. Он одним из первых сформулировал и практически проверил основы дендрохронологии, показав важность засушливых регионов для хвойных пород как источника наиболее чувствительного датирования древесных колец, что позволило продемонстрировать и внедрить в практику метод перекрестного датирования [76].

С начала 70-х годов прошлого века модели загрязнения тяжелыми металлами в последовательных годовых кольцах роста предварительно отметили развитие науки дендрогеохимии [44].

Наиболее ранними исследованиями с применением дендрогеохимии с 1970-х гг. для мониторинга поступления химических элементов, в том числе радионуклидов в годовые кольца, обусловленного природными и антропогенными факторами, в частности, связанными с подкислением почвы, считаются работы в развитых странах Северной Америки и Европы [77–78].

Ault и Ward на основе анализа годовых колец вяза американского (*Ulmus americana*) установили прямую зависимость между содержанием свинца в годовых кольцах деревьев и плотностью дорожного движения [79, 80]. В противоположность двум указанным мнениям, Szora предположил, что не наблюдается снижения содержания свинца в годовых кольцах роста дуба бѐлого (*Quercus álba*), отобранных на автотрассе [81].

В 1975 г. Лепп провел краткий обзор путей поглощения и факторов, регулирующих поступление металлов в растения. Различные группы химических элементов поглощаются растениями через различные механизмы. Общая площадь ассимилирующей поверхности химического состава деревьев включает поверхности корней, коры и листьев [82–86]. Основные пути поступления

химического элемента характеризуются абсорбциями листьями и корнями [3, 44], причем, например, такой элемент, как ртуть, особенно активно поглощается листьями [87–89]. После выпадении радионуклидов и химических элементов из атмосферы в газообразной форме происходит их задержание кронами деревьев и абсорбция надземными частями (листвой и корой). В течение 2–3 лет после выпадении интенсивность поглощения химических элементов растениями через корневую систему характеризуется растворимостью минеральных веществ в жидкой и твердой формах [3].

Поэтому основное предположение дендрогеохимии заключается в том, что кольца деревьев отражают по крайней мере частичную картину химического состава среды произрастания растений [61, 90–92].

Ранее проведенные исследования [77] показали, что наблюдалась тенденция увеличения концентрация хлора в древесине в период с 1950 по 1975 гг., а также были зафиксированы разные уровни накопления 20 химических элементов в сердцевине и заболони (рисунок 1.1).

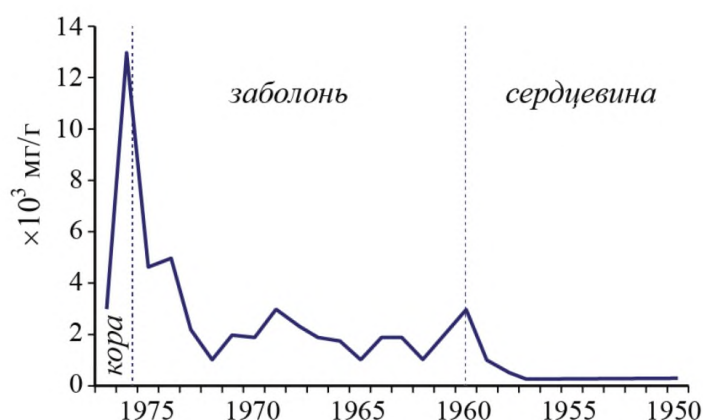


Рисунок 1.1 – Распределение хлора по годовым кольцам кедр [77]

Во второй половине XX в. исследования были направлены на определение тяжелых металлов в кольцах деревьев, среди которых распространены Pb, Cd, Cu, Zn, Al и другие. Как отмечено в проведенных работах, повышение содержания Pb, его соединений и других следов металлов были выявлены вблизи автотрасс в Иллинойсе, США [93], на металлургическом комплексе в северной части Швеции [94] и в Квебеке [95], в районах, удаленных от источников загрязнения в южных Аппалачских горах США [96], вдоль шоссе между городом и деревней,

протянувшегося на 150 км к востоку от Торонто, Канада [97], а также на металлообрабатывающем заводе в Швеции [98] и в районе добычи свинца в восточном Миссури [99].

Взаимосвязь между последствиями загрязнения воздуха и подкислением почв лесов наблюдалась не только в Северной Америке, но и в центральных европейских регионах в период с конца 1970-х по 1990-е гг. [78, 100]. Кроме того, немногими учеными были открыты потенциальные проблемы дендрогеохимии. К ним относятся способность перемещения химических элементов через границы колец, а также физиологические особенности различных видов растений.

На зависимость содержания химических элементов от возраста растения, а также на влияние физиологических процессов на их накопление в зоне прироста деревьев обращается внимание в работах [28, 88].

Синтез дендрогеохимических и дендрохронологических данных дает возможность эффективно интерпретировать хронологические аномалии, связанные с содержанием химических элементов. Анализ ширины годовых колец деревьев и их химического состава помогает выявить временные негативные влияния окружающей среды на биохимические процессы, происходящие в деревьях [64, 65, 101]. Исследование стабильных изотопов углерода и кислорода может быть использовано для восстановления вариаций температуры и осадков [102].

В большинстве современных исследований в области дендрогеохимии применяются новые методы, которые обнаруживают тяжелые металлы, химические и радиоактивные элементы и их изотопы в более низких пределах обнаружения и с большей скоростью и надёжностью, что позволяет изучать большее количество образцов и также расширять исследования. Нами проанализированы данные, полученные учеными для ряда территорий Российской Федерации. Содержание элемента в хвое и годовых кольцах деревьев, собранных в Алтайском крае, Республике Бурятия, Томской области, в регионах Сибири и Дальнего Востока, представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Содержание химических элементов в надземной части растения на территории России по оценкам специалистов

Элементы	По данным [103] (зола листьев тополя на территории 150 населенных пунктов) мг/кг сухого вещества	По данным [28] среднее содержание элементов (мг/кг) в золе лиственницы в Западном Алтае	По данным [8] (керы сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i> L.) мг/кг сухого вещества		
			Томская область	Кемеровская область	Республика Бурятия
Na	1303	930	6	15	11
Ca	142940	н.о.	894	651	484
Sc	0,57	2,7	0,0004	0,0004	0,0004
Cr	12,41	296	0,3	1	0,3
Fe	2945	н.о.	7	34	7
Co	9,34	н.о.	0,1	0,1	0,1
Zn	1248	1257,3	8	8	8
As	0,95	4,2	0,001	0,01	0,0004
Br	37,34	10,8	0,2	0,3	1
Rb	40,85	н.о.	0,5	0,3	0,3
Sr	1117	н.о.	3	3	7
Ag	0,16	5,5	0,02	0,03	0,04
Sb	0,50	2,0	0,002	0,002	0,002
Cs	0,36	1,94	0,01	0,01	0,004
Ba	250	н.о.	3	2	2
La	3,09	7,0	0,003	0,01	0,003
Ce	4,91	14,2	0,02	0,01	0,01
Nd	1,83	10,1	0,01	0,004	0,005
Sm	0,71	1,2	0,0002	0,0002	0,0002
Eu	0,08	н.о.	0,003	0,002	0,001
Tb	0,05	0,2	0,0004	0,0001	0,001
Yb	0,15	0,54	0,0003	0,0001	0,0004
Lu	0,02	0,09	0,0002	0,0002	0,001
Hf	0,22	1,1	0,0001	0,0001	0,0005
Ta	0,03	н.о.	0,001	0,001	0,0003
Au	0,01	н.о.	0,0004	0,0003	0,001
Th	0,50	1,73	0,0005	0,0003	0,001
U	0,25	0,46	0,002	0,004	0,003

Примечание: – н.о. – не определялся

Как видно из таблицы, вариативность содержания многих элементов в зависимости от региона и объекта весьма высока. Несомненным фактором, влияющим на эту вариативность, является техногенез территорий и природных геологических аномалий [104, 105].

По результате исследований [64, 65] содержание серы, фтора, тяжелых металлов и питательных элементов в растениях, собранных на разном удалении от промышленного узла на территории Западного Забайкалья и Иркутской области, значительно изменяется. Так, в хвое деревьев в условиях промышленного воздействия установлены самые высокие уровни накопления химических элементов: серы, фтора, свинца, кадмия, ртути, железа, цинка, кремния. На удалении в 15–60 км от источника выбросов их уровень в хвое сосны снижается, но остается повышенным по сравнению с фоновыми значениями. Концентрации загрязняющих веществ, наблюдаемые на расстоянии 60 км от источника загрязнения, соответствуют фоновым значениям (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Морфометрические характеристики сосны обыкновенной на разном удалении от Улан-Удэнского промузла [64]

Местоположение ПП, расстояние от Улан-Удэнского промузла, км	Длина побега, мм	Масса хвои побега, г	Число хвоинок на побеге, шт	Длина хвоинки	Масса 50 хвоинки, г	Продолжительность жизни хвои, лет	Дефолиация крон, %
Г. Улан – Удэ	112,8±3,2	2,44±0,25	93,3±5,6	42,6±2,5	0,74±0,04	2-3	65
с. Эрхирик, 15 км	111,7±4,8	2,61±0,23	107,2±5,8	40,7±3,5	0,79±0,09	3-4	45
п. Онохой, 40 км	122,6±5,2	2,64±0,25	119,1±6,2	53,6±3,5	0,82±0,08	4	30
с. Курба, 60 км	156,7±4,2	4,56±0,35	145,2±7,5	60,5±2,8	0,92±0,09	6	15-20
с. Онинборск, 180 км (фон)	150,6±4,6	4,57±0,32	163,0±4,5	63,5±3,9	0,96±0,09	6	25-30

Кроме того, для выяснения влияния среды обитания на дерево были изучены морфологические параметры растения, в том числе продолжительность жизни хвои, длина и масса ассимиляционных органов. Как свидетельствуют данные таблицы 1.2, растения, находящиеся в экологически загрязненной среде, способны демонстрировать снижение биологической продуктивности [64, 65].

В последнее время был проведен ряд исследований, направленных на изучение способности растений поглощать ртуть, поступающую от природных и антропогенных источников [63, 106–120].

Так, на основе анализа керна деревьев рядом авторов показано, что расстояние от места отбора проб до источника выбросов влияет на накопление Hg в годовых кольцах деревьев [62, 63, 103, 121, 122]. Накопление ртути в кольцах деревьев фиксируется и под воздействием природных факторов, таких как землетрясения и ртутная дегазация земли в период активации разломов [62, 72, 103, 110].

Результаты исследований, проведенных за последние 50 лет, показали надежность дендрогеохимии как инструмента для оценки стабильности архива колец деревьев. При этом надежность во многом определяется путем поглощения и подвижностью химических элементов в разных тканях растений. Ртуть поглощается из атмосферы через листья (через устьица или кутикулу), корни и кору, что делает ее надежным архивом изменений, происходящих в составе атмосферы [87, 123–126].

При оценке корреляции пиковых концентраций Hg в многолетних архивах (древесные, атмосфер и ледяные керны) служит надежным инструментом для выявления тенденции ее глобального выпадения в удаленных районах [45, 127–132]. Четко видно тенденция увеличения содержания Hg в годовых кольцах с 1800 года, которая достигает пика в 1960-х гг. (рисунок 1.2). Однако уровень и период повышенного содержания Hg в кольцах деревьев отличались от тех, что наблюдались в ледяных кернах. В данном исследовании предполагается гипотеза о радиальном перемещении Hg между границами колец деревьев [88, 112, 133, 134].

Как было показано ранее, перенос разных химических элементов (включая N, U, Pb, Rb) между кольцами при радиальной диффузии наблюдалось в разных видах деревьев, о чем свидетельствуют ссылки в работах [51, 88, 124, 135–141].

Перенос ртути в годовом кольце был обнаружен в экспериментах на деревьях 3–5 лет [88], в исследованиях загрязнения окружающей среды вблизи хлорно-щелочных заводов [140] и в исследовании поступления Hg в древесину в зоне воздействия извержения вулкана.

Однако на основании корреляции синхронной хронологии пика содержания ртути в древесном кольце по отношению к периоду максимальной эмиссии содержания Hg в атмосфере многие ученые исключили возможность перенос Hg при радиальных механизмах диффузии между границами годовых колец деревьев [46, 123, 124, 141].

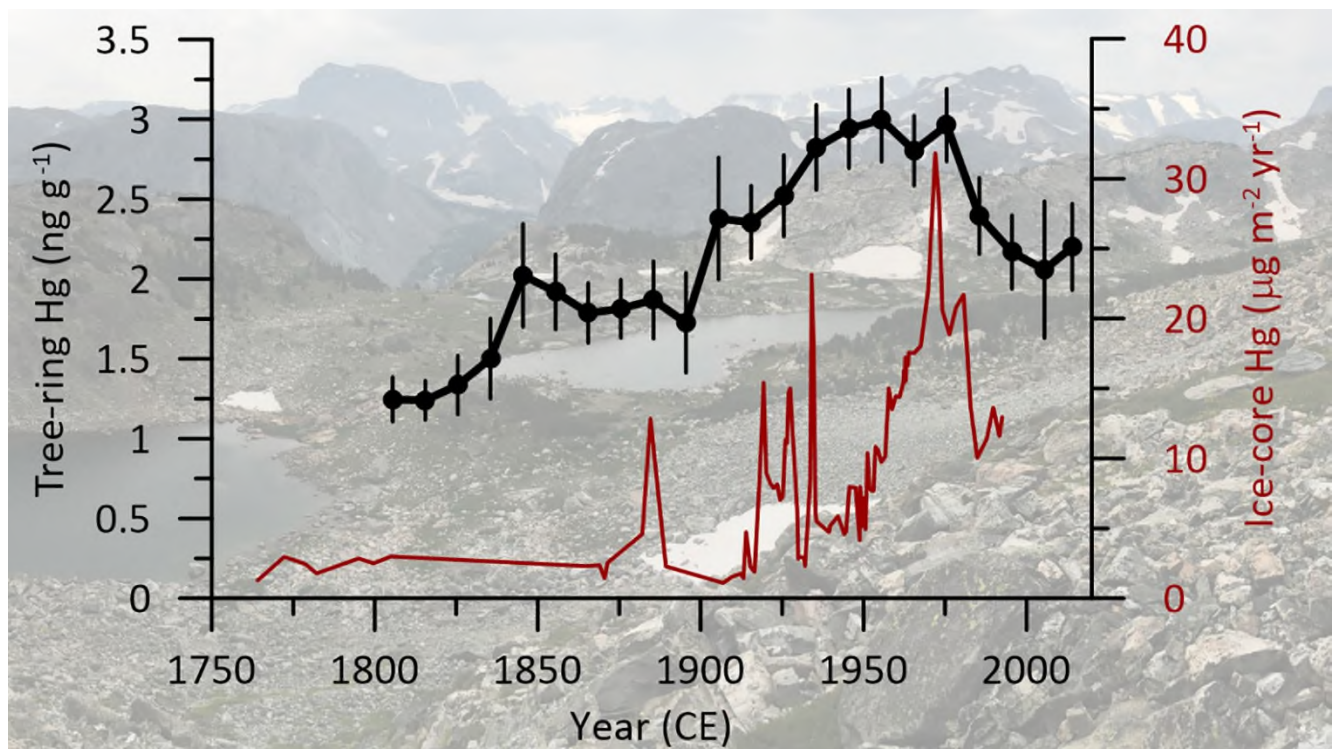


Рисунок 1.2 – Динамика изменения содержания ртути в годовых кольцах *Whitebark pine* и кернах льда в западной части штата Вайоминг, Америка [133]

Чтобы проверить зависимость поглощения Hg тканями растений, многие исследователи анализировали ее содержание в листьях [13, 142, 143], коре и кольцах деревьев [72, 87, 117, 119, 125, 144–148] или комплексно [9, 62, 71].

Таким образом, к настоящему времени в базу данных по содержанию ртути как в России, так и в мировом масштабе внесен существенный вклад на основании исследований верхних частей различных видов растений (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Валовое содержание ртути в верхней части растительности на территориях России и других регионов мира по оценкам специалистов

Регион	Вид растения	Среднее, нг/г	Литературный источник
<i>Керны</i>			
Байкальская рифтовая зона, Республика Бурятия, Россия	сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	12,8	[71, 72]
Томск, Россия	сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	80	[9]
Пензенской области, Россия	сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	0,0084	[107]
Северо-запад Алтайского края, Россия	сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	39	[87]
Северо-запад Алтайского края, Россия	лиственница сибирская (<i>Larix sibirica</i> L.)	27	[87]
Провинция Чунцин, Китай	Массонска сосна (<i>Pinus massoniana</i>)	4,5	[112]
г. Новосибирск, Россия	тополь бальзамический (<i>P. balsamifera</i> L.)	52	[62, 89]
Томск, Россия	тополь (<i>Populus balsamifera</i> L.)	94	[9]
Байкальская рифтовая зона, Республика Бурятия, Россия	тополь (<i>Populus suaveolens</i> Fisch.)	7,0	[72, 103]
Новосибирска, Россия	тополь (<i>Populus suaveolens</i> Fisch.)	30	[62]
г. Йосу, Корея	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	11,15	[62]
Северо-запад Канады	Ель белая (<i>Picea glauca</i>)	2,8	[146]
Штаты Калифорния и Невада, США	Сосна жеффрея (<i>Pinus jeffreyi</i>)	1,85	[124]
Горы Тянь-Шань на западе Китая	Ель Шренка (<i>Picea schrenkiana</i>)	3,79	[34]
Штаты Вайоминг, США	Сосна белокорая (<i>Pinus albicaulis</i>)	0,8-5,3	[133]
г. Сеара, Бразилии	Ризофора мангле (<i>Rhizophora mangle</i> L.)	1,1-31	[147]
<i>Хвое сосны</i>			
Томск, Россия	сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	115	[9]
Пензенской области, Россия	сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	0,01	[107]

Продолжение таблицы 1.3

Регион	Вид растения	Среднее, нг/г	Литературный источник
<i>в листьях тополя</i>			
Новосибирска, Россия	<i>тополь бальзамический (Populus balsamifera L.).</i>	61	[62, 89]
Республика Алтай, Россия	тополь лавролистный (<i>P. laurifolia Ldb</i>)	183	[149]
г. Шелехов, Россия	тополь душистый (<i>P. suaveolens Fisch</i>)	90	[149]
Новокузнецк, Россия	тополь черный (<i>Populus nigra L.</i>)	26,7	[108]
пос. Акташ в Республике Алтай, Россия	тополь черный (<i>Populus nigra L.</i>)	183	[149]
<i>лишайник</i>			
Томск, Россия	лишайники	35-337	[9]
Республика Алтай, Россия	лишайники (<i>Rhizocarpon geographicum (L.) DC.</i>)	0,22	[150]
Приморской край, Россия	лишайники рода <i>Usnea</i>	0,135	[40]

Уровень ассимиляции Hg в атмосфере зависит от конкретных физиологических факторов исследуемого объекта, а также от глобальных и локальных воздействий окружающей среды, как показано в таблице 1.1. К физиологическим факторам относятся проводимость stomы, площадь листьев и плотность эпидермиса [112, 148].

В первую очередь виды рода *Pinus* демонстрируют относительно высокие концентрации Hg в кольцах деревьев, что объясняется большой поверхностью листвы, накапливающей Hg в течение года [63, 88, 123, 124]. На втором месте по представленности находятся ель (*Picea*) и сосна (*Larix*) [114, 115, 141, 151]. Роды клена (*Acer*), тополя (*Populus*), дуба (*Quercus*) и других широколиственных имеют более низкие общие концентрации Hg по сравнению с хвойными [126]. Таким образом, ученые дендрогеохимически пришли к выводу, что хвойные породы предпочтительнее широколиственных для мониторинга содержания Hg в колебаниях компоненты окружающей среды [58, 88]. Содержания Hg увеличивается в следующем порядке: древесина, хвоя, листья, что подтверждается тем, что поглощения осуществляется через устьица или кутикулу, что является

преобладающим путем, а затем Hg переносится из листьев в древесину [9, 69, 87, 148]. Мхи и лишайники представляют собой группы лишенных сосудистых растений. Статические данные в опубликованной литературе показывают, что мхи и лишайники демонстрируют значительно более высокие концентрации Hg по сравнению с другими группами растений [9, 148].

Значительное повышение уровня Hg в XX в., достигшее своего пика в 1970 г., связано с промышленными выбросами, которые начались с промышленной революцией и способствовали глобальному распространению атмосферного загрязнения [45, 152–155]. В результате наблюдается максимальное выпадение Hg как в промышленных, так и в удаленных регионах, что подтверждают исследования, проведенные в разных средах, включая: воздух фирна в Гренландии [153], воздух Северной Америки (5N – 65S), Южной Америки (70N-11S) [156, 157]; торф из Пиренейских гор, Франция [158] и северной части Швеции [118], а также годовое кольцо белой ели (*Picea glauca*) на северо-западе Канады [146] и трех видов хвойных деревьев на севере Швеции [69].

Реализация норм по ограничению выбросов ртути крупными предприятиями, такими как хлорная промышленность [159], и исключение ртути из состава многих потребительских товаров [160] позволили снизить эмиссию Hg в атмосферу с начала 1970-х гг. [153, 156, 157, 161]. Об этом свидетельствует снижение выбросов ртути в Европе и Северной Америке и одновременное повышение уровня ртути в атмосфере в Азии, одном из регионов с быстрым экономическим и промышленным развитием в последние десятилетия. На рисунке 1.3 показано, что Азия является основным источником антропогенных выбросов ртути, составляя около 50 % от общемирового объема [157]. Основными источниками выбросов ртути в этом регионе являются сжигание угля, производство стали, цемента, бумаги, хлорно-щелочной продукции, добыча золота и утилизация ртутьсодержащего оборудования.

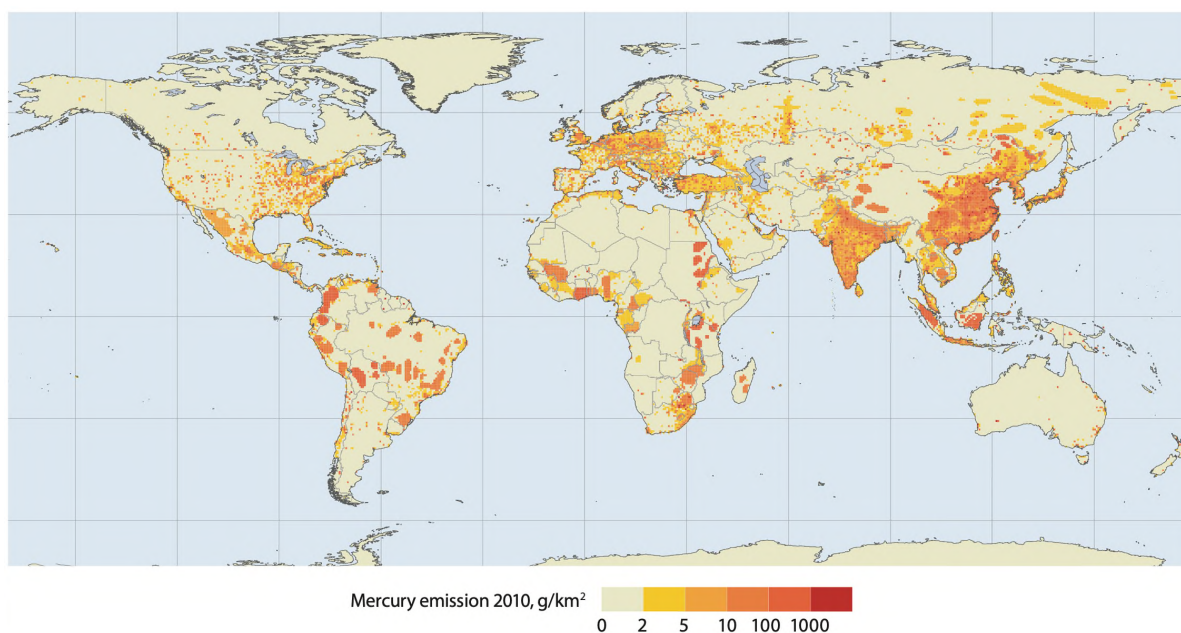


Рисунок 1.3 – Глобальное распределение антропогенных выбросов ртути в атмосфере в 2010 г. (по данным [157])

Кроме того, изучение химического состава древесных колец позволяет фиксировать соотношение изотопов водорода, кислорода и углерода, что отражает изотопный состав атмосферного CO_2 и позволяет проводить реконструкцию климата в прошлом [4, 162, 163].

Таким образом, на сегодняшний день очевидным является факт того, что на формирование элементного состава древесных растений в целом и колец деревьев в частности оказывают влияние большое число факторов, среди которых как специфика самого растения, так и специфика изменений среды его обитания. Ученые, занимающиеся обобщением информации по ретроспективному анализу изменений, происходящих в биосфере, склоняются к тому, что актуальным является изучение региональных особенностей этого процесса [164]. Так, по мнению автора, результаты интенсивных научных исследований в последние годы в рамках международных, национальных и региональных программ привели к выводу о том, что интегрированные (мультидисциплинарные) региональные исследования следует признать приоритетными. Для Сибири работы, касающиеся изучения проблем окружающей среды с геохимической точки зрения, были начаты еще в начале XX в. с изучения явления радиоактивности и радиоактивных элементов в природных объектах выпускниками европейских вузов России в

Сибири [165, 166]. По результатам экспедиций в Енисейскую губернию в 1907 г. П.П. Орлов определил уровень радиоактивности воздуха на Юлийском руднике и минеральной воды в озере Шира, Доможаково [167]. Далее, в 1913 г., В. А. Обручев приступил к разведке рудных месторождений и поиску радия в Сибири. В тридцатые годы исследования по различным направлениям ядерной физики проводились в вузах Томска. Работы активно проводились учеными Томского политехнического университета, в том числе на базе учебного ядерного реактора. В годы Великой Отечественной войны на территорию г.Томска было эвакуировано ряд промышленных предприятий, а в начале 1950-х гг. в Томске был построен Сибирский химический комбинат и была получена первая партия обогащенного урана промежуточной концентрации для выработки оружейной кондиции. Развитие ядерных технологий отметило период резкого изменения химического состава биосферы. Ядерные технологии связаны с развитием ядерной энергетики человека, включая добычу и переработку урановой руды, обогащение урана и наработка плутония, испытания ядерного оружия в различных природных условиях, а также работу атомных электростанций [7, 166, 168, 169].

Наряду с микроэлементами изучение радиоактивных элементов в годовых кольцах деревьев используется для оценки истории загрязнения атмосферы. Распределение радионуклидов в кольцах деревьев было проанализировано как отражение радиоактивности и загрязнения окружающей среды [3].

В настоящее время в нашей стране созданы две научно-исследовательские лаборатории кольцевых деревьев – в Институте экологии флоры и фауны УрО РАН (г. Екатеринбург) и в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (г. Красноярск), а также ряд небольших групп (в Иркутске, Вологде, Москве, Санкт-Петербурге), в которых занимаются изучением закономерностей годичного радиального прироста древесных растений, использованием кольцевых датировок деревьев для реконструкции природных условий и датировки различных катастрофических, исторических и археологических событий.

В Томске существуют две лаборатории по изучению и анализу годичных колец – в Институте мониторинга эколого-климатических систем СО РАН и в

лаборатории международного научно-образовательного центра «Урановая геология» в 20 корпусе Томского национального исследовательского политехнического университета [3, 7, 10, 74, 75, 165, 166, 170].

За более чем 50 лет развития дендрогеохимии экспериментальные методы с разной степенью успеха решали задачи экологического мониторинга. Новым подходом в этой области является f-радиография, которая применяет географическую привязку для выявления следов радиоактивных воздействий в годовых кольцах деревьев. В работах [171, 172] изложена основа нового подхода с применением метода осколочной f-радиографии к оценке радиационной обстановки в годовом кольце деревьев, произрастающих под воздействием предприятий ядерного топливного цикла Сибирского региона (рисунок 1.4).

Так, Л. П. Рихванов и другие [74] на основании изучения годовых колец деревьев района падения Тунгусского метеорита показали устойчивую тенденцию увеличения уровня накопления делящихся радионуклидов с конца XIX в. и достижения максимума в 80-х г. XX в. (рисунок 1.4). В фоновом – «доядерном» периоде (до 1945 г.) содержание урана U^{235} составляет 0,06–0,09 мг/кг, что соответствует плотности треков 45–60 треков/мм².

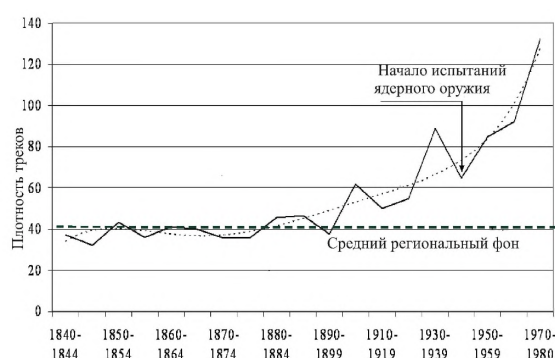


Рисунок 1.4 – Плотность треков от осколков деления в годовых кольцах лиственницы, р. Тунгуска, болото «Бублик» [74]

Л. П. Рихванов и другие [3] изучили распределение треков от осколков деления радионуклидов в годовых кольцах деревьев в северо-восточном секторе влияния Сибирского химического комбината. Результаты показали, что плотность треков увеличилась с 40 треков/мм² в 1940 г. до 160 треков/мм² в 1995 г. С начала

работ (1961 г.) Сибирского химического комбината наблюдались выбросы делящихся элементов в окружающую среду в разных количествах (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Плотность треков от осколков деления U^{235} и трансурановых элементов в срезах деревьев Томской области, отобранных на разных удалениях от промышленного реактора: 1 – наблюдаемая кривая (5 км от реактора); 2 – наблюдаемая кривая (15 км от реактора); 3 – средний фон для Томского района [3]

При рассмотрении влияния Ангарского электролизного химического комбината (АЭХК) отобраны спилы сосен, находящихся в Восточной Сибири, в 100 км западнее озера Байкал [3]. Применение метода f-радиографии позволило проанализировать треки от осколков деления радионуклидов в годовых кольцах деревьев, которые свидетельствуют об увеличении плотности треков в конце 1970-х гг. Накопленные свойства делящихся элементов демонстрируют тенденцию к увеличению в период активных атмосферных испытаний ядерного оружия (1949–1963 гг.) и в период увеличения мощности завода (1979–1998 гг.) (рисунок 1.6). Кроме того, геохимические особенности территории АЭХК характеризуются неоднородностью содержания урана в почве.

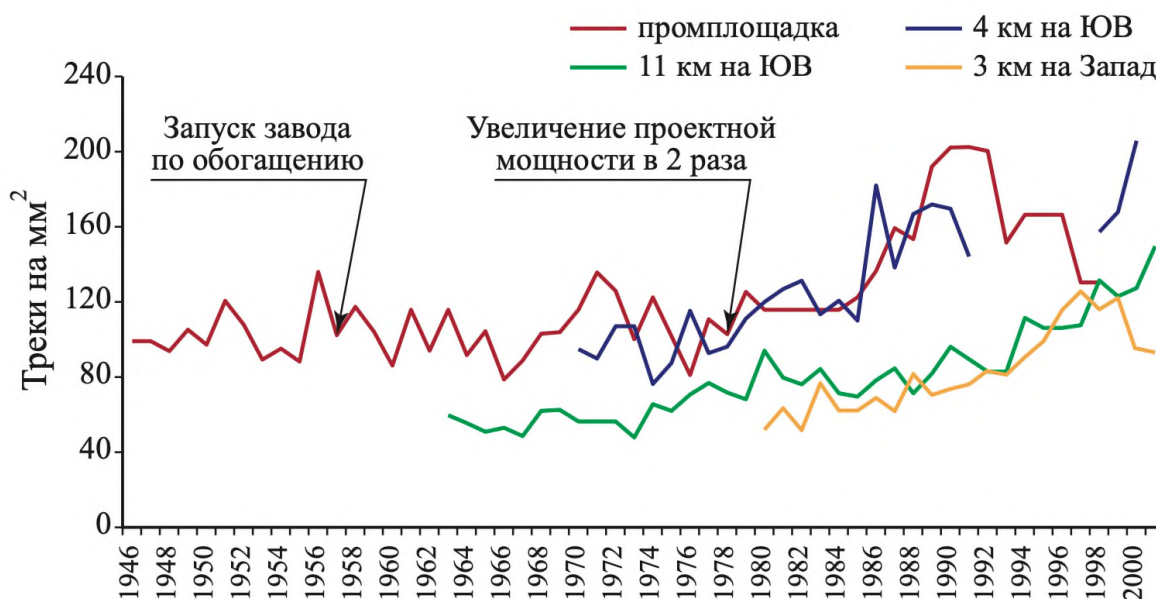


Рисунок 1.6 – Плотность треков от осколков деления U-235 и трансурановых элементов в срезах деревьев в районе АЭХК [3]

Таким образом, литературные данные свидетельствуют об изменении состава химических элементов окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. Содержание химических элементов в древесном кольце имеет тенденцию к увеличению с течением времени и накоплению при загрязнении биосферы. Считается, что ткани растений являются эффективными биологическими индикаторами при мониторинге качества окружающей среды.

В наши дни работы по изучению и анализу содержания различных химических элементов в компонентах природной среды в том числе и годовых кольцах деревьев, для ретроспективного анализа геоэкологического состояния окружающей среды выполнялись многими исследователями: Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, Е.В. Черненькая, Б.Р. Соктоев, Г.А. Гончаров, Е.Е. Ляпина, Т.С. Большунова, А.М. Межибор, Е.В. Евстафьева, Ю.В. Робертус, Д.В. Юсупов, И.П. Панюшкина, Л.В. Афанасьева, Е.М. Турсуналиева, Т.А. Архангельская, А.С. Миронова, С.Г. Шиятов, Л.В. Жорняк, Е.А. Ваганов, Д.Ф. Зирнова, В.Л. Гавриков, Жирнова Д.Ф., В.И. Харук, А.Н. Назаров, Л.А. Дорохова, Н.И. Казимиров, Р. Бергалы, А.Г. Горохова, В.А. Домаренко, Ю.Л. Замятина, С.М. Матвеев, О. В. Чуракова, В.Д. Страховенко.

За более чем 70 лет существования и развития дендрогеохимии большое количество зарубежных исследователей интересовались этими вопросами: X. Liu, N.W. Lepp, H. Kang, Y.S. Ahn, B. Świątek, H. Peng, W. Balraju, C. Cocozza, T. Navrátil, T. Nováková, A. Ghotra, X. Wang, P. Pongrac, H.C. Fritts, A.E. Douglass, J. Kang, H. Liang, K.L. Padilla, M. Tatzber, R.E. Tout, Z. Niu, B.E. Cutter, R.P. Guyette, S.A. Watmough, T.C. Hutchinson, E.R. Cook, L.A. Kairiukstis, A. Hulst, U. Büntgen, R. D'Arrigo, J. Dolezal, J.E. Harvey, S. Jiang, Y.H. Lo, Q.R. Ning, A. Gruber, L. Zheng, A. Rühling, R. Bargagli, J. Hagemeyer, W.U. Ault, N.I. Ward, P.S. Szopa, C. Zhang, A. Jonnson, G.L. Rolfe, C. Symeonides, G. Robitaille, D.N. Jordan, M. Eklund, W.C. Shortle, J. Arnold, M. Assad, D. Baroni, M. Becker, F. Biondi, S. Chen, M. Enrico, F. Vogel, R.M. Hubbard, C. Li, M.A. Peckham, E. Schulman, X. Wang, Y. Yang, D.V. Mifsud.

Выводы по главе 1

Несмотря на ряд проблем, выявленных учеными, весьма актуальным для целей реализации экологического мониторинга, является вопрос организации региональных исследований, позволяющих проводить уточняющий анализ по возникающим вопросам. К таким вопросам относятся специфика концентрирования химических элементов в кольцах деревьев, произрастающих в разных природно-климатических условиях, в различных природно-техногенных ситуациях, а также вопросы концентрирования токсичных элементов (таких, например, как ртуть) в зависимости от ширины колец дерева и условий его произрастания и многих других. В нашей работе мы делаем попытку представить результаты, полученные для территорий двух отличных по геоэкологическим условиям регионов – Сибири (на примере Томского района Томской области) и двух провинций Социалистической Республики Вьетнам.

2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Объект исследования

В качестве объекта исследования выбраны хвойные породы деревьев. Род Сосна (*Pinus*) семейства Сосновые (*Pinaceae*) представлен широко распространенными видами в Северном полушарии и в большем случае является эдификатором в лесных экосистемах. Высокая чувствительность к воздействию негативных факторов, большая экономическая ценность и экологические значения различных частей сосен обусловили популярность их применения учеными в качестве растения-индикатора для решения задач в области дендрохронологии и дендрогеохимии [173–180]. В данных работах исследуются два вида хвойных растений, произрастающих в разных эколого-климатических обстановках территории: сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в умеренном климате и сосны далайской (*Pinus dalatensis* Ferré) в тропическом муссонном климате.

Леса из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) занимают обширные территории не только в европейской части России, но и в Сибири, на Дальнем Востоке, а также в Западной Европе, Украине, Белоруси, Прибалтике, Казахстане, Северной Монголии (рисунок 2.1.1).



Рисунок 2.1.1 – Ареал распространения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)

Сосна обыкновенная хорошо приспособлена к экстремальным температурным условиями и встречается на высотах 1000–2500 м над уровнем моря. Граница годового кольца четко различима. Каждое годовое кольцо состоит из двух отдельных частей. Ранняя древесина, которая образуется в начале периода роста, имеет светлый цвет. Поздняя древесина, формирующаяся в конце периода роста, отличается более темным оттенком.

Лес сосны далатентской (*Pinus dalatensis* Ferré) – это типичный лес для центрального нагорья на юге Центрального Вьетнама, считается одним из старейших эндемичных видов растений во Вьетнаме и может встречаться также в Лаосе [182] (рисунок 2.1.2).

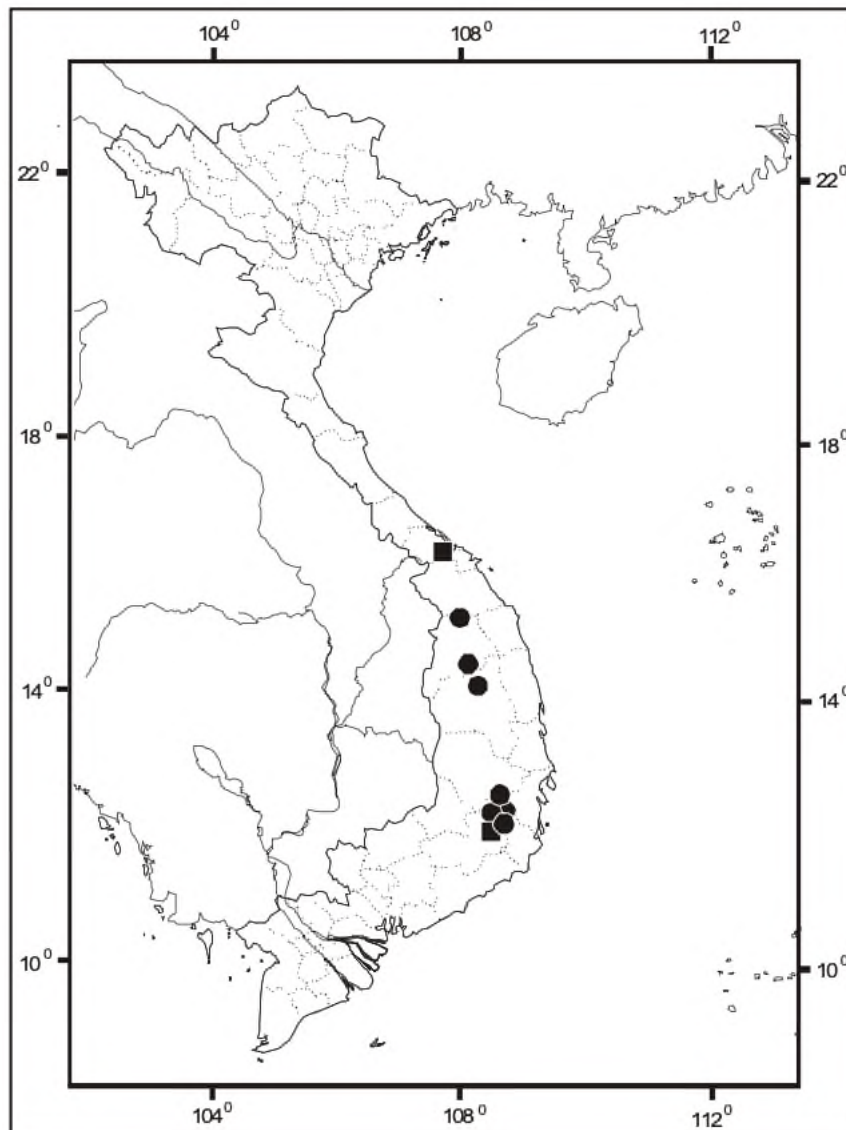


Рисунок 2.1.2 – Ареал распространения сосны далатентской (*Pinus dalatensis* Ferré)

В настоящее время сосна далатенская находится под угрозой исчезновения из-за чрезмерной эксплуатации и разрушения ее естественной среды обитания [184, 185]. Естественная популяция этого вида в основном расположена в смешанных лесах в центральных и южно-центральных нагорных районах Вьетнама, на высоте от 600 до 2600 м над уровнем моря [183, 186–188]. Кроме того, распространение этого вида было обнаружено в заповеднике Накай Нам Теун в Лаосе [189]. В отличие от тропических и субтропических древесин вида, сосна далатенская образует отдельные годовые кольца с четко выраженными границами и достаточно широко распространена. На основе этих характеристик сосна далатенская была успешно применена в дендрохронологическом исследовании на территории провинций Центрального нагорья Вьетнама (Ламдонг, Даклак и Зялай) в работе [188]. Более того, она стала перспективным объектом для исследований в области дендрохронологии и дендрогеохимии.

Годовые кольца деревьев являются эффективным геохимическим индикатором для оценки качества окружающей среды. Они позволяют точно датировать события загрязнения, которые фиксируются в кольце года его формирования (рисунок 2.1.3).



Рисунок 2.1.3 – Фотография древесного керна сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) из Социалистической Республики Вьетнам (а) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) из Томской области (б) (слева – кора; справа – сердцевина)

2.2 Отбор проб и пробоподготовка

В период с 2021 по 2024 гг. был проведен сбор проб на территории Томского района Томской области и провинций Даклак, Зялай и города Далат Социалистической Республики Вьетнам.

В Томском районе были выбраны четыре точки, каждая из которых характеризуется отдельной ситуацией воздействия на окружающую среду, включая

бытовое загрязнение, кустарные промыслы, промышленные зоны и транспортные системы города (рисунок 2.2.1).



Рисунок 2.2.1 – Схематическая размещения точек отбора проб керны сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), Томская область

Таблица 2.2.1 – Расположение точек отбора проб сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)

Код проб	Место отбора проб	Количество проб
Тимирязево	мкр. Тимирязево	1
Пашино	с. Пашино	1
Реактор ТПУ	вблизи исследовательского ядерного реактора Томского политехнического университета	1
Нефтихим	ООО «Томскнефтехим»	1

Первые две точки – с. Пашино («Пашино») и мкр. Тимирязево («Тимирязево») – расположены в зоне с минимальным воздействием города, на подветренной стороне от г. Томска. Две другие – вблизи исследовательского ядерного реактора Томского политехнического университета («Реактор») и ООО «Томскнефтехим» – подвержены значительную воздействию Северного промышленного узла (СПУ) г. Томска.

Во Вьетнаме были рассмотрены три опробованные территории в Центральном нагорье: г. Далат и провинции Даклак и Зялай (см. рисунок 2.2.2 и таблицу 2.2.2).

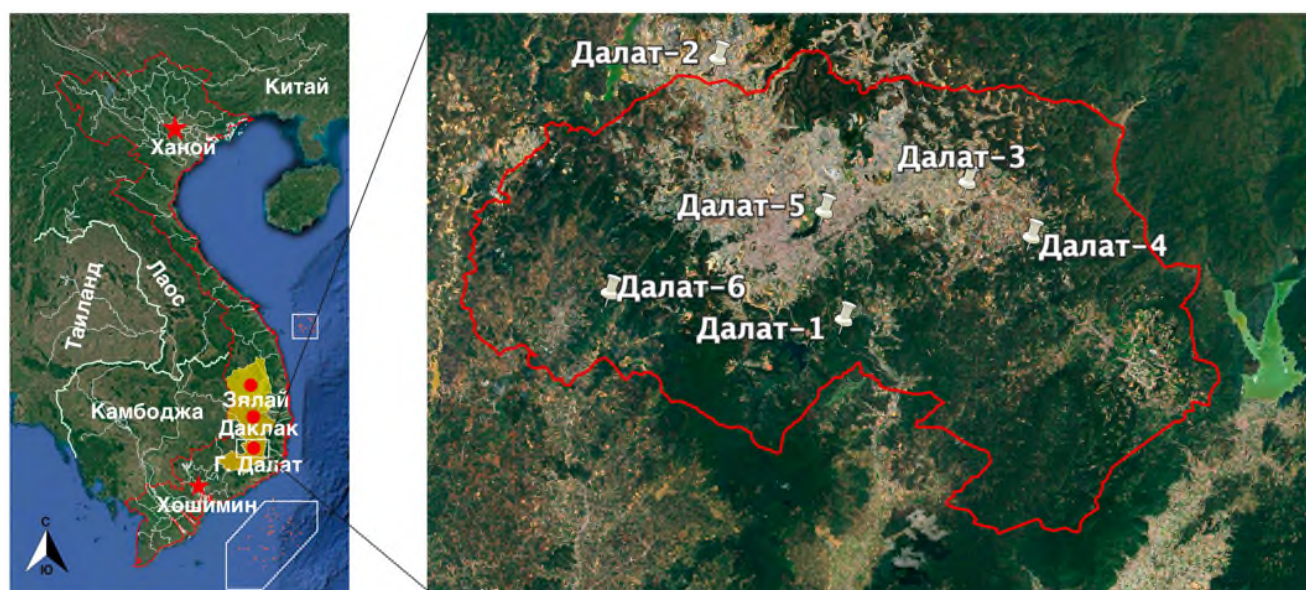


Рисунок 2.2.2 – Схема размещения точек отбора проб керны сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) – г. Далат, провинция Даклак, Зялай.

Точки отбора проб расположены вдоль основных транспортных магистралей. На рисунке 2.2.2 показано их расположение. Каждая характеризуется определенными эколого-геохимическими условиями, сформированными на данной территории.

Точка «Далат-1», располагающаяся в южной части изученной территории, характеризуется наличием радиоактивных аномалий на фельзите пород с высокой радиоактивной интенсивностью (70–170 мР/ч) [190–192]. В южной части, на территории Пренн-Датанла, отмечается хорошее качество каолина и низкое

содержание золото-серебряных сульфидных руд (0,1–1,7 г/т), выветривающийся из фельзитовых и риолитовых пород формации Донзыонг.

Точка «Далат-2», расположенной на северной границе г. Далат, отмечается высокой плотностью населения. На территории олово имеет гидротермальное происхождение и встречается в гранитах Анкрэотского комплекса, концентрируясь в метаморфизованных породах. Олово сопровождается грейзеном высокотемпературного гидротермального происхождения. Содержание олова составляет 64 %, сурьмы – 0,7 %, мышьяка – 0,008 %, меди – 0,04 %, вольфрама – 0,04 %, скандий – 0,003 %, натрий – 0,5 %, алюминий – 2,5 %, марганец – 0,0013 % и магний – 0,6 %, и ванадий – 0,003 %.

Точки «Далат-3» и «Далат-4» располагаются в юго-восточной части и вдоль железнодорожного маршрута Тхапчям–Далат (работающего в период военных действий Социалистической Республики Вьетнам (1932–1972 гг.) [193], ближе к промышленному узлу «Фатчи» и также здесь находятся каолиновые рудники месторождения «Чаймат», залегающие на миоценовом биотитовом граните [194, 195]. В минеральном составе каолина составляет содержание Al_2O_3 – 20–45 %, Fe_2O_3 – 0,42–1,9 %. В юго-восточной части города выявлена жильная золотая руда как кварц-мышьяковое золото (содержание золота – 2,55 г/т, серебра – 4,8 г/т) и кварц-сульфидное золото (содержание золота – 0,8–5,5 г/т).

Точка «Далат-5» расположена в центре и в ближайшем окружении от главного городского водохранилища, примерно в 2 км к югу от Института ядерных исследований. Далатский исследовательский ядерный реактор мощностью 250 кВт работает с 1963г. В период 1979 по 1982 гг. его реконструировали и увеличили мощность до 500 кВт [196].

Точка «Далат-6» расположена на юго-западе города Далат, в 15 км от центра города, для которого характерна местная сельскохозяйственная деятельность. Кроме того, в западной части города был обнаружен каолин, полученный в результате выветривания биотитового гранита комплекса Кана, содержащий SiO_2 – 47,3–64,9 %, Al_2O_3 – 21,7–32,2 %, Fe_2O_3 3,4–3,6 %, TiO_2 0,25–0,28 %.

Таблица 2.2.2 – Расположение точек отбора проб сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré)

Код проб	Место отбора проб	Количества проб
ДЛ01	Перевал Прен, г. Далат	2
ДЛ02	Район Лакзыонг – в 12км к северу от центра г. Далат, провинция Ламдонг	2
ДЛ03	Населенный пункт 11, г. Далат	2
ДЛ04	Вдоль национального маршрута 20, коммуна Суантхо, г. Далат	2
ДЛ05	Парк Суанхыонг, населенный пункт 3, г. Далат	2
ДЛ06	Вдоль провинциальной дороги 725, коммуна Танунг, г. Далат	2
Даклак	вдоль национального маршрута 14, в 50 км к северу от центра г. Буонматхыонг, провинция Даклак	2
Зялай	вдоль национального маршрута 14, в 25 км к югу от центра г. Плейку, провинция Зялай	1

Отбор кернов сосны проводился в соответствии с методами, необходимыми для дендрохронологических и дендроклиматических исследований [197]. Для получения более длинных древесно-кольцевых хронологий были выбраны старовозрастные деревья. Живые древесные керны отбирали с помощью приростного бурава Haglof длиной 300 мм (рисунок 2.2.3). Керны брали перпендикулярно продольной оси ствола дерева на высоте 1,3 м от поверхности земли (рисунок 2.2.4).



Рисунок 2.2.3 – Возрастной бурав. Условные обозначения: а – наконечник сверла; б – собранный бурав; в – стержень; г – экстрактор; д – сверло



Рисунок 2.2.4 – Отбор кернов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) возрастным буром Пресслера

Отобранные пробы помещались в бумажные тубусы для предотвращения повреждений. На каждой упаковке указывались: порода дерева, дата сбора образцов, а также краткое описание местопроизрастания и точные их координаты. Процесс подготовки проб в лаборатории включал высушивание при комнатной температуре, размещение в деревянные рейки-пеналы, шлифование мелкой наждачной бумагой для отчётливой видимости границ колец и их разделение скальпелем. Подготовка проб проводилась в соответствии с выбранным методом анализа. Керна древесины измельчаются по каждому году для анализа на содержание Hg, по десятилетиям для определения 71 химических элемента методом плазменно-спектрометрии и по временным периодам: доядерный (до 1945 г.), ядерный (1946–1962 гг.), постядерный (1963–1979 гг.) и современный (1980–2021 и 2013–2022 гг.) и для определения 28 химических элементов методом ИНАА. Всего было получено 10 кернов в Томском районе. На территории Социалистической Республики Вьетнама собрали 12 кернов в городе Далат, 2 керна в провинции Даклак и 1 спил на территории провинции Зялай (рисунок 2.2.5).



Рисунок 2.2.5 – Отобранные керны сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) в пеналах

Общее количество проанализированных разными методами проб, включающих разные временные периоды, объединяющие кольца изучаемых кернов и спилов деревьев, составило 2078.

2.3 Аналитические методы

Для получения достоверной информации о химических элементах и делящихся осколках радиоактивного ядра в нашем исследовании использовались комплексы методов исследования. Выбор этих методов был обусловлен наличием объектов уникальной научной инфраструктуры ТПУ. Виды и средства измерений, а также количество образцов с различных территорий перечислены в таблице 2.3.1.

Таблица 2.3.1 – Виды анализа, инструментальная база, территория отбора и количество проб

Метод	Количество проб	Территория
Изменения ширины колец	7 кернов 543 годовых колец	Томский район г. Далат Провинция Зялай
Атомно-абсорбционный анализ ртути (ААС-Ртуть) с использованием анализатора «РА-915+» с приставкой «ПИРО-915+»	333 годовых кольца 175 годовых колец 94 годовых кольца 32 годовых кольца	Томский район г. Далат Провинция Даклак Провинция Зялай
Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) на 28 химических элементов (на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т НИ ТПУ)	31 проба – 565 годовых колец 6 проб – 124 годовых кольца	Г. Далат Провинция Даклак
Методы плазменной спектрометрии (МС-ИСП) на 73 химических элемента (в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии НИ ТПУ)	8 проб – 63 годовых кольца 3 проб – 31 годовое кольцо	Г. Далат Провинция Зялай
Осколочная f-радиография на делящиеся радионуклиды (на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т НИ ядерной физики ТПУ)	1 керн – 87 годовых колец 1 керн – 31 годовое кольцо	Г. Далат Провинция Зялай

2.3.1 Измерения ширины годовых колец и перекрестная датировка

Выделение границ годовых колец выполнялось на приборе LINTAB с помощью программного обеспечения TSAP-Win и LIGNOVISION с точностью до 0,01 мм в лаборатории динамики и устойчивости экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск). Прибор LINTAB вместе с программным обеспечением TSAP представляет собой устройство для получения дендрохронологической информации с использованием полуавтоматической методики. Они анализируют данные и представляют результаты в табличной и графической форме. На основе полученных измерений был построен график абсолютных приращений радиуса для каждого радиуса, по которому была выполнена точная датировка колец деревьев методом перекрестного датирования (рисунок 2.3.1.1).

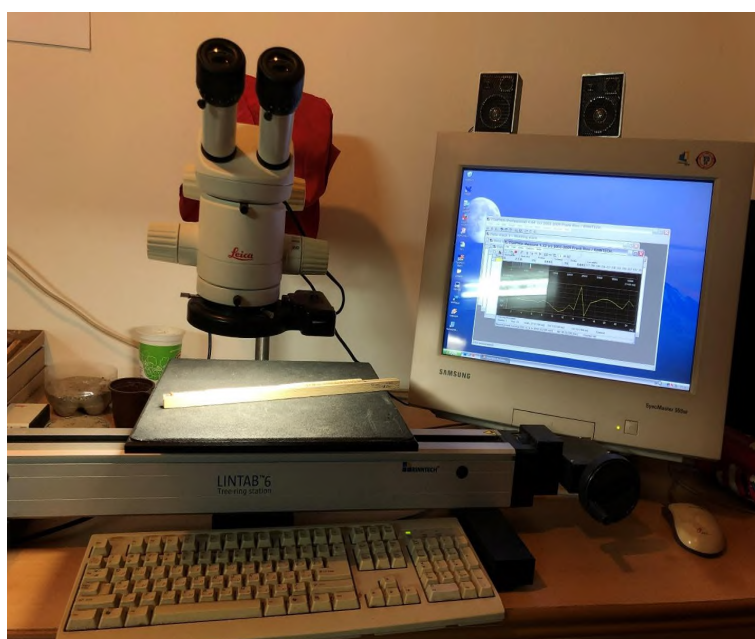


Рисунок 2.3.1.1 – Полуавтоматическая установка для измерения ширины годовых колец: стереомикроскоп; скамья с прецизионной подачей, обеспечивающей линейное перемещение образца с точностью 0,01мм (слева); компьютер для накопления данных измерений (справа)

Для изучения влияния климатических условий на динамику накопления химических элементов и изменение ширины древесных колец нами были собраны метеоданные станции Томского района и города Далат Социалистическая

Республика Вьетнам. Данные Томского района доступны на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных за 1936–2021 гг. А метеостанция в городе Далат предоставляет данные с 1981 по 2023 гг. на сайте Прогноза мировых энергетических ресурсов. Метеоданные суточных наблюдений включают температуру воздуха, количество осадков, скорость и направление ветров. В преобладающих условиях произрастания ведущие факторы, влияющие на величину годового прироста и уровни накопления химических элементов большинства деревьев, устанавливаются расчетным путем метеорологических данных в течение года, в вегетационный период и в период при положительных и отрицательных температурах в России, а также в засушливые и дождливые сезоны на исследуемых территориях Социалистической Республики Вьетнам.

2.3.2 Атомно-абсорбционный анализ ртути

После разделения каждое годовое кольцо анализировали на содержание ртути (Hg). Пробы определялись на анализаторе Hg РА-915+ с использованием метода атомной абсорбции с приставкой ПИРО-915. Этот метод пиролиза позволяет обнаружить Hg в пределах 5 нг/г, точность определения 5 нг/г. Концентрация элемента рассчитывалась на 1 г сухого вещества в учебно-научной лаборатории на базе Инженерной школы природных ресурсов НИ ТПУ.

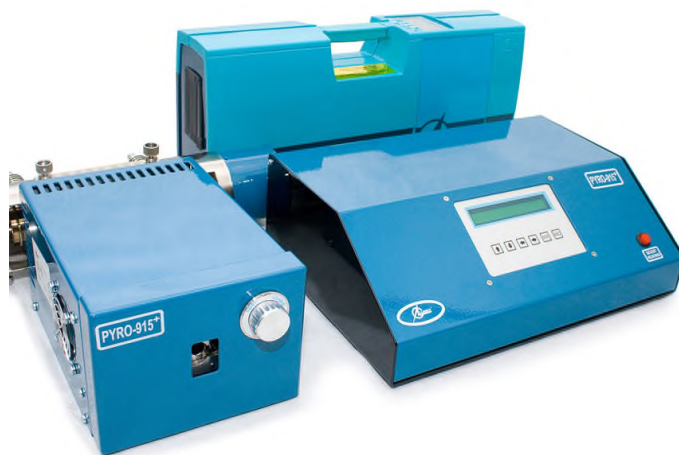


Рисунок 2.3.2.1 – Анализатор ртути «РА-915М» с пиролизической приставкой «ПИРО-915+» (Аналитическое оборудование «Люмекс...»)

Методом атомно-абсорбционного анализа можно определять (без пробоподготовки) содержания ртути в жидких и твердых пробах: дерево, сточная вода, кровь, продукты питания, нефть и нефтепродукты, почва, донные отложения, и т.д.

Все взятые образцы были предварительно высушены при комнатной температуре. Образцы керна измельчались скальпелем. Нижний предел обнаружения Hg составлял 5 нг/г. Вес пробы 20–40 мг. Взвешенный образец (от 20 до 300 мг) помещается на дозирующую ложку. Включена интеграция аналитического сигнала, и дозирующая ложка устанавливается на приставку ПИРО-915. По возвращении аналитического сигнала к исходному уровню (60–120 секунд) интеграция завершается.

Почти все методы количественного спектрального анализа являются относительными, и определение неизвестных концентраций основано на сравнении интенсивностей спектральных линий в спектрах исследуемого образца и контрольного образца. Это связано с тем, что невозможно установить точную количественную связь между интенсивностью эмиссионных или абсорбционных спектральных линий атома какого-либо элемента и его концентрацией в образце, поскольку атомизация образца и возбуждение атомов (или ионов) в используемых источниках света чрезвычайно сложны и до настоящего времени методы их количественного описания не разработаны.

Достоверность результатов во многом зависит от соответствия состава и физико-химических свойств стандартного и аналитического образцов. Неизвестную концентрацию определяют путем сравнения интенсивности спектральных линий в спектрах образца и стандарта. Для этого готовят ряд стандартов, среди которых содержание определяемого элемента охватывает весь диапазон ожидаемых концентраций элемента в пробе. Идеальный стандарт отличается от пробы только содержанием определяемых элементов. Затем строят график зависимости интенсивности линии в спектре атома (или иона) определяемого элемента от его концентрации в стандартах.

Концентрация неизвестного элемента определялась по интенсивности, измеренной в спектре образца путем интерполяции по калибровочной кривой. Получение спектров всех стандартов и образцов должно проводиться в одинаковых условиях. Аналитическая ошибка составляет не более 12 %. Концентрация Hg рассчитывается на 1 г сухого вещества.

В нашем исследовании в качестве стандартного образца использовался стандарт «Лист березы» ЛБ-1 (ГСО-8923-2007).

2.3.3 Инструментальный нейтронно-активационный анализ

Метод инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) – это чувствительный аналитический метод для определения содержания элементов, присутствующих в сложных исследуемых геохимических объектах. К таким объектам относятся горные породы и минералы, осадки и почва, уголь, археологические артефакты, нанотехнологические материалы, аэрозоли, кольца деревьев, травы и др. Метод основан на ядерных свойствах элементов. Метод ИНАА применяется в таких областях, как сельское хозяйство, археология, науки о Земле, питание человека, мониторинг окружающей среды и полупроводниковая технология.

В методе ИНАА образцы материалов облучаются потоком тепловых нейтронов в исследовательском реакторе ИРТ-Т, расположенном в ядерно-геохимической лаборатории отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. После излучения пробы некоторые стабильные изотопы превращаются в радиоизотопы с коротким периодом полураспада. При распаде этих радиоактивных изотопов происходит испускание гамма-излучения, которое фиксируется полупроводниковым гамма-спектрометром.

Использование радиоактивного излучения и радиоактивного распада позволяет изучать спектр излучения исследуемых объектов, а также определять концентрацию присутствующих элементов. Этот метод позволяет одновременно количественно определять множество элементов. Для анализа требуется всего 100 мг образца, который не разрушается при тепловом воздействии и не требует

предварительной химической подготовки. Метод имеет низкий предел обнаружения для многих элементов, а также отличается высокой чувствительностью и точностью в диапазоне содержания от $n \cdot 1\%$ до $n \cdot 10^{-8}\%$.

Таблица 2.3.3.1 – Пределы определения содержаний элементов в разных объектах методом ИНАА

Элемент	Предел, мг/кг	Элемент	Предел, мг/кг
Na	20	Ba	3
Ca	300	Sb	0,007
Sc	0,002	La	0,007
Cr	0,1	Ce	0,01
Fe	10	Sm	0,01
Co	0,1	Eu	0,001
Ni	20	Tb	0,001
Zn	2	Yb	0,01
As	1	Lu	0,001
Br	0,3	Hf	0,01
Rb	0,6	Ta	0,01
Sr	1	Au	0,002
Ag	0,01	Th	0,01
Cs	0,3	U	0,01

Аналитический процесс включает в себя подготовку образцов, облучение, измерение и обработку данных. Материальный образец дерева (по 100 ± 1 мг) помещается в капсулы из алюминиевой фольги известного состава. Заполненные образцом капсулы – одна капсуль с сертифицированным эталоном сравнения и одна пустая капсуль – герметично упаковываются в контейнере для облучения. Для измерения нейтронного потока во время облучения добавляются компараторы. Время облучения образцов в реакторном канале составляет 20 часов при тепловом потоке нейтронов около 1×10^{13} нейтронов/см²/сек. Интенсивность гамма-

излучения радионуклидов фиксируется в твердотельном детекторе, затем калибруется и сравнивается со стандартами для количественной оценки содержания элементов. Метод ИНАА позволяет определить содержание 28 элементов, включая Na, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Br, Rb, Sr, Ag, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Au, Th, U. Нижние пределы обнаружения содержания элементов в природной среде представлены в таблице 2.3.3.1 (аналитики –старшие научные сотрудники А.Ф. Судыко и Л.В. Богутская).

2.3.4 Методы плазменной спектрометрии

Валовое содержание 73 химических элемента в годовых кольцах деревьев было определено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии НИ ТПУ (заведующий лабораторией к.г.-м.н. А.А. Хвощевская, аналитик В.В. Куровская). Всего проанализированы 11 проб годовых колец сосны (8 проб в городе Далат и 3 пробы в провинции Зялай).

Метод масс-спектрометрии с индукционно связанной плазмой (ИСП-МС) значительно расширяет возможности элементного анализа. Этот метод позволяет одновременно определять практически все химические элементы с низкими пределами обнаружения, что особенно важно для выявления всех элементов в растительных образцах.

Подготовка проб для определения химических элементов включала в себя: высушивание при комнатной температуре, разделение керна на десятилетние периоды и их измельчение. После этого образцы подвергались взятию навески и разложению их в концентрированной азотной кислоте с использованием государственной стандартной методики ГСО 8923–2007 (ЛБ-1, *Betulinus folium* (лист березы)). Эта методика используется для определения содержания химических элементов в диагностируемых биосубстратах, препаратах и биологически активных добавках с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной аргоновой плазмой. Пределы определения элементов методом ИСП-МС приведены в таблице 2.3.4.1.

Таблица 2.3.4.1 – Нижние пределы определения содержаний элементов методом ИСП-МС

Элемент	Предел, мг/кг	Элемент	Предел, мг/кг	Элемент	Предел, мг/кг	Элемент	Предел, мг/кг
Li	0,0002	Ni	0,002	In	0,0001	Yb	0,00005
Be	0,0001	Cu	0,002	Sn	0,0002	Lu	0,00005
B	0,002	Zn	0,002	Sb	0,0001	Hf	0,00005
Na	-	Ga	0,0002	Te	0,0005	Ta	0,00005
Mg	-	Ge	0,0002	I	-	W	0,001
Al	0,002	As	0,002	Cs	0,00005	Re	0,00005
Si	-	Se	0,005	Ba	0,0002	Os	0,00005
P	0,07	Br	0,025	La	0,00005	Ir	0,00005
SO ₄	-	Rb	0,0001	Ce	0,00005	Pt	0,00005
Cl	-	Sr	0,002	Pr	0,00005	Au	0,00005
K	-	Y	0,0001	Nd	0,00005	Hg	-
Ca	-	Zr	0,0002	Sm	0,00005	Tl	0,00005
Sc	0,002	Nb	0,0001	Eu	0,00005	Pb	0,0002
Ti	0,002	Mo	0,0002	Gd	0,00005	Bi	0,00005
V	0,002	Ru	0,00005	Tb	0,00005	Th	0,00005
Cr	0,002	Rh	0,00005	Dy	0,00005	U	0,00005
Mn	0,0002	Pd	0,0001	Ho	0,00005		
Fe	-	Ag	0,0001	Er	0,00005		
Co	0,0001	Cd	0,0001	Tm	0,00005		

2.3.5 Методика осколочного радиографического исследования

Осколочная радиография (f-радиография) широко применяется при изучении накопления и распределения урана и других делящихся элементов в живых организмах [25], включая и годовые кольца деревьев [3, 10].

Метод обусловлен способностью ядра U^{235} к распаду под действием тепловых нейтронов, что приводит к образованию двух осколков деления и

выделению значительного количества энергии. Осколки ядерного деления рассеиваются и изменяют структуру принимающего твердого объекта (детектора). Следы деления фиксируются с помощью химического травления детектора, представляющего собой синтетическую слюду (рисунок 2.3.5.1). Данный метод обладает высокой чувствительностью (до $n \times 10^{-8} \%$) и точностью 10–20 %.

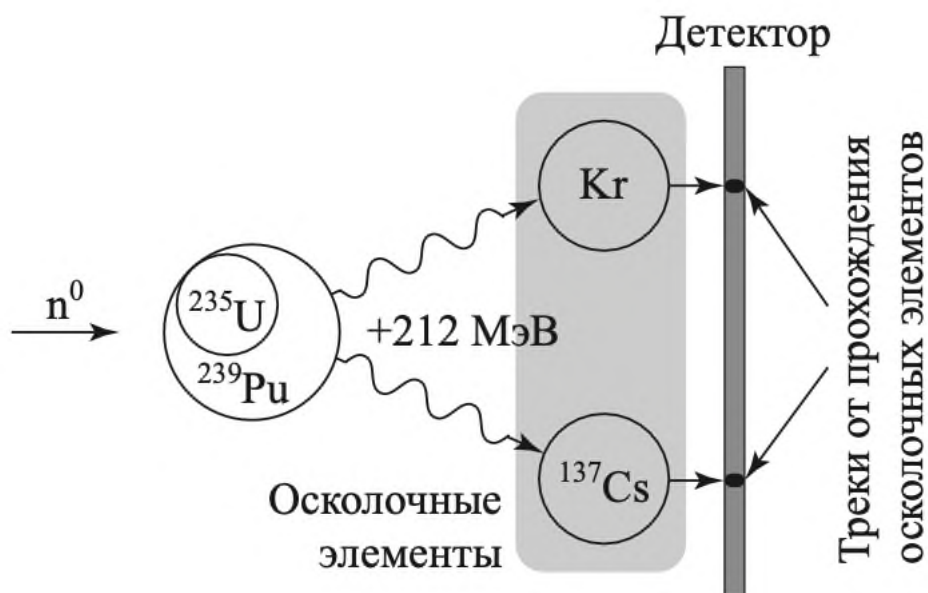


Рисунок 2.3.5.1 – Схема получения осколков деления и их фиксации на детекторах [3]

В настоящее время учеными применяется эффективно метод f-радиографии при выявлении радиоактивного загрязнения в почве [170, 198] и частях растений (листья, древесина и корень) [3, 74, 199–201].

В данном исследовании керн сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) отобранный в точке ДЛ05 города Далат Социалистической Республики Вьетнам, был облучен потоком тепловых нейтронов в исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т Томского политехнического университета (заведующий лабораторией – старший научный сотрудник А.Ф. Судыко). Интенсивность потока тепловых нейтронов составила 1×10^{15} н/см².

Подготовка образца проводилась согласно установленным инструкциям [3] и состояла из нескольких этапов. Сначала древесные керны высушивались при комнатной температуре. Образцы представляли собой древесные керны длиной 9

см, толщиной 1–2 см и шириной до 4,5 см. Затем на миллиметровой бумаге рисовали очертание полного датирования древесного керна. На поверхность древесного керна с одной стороны был нанесен клеевой эталон с известным содержанием урана. После высыхания клеевого эталона на образец помещался детектор из синтетической слюды (рисунок 2.3.5.2). Образец-эталон-детектор накрывался защитной пленкой для предотвращения внешнего загрязнения во время облучения. Подготовленная группа образцов помещалась в контейнер из алюминиевой фольги.



Рисунок 2.3.5.2 – Подготовка образцов древесины для проведения радиографических исследований

Для получения содержания радионуклидов в годовом кольце подготовленные образцы древесины подвергались облучению потоком тепловых нейтронов на ядерном реакторе и после остывания образца проводили химическое травление детектора из синтетической слюды фтороводородной кислотой в течении 15 минут. После травления на имеющемся детекторе фиксировались следы осколков деления.

Датировка древесного кольца переносилась на детектор. Для этого граница годового кольца аккуратно перерисовывается на его поверхности на основе ранее подготовленного хронологического рисунка годовых колец деревьев (рисунок 2.3.5.3). Такая методика позволяет определить количество радиоактивных следов в каждый год формирования годового кольца дерева под оптическим микроскопом.

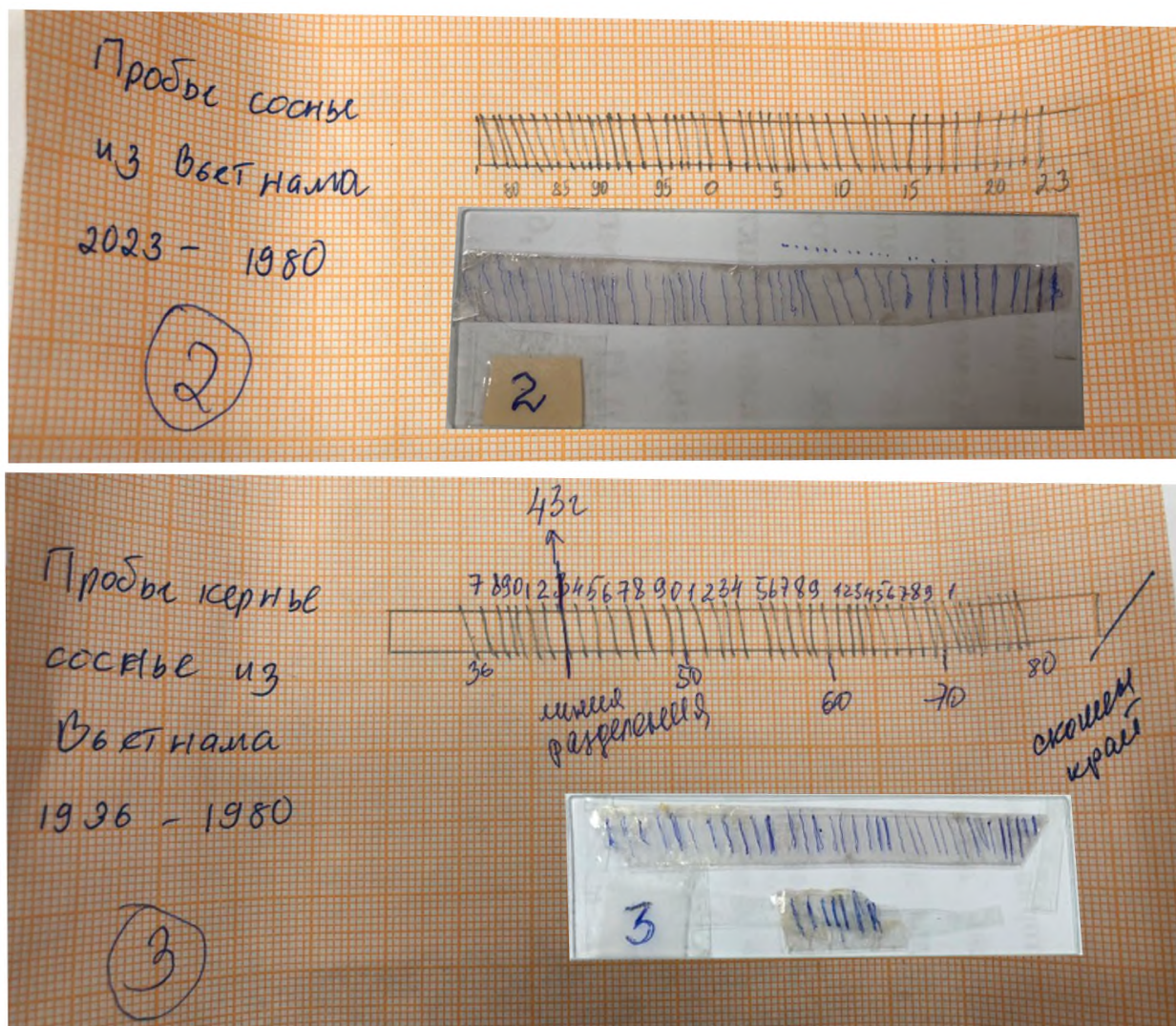


Рисунок 2.3.5.3 – Датировка древесины и слюдяной детектор, на который вынесены контуры годовых колец.

Количество треков пересчитывалось по известным формулам, учитывающим плотность исследуемого вещества и эталона на содержание урана [202]. До 1945 года в природе в аналитически значимых концентрациях присутствовал только один делящийся изотоп элемента (U^{235}), после 1945 г. к нему прибавились трансурановые элементы (Pu, Am, Np и др.), и поэтому в данном случае целесообразно говорить об эквивалентном уране.

Количество треков подсчитывается в соответствии с известными формами, которые включают равномерное распределение, скопления и «звезды».

2.3.6 Статистическая обработка данных

Полученные данные обработаны с помощью компьютерных программ «Microsoft Office Word», «Microsoft Office Excel» и «Статистика». В результате статистической обработки данных были получены следующие параметры: среднее содержание, стандартная ошибка, медиана, максимальное и минимальное содержание, стандартное отклонение, дисперсия выборки, коэффициент вариации при уровнях надежности 95 %.

Для проверки гипотезы о стандартном распределении элементов в выборке использовался критерий Пирсона и тест Колмогорова–Смирнова. Значимость различий оценивалась по критерию Пирсона и принималась высокой при $p < 0,001$; сильно значимой – при p от 0,001 до 0,01; значимой – при p от 0,01 до 0,05; слабо значимой – при p от 0,05 до 0,1; не значимой – при $p \geq 0,1$.

В случае нормального распределения данных использовался параметрический критерий Стьюдента и предварительно сравнивались дисперсии по параметрическому критерию Фишера (f-критерий, для сравнения дисперсий).

В остальных случаях применялись непараметрические критерии Манна–Уитни и двухвыборочный критерий Колмогорова–Смирнова, которые являются непараметрической альтернативой t-критерию.

Были рассчитаны геохимические показатели для ртути. К ним относятся коэффициент концентрации относительно фона (за который принималось среднее арифметическое или геометрическое, временно допустимая концентрация, кларк ноосферы), коэффициент концентрации относительно среднего для живого вещества, коэффициент концентрации относительно среднего для наземных растений, нормирование по Б. Маркету и фактор обогащения (нормирование по Sc).

Коэффициент концентрации относительно фона рассчитан как отношение концентрации ртути в пробе к фоновому показателю (8,4 нг/г), как указано в работе [107]:

$$K_c = C_{Hg} / C_{\phi},$$

Допустимое временное содержание определено отношением концентрации Hg в пробе к удвоенному значению фоновой концентрация Hg (8,4 нг/г), как указано в работе [107]:

$$ВДК = C_{Hg} / 2C_{\phi},$$

Кларк ноосферы определен отношением концентрация Hg в пробе к кларку Hg в ноосфере (180 нг/г) [203]:

$$K_N = C_{Hg} / K_{NHg},$$

Коэффициент концентрации относительно среднего для живого вещества определен отношением концентрация Hg в пробе к средней концентрации Hg в живом веществе (50 нг/г) [204]:

$$K_{LM} = C_{Hg} / C_{LMHg},$$

Коэффициент концентрации относительно среднего для наземных растений определен отношением концентрация Hg в пробе к средней концентрации Hg в наземных растениях (15 нг/г) [8]:

$$K_{LP} = C_{Hg} / C_{LPHg},$$

Коэффициент концентрации относительно В. Markert определен отношением концентрации Hg в пробе к концентрации Hg в сухом веществе растений по В. Markert (100 нг/г) [205]:

$$K_M = C_{Hg} / C_{MHg},$$

Коэффициент обогащения (Fe) (нормирование по Sc) рассчитан путем соотношения кларк Hg « C_{Hg}/K_{Hg} » в пробе к коэффициенту кларка Sc « C_{Sc}/K_{Sc} » (где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе; K_{Hg} – кларк Hg в сухом веществе растений; C_{Sc} – концентрация Sc в пробе (0,002 нг/г) [8]; K_{Sc} – содержание Sc (0,02 мг/кг) по Markert [205]:

$$Fe = (C_{Hg}/K_{Hg}) / (C_{Sc}/K_{Sc}),$$

Для определения геохимических аномалий были рассчитаны коэффициент концентрации путем определения соотношения средней концентрации химического элемента к среднему содержанию по выборке ($n=31$). Построен химический ряд в порядке убывания коэффициентов концентрации, где значения $K_c > 1$ свидетельствуют о накоплении этих химических элементов относительно фона и $K_c > 2$ – о значительном накоплении.

Для описания корреляции между химическими элементами или на разных точках опробования рассчитаны стандартные коэффициенты корреляции Пирсона с уровнем значимости $p=0,05$.

3 СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ В ГОДОВЫХ КОЛЬЦАХ ДЕРЕВЬЕВ КАК ИНДИКАТОР ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

3.1 Эколого-геохимическая оценка ртутной нагрузки на территории

Томского района по результатам изучения годовых колец деревьев

В ходе изучения геохимических особенностей Томского района нами было проведено исследование изменения содержания Hg в годовых кольцах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в связи с учетом природных условий, регионального климата и влияния технической деятельности. Было исследовано содержание Hg в четырех опробованных кернах, отобранных в Томского районе. (таблица 3.1.1).

Таблица 3.1.1 – Статистические параметры содержания ртути в кернах *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района

Точка	Возраст, лет	Среднее, нг/г	Концентрация, <u>мин–макс</u> медиана, нг/г	Стандартное отклонение	Кв
Тимирязево	80	133,7±23,9	$\frac{5-1170}{47,0}$	214,7	161
Пашино	80	127,6±47,2	$\frac{5-3505}{17,7}$	424,5	332
Реактор	93	67,3±21,6	$\frac{5-1953}{27,0}$	207,9	309
Нефтехим	81	146,1±51,2	$\frac{5-3986}{29,0}$	463,4	317

Примечание: Кв – Коэффициент вариации

Распределение ртути в кернах сосны на территории опробования носит неравномерный характер, что подтверждается результатами расчета Кв 161–332% (таблица 3.1.1).

На территории Томского района содержание Hg изменяется в пределах от 5 до 3986 нг/г. Наибольшее содержание зафиксировано в точке «Нефтехим», а наименьшее – в точке «Реактор». В ходе проведенного анализа выявлено превышение содержания ртути по сравнению с данными ранее проведенных исследований на данной территории [9]. Следует отметить, что поступление Hg в

древесные керны не отличается вне зависимости от точек опробования по отношению к городу, за исключением точки «Реактор» (рисунок 3.1.1).

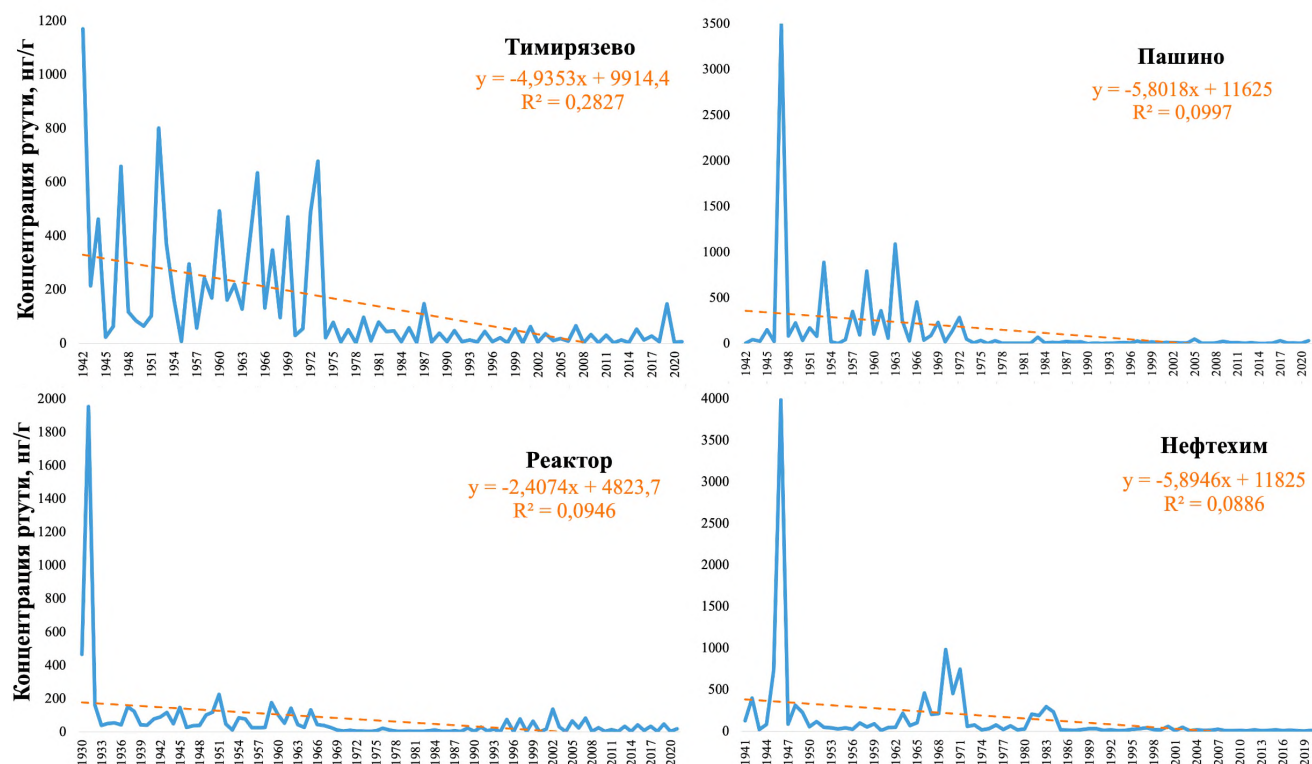


Рисунок 3.1.1 – Динамика поступления Hg в древесные керны *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района

Во временном ряду выделяется два интервала, в которых концентрация Hg значительно отличается друг от друга. Разница в среднем содержании во всех точках между двумя периодами представлена в виде столбчатой диаграммы (рисунок 3.1.2). Анализ поступления Hg в древесные керны сосны Томского района выявил превышение среднего содержания за 1941–1974 гг. в 2,2; 2,4; 1,8; 2,1 раза в точках «Тимирязево», «Пашино», «Реактор» и «Нефтехим» соответственно.

Интересно отметить, что керн сосны в точке «Реактор» является самым «старым» из четырёх собранных образцов. Максимальное содержание Hg в точке «Реактор» отмечено в период 1930–1939 гг. со средним содержанием 308 нг/г.

Исследователями выполнена датировка пиковых концентраций ртути в торфяной залежи на территории Сибирского региона (ХМАО, Томская область), по 1975 гг. Пик 1975 г. т.м. «Озерное» (ХМАО) связан с началом разработки нефтяных месторождений в Сибири. В торфяной колонке т.м. «Бакчар»

(Томская область) пик на глубине 45 см соответствует, согласно датировке, периоду Второй мировой войны [9].

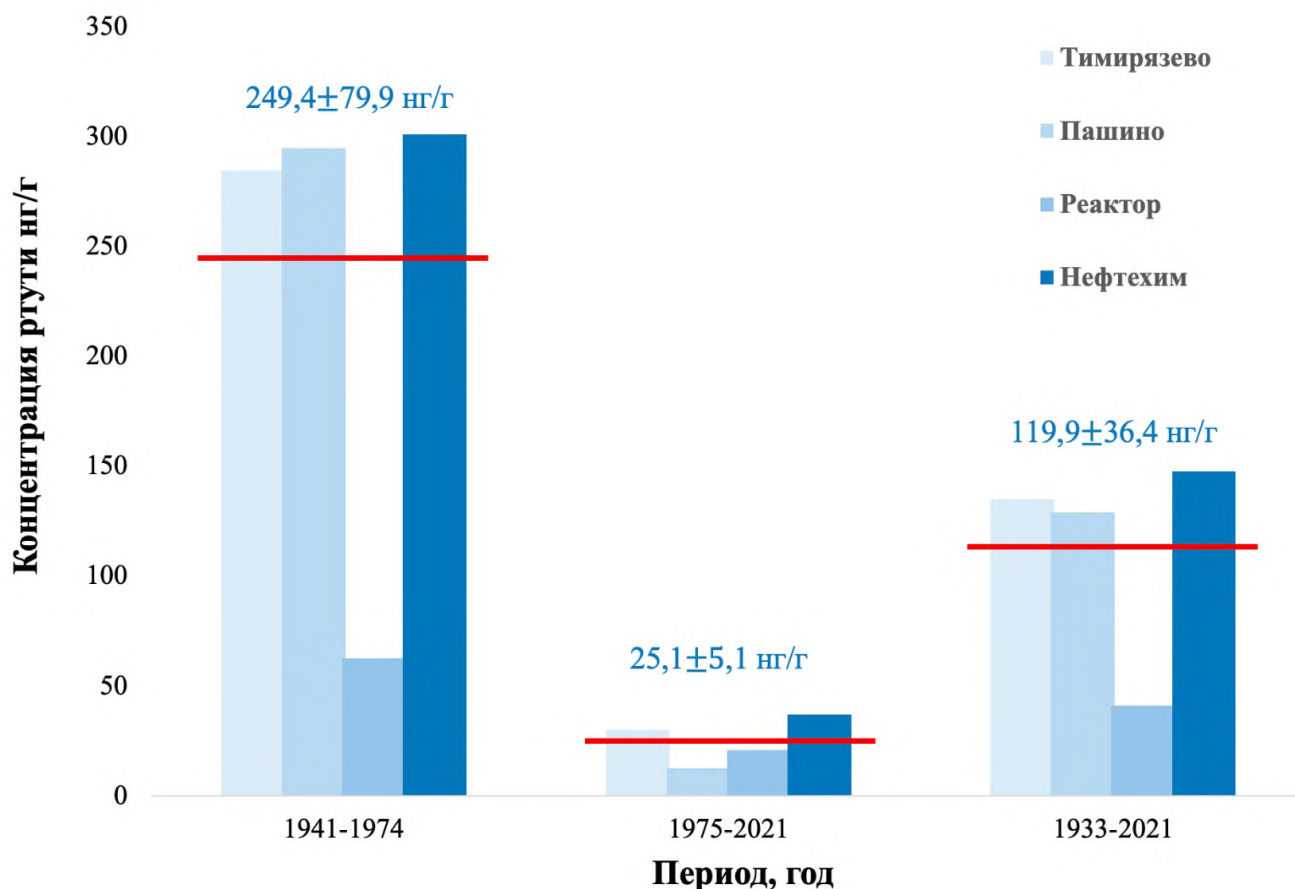


Рисунок 3.1.2 – Периоды аккумуляции ртути кернами сосны обыкновенной на территории Томского района.

Выделен период повышенных концентраций ртути с 1941 по 1974 гг. в древесине сосны трёх деревьев из четырех. Возможно, это связано с эвакуацией промышленных предприятий в годы Великой Отечественной войны.

В последующие годы пики ртутного накопления могут быть связаны и с развитием техногенных процессов. Так, накануне Великой Отечественной войны (1941–1945 гг.) промышленный сектор Томской области оставался слабо развитым и включал в себя такие отрасли, как производство строительных материалов, пищевая, лесная и деревообрабатывающая промышленность. На начальном этапе войны в Томской области была проведена конверсия производства для обеспечения фронта предметами первой необходимости и вооружением. Вследствие чего из европейской части страны в Томск было эвакуировано более 30 промышленных

предприятий, и уже к концу 1941 г. половина эвакуированных предприятий начала выпускать продукцию [206]. Большинство из них относятся к производственным предприятиям, которые в составе своей продукции или отходов содержат примеси Hg, к типичным из них относятся ярославский «Электромашиностроительный завод», «Электроламповый завод» и др.

В интервале 1940–1949 гг. объем производства продукции вырос во всех отраслях, кроме пищевой промышленности. Особенно пик 1940-х гг. был обусловлен производством химикатов для боеприпасов во время Второй мировой войны. В послевоенные 1950–1959 гг. основными отраслями промышленности были машиностроение и металлообработка, лесная и деревообрабатывающая промышленность, пищевая промышленность, на долю которых приходилось 59,2, 15,6 и 10,1 % соответственно. С 1940 по 1960 гг. работала железнодорожная линия Асино–Томск–Тайга, связывавшая областной центр с тремя соседними административными районами [206].

Общий характер накопления ртути кернами сосны обыкновенной наблюдается в точках «Пашино»–«Тимирязево» ($r=0,32$ при $P=0,05$) и «Тимирязево»–«Реактор» ($r=0,22$ при $P=0,05$). Для определения статистической значимости коэффициентов корреляции использовался t-тест (уровень значимости 0,05). Критическое значение для выборки 80 лет равно 0,22 при $P=0,05$. Связь между уровнем накопления Hg и шириной годовых колец не обнаружена.

Расчёты геоэкологических показателей показали превышение коэффициента концентрации относительно регионального фона, расчетного параметра ВДК, среднего для живого вещества и наземных растений, а также фактора обогащения Fe, наблюдающих во всех точках опробования на территории Томского района. Содержания ртути во всех исследованных точках ниже кларка ноосферы. Нормирование по [205] свидетельствует о накоплении ртути годовыми кольцами в всех точках Томского района, кроме точки «Реактор» (таблица 3.1.2).

Концентрация ртути в разных природных объектах на территории Томского района исследовалась и другими авторами, в том числе изучались почва, твердый осадок снега, хвоя, мхи, грибы, древесина сосны и тополя и эпифитные виды

лишайников [9, 11, 122, 207, 208]. В точке «Реактор» в период 1970–1984 гг. выявлен похожий характер аккумуляции поллютанта, выявленный в ранее проведенных исследованиях в кернах сосны и тополя. Однако средние содержания ртути превышают ранее полученные в 1,6–1,8 раз.

Сравнение валового содержания ртути в сопредельных средах Томского района показывает, что наибольшее содержание ртути выявлено в эпифитных видах лишайников, а наименьшее – в хвое. Рассмотрим полученные данные с превышением среднего содержания ртути в вышеуказанных средах: мхах – в 1,2–2,5 раза, почвах – в 1,2–2,7 раза; твердом осадке снега – в 1,6–1,8 раз; древесине сосны – в 1,6–1,8 раз; древесине тополя – в 1,4–1,6 раз; грибах – в 1,1–1,2 раза. Следует отметить, что среднее содержание ртути в древесных кернах в точке «Реактор» ниже, чем в твердом осадке снега, а также в древесине тополя и сосны в Томской области.

Таблица 3.1.2 – Геоэкологические показатели ртутной нагрузки на изучаемые территории по данным исследования керна сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в период с 1930 по 2021 гг.

Точки	Kc	ВДК	K _N	K _{LM}	K _{LP}	K _M	Fe
Тимирязево	15,91	7,96	0,74	2,67	8,91	1,34	66,83
Реактор	8,02	4,01	0,37	1,35	4,49	0,67	33,67
Пашино	15,19	7,59	0,71	2,55	8,51	1,28	63,79
Нефтехим	17,59	8,79	0,82	2,96	9,85	1,48	73,88

Средние содержания Hg в кернах сосны превышают ранее полученные концентрации для Томского района (рисунок 3.1.3). Следует отметить синхронность поступления поллютанта в древесину на территории Томского района. Общим характером накопления ртути древесиной *Pinus sylvestris* L. отмечаются точки «Пашино», «Тимирязево» и «Реактор».

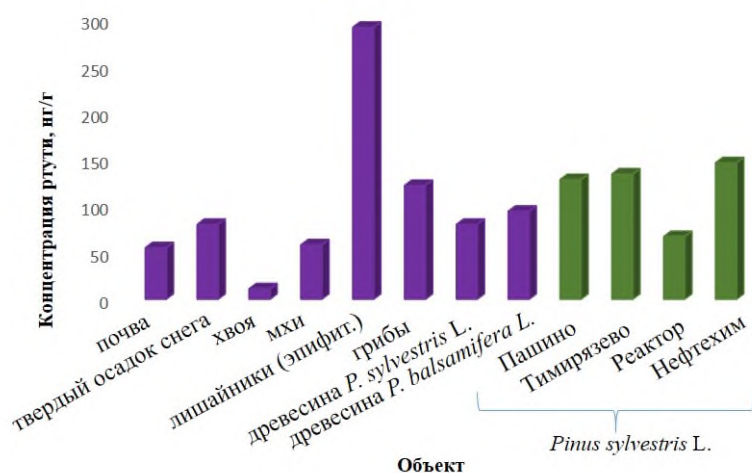


Рисунок 3.1.3 – Содержание ртути в древесине сосны обыкновенной по сравнению с другими объектами окружающей среды на территории Томского района (объекты сравнения приведены по данным авторов: [9, 11, 122, 207])

Таким образом, содержание ртути в годовых кольцах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) Томского района варьируется в широких пределах – 1–3986 нг/г, при среднем 118 нг/г. Максимальный уровень содержания Hg зафиксирован в точке «Нефтехим», а минимальный – в точке «Реактор». Нами выявлены тенденции к уменьшению содержания во временном ряду с 1932 по 2021 гг. и установлено четкое увеличение содержания Hg за период 1930–1974 гг. Анализ показал, что повышенные концентрации связаны с технологическим прогрессом, наращиванием военного производства и общей глобальной тенденцией. Установлено, что средние содержания Hg в древесине сосны выше содержаний в природных объектах в ранее проведенных исследованиях по Томской области, за исключением лишайников. Более того, результаты расчетов геоэкологических параметров свидетельствуют о превышении коэффициента концентрации относительно регионального фона, расчетного параметра ВДК, среднего для живого вещества и наземных растений.

3.2 Эколого-геохимическая оценка ртутной нагрузки на территории г. Далат, Социалистическая Республика Вьетнам по результатам изучения годовых колец деревьев

В ходе проведенного исследования была обнаружена ртутная нагрузка в трех точках территории Социалистической Республики Вьетнам (РВ): две точки в городе Далат и одна точка в провинции Даклак. Экологическая обстановка на территории РВ в значительной степени зависит от промышленной нагрузки, природных геохимических условий, а также загруженности транспортных магистралей. Основные загрязнители могут быть связаны с действующим промышленным узлом Фатчи, сельскохозяйственной деятельности и высокой плотностью транспортных магистралей, учитывая состояние г. Далат как важного туристического направления Центрального нагорья.

Следует отметить, что на Восточную и Юго-Восточную Азию приходится около 80 % общих выбросов ртути в Азии и около 40 % общего объема глобальной ртути [157]. Выбросы ртути из этого региона оказывают значительное влияние на концентрации ртути в атмосфере в подветренных районах, таких как Япония, Тайвань и северная часть Восточного моря [19, 21, 209–212]. В ряде исследований было отмечено значительное превышение содержания ртути в воздушных массах из Китая, а также существенное влияние муссонов на загрязнение ртутью Хошимина, мегаполиса Юго-Восточной Азии. Однако до сих пор отсутствуют исследования, посвященные содержанию ртути в разных биохимических средах Центрального нагорья южной части Республики Вьетнам. Тем не менее можно предложить, что существенный вклад вносит трансграничный перенос с Восточной Азии в южную часть Республики Вьетнам.

Концентрации Hg в Республике Вьетнам находятся в пределах 1–11510 нг/г. Результаты ртутного анализа в древесине сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) указывают на наличие повышенного содержания ртути в двух точках г. Далат, пониженного содержания в точке провинции «Даклак», расположенной в 280 км к юго-западу от центра г. Далат (таблица 3.2.1).

Таблица 3.2.1 – Статистические параметры содержания ртути в древесных кернах *Pinus dalatensis* Ferré на территории Социалистической Республики Вьетнам.

Точка	Возраст, лет	Среднее	<u>мин–мак</u> медиана	Стандартное отклонение	Кв
Даклак	93	12,4±1,1	$\frac{5-65}{10}$	10,9	88
ДЛ03	93	882,9±207,1	$\frac{5-11380}{12,3}$	2017,4	227
ДЛ04	82	876,4±272,9	$\frac{5-11510}{6,7}$	2471,5	282

Примечание: Кв – Коэффициент вариации

Расчет Кв (80–282 %) показывает, что существует неравномерность распределения содержания ртути в древесных кернах сосны в двух опробованных точках.

На рисунке 3.2.1 показана тенденция снижения накопления ртути в древесных кернах во временном ряду от 1932 к 2023 гг. При рассмотрении особенности динамики накопления ртути по всей хронологии в древесных кернах резко выделяются два периода с разным уровнем содержания ртути. Временной интервал с высокими значениями содержания Hg приходится на 1932–1969 гг., кратность превышения по сравнению со средним содержанием в точке «ДЛ03» составляет 2,4 раза, в точке «ДЛ04» – 3 раза и в точке провинция «Даклак» – 1,5 раза. Среднее содержание Hg в кернах составляет 2169; 2649; 19 нг/г в период с 1932 по 1969 гг. и 10; 6; 8 нг/г – с 1970 по 2023 гг. в точках «ДЛ03», «ДЛ04» и «Далак» соответственно.

Вьетнам является развивающейся страной, до окончания войны 1970-х гг. его экономикой являлось отсталое сельское хозяйство. Негативное влияние в военные годы было отмечено значительными изменениями природной среды. С начала XX в. г. Далат считался отдалённым местом с малочисленным населением. Во время Первой мировой войны (1914–1918 гг.) европейцы выбрали г. Далат в качестве места отдыха. К концу 1930-х гг. были завершены важные инфраструктурные проекты, такие как электростанции, автомобильные и железные дороги. К 1940 г. население города значительно увеличилось.

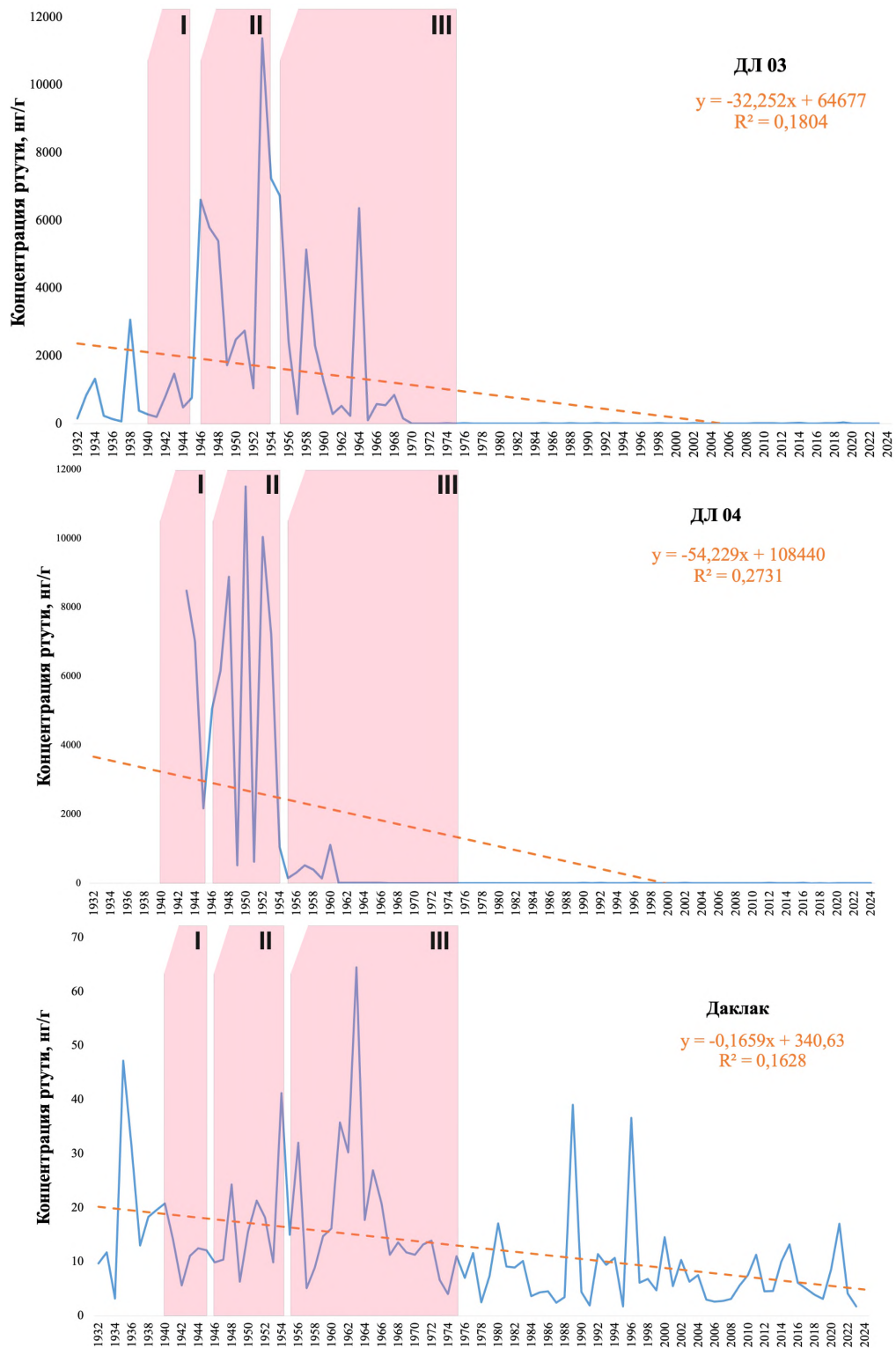


Рисунок 3.2.1 – Концентрация ртути в древесных ядрах на территории Республики Вьетнам: I – война за защиту Отечества против японского империализма (1940–1945 гг.); II – Первая Индокитайская война против Французского колониализма (1946–1954 гг.); III – Вторая Индокитайская война против Американского империализма (1955–1975 гг.)

На рисунке 3.2.1 («ДЛ03», «ДЛ04») показана корреляция между динамикой накопления ртути в сосновых кернах и историческим периодом войны за защиту Отечества против японского империализма (1940–1945 гг.), Первой Индокитайской войны против Французского колониализма (1946–1954 гг.) и Второй Индокитайской войны против Американского империализма (1955–1975 гг.). Очевидно, что количество пиковых концентраций и периоды их локализации во временном интервале совпадают с хронологией военных конфликтов.

Среднее содержание ртути в точке «Даклак», расположенной в 280 км от г. Далат, составляет 12,5 нг/г (5–65 нг/г). В этом районе отсутствуют крупные промышленные предприятия и природные источники выбросов ртути в окружающую среду. Потоки поступления ртути в годовом кольце могут быть связаны с трансграничным переносом загрязнителей при глобальном выпадении ртути и с деятельностью по сжиганию биомассы, соответствующей вырубке лесов этническими меньшинствами в Центральном нагорье Вьетнама.

В ходе корреляционного анализа выявлены закономерности потоков ртути в годовых кольцах деревьев с использованием нулевой гипотезы при 5 % уровне надежности. Были проанализированы керны за 93 года, что составило значение коэффициента корреляции 0,22 при уровне значимости 95 %. Таким образом, была выявлена положительная корреляция концентрации Hg между токами «ДЛ03» «ДЛ04» ($r=0,3$ при $p<0,05$).

При анализе геоэкологических показателей двух кернов, отобранных в г. Далат, отмечены превышения всех рассчитанных значений. В керне из точки провинция «Даклак» среднее содержание ртути превышает фоновое содержание, расчет Fe свидетельствует об обогащении ртутью древесины в данной точке опробования. ВДК, кларк ноосферы, коэффициент концентрации относительно среднего для живого вещества и наземных растений, а также нормирования по B. Market и фактор обогащения в остальных исследованиях точка показывают накопление поллютанта в значительных концентрациях (таблица 4.2.2).

Таблица 4.2.2 – Геоэкологические показатели ртутной нагрузки на территории Республики Вьетнам по данным дендрогеоэкологических исследований керна сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) в период с 1932 по 2023 гг.

Регион	Точки	K _c	ВДК	K _N	K _{LM}	K _{LP}	K _M	Fe
Республика Вьетнам	ДЛ03	105,11	52,56	4,91	17,66	58,86	8,83	441,47
	Даклак	1,48	0,74	0,07	0,25	0,83	0,12	6,20
	ДЛ04	103,08	51,54	4,81	17,32	57,72	8,66	432,92

Таким образом, нами установлено, что среднее содержание ртути в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) южных провинций Республики Вьетнам составляет $593,7 \pm 161,1$ нг/г. Выявлены повышенные содержания ртути в двух точках г. Далат и пониженные содержания ртути в точке провинции «Далак», расположенной в 280 км юго-западу от центра г. Далат. Выделяется тенденция понижения накопления Hg в древесине сосны во временном ряду от 1932 к 2023 гг. Нами выявлены повышенные средние содержания ртути в период 1930–1970 гг., который совпадает с технологическим влиянием Вьетнамской войны и наличием локальных источников. Результаты расчетов геоэкологических параметров показывают превышение всех значений на территории г. Далат, а на территории провинции «Даклак» наблюдается обогащение элементом древесины сосны по сравнению с фоном, по данным нормирования по скандию.

3.3 Сравнительная характеристика ртутной нагрузки на территории Сибири и Республики Вьетнам по результатам изучения годовых колец деревьев

При анализе дендрогеохимических показателей в первую очередь необходимо учитывать особенности геоэкологической обстановки и климатические особенности изучаемых территорий. Эти факторы напрямую влияют на биологические и биохимические реакции, протекающие в окружающей среде, тем самым способствуя биохимической кинетике растения, что служит подтверждением способности растения накапливать элементы. Признано, что

условия обитания сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) значительно различаются по уровню промышленной нагрузки, природным геохимическим условиям.

Таблица 3.3.1 – Особенности ртутной нагрузки в кернах *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района и *Pinus dalatensis* Ferré на территории южных провинций Республики Вьетнам

Территория	Пункт отбора проб	Среднее содержание Hg, нг/г		Пики год/С _{Hg} , нг/г	Медиан, нг/г
		Вся выборка	Период, год С _{Hg} , нг/г		
Томский район	Тимирязево	133,7±23,9	<u>1942–1973</u> 293 <u>1974–2021</u> 30	<u>1942</u> 1170	47,0
	Пашино	127,6±47,2	<u>1942–1972</u> 312 <u>1973–2021</u> 13	<u>1947</u> 3505	17,7
	Реактор	67,3±21,6	<u>1930–1971</u> 125 <u>1972–1988</u> 6 <u>1989–2021</u> 27	<u>1932</u> 1953	27,0
	Нефтехим	146,1±51,2	<u>1941–1971</u> 325 <u>1972–2021</u> 38	<u>1942</u> 3986	29,0
Республика Вьетнам	ДЛ03	882,9±207,1	<u>1932–1970</u> 2117 <u>1971–2023</u> 8	<u>1954</u> 11380	10
	ДЛ04	876,4±272,9	<u>1943–1960</u> 3968 <u>1961–2023</u> 7	<u>1950</u> 11510	12,3
	Daklak	12,4±1,1	<u>1932–1973</u> 18 <u>1974–2023</u> 8	<u>1964</u> 65	6,7

Анализ разброса минимальных и максимальных значений по отношению к среднему позволяет дать предварительную оценку эколого-геохимического состояния на исследуемой территории. Таким образом, можно сделать вывод, что незначительный разброс и соответствие среднего значения медианному позволяют оценить неравномерное распределение ртути при коэффициенте вариации более 100 % в кернах сосны как и на территории Томского района, так и в г. Далат Республики Вьетнам (161–332 и 227–282 соответственно) (таблица 3.1.1, 3.2.1). Неравномерное распределение элемента может свидетельствовать о наличии аномальных значений содержания ртути с высокой частотой, наблюдавшихся в период наиболее техногенного воздействия 1930–1970 гг. (таблица 3.3.1).

Полученные результаты свидетельствуют о широком размахе уровней содержания Hg. Наибольшая разница в содержании Hg в древесине сосны отмечается во Вьетнаме 5–11510 нг/г. Кроме того, в точке провинция «Даклак» разброс минимальный: 5–65 нг/г. Наименьший разброс концентраций элемента в Томской области составляет 5–3986 нг/г. Среднее валовое содержание Hg в годовых кольцах на территории исследования установлено: Вьетнам – 582,1 нг/г, Томская область – 118,2 нг/г (рисунок 3.3.1).

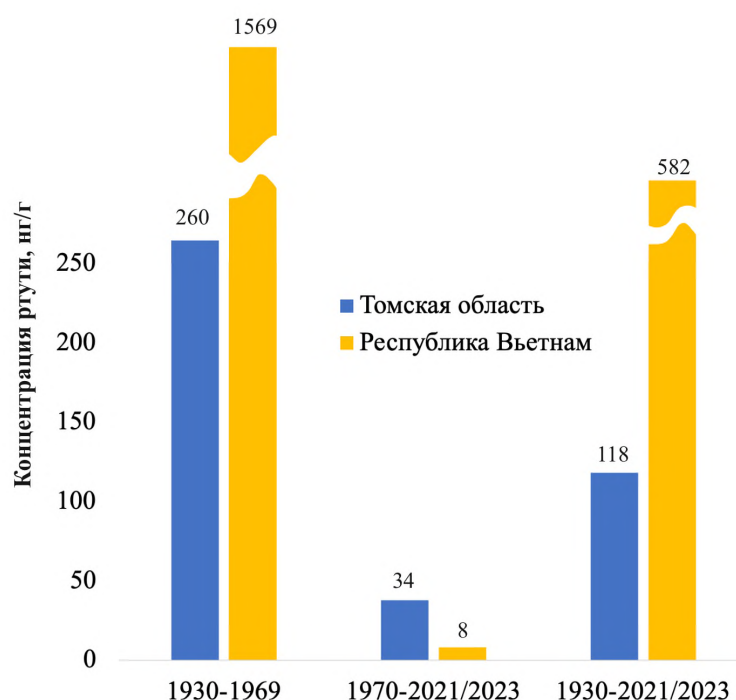


Рисунок 3.3.1 – Валовое содержание Hg в годовом кольце сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré)

Похожий характер распределения Hg отмечается и в керне сосны в Сибирском районе и южных провинциях Республики Вьетнам: повышенное по сравнению со средним содержанием ртути в период с 1930 по 1969 гг. (260, 1569 нг/г соответственно) и сниженное – с 1970 по 2021/2023 гг. (34 и 8 нг/г соответственно) (рисунок 3.3.1).

Максимальное значение ртути отмечается в период с 1930 по 1969 гг. на территории Вьетнама, краснота превышения по сравнению с содержанием за данный период в Томской области составляет 6 раз. Минимальное содержание ртути в период 1970–2023 гг. во Вьетнаме в 4 раза ниже, чем в Томской области.

Повышенные средние концентрации обусловлены повторением пиков концентраций Hg в отдельных годовых кольцах деревьев, характерных для южных провинций Республики Вьетнам в период военных действий. Следовательно, среднее содержание в соснах Республики Вьетнам превышает таковое в Томской области. Анализ медианного значения ртути сосны для Томского района составляет 30,8 нг/г, а для южных провинций Республики Вьетнам – 9,3 нг/г. Увеличение медианного значения в древесине объясняется локальными эколого-геохимическими условиями Томской области, которые отличаются от условий южных провинций Республики Вьетнам. На территории Томской области расположены крупный промышленный объект – Сибирский химический комбинат. Проведенные исследования показали, что вблизи нефтеперерабатывающего предприятия ООО «Томскнефтехим», предприятия ядерного теплового цикла, тепловых электростанций «ГРЭС-2», «ТЭЦ-1» и «ТЭЦ-3», а также жилых районов с преобладающим печным отоплением и локальными котельными наблюдаются техногенные ореолы повышенного содержания Hg в волосах детей [213, 214], растениях [9, 121, 122, 216], торфах [9, 217], почво-грунтах [207, 218, 219] и снежном покрове [11, 215]. На территории Республики Вьетнам присутствие крупных предприятий, выбрасывающих ртуть в окружающую среду, минимально. Наиболее значительными источниками выбросов ртути в локальных эколого-геохимических условиях были названы сжигание биомассы, использование

удобрений и пестицидов в сельскохозяйственной деятельности, а также добыча золота в колониальный период.

Выделяются закономерности распределение максимального всплеска Hg практически вне зависимости от территории опробования в период 1930–1969 гг., которые совпадают с технологическим прогрессом, наращиванием военного производства и тенденцией в моделировании глобальных тропосферных концентраций Hg(0) на основе последних инвентаризаций выбросов ртути [146, 156, 157]. Результаты данного исследования выявили сходные тенденции изменения содержания Hg в разнообразных озерных отложениях [220], торфе в Швеции [118], годовых кольцах фоновых районов лиственницы европейской (*Láris decidua*) [141] и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) [140] в Центральной Европе (Чешская Республика), ели белой в Северной Америке (Канада) [146], талых осадков во Франции за 1840–2000 гг. [158], а также промежуточного воздуха фирна в Гренландии с 1940 по 2000 гг. [153]. Несмотря на наблюдаемые различия в значениях содержаний Hg, тенденция и пики содержания Hg в разных стратифицированных образованиях окружающей среды (ледники, донные осадки, годовые кольца деревьев) демонстрируют значительную последовательность и корреляцию. В большинстве случаев зафиксирована тенденция увеличения содержания ртути с 1800-х гг., достигшая максимума в 1970-х гг., которая затем постепенно снизилась в 2000-х гг.

В 2024 г. исследователи из Китая составили базу данных записей о ртути в природных архивах, охватывающую период с 1700 по 2012 гг., используя данные из 221 кернов льда (4 %), торфа (13 %), озер (72 %) и морских отложений (11 %) в восьми ключевых регионах: Северной Америке (47 %), за которой следуют Европа (11 %), Арктика (11 %, в основном Гренландия), Латинская Америка (9 %, в основном Центральная Америка и западные Анды), Центральная Азия (8 %, в основном Тибетское нагорье), Восточная Азия (6 %), Центральная и Южная Африка (3 %) и Океания (2 %) (рисунок 3.3.2).

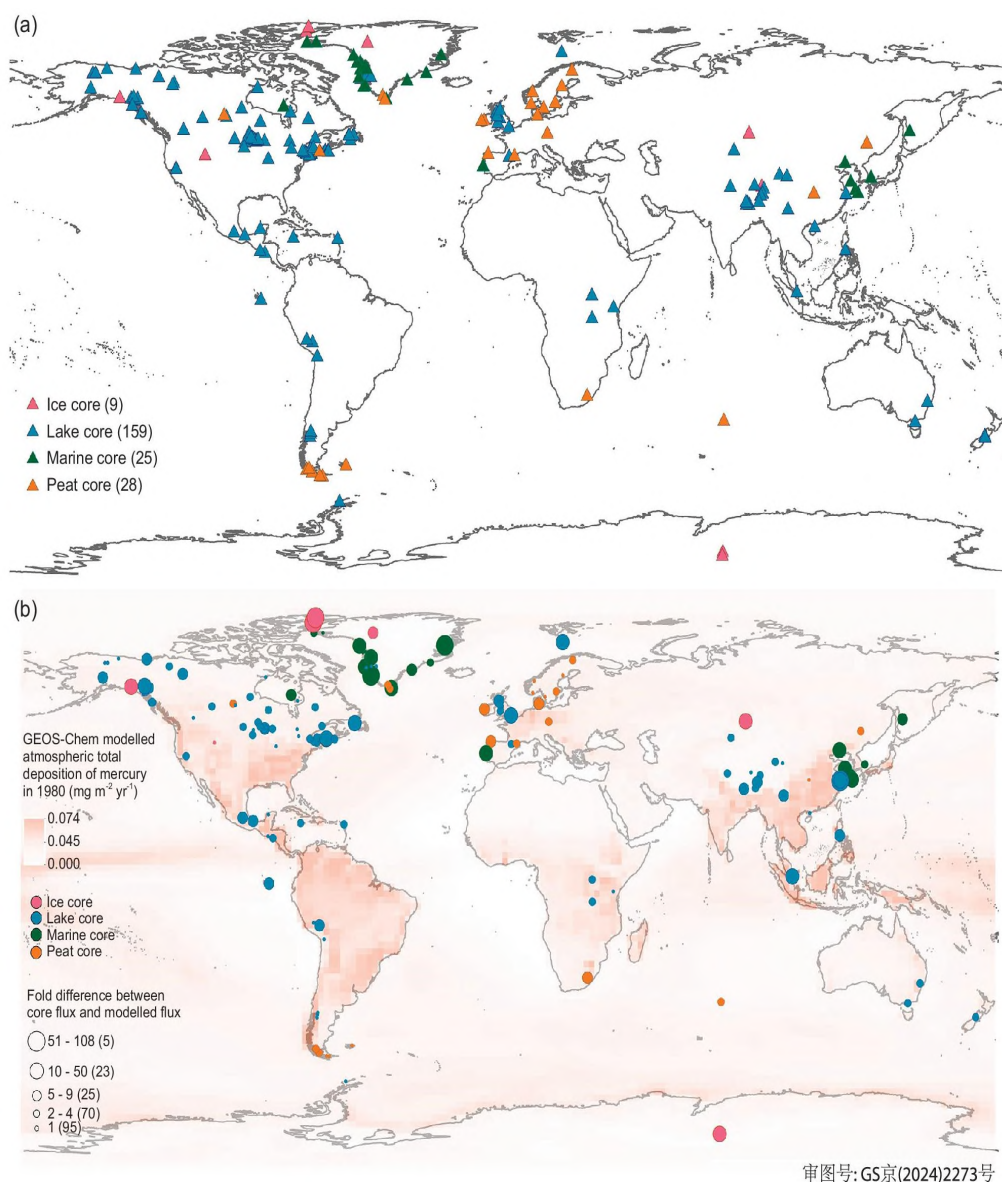


Рисунок 3.3.2 – (а) Пространственное распределение записей естественного архива Hg. Цифры в скобках обозначают количество кернов из соответствующих естественных архивов, собранных в базе данных. Некоторые керны, собранные из тех же или из близлежащих мест, не полностью видны на рисунке; (б) Сравнение между естественными архивными потоками ртути и общими (влажными + сухими) потоками атмосферного осаждения ртути, смоделированными GEOS-Chem на каждом участке отбора кернов в базовом 1980 г. – году с наибольшим количеством кернов [18].

Более крупные круги указывают на большие различия в величине. Как правило, потоки ртути из озера, торфа и морской ртути больше, чем

смоделированные общие потоки атмосферного осаждения ртути, в то время как потоки ртути из льда меньше. В общей сложности 42 % кернов показывают хорошее согласие с смоделированными значениями, на что указывает разница в пределах 1 раза. Однако 12 % кернов демонстрируют различия >10 раз, в основном морские и ледяные керны [18].

Ученые составили и сравнили базу данных накопления ртути из торфяных, озерных, ледяных и морских отложений по всему миру с атмосферным осаждением ртути, смоделированным GEOS-Chem, сосредоточившись на тенденциях, величинах, пространственно-временном распределении и факторах воздействия.

Потоки ртути во всех четырех отложениях показали 5-9-кратное увеличение за период с 1700 по 2012 гг., при этом потоки ртути из озер и торфа в целом отражали тенденции атмосферного осаждения. Значительное снижение потоков ртути из озер и торфа после 1950 г. в Европе свидетельствует об эффективной экологической политике, тогда как рост в Восточной Азии, Африке и Океании подчеркивает, в частности, воздействие использования угля.

Начиная с 1900 г. потоки ртути из озер и торфа во всех регионах начали расти, но их траектории разошлись после 1950-х гг. Европа была единственным регионом, который показал значительное снижение, при этом потоки ртути из озер и торфа снизились на 94 и 97 %, соответственно, с соответствующих пиков в 1950-х и 1970-х гг. до 2012 г.

В 2012 г. потоки упали до 0,039 (0,026, 0,052) мг/м²/год в кернах озер и 0,022 (0,014, 0,030) мг/м/год в кернах торфа. Эти уровни 2012 г. очень похожи на доиндустриальные уровни, когда поток ртути из озера составлял 0,027 (0,015, 0,039) мг/м²/год в 1866 г., а поток ртути из торфа – 0,006 (0,004, 0,008) мг/м²/год в 1760 г. (самый ранний год с несколькими кернами). Значительное сокращение, наблюдаемое в кернах озер и торфа в последние десятилетия, хорошо согласуется с тенденциями к снижению и темпами смоделированных общих атмосферных отложений ртути в период 1980–2012 гг. и с наблюдаемой концентрацией Hg⁰ и влажным осаждением Hg²⁺ в период 1990–2010 гг.

Потоки ртути из озер в Океании, Центральной и Южной Африке и Восточной Азии испытывали усиленное накопление ртути вплоть до 2012 г. (рисунок 3.3.3).

95 % затененных областей представляют доверительные интервалы, а «n» рядом с каждой линией указывает на максимальное количество кернов, использованных при построении графика. На график нанесены только потоки, которые были усреднены из двух или более кернов. Пунктирные удлиненные линии указывают на то, что потоки были рассчитаны с использованием как данных кернов, так и прогнозируемых значений, полученных с помощью общей аддитивной модели (GAM).

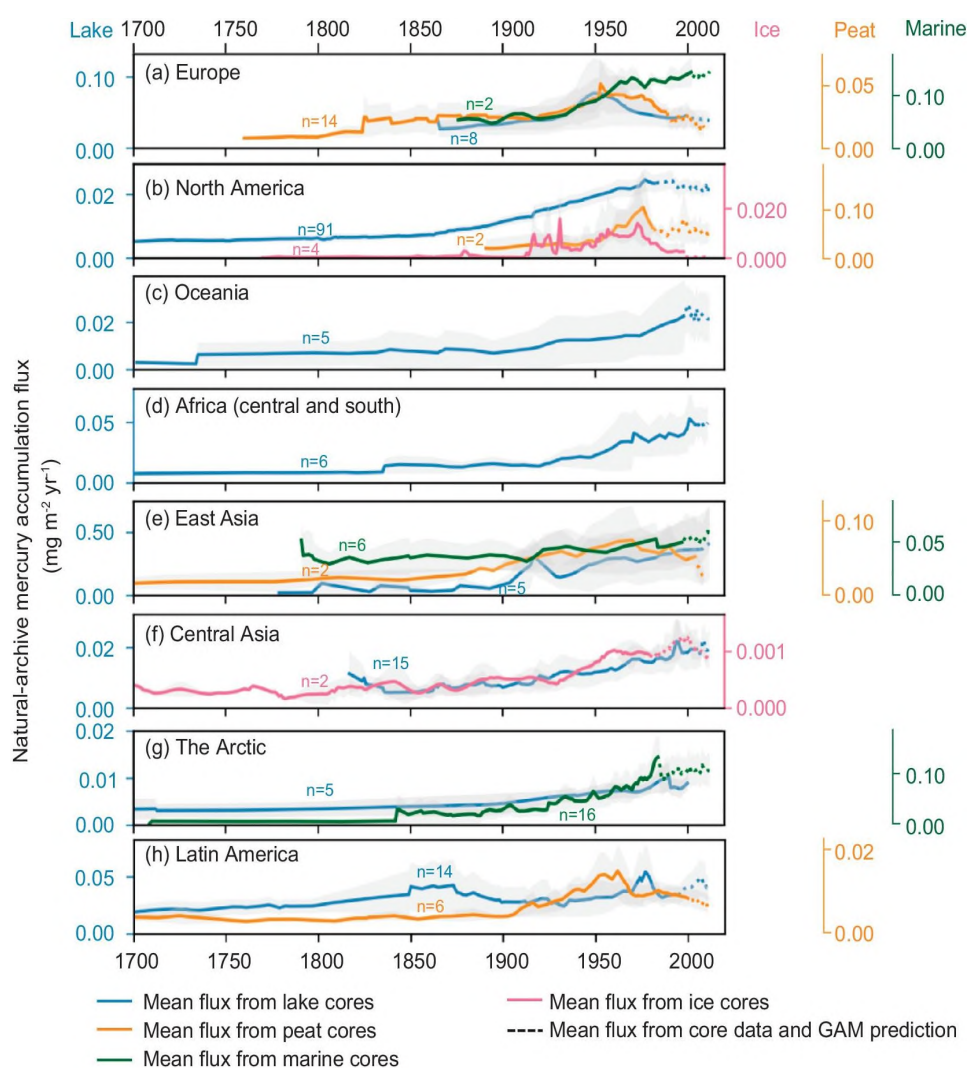


Рисунок 3.3.3 Синтезированные региональные потоки накопления ртути, реконструированные по льду, торфу, озерным отложениям и морским отложениям с 1700 по 2012 год [18].

Недавнее увеличение потоков ртути из озер согласуется с смоделированным атмосферным осаждением в период 1980–2012 гг. Увеличение, вероятно, было вызвано ростом использования угля в Австралии, Южной Африке и Китае, которое выросло на 71, 190 и 533 % соответственно за тот же период [221]. Дополнительный вклад в это увеличение мог быть внесен деятельностью по кустарной и мелкомасштабной добыче золота (ASGM), которая в настоящее время является крупнейшим источником выбросов ртути [16]. Частично вызванная резким ростом цен на золото после 2000-х гг., ASGM распространилась в развивающихся регионах по всему миру, включая Центральную и Южную Африку и Китай [222, 223]. Однако масштабы выбросов ASGM несут в себе значительную неопределенность и требуют дальнейшей проверки.

Потоки морской ртути в океанах Европы, Арктики и Восточной Азии продемонстрировали тенденции к росту. Эти подъемы особенно примечательны для Европы и Арктики, где тенденции атмосферного осаждения снижались. В Европе морские керны показали значительную тенденцию к росту на 3 % в год до 1960-х гг., которая затем замедлилась до 0,4 % в год до 2012 г. Эта тенденция к росту резко контрастирует с ранее обсуждавшимся снижением смоделированного атмосферного осаждения региона и потоков ртути из озер и торфа после поворотных периодов 1950-х и 1970-х гг. соответственно. К 2012 г. потоки морской ртути в Европе достигли 0,144 (0,140; 0,148) мг/м²/год, что является одним из самых высоких уровней в базе данных.

Более глубокое влияние использования угля очевидно в Восточной Азии, Африке и Океании, где уголь оставался основным источником энергии, по крайней мере до 2012 г. Следовательно, потоки ртути из озер в этих регионах показали монотонный рост, причем Восточная Азия стала особенно интенсивной точкой накопления ртути [18].

Результаты данного исследования хорошо согласуются с данными, приведенными в работе китайских ученых 2024 г., в которой объясняются полученные нами тенденции и закономерности.

3.4 Влияние климатических характеристик на поступление ртути в годовые кольца

Немалый вклад в накопление химических элементов растениями вносит климат: один вид растений произрастает в умеренном климате, другой – в тропическом муссонном. Заметные различия отмечаются в уровнях накопления ртути годовыми кольцами двух видов растений.

Для установления влияния климатических показателей на поток ртути в годовых кольцах был выполнен кластерный анализ и построена дендрограмма, что позволяет определить группы климатических параметров, которые связаны с содержанием Hg в хронологиях колец. В процессе анализа использовался метод Варда, при этом расстояния оценивались как $1-r$, где r – коэффициент парной корреляции Пирсона с наибольшими значениями.

Анализ дендрограммы показывает, что в первую очередь на поступление элемента в древесину сосны влияет сумма осадков, как за года, так и в течение вегетационного периода, и в период с положительными температурами. Кроме того, важным является количество дней с осадками в течение года и за вегетационный период. Влияние на вегетацию оказывает накопленный в течение зимнего периода снег. Количество дней с температурами $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и сумма температур за этот период также важны при исследовании поступления ртути в деревья (рисунок 3.4.1).

Для уточнения полученных зависимостей выполнен факторный анализ по методу главных компонент. На распределение концентрации ртути и климатических параметров оказывают влияние два значимых фактора, суммарное воздействие которых составляет 52,1 %. «Фактор 1» (32,3 %) указывает на положительную значимость при накоплении Hg осадков за вегетационный период и при температуре $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$, и также продолжительность этих периодов. «Фактор 2» (19,7 %) выделил осадки как в течение календарного года, так и за зимний период, в том числе и предыдущего года. Все зависимости характеризуются положительным знаком.

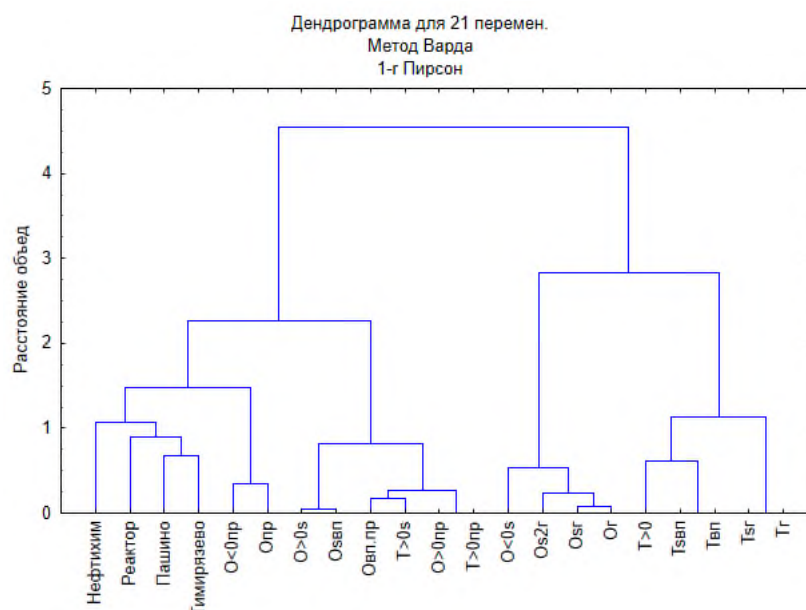


Рисунок 3.4.1 – Дендрограмма корреляционной матрицы влияния климатических параметров на поступление ртути в годовые кольца *Pinus sylvestris* L. (1930-2021 гг.) на территории Томской области (1-Pearson $r=0,21$), показатели: Тг – среднегодовая; Тсг – сумма за год; Твп – за вегетационный период; Тсвп – сумма за вегетационный период; Т>0; Т>0s – сумма положительных температур; Т>0пр – продолжительность периода с положительными температурами; Осадки: Ог – среднегодовая; Осг – сумма за год; Опр – количество дней с осадками в течение года; Осп – сумма за вегетационный период; Овп.пр – количество дней с осадками за вегетационный период; О>0s – сумма при положительных температурах; О<0s – сумма при отрицательных температурах; О>0пр – количество дней с осадками при положительных температурах; О<0пр – количество дней с осадками при отрицательных температурах; Os2г – сумма за 2 года.

То есть с повышением температуры и увеличением количества осадков содержание ртути в древесине сосны возрастает. Полученные закономерности согласуются с данными, приведенными для хвой сосны [9] на территории Томской области и Сибирского региона в целом [109]. Как известно, во влажной среде существует возможность повышения растворимости элементов, а также проводимости stomы, что способствует ассимиляции поллютанта растением [224–226]. При повышении температуры воздуха пары ртути с подстилающей

поверхности становятся более активными наряду с биологическими и биохимическими реакциями окружающей среды, которые способствуют биохимической кинетике растения, что подтверждает способность накапливать элемент растениями [111, 112].

В период с 1933 по 2021 гг. наблюдается в Томской области повышение температуры, как за год, так и в течение вегетационного периода. Увеличивается не только температура воздуха, но и продолжительность периода с положительными температурами. Количество осадков, наоборот, снижается. Отдельно стоит отметить, что во временном интервале с повышенными концентрациями ртути в древесных ядрах (1941–1974 гг.) отмечается наибольшая сумма осадков в течение как вегетационного периода, так и за год. Данная тенденция отображена в расчетах, представленных на рисунке 3.4.1.

Результаты корреляционного анализа выявили влияние на аккумуляцию ртути северо-восточных и юго-западных ветров в течение года. Юго-западные ветра играют важную роль в поступлении элемента в течение вегетационного периода, при положительных температурах и в течение зимнего периода. Кластерный анализ подтвердил преобладающую роль в атмосферном переносе ртути южного, восточного и западного ветров за год, в течение вегетационного периода, при положительных и отрицательных температурах, а также их продолжительность, что совпадает с долей ветров этих направлений, о чем свидетельствует роза ветров как за весь период исследования, так и в периоды повышенных концентраций ртути (рисунок 3.4.2).

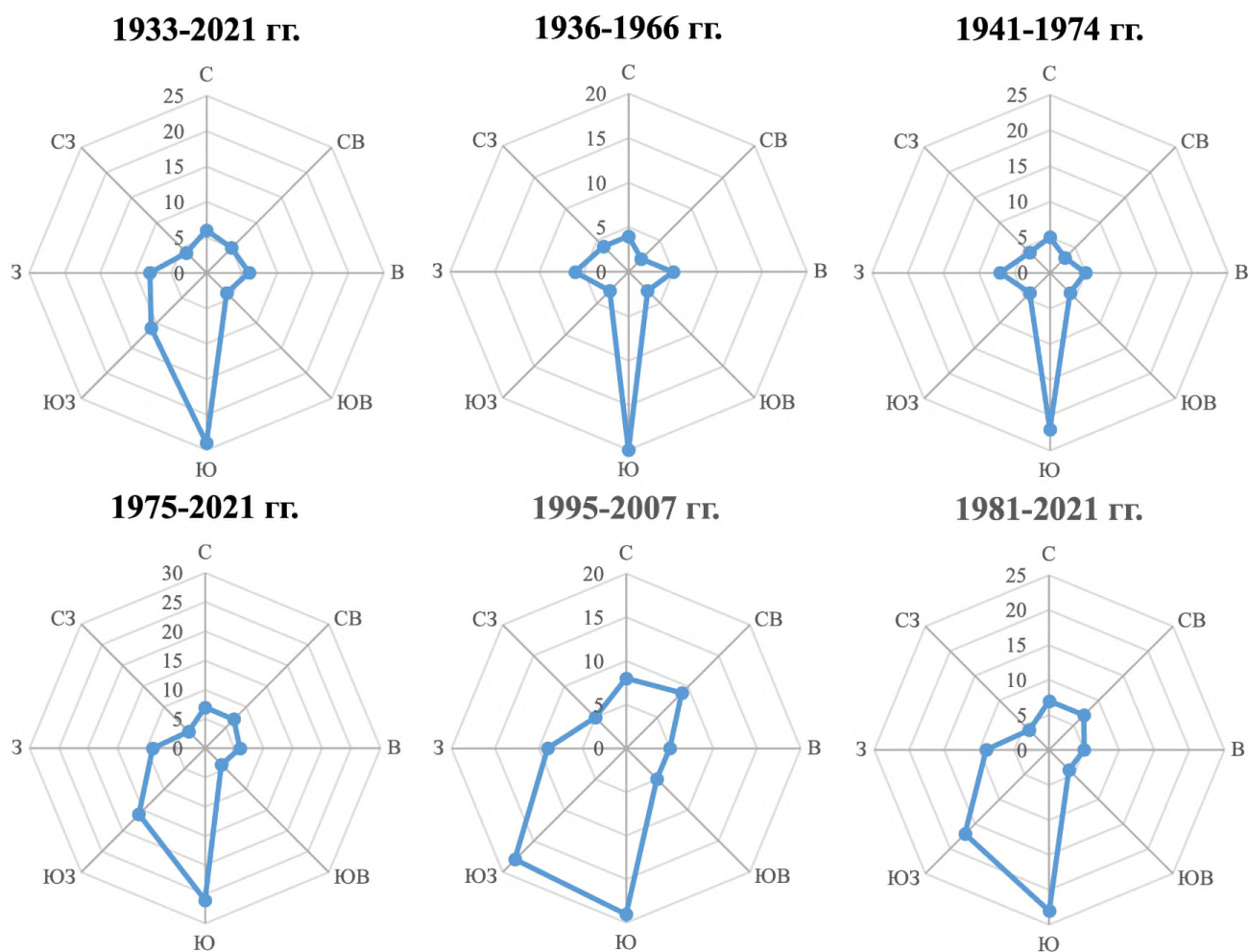


Рисунок 3.4.2 – Роза ветров по данным метеостанции г. Томска

Для сравнения взаимосвязи динамики накопления ртути и метеорологических параметров между двумя изучаемыми территориями была построена дендрограмма за период с 1981 по 2021 гг. (рисунок 3.4.3). Результаты отличаются от тех, что были получены при изучении всей хронологии колец деревьев. На содержание ртути влияют средние температуры как в течение года, так и в период положительных температур, а также суммы осадков как в течение года, так и за вегетационный период. Кроме того, в накопление Hg в сосне Томской области за последние 40 лет значительный вклад внесли количество дни с осадками при отрицательных температурах и сумма осадков за этот период.

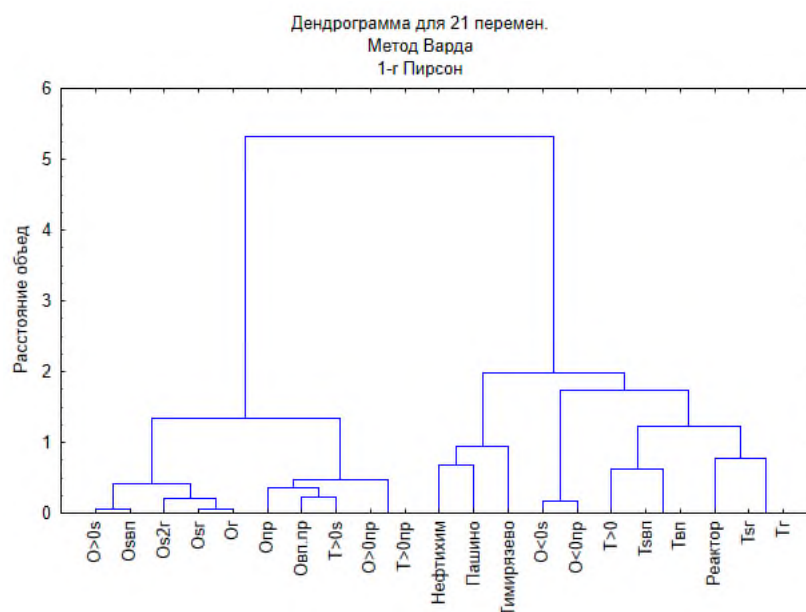


Рисунок 3.4.3 – Дендрограмма корреляционной матрицы влияния климатических параметров на поступление ртути в годовые кольца *Pinus sylvestris* L. на территории Томской области (1981–2021 гг.) (1-Pearson $r=0,32$), показатели: Tг – среднегодовая; Tsr – сумма за год; Tвп – за вегетационный период; Tsvп – сумма за вегетационный период; T>0; T>0s – сумма положительных температур; T>0пр – продолжительность периода с положительными температурами; Осадки: Or – среднегодовая; Osr – сумма за год; Opr – количество дней с осадками в течение года; Osvп – сумма за вегетационный период; Oвп.пр – количество дней с осадками за вегетационный период; O>0s – сумма при положительных температурах; O<0s – сумма при отрицательных температурах; O>0пр – количество дней с осадками при положительных температурах; O<0пр – количество дней с осадками при отрицательных температурах; Os2г – сумма за 2 года.

Были выявлены два значимых фактора на распределение концентрации ртути и климатических параметров Томского района в период 1981–2021 гг. Установлено, что вклад первого фактора составляет 34,5 % в общую дисперсию и демонстрирует отрицательную связь между количеством дней с положительными температурами, продолжительностью осадков в течение года, за вегетационный период и с положительными температурами, а также суммой осадков за весь изучаемый период и количеством за год. Второй фактор со значимой нагрузкой

11,2 % имеет положительную связь с суммой температур за год и за вегетационный период, также со средними температурами за год, за вегетационный период и в период с положительными температурами.

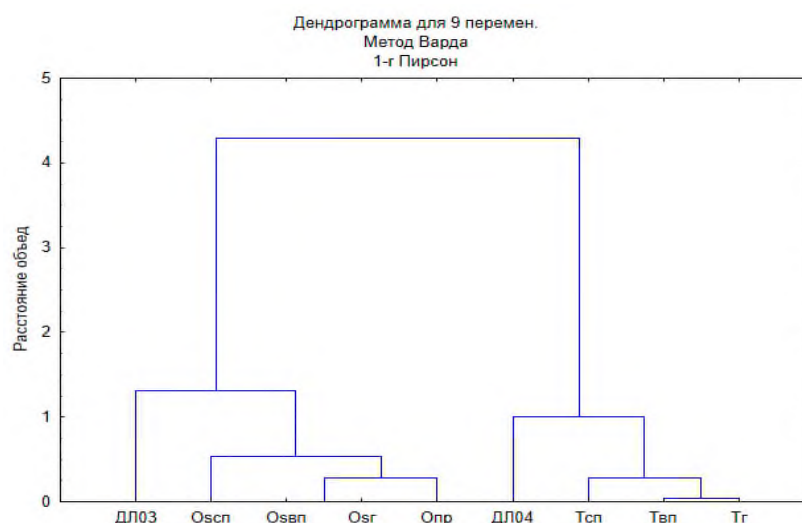


Рисунок 3.4.4 – Дендрограмма корреляционной матрицы климатических параметров на поступление ртути в годовые кольца *Pinus dalatensis* Ferré на территории Томской области (1981–2021 гг.) (1-Pearson $r=0,32$), показатели: Температура: Тг – среднегодовая; Тсп – за дождливый период; Тсп – за сухой период; Осадки: Oсп – сумма за год; Опр – количество дней с осадками в течение года; Oспп – сумма за дождливый период; Oспп – сумма за сухой период;

Похожий характер накопления ртути в зависимости от метеопараметров (1981–2021/2023 гг.), представленный на дендрограмме по двум исследованным точкам на территории Республики Вьетнам, зависит от сумм осадков и средних температур как в течение года, так и в вегетационный период (рисунок 3.4.4). Отчетливо выделяются два основных фактора, на долю которых приходится 74,8 % общей дисперсии. «Фактор 1» (40,4 %) связан с накоплением Hg и определяется метеопараметрами, такими как средние годовые температуры, суммы осадков, их продолжительность, как в течение календарного года, так и за вегетационный период. Следующий по значимости «Фактор 2» (30,4 %) указывает на важность средних годовых температур и сумм осадков.

Как видно из полученных данных, хотя и существуют разные метеорологические условия Сибирского региона и Центрального нагорья южной части Вьетнама, уровень ассимиляции Hg в период 1981–2021/2023 гг. значительно зависит от температуры как в течение года, так и за вегетационный период, а также от суммы осадков и их продолжительности независимо от породы дерева.

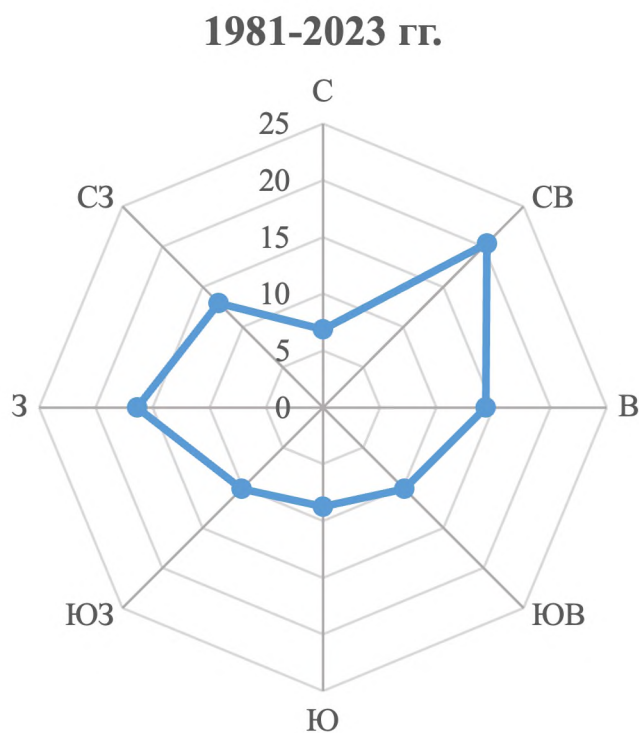


Рисунок 3.3.6 – Роза ветров по данным метеостанции г. Далат в период 1981–2023 гг.

В г. Далат в период 1981–2023 гг. преобладают северо-восточные ветры со средней частотой более 20 %, представленные на розе ветров (рисунок 3.4.5). По результатам коэффициентов корреляции и кластерного анализа было установлено, что северо-восточные, восточные, юго-восточные и южные ветры могут переносить потенциальное загрязнение ртутью локально в районе и влиять на накопление ртути древесиной в дополнение к воздействию, связанному с переносом ртути на дальние расстояния. Кроме того, нами обнаружена обратная корреляция между западными ветрами и потоками ртути в древесине сосны.

Таким образом, определено влияние метеорологических параметров на накопление Hg годовыми кольцами сосен в разных климатических условиях

(умеренных и тропических). При изучении всей хронологии колец сосны Томского района было выявлено, что поступление Hg связано с суммой осадков как за год, так и в течение вегетационного периода и в период с положительными температурами. Кроме того, накопленный в течение зимнего периода снег и количество дней с положительными температурами также влияют на поступление Hg в период 1931–2021 гг. В период повышения глобальных температур обнаруживается аналогичная зависимость накопления Hg от сумм осадков и средних температур как в течение года, так и за вегетационного периода независимо от территории опробования.

Выводы по главе 3

Мониторинг изменений в глобальном биогеохимическом цикле Hg дендрогеохимическим методом является эффективным способом изучения уровня Hg. Загрязнение ртутью окружающей среды распространяется по всему миру в связи с ее устойчивостью в разных средах. На исследуемых территориях влияние локальных антропогенных источников выбросов Hg в компонентах окружающей среды является незначительным, что позволяет создать уникальную возможность для отслеживания её глобальных выпадений в рамках биогеохимического цикла биосферы. Тенденция к снижению содержания Hg на двух исследуемых территориях прослеживается на изученный временный ряд. Повышение среднего содержания Hg отмечено в период с 1930 по начало 1970-х гг. независимо от опробованных территорий. Потоки поступления ртути в годовые кольца сосны Томского района и южных провинций Республики Вьетнам определяются локальными техногенными факторами, в которых учитывается деятельностью по сжиганию биомассы, наращиванию военного производства, и также техногенный прогресс во время Второй мировой войны и Вьетнамской войны соответственно. Кроме того, существует глобальная тенденция накопления Hg в изучаемых регионах. Повышенный период содержания Hg на исследуемых территориях совпадает с глобальными пиками потоков Hg в озерных и тофярных отложениях в период 1900–1950 и 1900–1970 гг. соответственно. С

1950-х гг. траектории потоков ртути из этих природных архивов разошлись – наблюдалось снижение в Европе по сравнению с разными регионами Северной Америки, Восточной Азии, Центральной Азии, Африки и Океании в зависимости от потребления промышленного угля. Можно предположить, что основными фактором накопления Hg в этих регионах являются глобальные факторы, а местные источники играют меньшую роль. Выделяется похожий характер ассимиляции Hg древесиной в зависимости от метеопараметров, на которые влияют средние температуры как в течение года, так и за вегетационный период, а также сумма осадков и их продолжительность независимо от породы дерева. Температура оказывает существенное влияние на нарушение биогеохимического цикла Hg в биосфере. С 1980-х гг. повышение глобальной температуры привело не только к таянию ледников, что усилило поступление Hg в разные природные архивы, включая растительность, но и к усилению поглощения элементов растениями в результате более активных паров ртути и изменений биологических и биохимических реакций окружающей среды.

4 Зависимость ширины годовых колец от факторов окружающей среды

Ускоренное развитие общества и увеличение численности населения планеты, а также технический прогресс усилили влияние человека на природную среду и в последние десятилетия обусловили глобальные изменения. Необходимо изучить реакцию лесных экосистем на глобальные изменения [227]. Биота, в том числе годовые кольца деревьев, фиксируют изменения окружающей среды на протяжении длительного периода времени. В данном исследовании был использован дендрохронологический метод для выяснения реакции хвойных пород на отдельные климатические условия на двух изучаемых территориях: в Томском районе (Западная Сибирь) и г. Далат (Центральное нагорье южной части Республики Вьетнам). Проведено комплексное исследование реакции радиального развития в двух разных климатических зонах. Как показано в работах [4, 76, 197, 227–246], существуют корреляции между шириной годовых колец деревьев и чувствительностью к изменению климатических характеристик. Доказано, что климатические факторы, такие как скорость ветра, осадки и температура, значительно влияют на рост и развитие деревьев [247]. Кроме того, следует отметить, что разные породы деревьев обладают разными физиологическими характеристиками, что может приводить к различной реакции на изменение климата.

Всего было отобрано 4 керны в Томском районе и 1 керн в городе Далат. Изучены 333 и 112 годовых колец, соответственно. Датировка деревьев Томского района охватывает период с 1930 по 2021 гг. (91 год) и в городе Далат – с 1912 по 2023 гг. (111 лет). Средняя ширина годового кольца в Томском районе составляет $2,7 \pm 0,14$ мм, наименьшая средняя ширина годового кольца отмечается в точке «Реактор» ($2,2 \pm 0,09$ мм), а наибольшая – в точке «Нефтехим» ($3,1 \pm 0,21$ мм). Более того, три из четырех деревьев в Томской области показали одинаковую тенденцию прироста на протяжении всей своей хронологии. Средняя ширина годового кольца в городе Далат – $2,1 \pm 0,1$ мм (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Статистические параметры среднего ширины годовых колец в ядрах *Pinus sylvestris* L. территории Томского района и *Pinus dalatensis* Ferré территории г. Далат Социалистической Республики Вьетнам

Точка		Возраст, лет	Среднее	$\frac{\text{мин-макс}}{\text{медиана}}$	Стандартное отклонение	Кв
Томская область	Тимирязево	80	$2,8 \pm 0,12$	$\frac{1,0-6,0}{2,6}$	1,1	40
	Пашино	80	$2,2 \pm 0,14$	$\frac{0,6-6,5}{1,8}$	1,2	56
	Реактор	93	$2,6 \pm 0,1$	$\frac{1,4-5,1}{2,4}$	0,9	34
	Нефтехим	81	$3,1 \pm 0,2$	$\frac{0,7-8,1}{2,5}$	1,9	62
Республика Вьетнам	г. Далат	112	$2,1 \pm 0,1$	$\frac{0,8-6,1}{1,8}$	1,01	48

Примечание: Кв – Коэффициент вариации

Изменение ширины годовых колец сосны демонстрирует тенденцию к снижению с начала 1900-х гг. до настоящего времени, что подтверждается графиками трендов (рисунок 4.1). Здесь необходимо упомянуть о понятии «год событий» [248, 249], в котором фиксируются чрезвычайно широкие и узкие кольца соответственно. «Год событий», т. е. год, в который исключительно узкая или широкая ширина колец легко обнаруживается на кривой средней ширины годового кольца, как показано на рисунке 4.1. Узкие кольца формируются в неблагоприятные по климатическим условиям годы у большей части деревьев, произраставших в однородном по климатическим условиям районе [163]. Примечательно, что «годами событий», в которых зафиксировано наименьшее значение ширины годового кольца, являются: 1950, 1998, 2013 гг. в г. Далат, 2007 и 2020 гг. во всех опробованных точках Томской области. Резкое изменение температуры и количества осадков, повлиявшее на рост растения, четко отражено на рисунке 4.2. В указанные годы событий было зафиксировано повышение температуры и снижение количества осадков, что приводило к засухе в 2007–2008 и 2019–2020 гг. в Томской области.

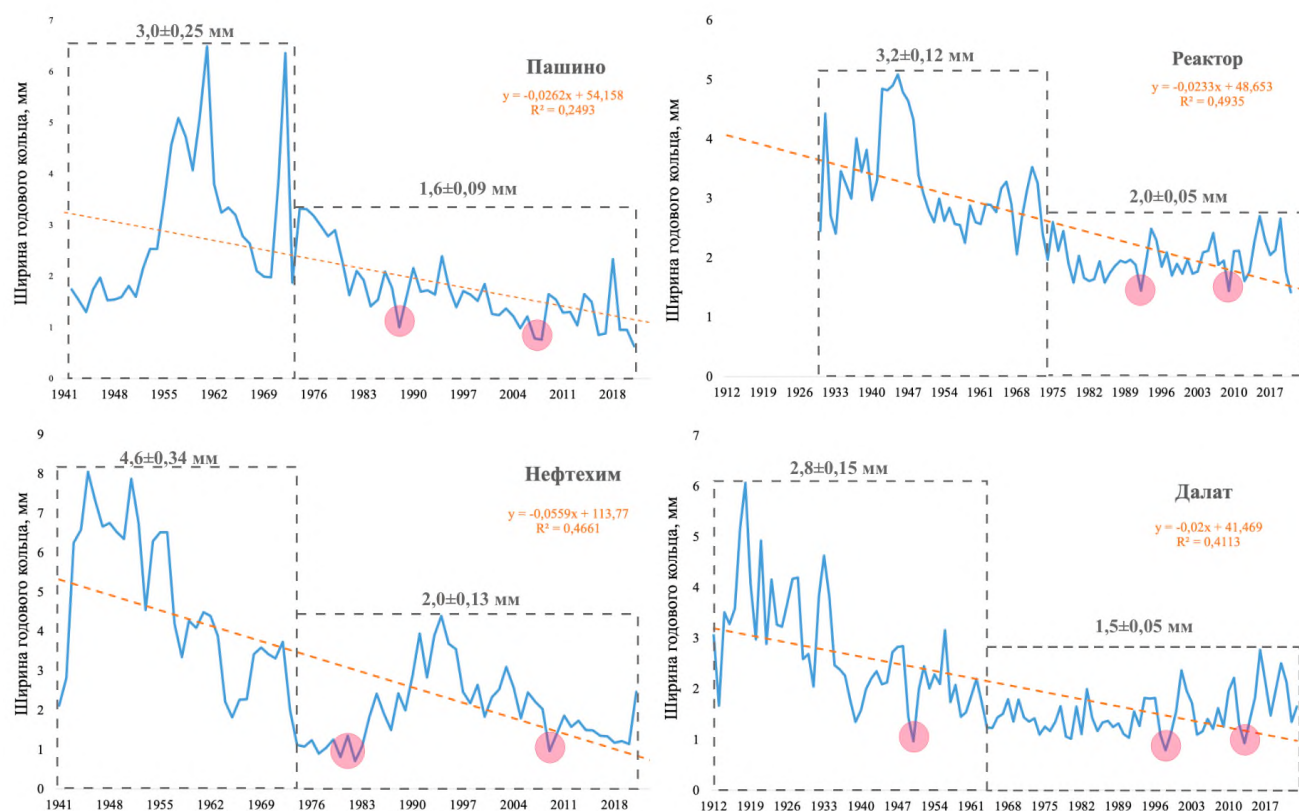


Рисунок 4.1 – Отдельные хронологии ширины годовых колец *Pinus sylvestris* L.

в Томском районе и *Pinus dalatensis* Ferré в г. Далат, Республики Вьетнам

Примечание: синяя сплошная линия – линия тренда, оранжевая пунктирная линия – линейная подгонка, оранжевый шрифт – уравнение линейной подгонки, красный кружки – год событий

Следует отметить, что наиболее четко выраженное изменение ширины годового кольца нами обнаружено на отрезке с 1930 по 1974 гг. для сосны Томского района, кратность превышения в период 1975–2021 гг. составляет в точке «Тимирязево» – 1,2; «Пашино» – 1,8; «Реактор» – 1,6; «Нефтехим» – 2,3 раза и за весь период 1,1; 1,4; 1,3; 1,5 раза, соответственно, относительно среднего. Для сосны г. Далат максимальная ширина годового кольца ($2,8 \pm 0,15$ мм) выявлена в период 1912–1963 гг. и превышает средние показатели изменения ширины в период 1964–2023 гг. ($1,5 \pm 0,05$ мм) в 1,8 раз и среднюю ширину за весь период ($2,1 \pm 0,1$ мм) в 1,3 раза. При изучении литературы установлено, что молодые растения характеризуются более высоким уровнем проводимости стомы и ферментативной активности [250], а поглощающая способность эпидермиса обычно снижается с возрастом ткани [251]. В результате скорость роста древесной биомассы у молодых

периодов выше, чем у взрослых периодов [163, 252], т. е. чем старше дерево, тем более узкие у него годовые кольца.

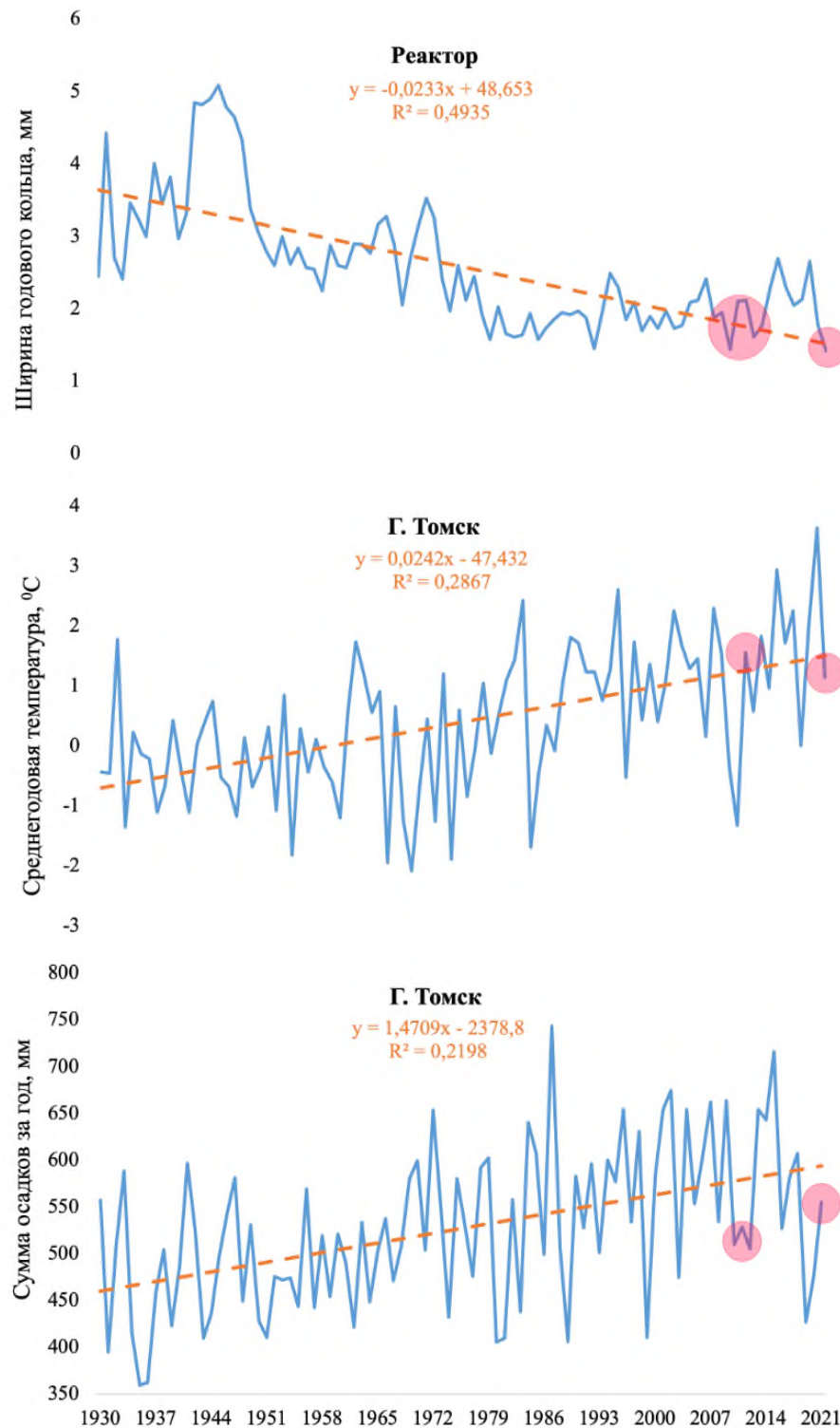


Рисунок 4.2 – Изменение ширины годовых колец *Pinus sylvestris* L. и метеорологических факторов (среднегодовой температуры и суммы годовых осадков) в городе Томска с 1930 по 2021 гг. *Примечание: синяя сплошная линия – линия тренда, оранжевая пунктирная линия – линейная подгонка, оранжевый шрифт – уравнение линейной подгонки, красные кружки – год событий.*

По данным метеостанции г. Томск с 1933 по 2021 гг. среднегодовая температура колебалась от $-2,1$ до $3,6$ °С, среднегодовое количество осадков – от 360 до 744 мм, а среднегодовая скорость ветра – $0,08$ м/с. На рисунке 4.2 показана тенденция к повышению температуры и осадков с увеличением температуры на $0,02$ °С и количества осадков на $1,47$ мм в год соответственно. Также отмечается незначительная тенденция к снижению скорости ветра. В период 1981–2021 гг. среднегодовая температура изменяется от $-1,7$ до $3,6$ °С, среднегодовое количество осадков – от 407 до 744 мм, а среднегодовая скорость ветра составляет $0,1$ м/с. Максимальные количества осадков отмечаются осенью и зимой, минимальные – летом при максимальной температуре. Осадки зимой выпадают в основном в виде снега, который может начаться в октябре. Снежный покров накапливается с декабря по март, и тает с апреля до середины мая. Резкое изменение температуры и количества осадков, повлиявшее на рост растения, четко отражено на рисунке 4.2 [164, 253].

Общий тренд увеличения температуры в Сибирском регионе совпадает с литературными данными, установленными учеными для Сибири [164, 253]. Так, М.В. Кабановым [164] приведен тренд для Сибири в целом, показывающий тенденцию потепления (рисунок 4.3, 4.4). Автором отмечается наличие периодичности колебаний среднегодовых температур для города Томска, составляющая ранее 10 лет и к современному периоду сокращенное до 5–7 лет. Это совпадает с теми результатами, которые получены нами как при анализе метеорологических параметров, так и по реакции ширины колец деревьев, произрастающих в Томском районе в непосредственной близости от города Томска. В то же время в работе [253] отмечается, что на региональные изменения климатических параметров на территории Сибири оказывает влияние комплекс факторов, включающих геоэкологические (техногенез, наличие «острова тепла» в городах, ландшафт и т. д.) [253]. Автором выявлены тенденции роста температур с очаговым характером потепления на территории Сибирского региона. Он справедливо отмечает, что необратимые преобразования экосистем и трансформация ландшафтов приводят к изменению местных природно-

климатических условий. Таким образом, можно говорить о том, что влияние глобальных процессов изменения климата и их трансформация с учетом региональных факторов оказывают значимое влияние на тренды метеорологических параметров и отражаются на формировании ширины колец деревьев в регионе [228, 254–260].

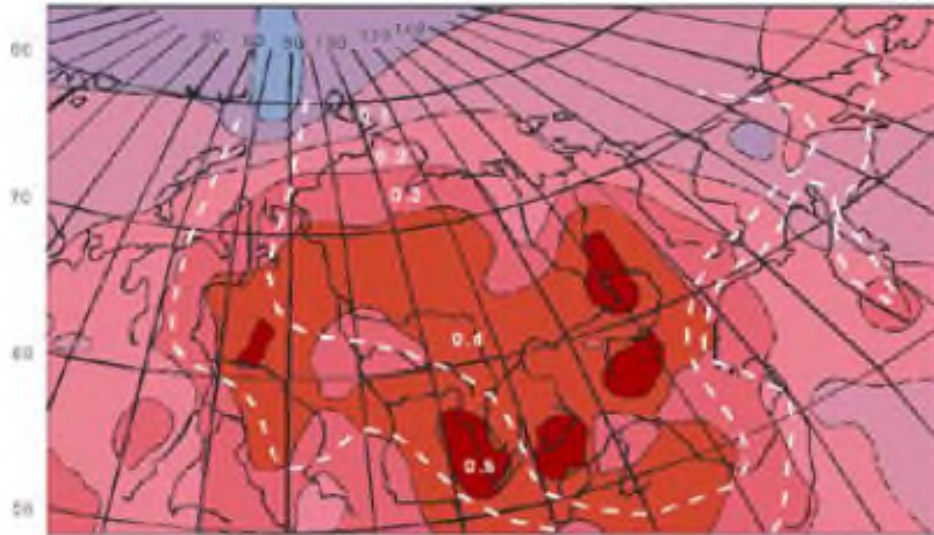


Рисунок 4.3 – Карта линейных трендов потепления в период 1965–2000 гг. Сравнение с изолиниями января (минус 28 °С – верхняя, и минус 20 °С – нижняя) в период 1881–1935 гг. [164]

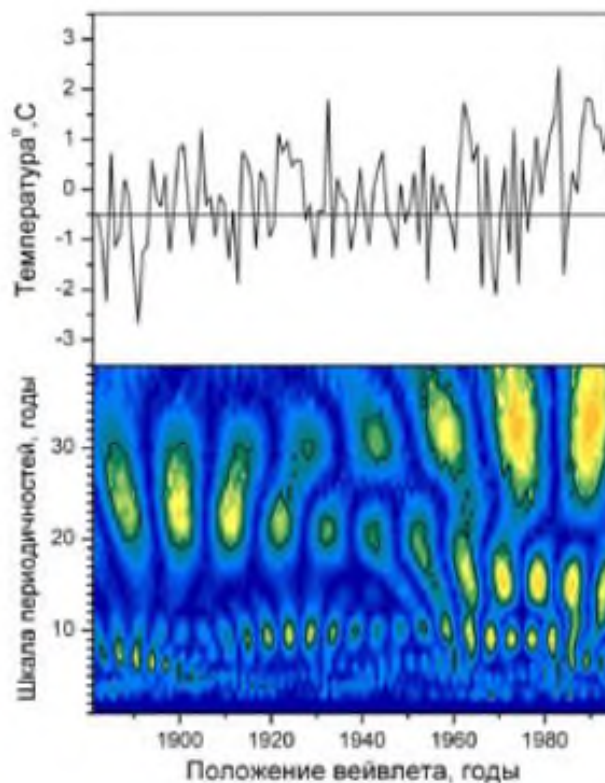


Рисунок 4.4 – Ряд среднегодовой температуры (вверху) и его вейвлет-спектр (внизу) для г. Томска [164]

Рассмотрение нами аналогичных процессов, происходящих в других климатических условиях, подтверждает данный вывод. Исследуемая территория находится в типичном муссонном тропическом климате провинции Ламдонг, расположенной в Центральных горах южной части Вьетнама. Рельеф провинции Ламдонг с высокими горными массивами формирует различные климатические зоны в зависимости от высоты над уровнем моря. С 1912 по 2023 гг. среднегодовая температура г. Далат варьировалась от 21,1 до 22,5 °С, а сумма осадков за год – от 1657 до 2020 мм. Как показано на рисунке 4.5, повышенная тенденция температуры четко выражена. С 1980-х гг. наблюдается усиление и ускорение процесса глобального потепления [261, 262]. Однако значительной тенденции в изменении количества осадков г. Далат не выявлено (рисунок 4.5).

Для выяснения изменения климата на годовые кольца сосны далатенской был проведен подробный анализ суточных метеорологических данных, полученных на метеостанции г. Далат. За 43-летний период доступных данных метеостанции г. Далат среднегодовая температура варьировала от 21,2 до 23,8 °С, среднегодовое количество осадков – от 125 до 2214 мм, а среднегодовая скорость ветра – 0,56 м/с в год. На рисунке 4.8 тенденция изменения климатических факторов во времени показывает снижение температуры и скорости ветра, а также увеличение осадков. Скорость изменения составляет $-0,0156$ °С, $-0,027$ м/с и 25,7 мм в год, соответственно. Город Далат характеризуется двумя сезонами: сухим сезоном, который продолжается с декабря по март следующего года, и сезоном дождей – с апреля по ноябрь [188].

Анализ взаимосвязи ширины годовых колец с климатом г. Далат (рисунок 4.5) установил, что узкие годовые кольца (1950, 1998 и 2012 гг.) свидетельствуют о сильном негативном влиянии климатического условия на рост сосны г. Далат, особенно в засушливые годы, что подтверждается исследованиями [263, 164]. Это позволяет предположить, что сужение годового кольца дерева является его реакцией на резкие колебания метеорологических параметров (рисунок 4.5).

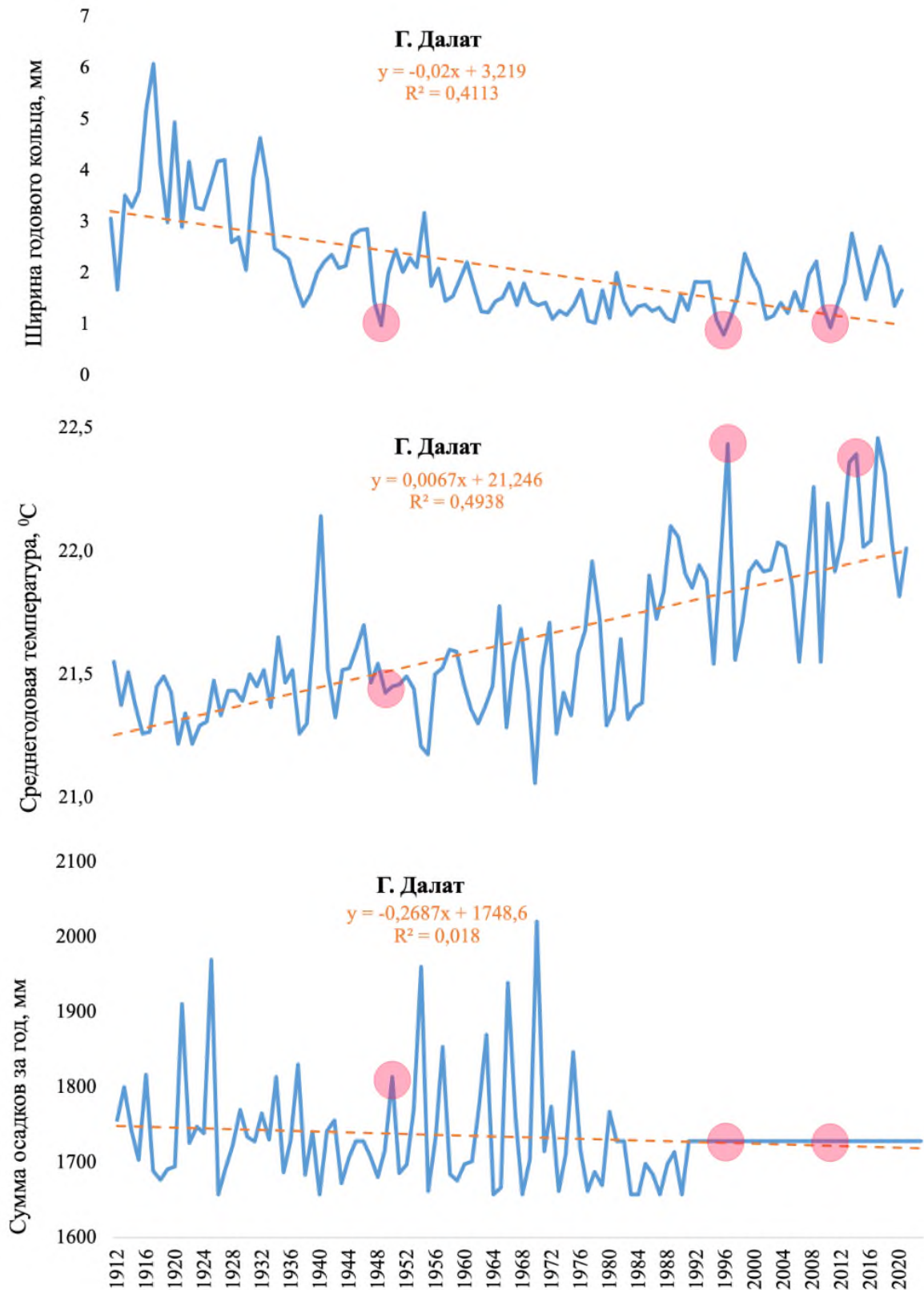


Рисунок 4.5 – Изменение ширины годовых колец *Pinus dalatensis* Ferré и метеорологических факторов (среднегодовой температуры и суммы годовых осадков) г. Далат, Вьетнам с 1912 по 2023 гг.

Примечание: синяя сплошная линия – линия тренда, оранжевая пунктирная линия – линейная подгонка, оранжевый шрифт – уравнение линейной подгонки, красный кружки – год событий.

Ранее проведёнными исследованиями [188] было установлено, что оптимальная температура для прироста сосны далатенской составляет 20–22 °С, а влажность воздуха должна быть <82 %. Повышение температуры негативно сказывается на ширине годового кольца.

Кривые прироста древесины сосны, полученные во всех опробованных нами точках, подтверждают ранее полученные данные как на территории Сибири (п. Самусь, Томский район), так и в Центральном нагорье южной части Вьетнама [9, 188].

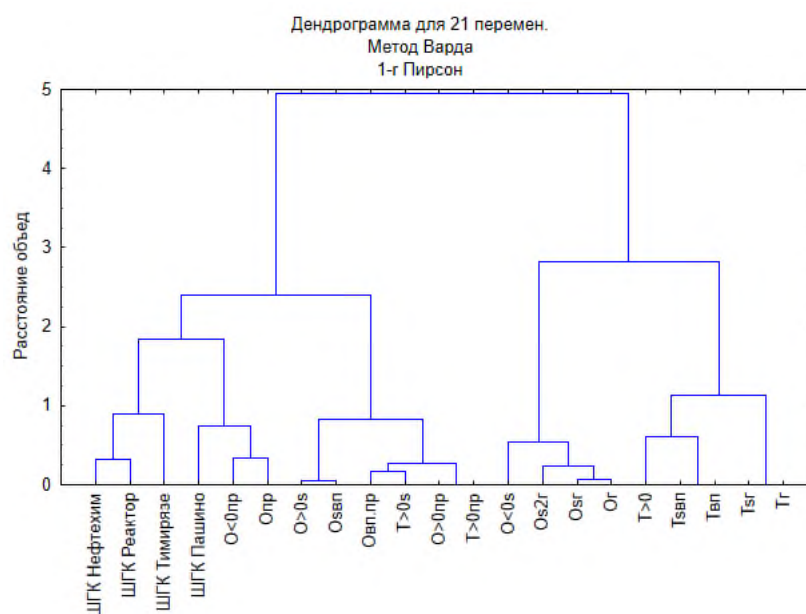


Рисунок 4.6 – Дендрограмма корреляционной матрицы влияния климатических параметров на изменении ширины годового кольца *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района в период 1930–2021 (1-Pearson $r=0,21$, при $p=0,05$), показатели: Температура: Тг – среднегодовая; Тсг – сумма за год; Твп – за вегетационный период; Тсвп – сумма за вегетационный период; Т>0; Т>0s – сумма положительных температур; Т>0пр – продолжительность периода с положительными температурами; Осадки: Ог – среднегодовая; Оsг – сумма за год; Опр – количество дней с осадками в течение года; Оsвп – сумма за вегетационный период; Овп.пр – количество дней с осадками за вегетационный период; О>0s – сумма при положительных температурах; О<0s – сумма при отрицательных температурах; О>0пр – количество дней с осадками при положительных температурах; О<0пр – количество дней с осадками при отрицательных температурах; Оs2г – сумма за 2 года.

В период с 1933 по 2021 гг. на территории Томского района наблюдаются повышенные температуры, как за год, так и в течение вегетационного периода. Увеличивается не только температура воздуха, но и продолжительность периода с положительными температурами. Количество осадков, наоборот, снижается. Отдельно стоит отметить, что во временном интервале 1941–1974 гг. отмечается наибольшая сумма осадков в течение как вегетационного периода, так и за год.

В период 1931–2021 гг. на ширину годового кольца на территории Томского района влияние оказывают сумма осадков в течение года, за вегетационный период и при положительных температурах. Также следует учитывать количество накопленного за зимний период снега. Ширина годового кольца зависит от продолжительности вегетационного периода и периода с положительными среднесуточными температурами (рисунок 4.6).

В период резкого потепления с 1980 г. не было выявлено линейной корреляции между шириной годового кольца деревьев и климатическими параметрами. Результаты дендрограммы показывают, что на ширину годового кольца сосны также влияет сумма осадков как в течение года, так и в вегетационный период, а также количество дней в снежном периоде и сумма осадков в этот период (рисунок 4.7). Важным показателем для прироста древесины выявлена сумма осадков при положительных температурах и среднесуточная температура за этот период.

Значительное количество снега, накапливающееся зимой, может замедлить рост корней сосен из-за подмерзания их кончиков. Осадки в этот период вносят значительный вклад в накопление питательных веществ для текущего и последующих вегетационных периодов. После завершения камбиальной активности климатические сигналы записываются в годовых кольцах на следующий год [265, 266].

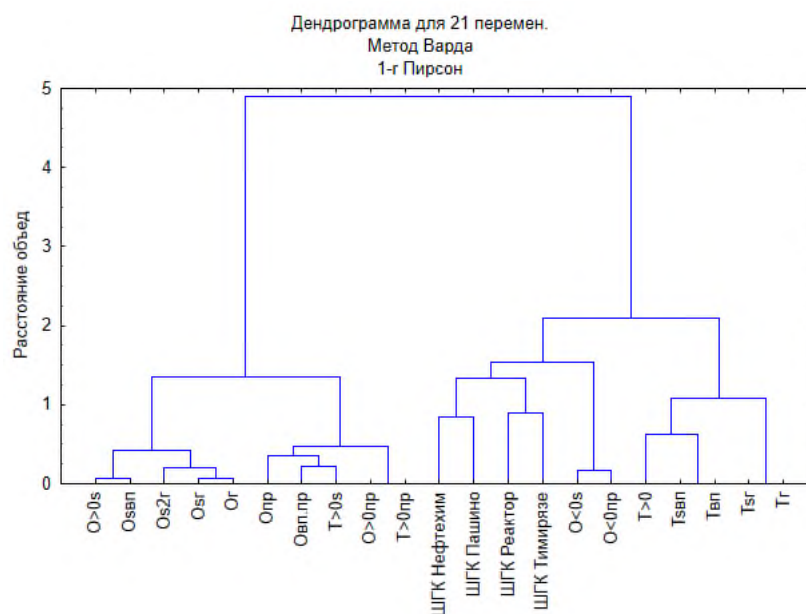


Рисунок 4.7 – Дендрограмма корреляционной матрицы влияния климатических параметров на изменении ширины годового кольца *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района в период 1981–2021 гг. ($1 - \text{Pearson } r = 0,31$, при $p = 0,05$), показатели: Температура: Тг – среднегодовая; Тсг – сумма за год; Твп – за вегетационный период; Тсвп – сумма за вегетационный период; $T > 0$; $T > 0s$ – сумма положительных температур; $T > 0pr$ – продолжительность периода с положительными температурами; Осадки: Ор – среднегодовая; Осг – сумма за год; Opr – количество дней с осадками в течение года; Osvп – сумма за вегетационный период; Ovp.pr – количество дней с осадками за вегетационный период; $O > 0s$ – сумма при положительных температурах; $O < 0s$ – сумма при отрицательных температурах; $O > 0pr$ – количество дней с осадками при положительных температурах; $O < 0pr$ – количество дней с осадками при отрицательных температурах; Os2г – сумма за 2 года.

Стабильный температурный предел для формирования ксилогенеза хвойных деревьев в холодном климате указан в работах [267, 268]. В последние десятилетия было зафиксировано повышение температуры зимой [269–271]. Преобладающие теплые условия в конце зимы и начале весны показывают, что прирост годовых колец зависит от условий в начале сезона и, вероятно, приводит к более раннему началу формирования ксилемы. Однако снежный покров также имеет

положительное влияние на обеспечение деревьев влагой весной, что было отмечено в исследованиях, проведенных не только в Сибирском регионе России [265], но и в Гиндукуше, Гималаях, Китае [272] с использованием дендрохронологии. Максимальная радиальная скорость прироста приходится на первую половину вегетационного сезона, который постепенно сместился на период меньшего количества дождей [265].

Для хвойных деревьев в холодных биомах прирост годовых колец в большей степени зависит от водного баланса и температуры в течение вегетационного периода, когда фиксируется максимальное количество солнечной радиации. Это подтверждается положительной корреляцией между скоростью прироста и температурой вегетационного периода и в течение года, которая была особенно заметна в период глобального потепления [269–271].

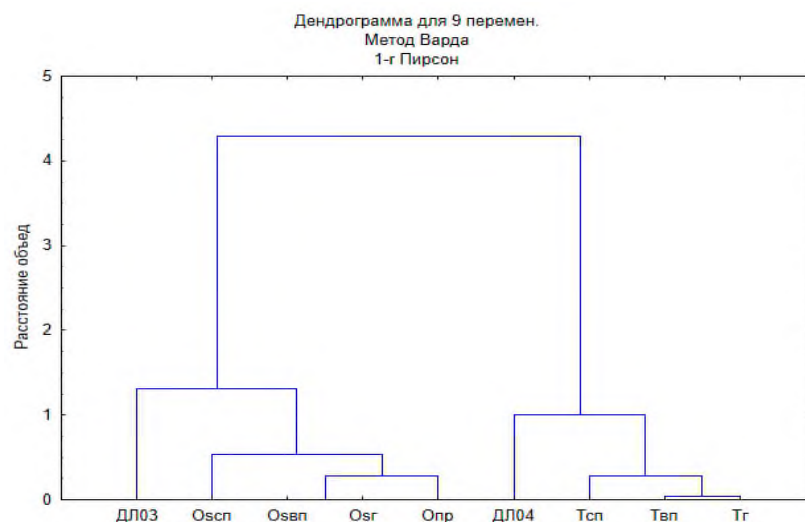


Рисунок 4.8 – Дендрограмма корреляционной матрицы влияния климатических параметров на изменении ширины годового кольца *Pinus dalatensis* Ferré на территории г. Далат, Республики Вьетнам (1-Pearson $r=0,31$, при $p=0,05$), показатели: Температура: Тг – среднегодовая; Твп – за дождливый период; Тсп – за сухой период; Осадки: Осп – сумма за год; Опр – количество дней с осадками в течение года; Оспп – сумма за дождливый период; Оспп – сумма за сухой период;

Изменение ширины годовых колец на территории г. Далат существенно зависит от суммы осадков за год и вегетационном периоде, а также

продолжительности за эти период, что подтверждается матрицей коэффициентов линейной корреляции и кластерным анализом (рисунок 4.8).

В тропическом климате, когда температура превышает оптимальный уровень, прирост дерева сильно зависит от количества осадков, повышающих влажность почвы, способствующую увеличению прироста колец дерева.

Выводы по главе 4

Таким образом, можно сделать вывод о том, что согласно полученным нами данным для двух регионов, на ширину колец деревьев оказывает влияние количество осадков и температура. Результаты наших исследований подтвердили ранее имеющиеся в литературе выводы. В данном исследовании важным является подтверждение имеющихся данных на конкретных локальных участках, имеющих специфические геоэкологические условия, сформированные под влиянием природно-техногенных факторов. Нами установлено, что основными годами, для которых характерно изменение ширины годовых колец, связанное с метеорологическими параметрами, являются 1913, 1939, 1950, 1991, 1998 и 2013 для территории г. Далат и 2007, 2008, 2019 и 2020 для территории Томского района. Общий тренд изменения ширины годовых колец вне зависимости от территории понижительный к современному периоду.

5 ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГОДОВЫХ КОЛЬЦАХ ДЕРЕВЬЕВ КАК ИНДИКАТОР ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА ТЕРРИТОРИИ Г. ДАЛАТ, СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА ВЬЕТНАМ

5.1 Биогеохимическая индикация природных обстановок г. Далат

Эффективность использования растений в качестве биогеохимических индикаторов для поиска месторождений полезных ископаемых обусловлена тем, что их химический состав чутко реагирует на присутствие типичных рудных элементов. Как известно, уровень накопления химических элементов растениями зависит от разных геохимических условий, специфики литологического состава подстилающих пород, а также от техногенных воздействий, имеющих место на территориях произрастания [203].

В г. Далат сложная природно-техногенная обстановка. Она обусловлена наличием специфичных геологических структур и ряда производственных объектов (как, например, исследовательский реактор, железная дорога, промышленный узел Фатчи и др.).

По данным Вьетнамских ученых. в геологическом строении территории расположения г. Далат принимают участие терригенно-осадочные отложения формации Ланга (La Nga) среднеюрского возраста (J_2ln_{1-2}), верхнемеловые вулканогенные породы формации Дон Донг (Don Duong) (K_2dd) и меловые гранитоидные образования комплекса Део Ка (Deo Ca) (K_2dc) и Анкроет (K_2ak) [273, 274]. Рудная зона тесно связана серией субпослойных зон дробления и гидротермального изменения пород (температура рудной минерализации 240–460 °C) в щелочных известковых гранитоидах комплекса Динькуан (K_1dq); вулканогенных породах формации Донзыонг (K_2dd); известково-высокощелочных алюминиевых гранитах комплекса Анкроет (K_2ak) [275, 276]. По данным литературных источников, рудная зона г. Далат характеризуется минерализацией олова, вторичным золотом, сопровождаемым Bi, As, возможно, U-Th [277]. Литературные данные показывают тесную связь между содержанием олова и фазами минерализации Sn наряду с другими редкими элементами (Fe, As, Bi, Cu, Au,

W, Mo, Pb, Zn), входящими в состав фаз интрузионного блока комплекса Анкроет, формация Донзыонг [275]. В рудной зоне олово распределено в куполе интрузивных образований или вдоль отдельных трещин во вмещающих породах. Кроме того, золоторудная минерализация гидротермально-измененного происхождения расположена в кварцевых жилах с вмещающими породами – гранитными биотитами комплекса Анкроет или вулканогенными породами формации Донгзыонг. Интрузивные породы относятся к известково-щелочным разностям с различными соотношениями K_2O/Na_2O . Среди этих пород выделяют высококалиевые, высоконатриевые и калинатровые разности [273, 274, 278, 279].

Наши данные по изучению образца выветрелой горной породы с территории г. Далат показали, что основой являются такие минералы, как кварц, каолинит, мусковит (рисунок 5.1.1).

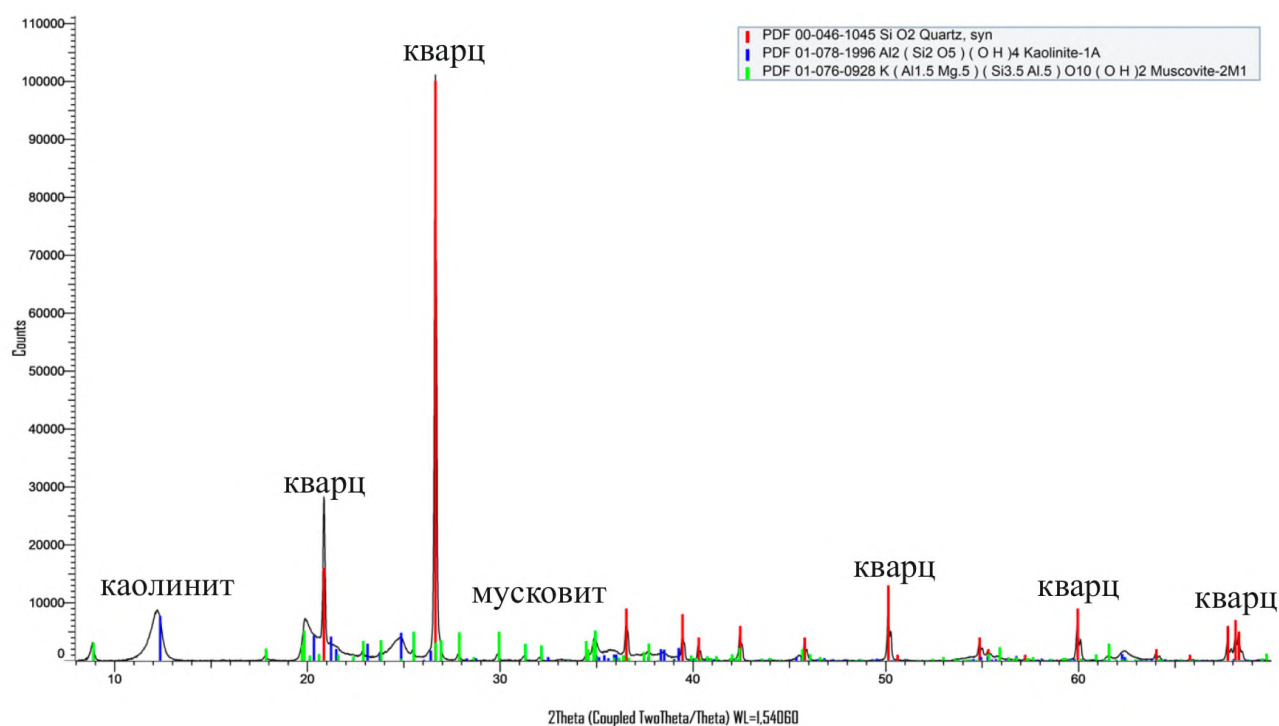


Рисунок 5.1.1. –Рентгенодифракционные картины образцов горной породы №1 из коры выветривания г. Далат.

Кроме того, встречаются альбит, микрокин, санидин содержащие минералы (рисунок 5.1.2), такие как доломит, маньей, анортит, ортоклаз, санидин и анортит и другие (рисунок 5.1.3).

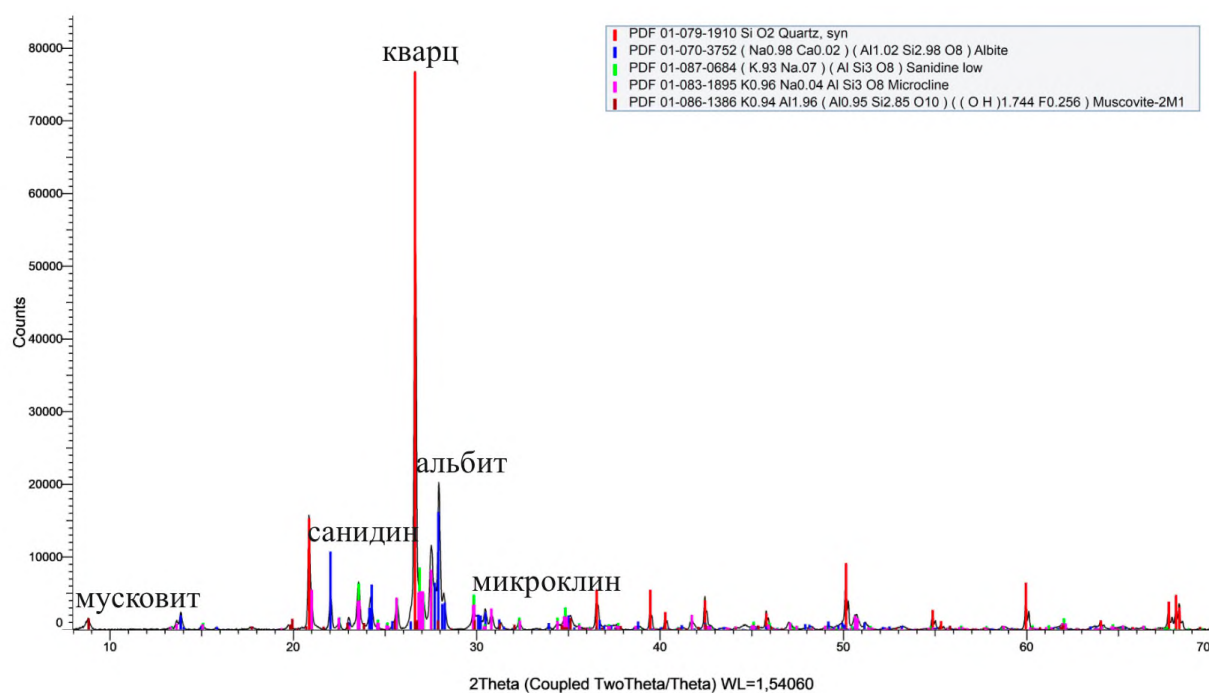


Рисунок 5.1.2. –Рентгенодифракционные картины образцов горной породы №2 из коры выветривания г. Далат.

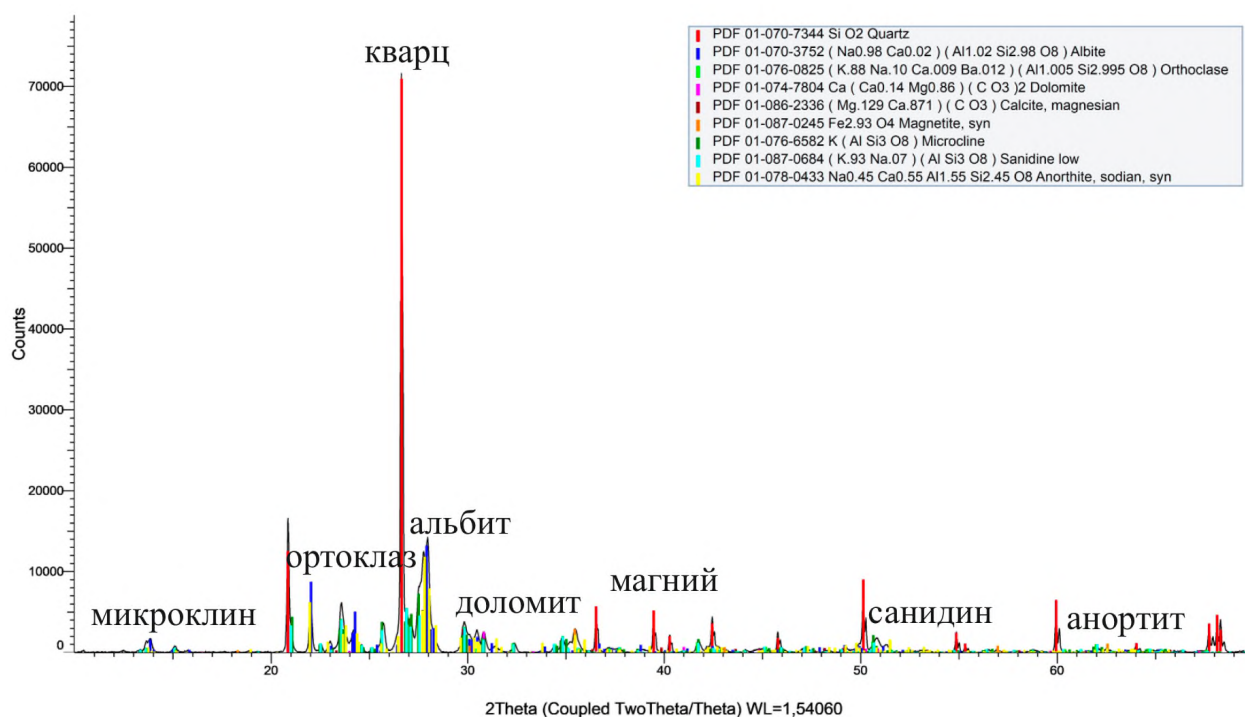


Рисунок 5.1.3. –Рентгенодифракционные картины образцов горной породы №3 из коры выветривания г. Далат.

Во всех пробах преобладающими минералами составляют кварц (24,5–56,9 %) и полевые шпаты (альбит, санидин, микроклин, ортоклаз) (7,7–30,6 %) и в

меньших количествах встречаются слюды (мусковит) (5,4–28 %), каолинит (15,1 %), кальцит (1,1 %), доломит (1 %), магнетит (0,6 %) и др. (таблица 5.1.1). Это свидетельствует о том, что породы обогащены кремнием (в кварце), щелочными элементами (в полевых шпатах), калием (связан с мусковитом и микроклином) и в меньшей степени происходит накопление железа, магнита и алюминия.

Таблица 5.1.1 – Химический состав породообразующих компонентов горных пород г. Далат, Социалистической Республики Вьетнам

Соотношение минералов, %	Образец			Обгащения химических элементов
	1	2	3	
Кварц (SiO_2)	56,9	24,5	31,6	Si
Полевые шпаты:				
Албит ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$,		20,7	30,6	Na, Al, Si
Санидин ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$,		7,7	14,5	K, Al, Si
Микроклин ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$,	–	13,1	17,9	K, Al, Si
Ортоклаз $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$		9,9		K, Al, Si
Анортит ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)		21,4		Ca, Al, Si
Слюды – мусковит $\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	28,0	–	5,4	K, Al, Mg, Si
Кальцит (CaCO_3)		1,1	–	Ca
Магний (MgCO_3)	–			Mg
Доломит ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$)	–	1	–	Mg, Ca
Магнетит (Fe_3O_4)	–	0,6	–	Fe
Каолинит ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_8$)	15,1	–	–	Al, Si

Для выяснения геохимической специфики древесных растений в южных провинциях Республики Вьетнам были изучены содержания 73 химических элемента в древесине методом ИСП-МС. Для исследования территории были выбраны две точки: первая точка «Далат-1», характеризующаяся наличием типичных рудных минералов региона Центрального нагорья Республики Вьетнам

и вторая – в провинции «Зялай», фоновом районе. Для каждого образца изучены годовые кольца десятилетних периодов. В керне сосны г. Далат разделены восемь проб (в 1960-х, 1970-х, 1980-х, 1990-х, 2000-х, 2010-х, 2020-х гг. и кора), а в спиле провинции «Зялай» – три пробы (в 1990-х, 2000-х, 2010-х гг.). Анализ химических элементов древесины и коры сосны показал, что более обогащена ими кора деревьев (рисунок 5.1.4). Следует отметить, что среднее содержание большинства химических элементов в древесине г. Далат почти в два раза выше, чем в фоновом районе провинции «Зялай». Это может свидетельствовать о том, что зависимость от ландшафтно-геохимических особенностей и техногенного воздействия по отдельным территориям влияет на уровень присутствия химических элементов, что и происходит в месте произрастания в условиях природных рудных минерализаций г. Далат.

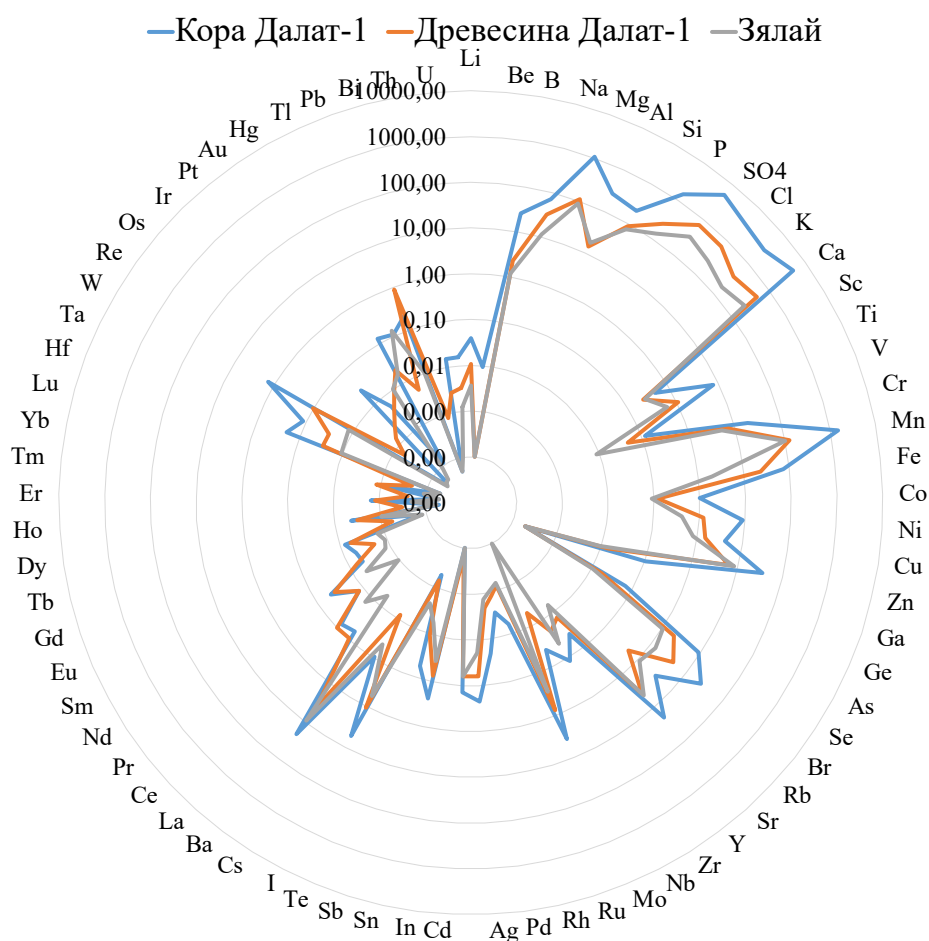


Рисунок 5.1.4 – Содержание химических элементов в древесине и коре сосен, произрастающих в южных провинциях территории Республика Вьетнам (мг/кг сухого вещества, шкала логарифмическая).

Значение коэффициента концентрации рассчитано относительно среднего содержания элемента в древесине сосны к среднему содержанию элемента в сосне из фонового условия провинции «Зялай» (таблица 5.1.2).

Таблица 5.1.2 – Ранжированные ряды химических элементов по коэффициенту концентрации в древесине сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) на территории южных провинций Республики Вьетнам относительно условного фона (провинция «Зялай»).

	Геохимический ряд (коэффициенты рассчитаны относительно среднего содержания химических элементов фонового района провинции «Зялай» (среднее по выборке, n=3))
Древесина	Pb _{86,3} Nb _{50,8} Pt _{46,7} Ir _{46,4} Os _{28,2} Th _{26,9} La _{18,0} Bi _{16,4} Re _{14,8} Pr _{12,3} Fe _{11,6} Yb _{11,1} W _{8,3} Ce _{6,8} Nd _{6,7} Er _{6,1} Ho _{5,7} V _{5,3} Sm _{5,2} Tm=Tb _{4,8} Lu=Gd _{4,3} Dy _{3,3} Ag _{3,2} Br=Li _{3,0} Ni _{2,9} Na=Mo _{2,8} Hf=Cl=U _{2,7} Ta _{2,5} K _{2,2} S=Y=Sn=Ca _{2,1} I _{2,0} B=Se=Sb=Cu _{1,9} P=Ti=Eu _{1,8} As=Pd _{1,6} In=Ga _{1,5} Cr=Co _{1,4} Rh=Hg=Mn _{1,3} Mg=Si _{1,2} Ru _{1,1} Cd=Be=Ge _{1,0} Sc=Au=Sr _{0,9} Al=Zn _{0,8} Zr=Rb _{0,5} Ba _{0,4} Te _{0,3} Cs _{0,2} Tl _{0,0}

Эту специфику хорошо видно на рисунке 5.1.5. Для древесины сосны территории г. Далат, отмечено концентрирование платиноидов, редкоземельных и редких элементов, а так же щелочных, щелочноземельных и радиоактивных элементов. Этот спектр характеризует состав пород изучаемой территории. Так, по данным [273], рудные образования и граниты интрузивных и вулканогенных пород этой территории характеризуются обогащением легкими лантаноидами, а также автором выявлена взаимосвязь между рудообразованием гидротермальных растворов и составами этих гранитных пород. В 40 км к югу от г.Далат расположено месторождение Та Нанг [273]. В других исследованиях региональных геологических условий установлено, что имеет место редкоземельная специализация в базальтовых и гранитных породах в формациях Динькуан, Деока и комплексе Анкроет, формации Донгзыонг [275, 280], в пределах которых

проходили наши исследования. Породы также характеризуются обогащением литофильными элементами, такими как K, Rb, Sr, Cs, Ba, и Eu, истощением элементов с высокой напряженностью поля, к которому относится титан, цирконий и др. [280].

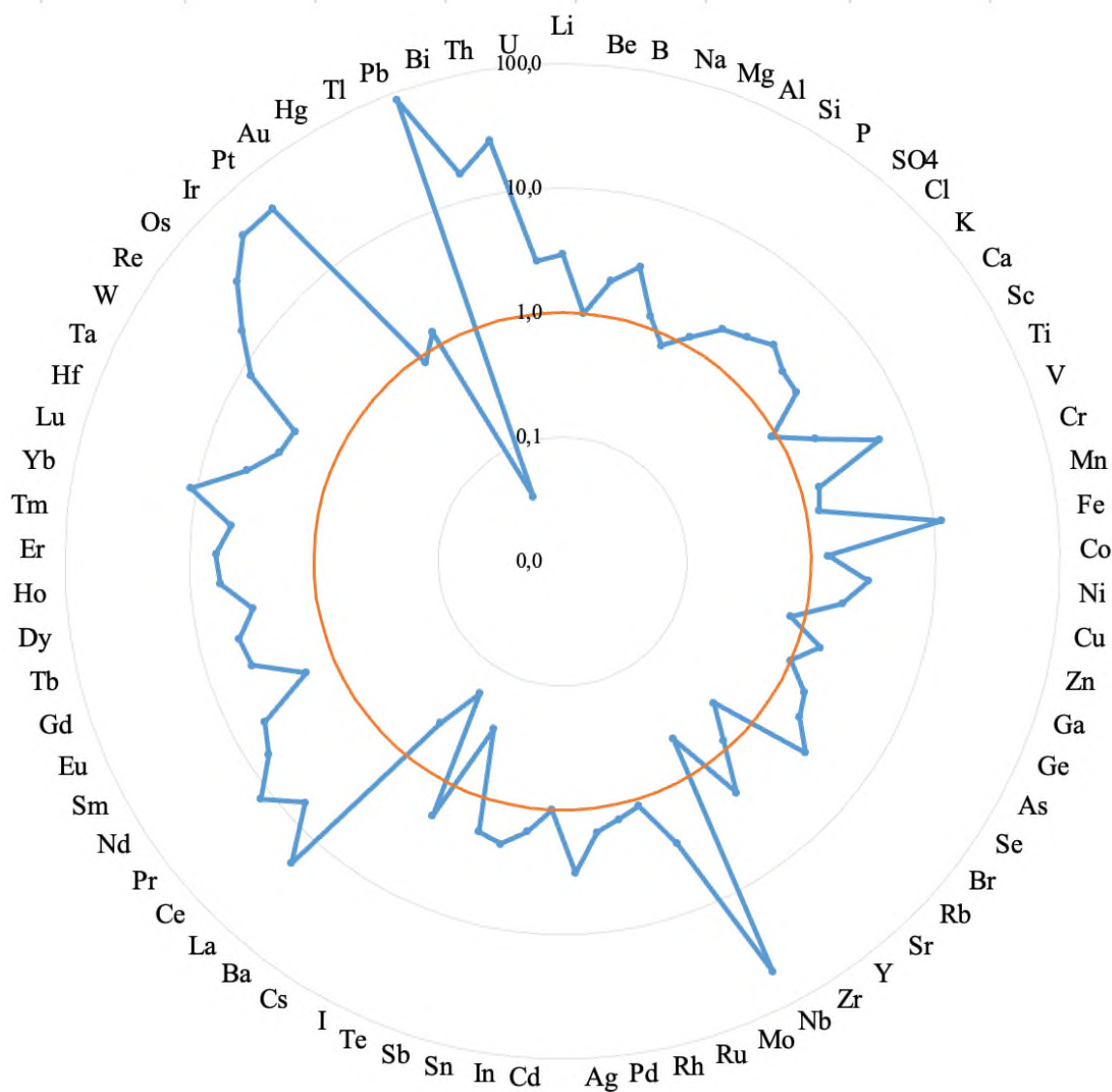


Рисунок 5.1.5 – Геохимическая специфика концентрирования химических элементов в древесине сосны, произрастающей на территории г. Далат (точки «Далат-1», n=8) Республики Вьетнам (коэффициенты концентрации относительно среднего для условного фона провинции «Зялай», n=3, шкала логарифмическая).

Таким образом, можно сделать вывод, что состав пород данной территории формирует геохимическую специфику древесины сосен, произрастающих в данной местности. Это хорошо видно на графиках сравнения некоторых соотношений

элементов в древесине этой территории и условно-фоновой («Зялай»). Так, на рисунке 5.1.6 показано соотношение суммы натрия и калия с кремнием. Хорошо выделяются более высокими содержаниями щелочных элементов древесные керны сосны территории г. Далат.

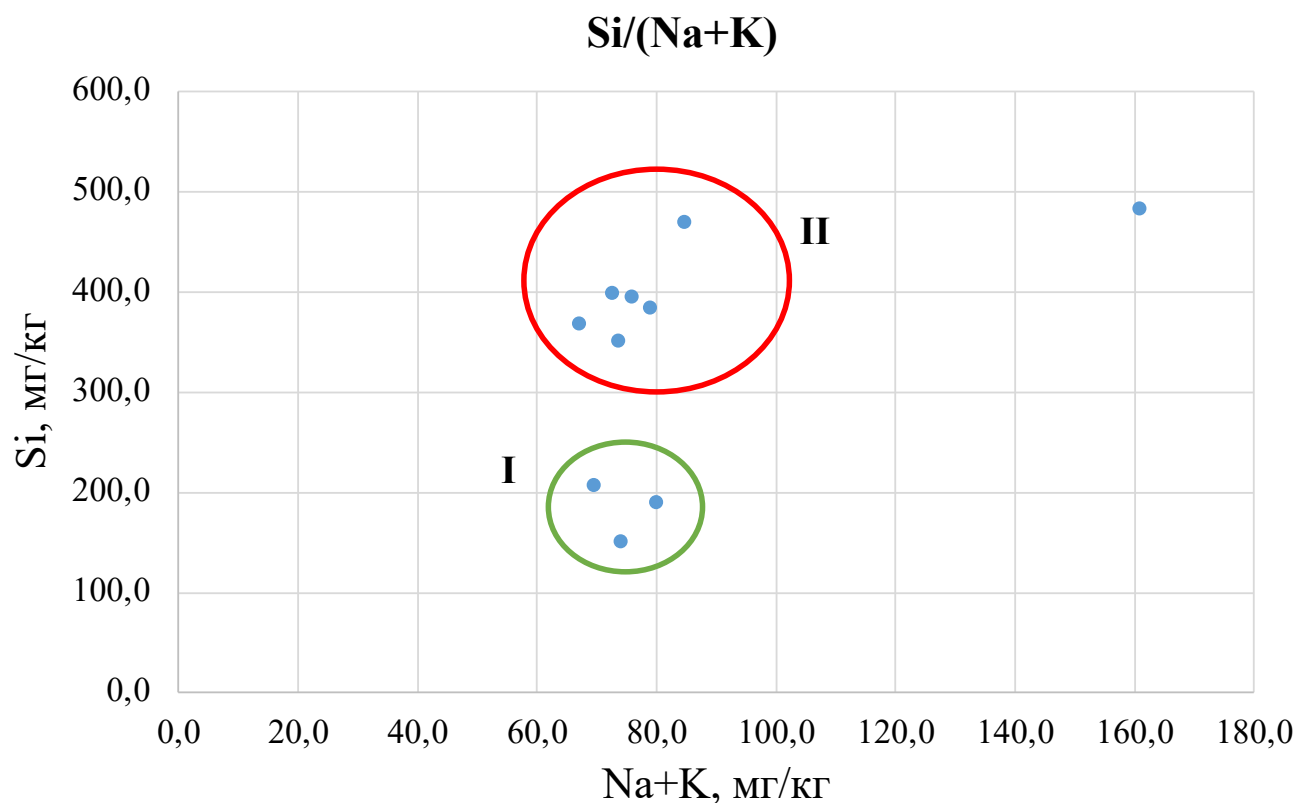


Рисунок 5.1.6 – Поля соотношения химических элементов в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) разных территорий Республики Вьетнам: I – Провинция Зялай; II – город Далат.

Равномерное распределение изменений химических элементов в годовых кольцах деревьев отчетливо представляет геохимическую специфику города Далат, связанную с гидротермальным изменением преобразований вмещающих гранитных пород. Метасоматит является процессом замещения горных пород кислотно-щелочными гидротермальными флюидами с изменением химического и минерального состава, при котором растворение старых минералов и отложение новых происходит почти одновременно. Образования метасоматитов разделяются на щелочные, основные и кислотные метасоматиты с различными соотношениями

K_2O/Na_2O . Соотношение K/Na в изученных годовых кольцах больше, чем 1. На основе классификации Дворника [281] и гипотезы дендрогеохимии (химический состав в годовых кольцах отражает часть содержания вмещающих пород), можно констатировать, что гидротермальный метаморфизм г. Далат является щелочным на основе соотношения $K/Na > 1$ во всех временных периодах (таблица 5.1.3).

Таблица 5.1.3 – Отношение средних содержаний калия и натрия в годовых кольцах (данные автора) и метасоматических породах по [281]

Собственные данные	K/Na	Литературные источники
1. Девевье г. Далат 1960-1969гг. 1970-1979гг. 1980-1989гг. 1990-1999гг. 2000-2009гг. 2010-2019гг. 2020-2023гг.	14 20 11 15 17 8 8	Данные автора
2. Деревье провинция Зялай 1990-1999гг. 2000-2009гг. 2010-2019гг.	13 12 22	Данные автора
3. Состав калиевых метасоматитов Пироксеновые фениты Микроклиниты Боитит-ортоклазовые метасоматиты Гумбеиты по алюмосиликатным породам Гумбеиты по карбонатным породам	K_2O/Na_2O 3 11 2 8 59	[281]
4. Состав натриевых метасоматитов Нефелин-пироксеновые фениты Альбититы Эйсит	0,75 0,1 0,1	[281]

В проведенных исследованиях по химическим составам пород г. Далат [273] и в Юго-Восточном регионе [274, 280] Республики Вьетнам зафиксированы геохимические характеристики гранитоидов I типа комплекса Анкрот и формации Донгзыонг, относящихся в высококалиевой известково-щелочной серии.

Это подтверждает, что содержание химических элементов в годовых кольцах сосны точки «Далат-1» представлены особенностями вещественного состава подстилающих пород – щелочными метасоматитами, которые характеризуются высокими концентрациями калиевых и натриевых оксидов (рисунок 5.1.7). Древесина сосны из провинции Зялай значительно меньше обогащена щелочными элементами по сравнению с растениями территории города Далат.

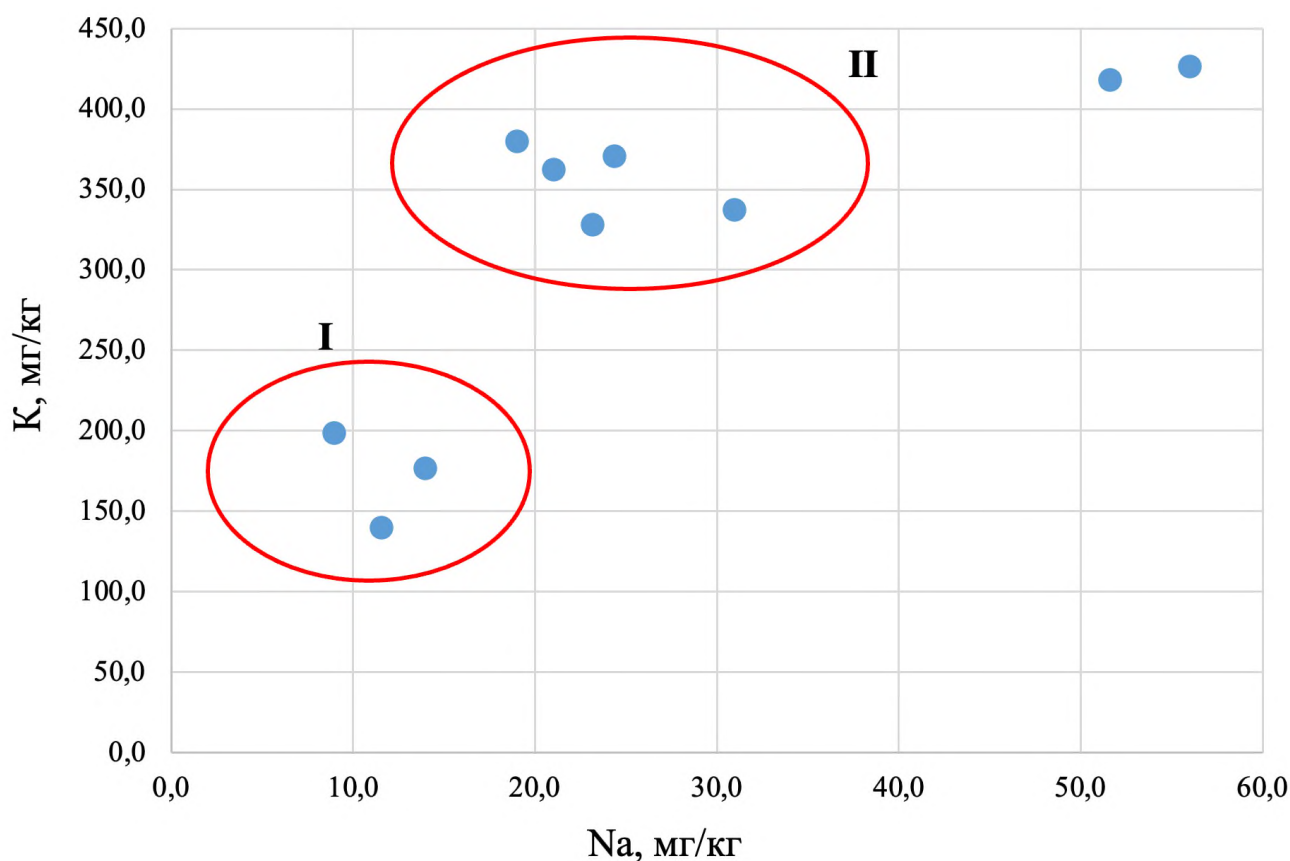


Рисунок 5.1.7 – Поля соотношения калия и натрия в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) разных территорий Республики Вьетнам:

I – Провинция Зялай; II – город Далат.

Для территории, характеризующейся наличием минерализованной зоны, индикаторами в составе древесины сосны, а следовательно, индикаторами

природных аномалий, являются элементы, которые имеют равномерное распределение во всех кольцах – это калий, рубидий, кальций, цинк и др. (таблица 5.1.4). Значительного изменения содержания этих элементов на протяжении изученного отрезка времени не выявлено (рисунок 5.1.8).

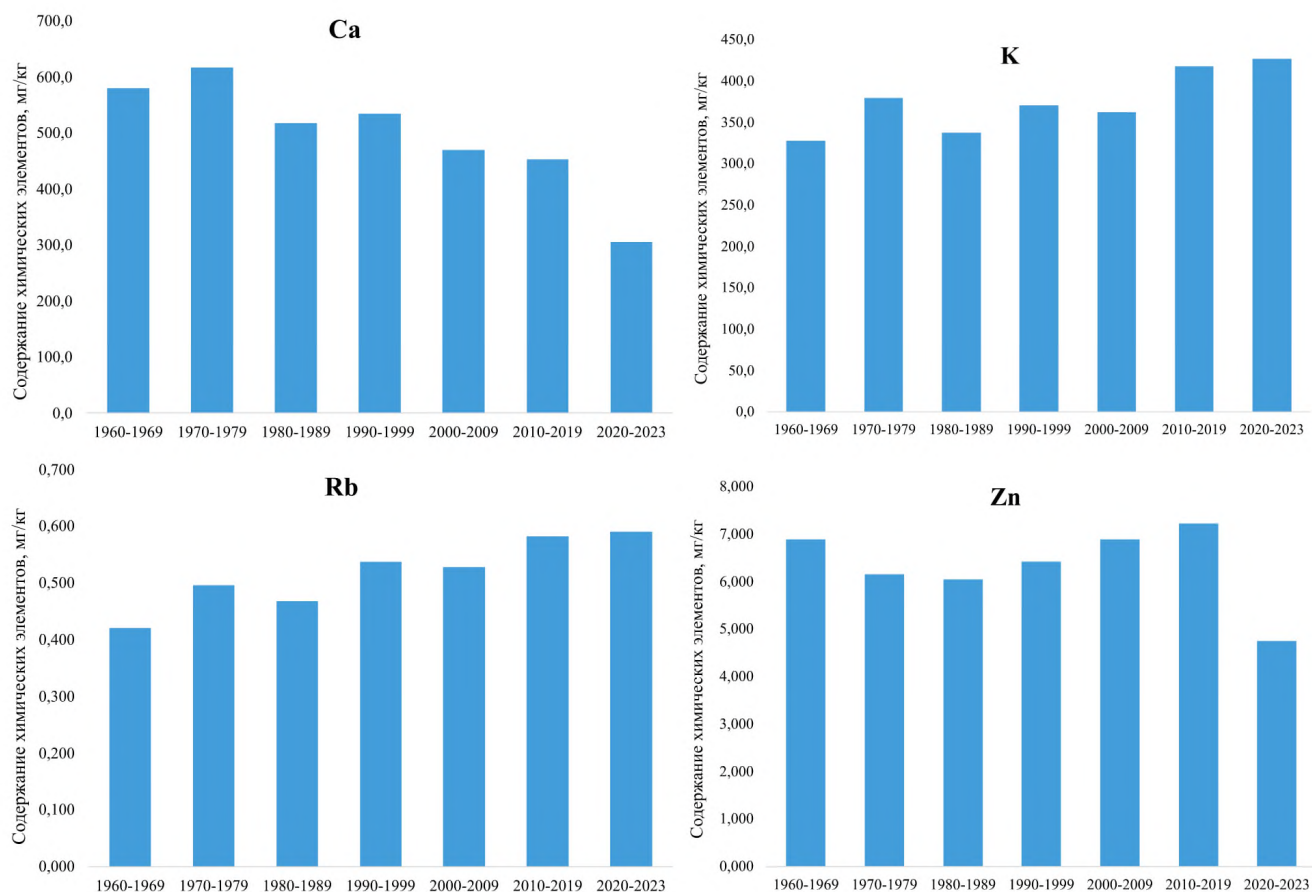


Рисунок 5.1.8 – Динамика содержания кальция, рубидия, калия и цинка в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) на территории г. Далат, Республики Вьетнам.

Аналогичная динамика накопления элементов наблюдаются в г. Далат для олова, железа, мышьяка, меди, золота, вольфрама, молибдена, свинца.

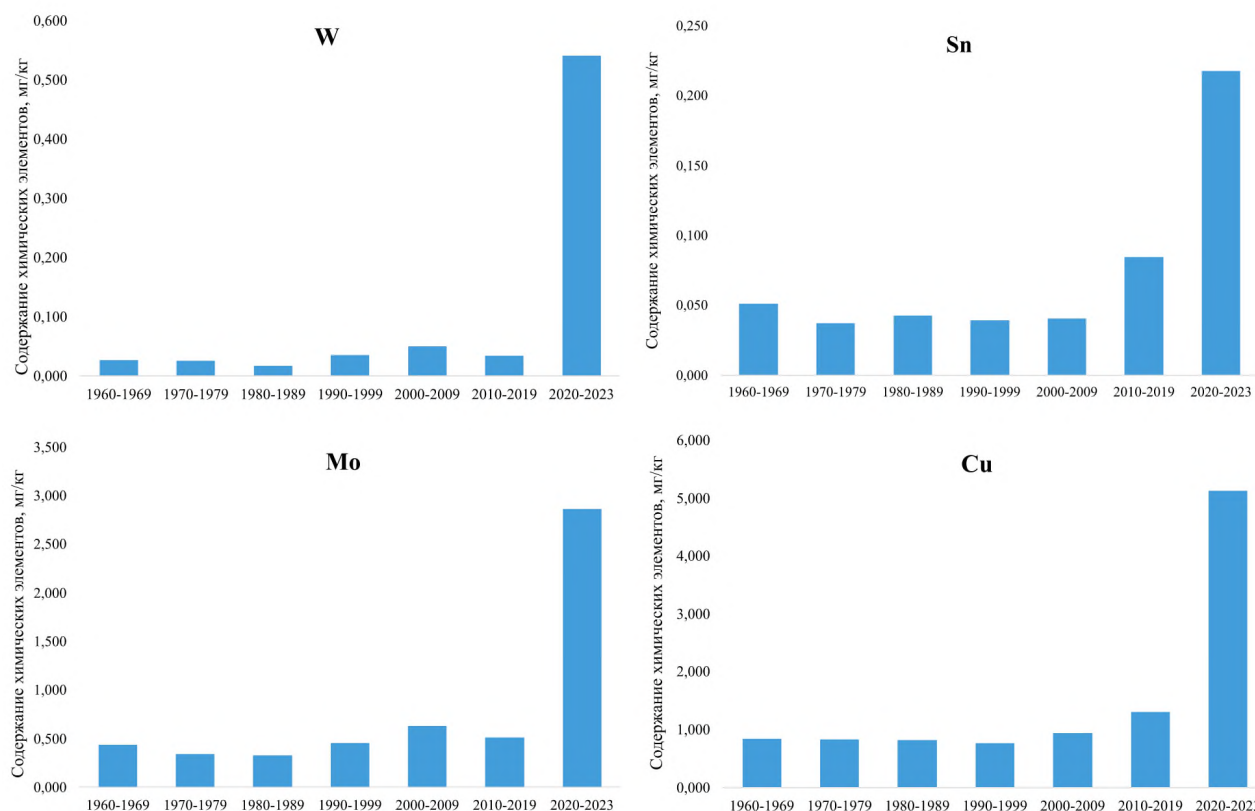


Рисунок 5.1.9 – Динамика содержания молибдена, олово, вольфрама и меди в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) на территории г. Далат, Республики Вьетнам.

Однако, есть отличие. Оно состоит в том, что в целом эти элементы имеют равномерное распределение по всем временным рядам, но демонстрируют тенденцию к увеличению концентрации в период 2020–2023 гг. (рисунок 5.1.9). Это может происходить из-за разрушения локальных природных геологических структур.

Точка отбора проб («Далат-1») располагалась в районе распространения пород вокруг фельзит-порфировой жилы, отличающихся высоким содержанием урана, церия и лантана. Анализ содержания химических элементов в древесине сосны, произрастающей на данной территории, показывает высокую концентрацию элементов группы редких земель и их суммы. Сумма всех редкоземельных элементов составляет сотые порядки в составе древесины в провинции «Зялай» и десятые на территории г. Далат (0,03 и 0,27 мг/кг соответственно) (рисунок 5.1.10).

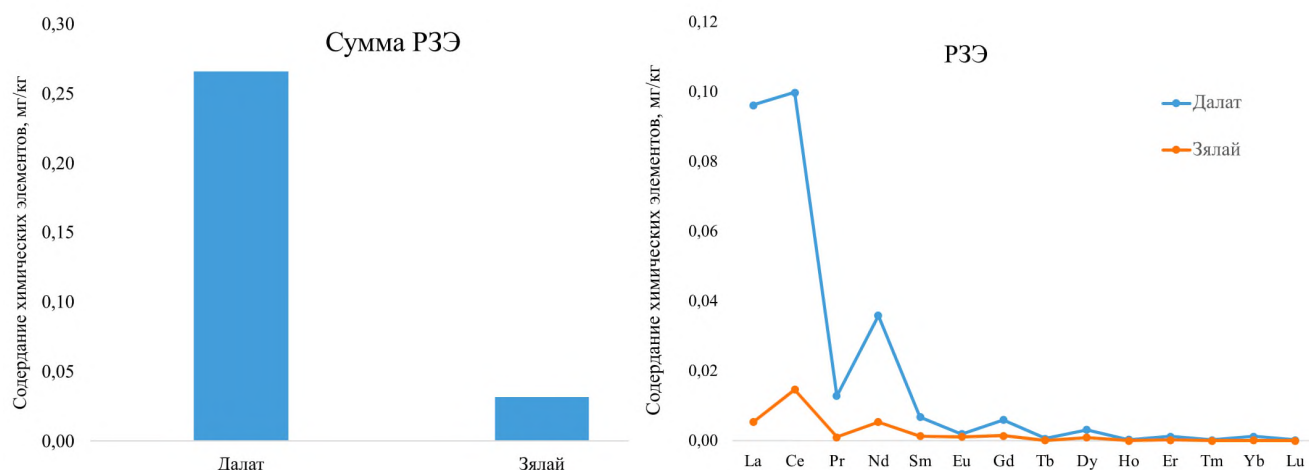


Рисунок 5.1.10 – Сумма содержания редких земельных элементов в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) на территории г. Далат и провинции Зялай Республики Вьетнам.

Увеличение содержания элементов этой группы отражает природную аномалию гранитного субстрата района г. Далат и позволяет говорить о возможности применения сосны в качестве биогеохимического индикатора.

Результаты рассмотрения отдельных элементов показывают, что в районе г. Далат и в условно-фоновом районе провинции «Зялай» обнаружены существенные различия в содержании практически всех элементов этой группы в составе древесных кернов. Максимальными накоплениями отличаются латан и церий, содержание которых в древесине можно считать индикаторами природных геохимических условий на территории г. Далат (рисунки 5.1.11, 5.1.12).

Таким образом, аномально высокие средние содержания суммы РЗЭ в годовых кольцах являются отражением геологических факторов и могут применяться в качестве биогеохимических индикаторов данного типа формаций, существование которых мы обсудили выше.

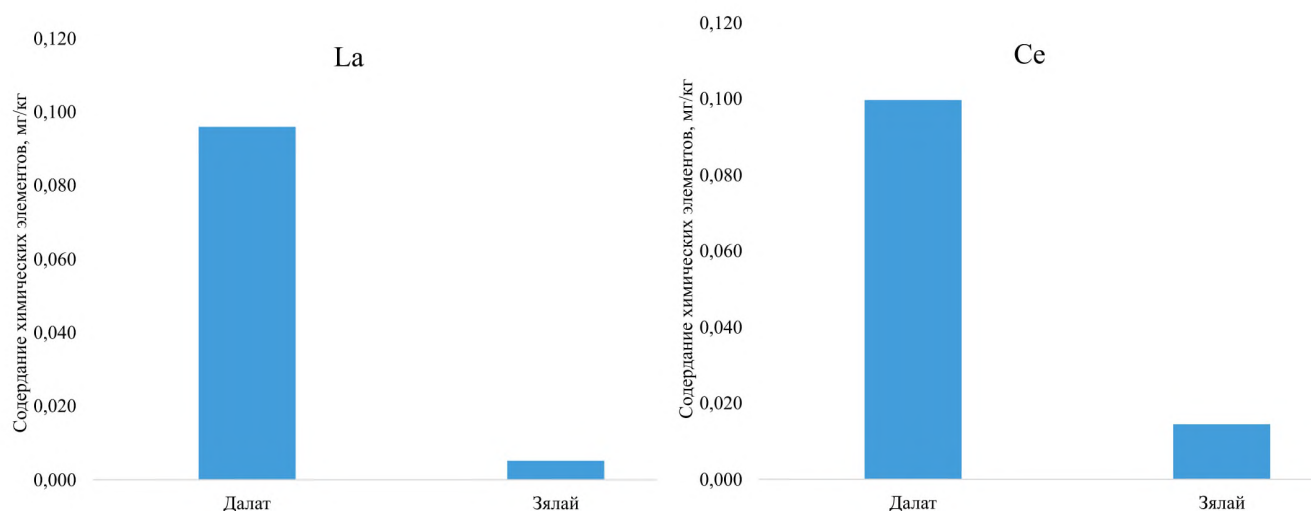


Рисунок 5.1.11 – Сравнения содержания латана и церия в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) на территории г. Далат и провинции «Зялай» Республики Вьетнам.

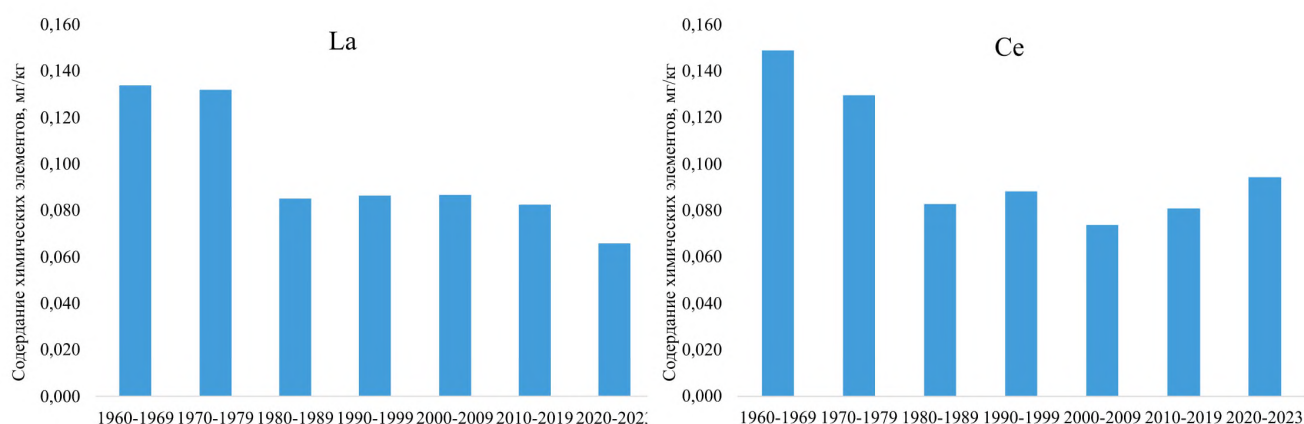


Рисунок 5.1.12 – Динамика содержания латана и церия в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) на территории г. Далат Республики Вьетнам

Всегда сложно выделить исключительно природные индикаторы на территориях. Характеризующихся сложной природно – техногенной ситуацией. На наш взгляд, техногенные индикаторы выделяются в изменениях содержаний в составе древесины на разных временных промежутках. Нами проведена работа по обобщению имеющейся информации в плане изменения тенденций содержания химических элементов в изученных временных промежутках на данной территории. Общие тенденции изменения содержаний изученных элементов в

годовых кольцах сосны относительно условно – фонового района представлены в таблице 5.1.4.

Таблица 5.1.4 – Ранжированные ряды химических элементов по коэффициенту концентрации в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) на территории южных провинций Республики Вьетнам

Временные периоды	Геохимический ряд (коэффициенты рассчитаны относительно фонового условия провинция Зялай, n=3)
1960-1969	Pb_{162,6} La_{25,1} Pr_{19,7} Th_{13,4} Nd_{11,3} Ce_{10,2} Sm_{7,8} Tb_{6,0} Yb_{5,8} Gd=Er_{5,5} Dy_{4,4} Ho_{4,1} Fe_{3,6} Y_{3,5} Ag_{2,8} Eu_{2,5} Ca_{2,4} W_{2,1} Li=Na=Cl=I_{2,0} K=Mn_{1,9} Re_{1,8} Se=Br_{1,7} As=Cd=S_{1,6} Mo=V=Sn_{1,5} Ga=Ni_{1,4} Co=Ta=B_{1,3} Sb=U=Mg_{1,2} Rh=P=Sr=Ti_{1,2} Cr=Cu=Be=Ge=Nb=In=Tm=Lu=Os=Ir=Bi=Si_{1,0} Sc_{0,9} Zn=Hf=Ba_{0,8} Pt=Al_{0,5} Ru=Rb=Hg_{0,4} Zr_{0,3} Au=Te=Cs_{0,2} Pd=Tl_{0,1}
1970-1979	Pb_{127,9} Nb_{126,6} Th_{38,9} La_{24,8} Bi_{18,6} Pr_{18,5} Nd_{9,7} Ce_{8,9} Ho_{7,9} Sm_{6,7} Tb_{6,6} Yb=Gd_{6,5} In_{4,8} Er_{3,9} Dy_{3,7} Ag_{3,6} Ta_{3,3} Fe_{3,2} Y_{3,0} Ca_{2,6} Eu=Lu_{2,4} Li_{2,3} K_{2,2} W_{2,1} Pt=Re_{2,0} Br_{1,9} I=Cl=Na_{1,7} Mn=V_{1,5} B=Cd=Se=U_{1,4} Co=As_{1,3} Mg=Mo_{1,2} Ga=S=P=Rh=Sn=Ni=Sb_{1,1} Sr=Ti=Cu=Cr=Be=Ge=Tm=Os_{1,0} Ir=Si_{1,0} Hf=Sc_{0,9} Ru=Zn_{0,8} Ba_{0,6} Hg_{0,5} Al=Rb=Zr_{0,4} Te=Cs_{0,2} Pd=Tl=Au_{0,1}
1980-1989	Pb_{85,3} Nd_{28,6} La_{16,0} Pr_{10,4} Th_{9,7} Bi_{7,5} Ce_{5,7} Fe_{5,6} Nd_{5,4} Yb_{3,6} Sm_{3,0} Ag_{2,9} Gd=Na_{2,7} Pt_{2,4} Ca=V_{2,2} Dy_{2,1} K_{2,0} S_{1,9} Tb=Li_{1,7} Ir=Hf_{1,5} Mn=W=Br=Eu_{1,4} Y=Sb=Cd=Ta_{1,3} B=Sn=Re=Co=Mo_{1,2} Mg=Cl=Rh=Ga=Ti_{1,1} U=Sc=Ru=Cu=In=Lu=Be=Ge=Tm=Os_{1,0} Se=Ni=Cr=Si=Sr=P_{0,8} Zn=As=I_{0,7} Er=Hg_{0,6} Ba=Pd_{0,5} Rb=Al_{0,4} Zr_{0,3} Te=Cs_{0,2} Ho=Au=Tl_{0,1}
1990-1999	Pb_{68,1} Nb_{31,4} Th_{21,5} La_{16,2} Pr_{10,9} Fe_{10,0} Bi_{6,4} Ce_{6,0} Nd_{5,8} V_{3,4} Gd=Sm_{2,9} W_{2,8} Va_{2,3} K=Li_{2,2} Yb=Na=Dy_{2,1} Er_{2,0} Br_{1,9} Tb_{1,8} Y=C_{11,7} Ag=Rh=B=Mo_{1,6} Ru=Ga=S=U_{1,5} Ni=Sb=Co_{1,4} Mg=Hf=Ta_{1,3} Pt=Eu=Re_{1,2} Ti=Sn=I=Cr_{1,1} Mn=Se=Si=Cd=Ir_{1,0} In=Lu=Be=Ge=Tm=Os=As=Sc=Hg_{1,0} Cu=Sr=P_{0,9} Ho=Zn_{0,8} Rb=Al_{0,5} Ba_{0,4} Zr_{0,3} Te=Cs=Au_{0,2} Tl=Pd_{0,1}
2000-2009	Pt_{309,4} Ir_{207,7} Os_{191,1} Re_{86,3} Pb_{70,9} Bi_{62,9} Nb_{51,8} Yb_{48,7} Th_{34,1} Er_{28,2} Tm_{27,6} Ho_{24,7} Lu_{23,0} La_{16,3} Tb_{13,5} Fe_{11,1} Pr_{10,2} Sm_{9,9} Gd_{7,3} Dy_{6,7} Nd_{6,0} U_{5,9} Ce_{5,0} V_{4,7} W_{4,0} Hf_{3,8} Eu_{3,5} Hg_{3,2} Br_{2,5} Li_{2,3} Cl=Mo_{2,2} K_{2,1} Ca_{2,0} Ag_{1,9} Na=Ta_{1,8} Au=B_{1,6} Ni=Y_{1,5} Mg=Sb=Rh=Co=Se_{1,3} Cr=I=Sn=Cu=As_{1,2} S=P=Si_{1,1} Ti=In=Be=Ge=Mn_{1,0} Ga_{0,9} Zn=Cd=Cd=Sr_{0,8} Te=Sc_{0,7} Al_{0,6} Rb_{0,5} Ru_{0,4} Ba=Zr_{0,3} Cs_{0,2} Tl=Pd=0,1
2010-2019	Nd_{85,9} Pb_{72,8} Th_{18,7} Bi_{17,3} La_{15,5} Pt_{11,1} Pr_{8,5} Fe_{6,7} Ce_{5,5} Yb_{5,0} Nd_{4,7} Na_{4,5} Ag=V_{3,9} Hf_{3,8} Li_{3,7} Br_{3,0} Ta_{2,9} Sm_{2,8} W_{2,7} Gd=Sb_{2,6} Sn=K_{2,4} Dy=Tb_{2,3} Cl=Ca_{1,9} Mo=Er_{1,8} B=Pd_{1,7} Cu_{1,6} U_{1,5} As=Ho=I_{1,4} Y=Cr_{1,3} Mg=Ga=Re_{1,2} Rh_{1,2} Ni=Si=Ti_{1,1} Ir=Os=Tm=Lu=In=Be=Ge=Se=Ru_{1,0} P=Zn=Mn_{0,9} Co=Eu=Sc_{0,8} Sr=Al_{0,7} Cd_{0,6} Zr=Rb_{0,5} Hg=S_{0,4} Au=Ba_{0,3} Te_{0,2} Cs=Tl_{0,1}

Продолжение таблицы 5.1.4

Временные периоды	Геохимический ряд (коэффициенты рассчитаны относительно фонового условия провинция Зялай, n=3)
2020-2023	Ir _{111,8} Th _{52,2} W _{42,7} Fe _{41,4} Nb _{29,9} V _{20,2} Pb _{16,3} Ni _{13,2} La _{12,4} Re _{10,2} Mo _{10,0} Pd = Br _{8,9} C _{18,4} Pr _{7,8} S _{7,4} Hf _{6,9} P _{6,8} Ce _{6,5} Li = Cu _{6,4} Sn _{6,3} Ti _{6,2} U = Yb _{6,1} Se _{6,0} Ag = I _{5,7} Ta _{5,4} Na _{4,9} B _{4,6} Sb _{4,4} As _{4,2} Nd _{4,0} Au _{3,8} Sm = Ga _{3,5} Cr _{3,3} Hg _{3,2} Ru _{2,9} Al _{2,6} Y = K _{2,5} Gd _{2,4} Co _{2,3} Si _{2,2} Dy = Rh _{1,8} Zr _{1,4} Tb = Ca _{1,3} Mg = Mn _{1,2} Bi = Os = Tm = Lu = In = Be = Ge = Sc = Er _{0,9} Ho _{0,9} Zn = Sr _{0,6} Pt = Rb _{0,5} Eu _{0,4} Cd = Ba _{0,3} Cs = Te _{0,2} Tl _{0,1}

Как видно из таблицы, преимущественным накоплением характеризуются элементы, входящие в состав горных пород данной территории. Иная картина распределения элементов в годовых кольцах по сравнению с индикаторами природных обстановок нами была выявлена для натрия, брома, урана и тория, концентрация которых значимо возрастает к современному периоду. Это хорошо видно на графиках соотношения некоторых элементов Na, K, Th, U (рисунок 5.1.13), а также в геохимических рядах по разным временным периодам (таблица 5.1.4).

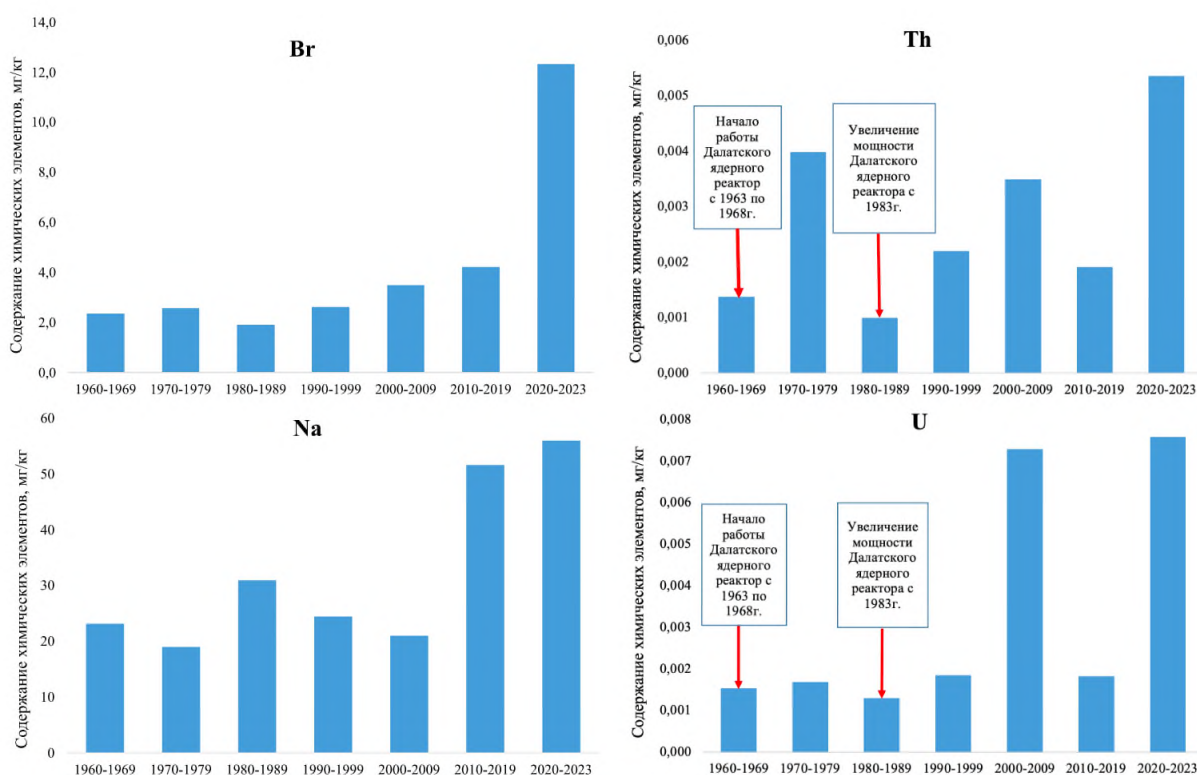


Рисунок 5.1.13 – Динамика содержания брома, натрия, урана, тория в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) на территории г. Далат, Республики Вьетнам.

Особенно следует отметить, что высокий уровень урана и тория совпадают с периодом работы (с 1963 по 1968 гг.) и увеличенной мощности Далатского исследовательского ядерного реактора г. Далат, с 1983г.

Обобщение тенденций изменения содержания изученных химических элементов, представлено в таблице 5.1.5.

Таблица 5.1.5 – Основные тенденции в динамике накопления элементов в составе сосны территории г. Далат, Республики Вьетнам.

Тенденция	Химические элементы
Равномерное распределение	Mg, K, Ca, Sc, Zn, Rb, Rh, Cs,
Повышение к современному периоду	Li, B, Na, Al, Si, P, S, Cl, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Se, Br, Zr, Mo, Ru, Pd, Ag, Sn, Sb, I, Hf, Ta, W, Au, U, Th,
Уменьшение к современному периоду	Mn, As, Sr, Y, Nb, Cd, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Tl, Pb,

Таким образом, проведенные с использованием метода индуктивно связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием позволил установить специфику поведения широкого спектра химических элементов в составе колец деревьев. Произрастающих в природно – техногенных условиях южных провинций Республики Вьетнам и установить возможность применения индикаторных показателей в биогеохимических и геоэкологических исследованиях.

5.2 Биогеохимическая индикация особенностей территории г. Далат, Республики Вьетнам с применением метода инструментального нейтронно – активационного анализа

Метод нейтронно – активационного анализа (ИНАА) имеет то преимущество, что его проведение не требует специальной химической подготовки проб. Это значит, по нашему мнению, что данные, полученные с его применением, носят объективный характер и снижают возможность ошибки анализа. Согласно представленным данным методика инструментального нейтронно-активационного анализа позволяет четко выделить эколого-геохимическую специфику территории г. Далат и установить отдельные зоны, отражающие промышленную и сельскохозяйственную деятельность, а также военное воздействие.

Для территории г. Далат характерным является сложная природно-техногенная обстановка. Она обусловлена наличием специфичных геологических структур и ряда производственных объектов. Техногенные источники связаны с деятельностью промышленного узла «Фатчи» на юго-востоке города, занимающегося переработкой сельскохозяйственной продукции и производством продуктов питания и включающего пять крупных предприятий, таких как акционерное общество «Ламдонг Фуд», ООО «Далат Файбер», ООО «Фушенг», ООО «Бонир Фарм» и ООО «Лонгдинг чай» [282]. Кроме того, существует ряд других источников, как например, исследовательский реактор, наличие железной дороги, мелкомасштабной добычи олова, золота и каолина на территории Далата. Нами изучены шесть точек, каждая из шести представленных точек отбора проб характеризуется наличием определенных эколого - геохимических условий. Точка «Далат-1», располагающаяся в южной части изученной территории, характеризуется наличием природной геохимической аномалии. Точка «Далат-2» расположена на северной границе г. Далат, отмечается высокой плотностью населения. Точки «Далат-3» и «Далат-4» располагаются в юго-восточной части и расположены вдоль железнодорожного маршрута Тхяпчям-Далат (работающего в военный период Вьетнамской войны (1932-1972гг.)), ближе к промышленному узлу Фатчи. Также здесь находятся каолиновые рудники месторождения Чаймат,

залегаящие на миоценовом биотитовом граните. Точка «Далат-5» расположена в центре и в ближайшем окружении от главного городского водохранилища, примерно в 2 км к югу от Института ядерных исследований. Пункт Далат-6 расположен на юго-западе города Далат, в 15 км от центра города, для которого характерна местная сельскохозяйственная деятельность.

Как уже было показано, ассимиляция химических элементов годовыми кольцами деревьев и корой зависит в большей степени от литолого-геохимических особенностей территории произрастания. В ходе исследования нами были выявлены особенности концентрирования химических элементов на территории расположения уникальной геологической структуры – грейзенизированного базальта. Точка отбора проб располагалась в районе распространения полевошпатовой породы формации Дыонзыонг с микроскладчатой жилой шириной 1–2 м, прорезающей экструзивные туфовые породы и обладающей высокой радиоактивностью. Породы вокруг фельзит-порфировой жилы наблюдаются повышенное содержание радиоактивных, редкоземельных и других элементов. Анализ полученных данных показал значительные различия в концентрации элементов в коре сосен по сравнению с корой других деревьев (рисунок 5.2.1).

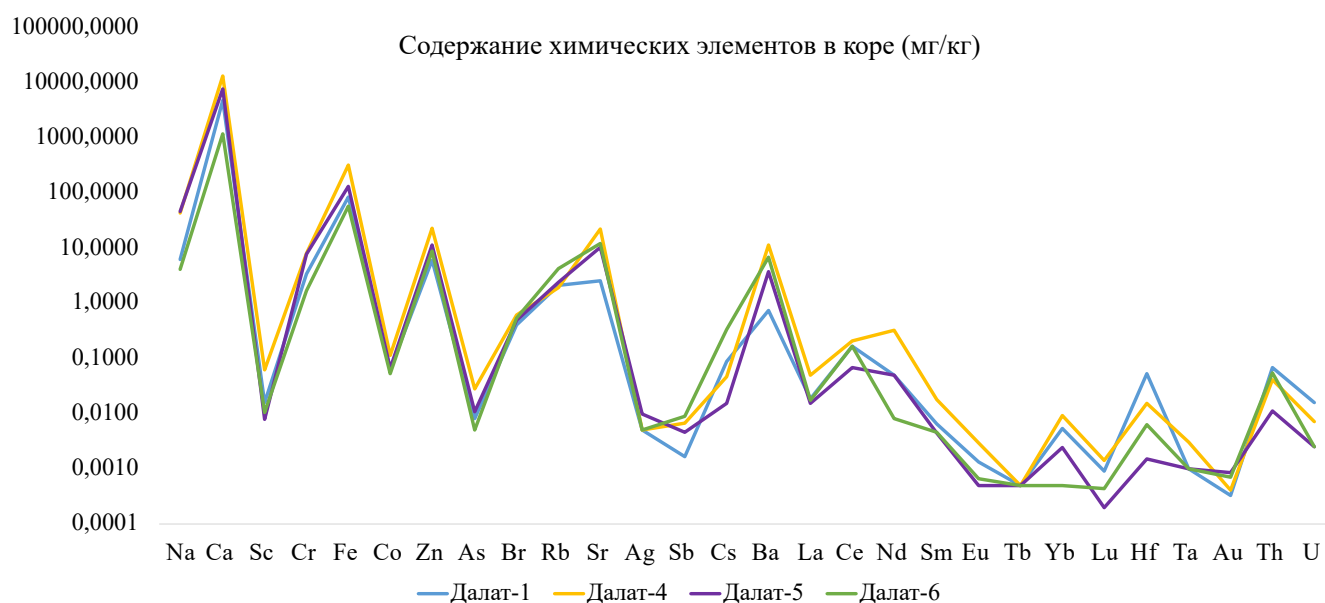


Рисунок 5.2.1 – Содержание химических элементов в коре сосен, произрастающих на территории Республика Вьетнам (мг/кг с.в., шкала логарифмическая).

Специфика концентрирования химических элементов в коре хорошо отражается в геохимических рядах, построенных на основе коэффициентов, рассчитанных относительно средних значений по всей выборке (таблица 5.2.1). Кора сосны, произрастающей в зоне природной аномалии, обозначена условным шифром «Далат-1» и характеризуется более высокими содержаниями урана и гафния. В точке «Далат-1» есть превышение среднего содержания элементов по выборке с концентрацией специфичных для этого типа проявлений радиоактивных элементов (тория и урана), редкоземельных элементов (иттербия, лютеция, гафния, скандия и др.) (таблица 5.2.1).

Таблица 5.2.1 – Геохимические ряды концентрирования элементов в коре деревьев территории Республики Вьетнам

Точка отбора проб (n – количество проб)	Геохимический ряд (коэффициенты рассчитаны относительно среднего по выборке, n=31)	Z _{спн}
Далат-1	Hf ₁₂ Th _{6,7} U _{4,3} Yb _{3,7} Ca _{3,3} Sc _{2,8} Lu _{2,5} Cs _{2,4} Fe _{1,9} Rb _{1,8} Co _{1,5} Ce _{1,5} Sm _{1,5} Cr _{1,4} Br _{1,4} Eu _{1,3} As _{1,1} La _{1,1} Zn _{1,0} Ta _{0,9} Sr _{0,8} Nd _{0,8} Tb _{0,7} Ag _{0,6} Sb _{0,5} Au _{0,5} Ba _{0,3} Na _{0,1}	34,2
Далат-4	Sc _{10,9} Ca _{9,1} Fe _{7,0} Sr _{6,7} Yb _{6,3} Nd _{5,3} Ba _{5,2} Sm _{4,1} Th _{4,1} Lu _{3,9} Zn _{3,8} Hf _{3,7} As _{3,8} Cr _{3,3} La _{2,9} Eu _{2,8} Ta _{2,7} Co _{2,6} Br _{2,2} Sb _{2,1} U _{2,0} Ce _{1,9} Rb _{1,7} Cs _{1,3} Na _{0,8} Tb _{0,7} Ag _{0,6} Au _{0,6}	75,4
Далат-5	Ca _{5,3} Cr _{3,1} Sr _{3,1} Fe _{2,1} Rb _{2,1} Zn _{1,9} Br _{1,7} Ba _{1,7} Yb _{1,6} Co _{1,5} As _{1,5} Sb _{1,5} Sc _{1,4} Au _{1,2} Ag _{1,1} Th _{1,1} Sm _{1,0} Na _{0,9} La _{0,9} Ta _{0,9} Nd _{0,8} Tb _{0,7} U _{0,7} Ce _{0,6} Lu _{0,6} Eu _{0,5} Cs _{0,4} Hf _{0,4}	15,9
Далат-6	Cs _{9,3} Th _{5,4} Rb _{3,8} Sr _{3,7} Ba _{3,2} Sb _{2,8} Sc _{1,9} Br _{1,9} Ce _{1,5} Hf _{1,5} Zn _{1,4} Fe _{1,3} Co _{1,2} Lu _{1,2} Sm _{1,1} La _{1,0} Au _{1,0} Ta _{0,9} Ca _{0,8} Cr _{0,7} As _{0,7} Tb _{0,7} U _{0,7} Ag _{0,6} Eu _{0,6} Yb _{0,3} Na _{0,1} Nd _{0,1}	26,2

При этом суммарный показатель накопления элементов не демонстрирует самых высоких уровней на исследованных локальных территориях (рисунок 5.2.2).

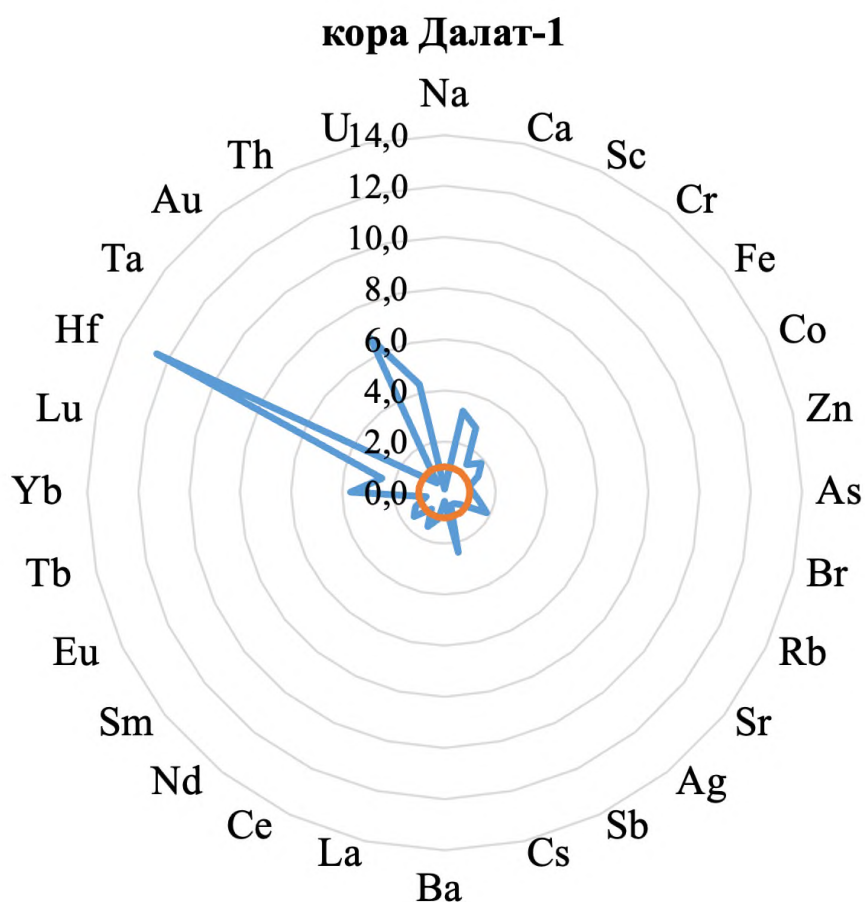


Рисунок 5.2.2 – Геохимическая специфика концентрирования химических элементов в коре сосны, произрастающей в районе геохимической аномалии (точка «Далат-1») на территории Республики Вьетнам (коэффициенты концентрации относительно среднего по выборке, $n=31$).

Процесс техногенеза оказывает существенное влияние на аккумуляцию химических элементов в коре деревьев. В частности, промышленный узел Фатчи расположен вблизи точки «Далат-4», где наблюдается значительное повышение концентрации тяжелых металлов. Максимальный показатель загрязнения в данной зоне достигает 75,4, что свидетельствует о выраженном антропогенном воздействии на локальные биогеохимические циклы (рисунок 5.2.3).

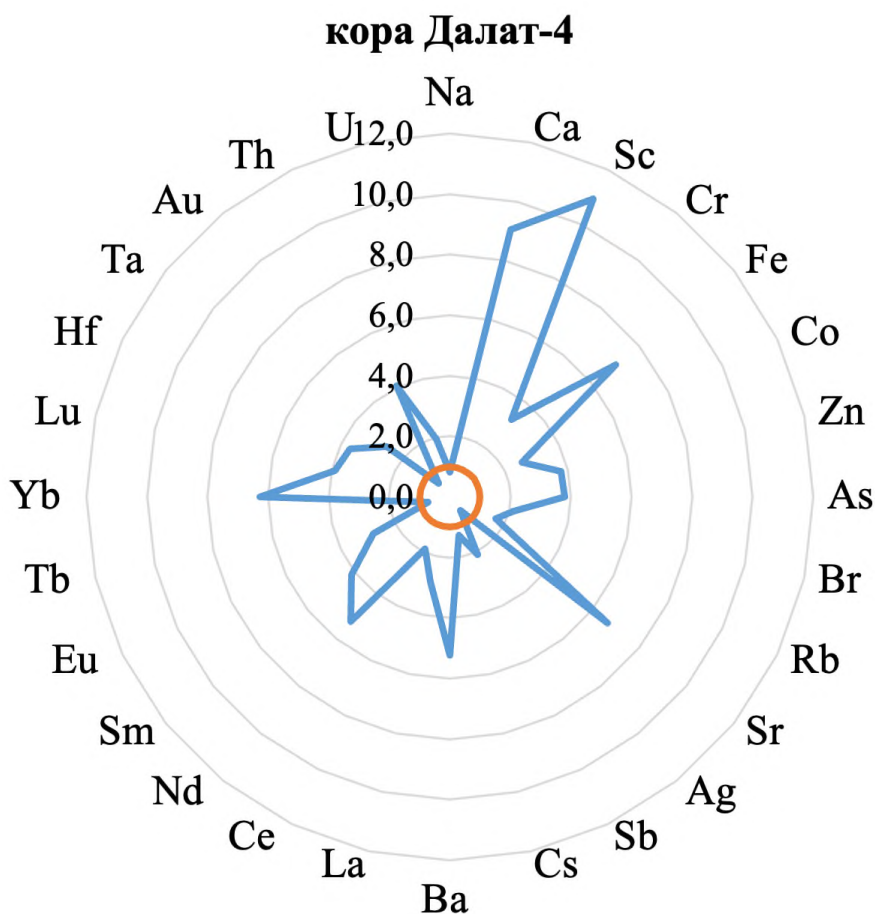


Рисунок 5.2.3 – Геохимическая специфика концентрирования химических элементов в коре сосны, произрастающей в районе техногенного влияния (точка «Далат-4») на территории Республики Вьетнам (коэффициенты концентрации относительно среднего по выборке, $n=31$).

Третье место по уровню накопления элементов занимает точка «Далат-6», расположенная в зоне активной сельскохозяйственной деятельности. В коре сосны на данной территории преобладают щелочные и щелочноземельные металлы, а также отмечается значительное накопление сурьмы (рисунок 5.2.4).

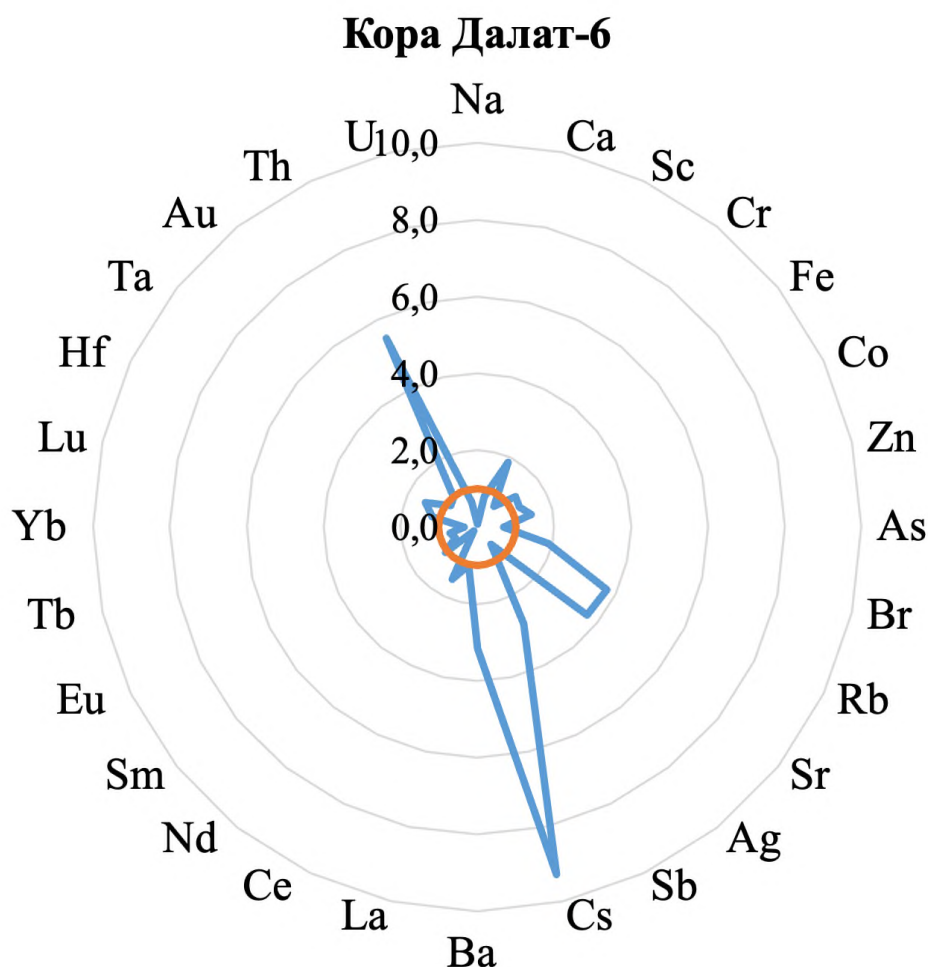


Рисунок 5.2.4 – Геохимическая специфика концентрирования химических элементов в коре сосны, произрастающей в районе техногенного влияния (точка «Далат-6») на территории Республики Вьетнам (коэффициенты концентрации относительно среднего по выборке, $n=31$).

Наименьшие показатели загрязнения зафиксированы в точке «Далат-5», характеризующейся высокой плотностью населения и непосредственной близостью к центральной транспортной дороге г. Далат. В коре сосны точки «Далат-5» выявлено повышенное содержание кальция, хрома, стронция, железа, рубидия и цинка (рисунок 5.2.5). Минимальным значением суммарного показателя загрязнения характеризуется точка «Далат-5», что позволяет отнести ее к условно-фоновым. Следует отметить, что в ходе исследования не были отобраны образцы коры во всех шести точках, в связи с чем отсутствуют данные для характеристики геохимических особенностей точек «Далат-2» и «Далат-3».

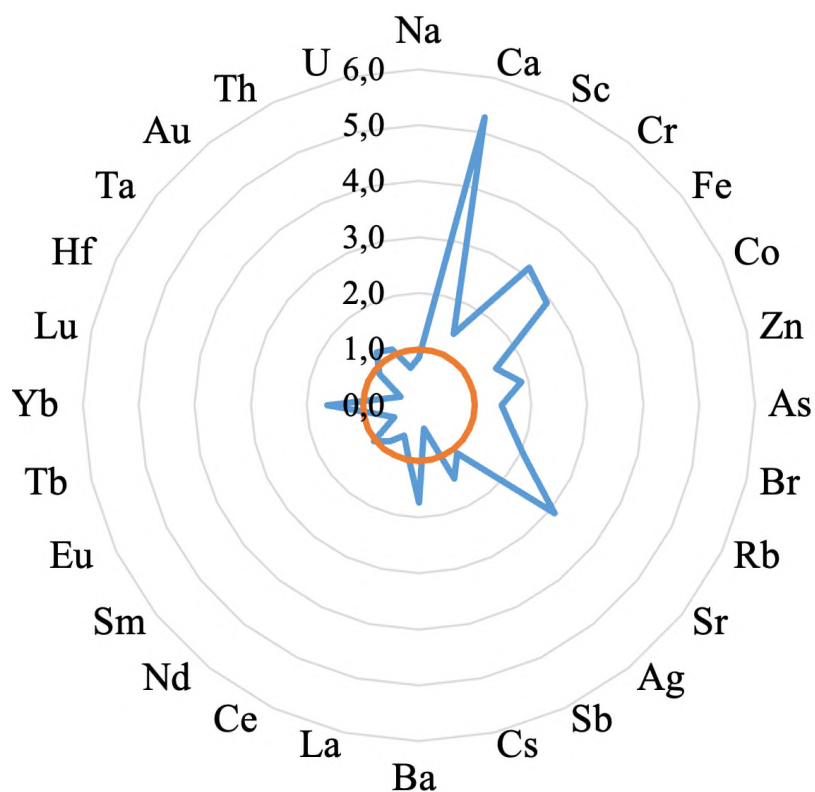
кора Далат-5

Рисунок 5.2.5 – Геохимическая специфика концентрирования химических элементов в коре сосны, произрастающей в районе техногенного влияния (точка «Далат-5») на территории Республики Вьетнам (коэффициенты концентрации относительно среднего по выборке, $n=31$).

Анализ выявил существенные различия в аккумуляции химических элементов древесиной по сравнению с их аккумуляцией корой сосны. Суммарный показатель накопления элементов в древесине на порядок ниже (таблица 5.2.2). Распределение химических элементов в годовых кольцах также демонстрирует иную динамику (рисунок 5.2.6). По-видимому, это обусловлено особенностями формирования годовых колец и комплексным воздействием как природных геологических аномалий, так и техногенных процессов различного масштаба – от локального до глобального.

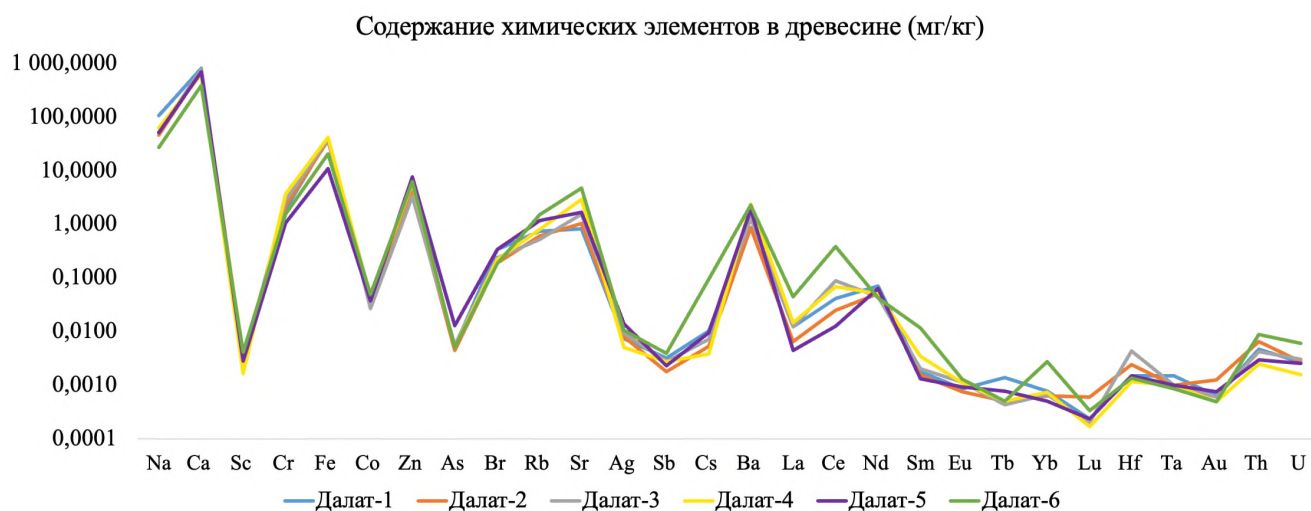


Рисунок 5.2.6 – Характер накопления химических элементов древесиной сосны на территории Республики Вьетнам (мг/кг с.в., шкала логарифмическая).

Специфика концентрирования элементов в древесине сосны отражена в геохимических рядах (таблица 5.2.2).

Таблица 5.2.2 – Геохимические ряды концентрирования элементов в древесине деревьев территории Республики Вьетнам

Точка отбора проб (n – количество проб)	Геохимический ряд (коэффициенты рассчитаны относительно среднего по выборке, n=31)	Z _{спн}
Далат-1	Na=Tb ₂ Ta _{1,3} Br=Nd _{1,2} Co=Sb _{1,0} Fe=Au _{0,9} Cr=Ag=Eu _{0,8} Zn=As=Rb=La=U _{0,7} Ca=Ba=Lu _{0,6} Yb=Th _{0,5} Sc=Ce=Sm=Hf _{0,4} Cs _{0,3} Sr _{0,2}	2,7
Далат-2	Au _{1,8} Lu _{1,6} Na=Cr=Ag=Ta _{0,9} Fe=Nd _{0,8} Co=Br=Eu=Tb=U _{0,7} Sc=Zn=As=Sb=Hf=Th _{0,6} Ca=Rb _{0,5} Ba=La=Sm=Yb _{0,4} Sr _{0,3} Ce _{0,2} Cs _{0,1}	1,4
Далат-3	Cr=Eu _{1,1} Na=Ag=Hf _{1,0} Fe=Sb=Ta=Au _{0,9} As=Ce=U _{0,8} La=Nd _{0,7} Co=Ba=Tb=Lu _{0,6} Ca=Sc=Zn=Rb=Sr=Sm=Yb _{0,5} Th _{0,4} Cs _{0,2}	0,2

Продолжение таблицы 5.2.2

Точка отбора проб (n – количество проб)	Геохимический ряд (коэффициенты рассчитаны относительно среднего по выборке, n=31)	Z _{спн}
Далат-4	Cr _{1,5} Na _{1,2} Ba=Eu _{1,1} Co=Zn _{1,0} Fe=Sr=Sb=La=Ta _{0,9} Br=Nd=Sm _{0,8} As=Rb=Tb=Au _{0,7} Ag=Ce _{0,6} Yb=Lu _{0,5} Ca=U _{0,4} Sc=Hf _{0,3} Th _{0,2} Cs _{0,1}	0,9
Далат-5	As _{1,8} Ag _{1,6} Zn=Br _{1,2} Tb=Au _{1,1} Na=Rb=Nd _{1,0} Co=Ba=Eu=Ta _{0,9} Sb=U _{0,7} Lu _{0,6} Ca=Sc=Sr _{0,5} Cr=Hf _{0,4} Cs=La=Sm=Yb=Th _{0,3} Fe _{0,2} Ce _{0,1}	2,4
Далат-6	Ce _{3,4} Sm _{2,7} La _{2,6} Cs _{2,6} Yb _{1,9} U _{1,6} Sr _{1,4} Rb=Sb _{1,3} Co=Ag=Eu _{1,2} Zn=Ba _{1,0} Lu=Th _{0,9} Ta _{0,8} Sc=As=Nd=Tb=Au _{0,7} Cr=Br _{0,6} Na _{0,5} Fe _{0,4} Ca=Hf _{0,3}	10,4

Максимальными суммарными показателями и широким спектром накопления элементов характеризуется древесина сосны, произрастающей в зоне сельскохозяйственной деятельности («Далат-6»). Накопление сурьмы, вероятно, обусловленное применением пестицидов и минеральных удобрений, демонстрирует сходную с корой динамику накопления.

Пространственное распределение химических элементов в древесине имеет комплексный характер. В отличие от коры, которая преимущественно отражает локальные геохимические аномалии, древесина демонстрирует выраженную зависимость от глобальных техногенных процессов. Особый интерес представляет выявленная корреляция между химическим составом годовых колец и климатическими изменениями, что проявляется в вариабельности их морфологических характеристик, в частности ширины. Полученные данные свидетельствуют о том, что древесина может служить надежным биоиндикатором как антропогенного воздействия, так и долгосрочных климатических трансформаций.

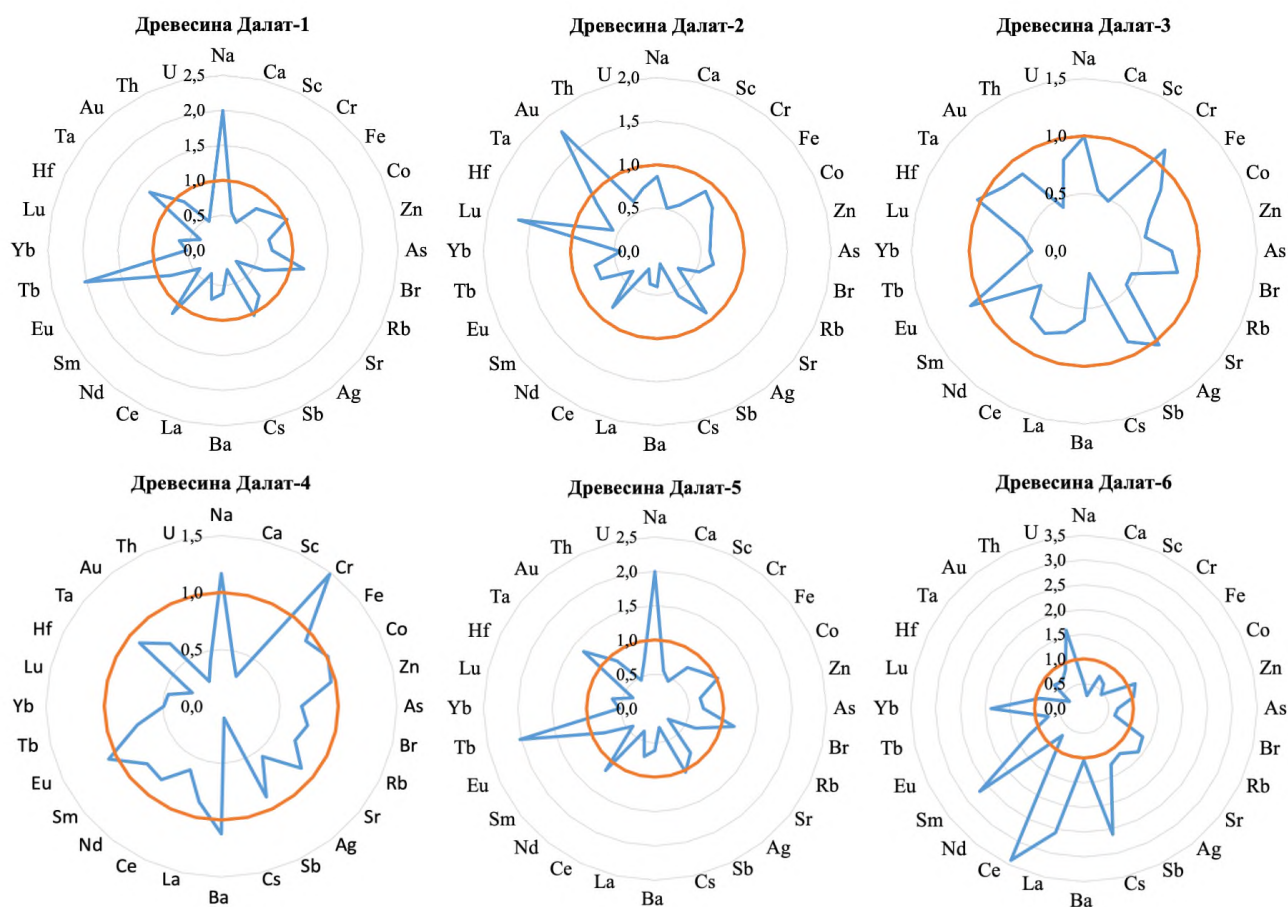


Рисунок 5.2.7 – Геохимическая специфика концентрирования химических элементов в древесине сосны, произрастающей на территории Республики Вьетнам (коэффициенты концентрации относительно среднего по выборке, $n=31$).

В древесине тенденция повышения коэффициентов концентраций в целом установлена непостоянно по всем точкам. В геохимических рядах точек «Далат-3» и «Далат-4» на первое место входит Cr, Na, Eu, что обусловлено техногенными геохимическими аномалиями, связанными с деятельностью основных городских промышленных предприятий и автотранспортов (рисунок 5.2.7). Примечательно, что если по содержанию элементов для коры точка «Далат-4» демонстрирует максимальные показатели загрязнения, то для древесины региона, напротив, характеризуется минимальными значениями суммарного показателя загрязнения. Это объясняется небольшим влиянием промышленного узла Фатчи с коротким периодом работы с 2020-х гг. по настоящее время. Полученные данные свидетельствуют о том, что кора служит чувствительным

индикатором недавнего антропогенного воздействия, тогда как древесина сохраняет долговременную запись изменений окружающей среды.

Точки «Далат-1» и «Далат-5» демонстрируют сходные геохимические спектры с преобладанием натрия, тантала, тербия, неодима, брома, цезия, которые отражают региональную природную геохимическую специализацию территории г. Далат. Для точки «Далат-1» зафиксировано значительное накопление натрия и тантала, что соответствует характеристикам контактной зоны калиево-натриевого щелочного массива с вмещающими породами. Примечательно, что ведущие элементы индикаторы для древесины на данной территории преобладают натрий, тербий и тантал, а для коры – гафний, торий и уран.

В точках «Далат-2» и «Далат-6» отмечены повышенные средние содержания двух ассоциаций: лутеция-золота и самария-иттербия-церия-лантана-цезия-урана. Такое распределение, вероятно, связано с природными региональными условиями.

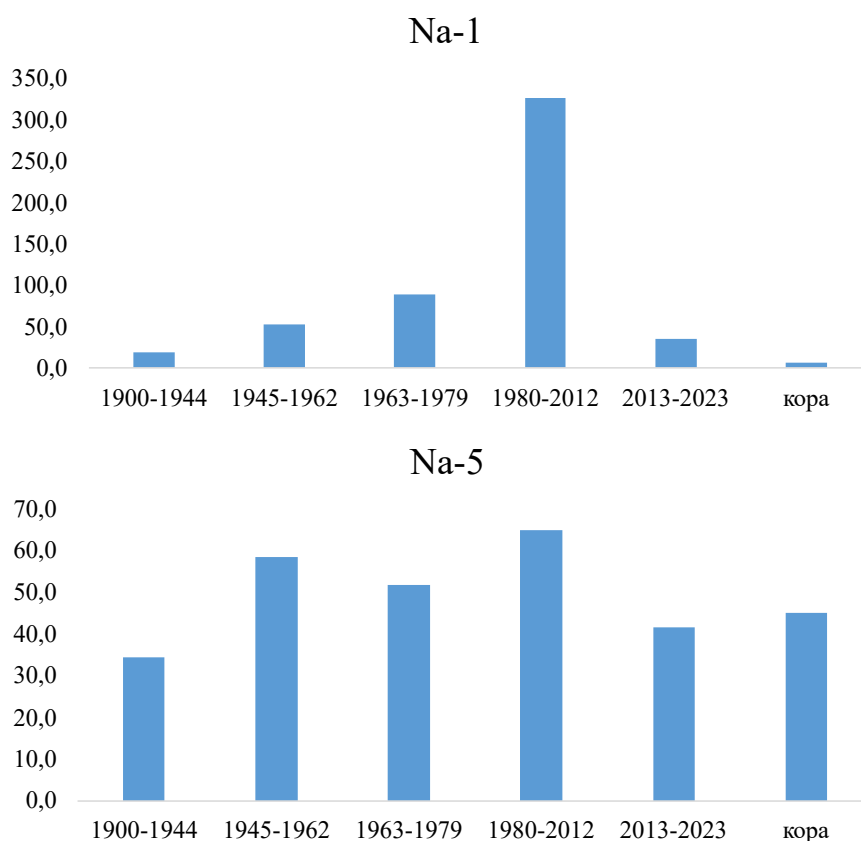


Рисунок 5.2.8 – Характер накопления натрия в годичных кольцах сосны территории Республики Вьетнам (мг/кг, св). Сосны точек «Далат-1» (Na-1) и «Далат-5» (Na-5).

Сравнение двух деревьев, расположенных на расстоянии около 12 км друг от друга, одно из которых находится в районе природной геохимической аномалии, выявило синхронное повышение содержания натрия в период 1980–2012 гг. (рисунок 5.2.8). При этом концентрация натрия в древесине сосны из точки «Далат-1» примерно на порядок превышает его содержание для точки «Далат-5». Такое различие однозначно свидетельствует о влиянии природного натриевого метасоматоза, характерного для точки «Далат-1».

Таким образом, на территории расположения города Далат Республики Вьетнам, сложилась уникальная геоэкологическая ситуация, характеризующаяся специфичными природно – техногенными условиями. Изменение геохимического фона этой территории отражается в элементном составе колец деревьев, которые являются хорошими индикаторами состояния среды.

5.3 Биогеохимическая индикация техногенных обстановок

На территории г. Далат наблюдается неравномерное распределение большинства изученных элементов, отражающее особенности геохимической специфики города. Наиболее выраженные аномалии отмечены для содержания Fe и Cr, которые повышено в районе с высокой техногенной нагрузкой по сравнению с территориями преимущественно сельскохозяйственного назначения и населенных пунктов (рисунок 5.3.1). В точках «Далат-3» и «Далат-4» содержание Fe и Cr выше, чем в точках «Далат-5» и «Далат-6», в 1,8–3,4 раза соответственно.

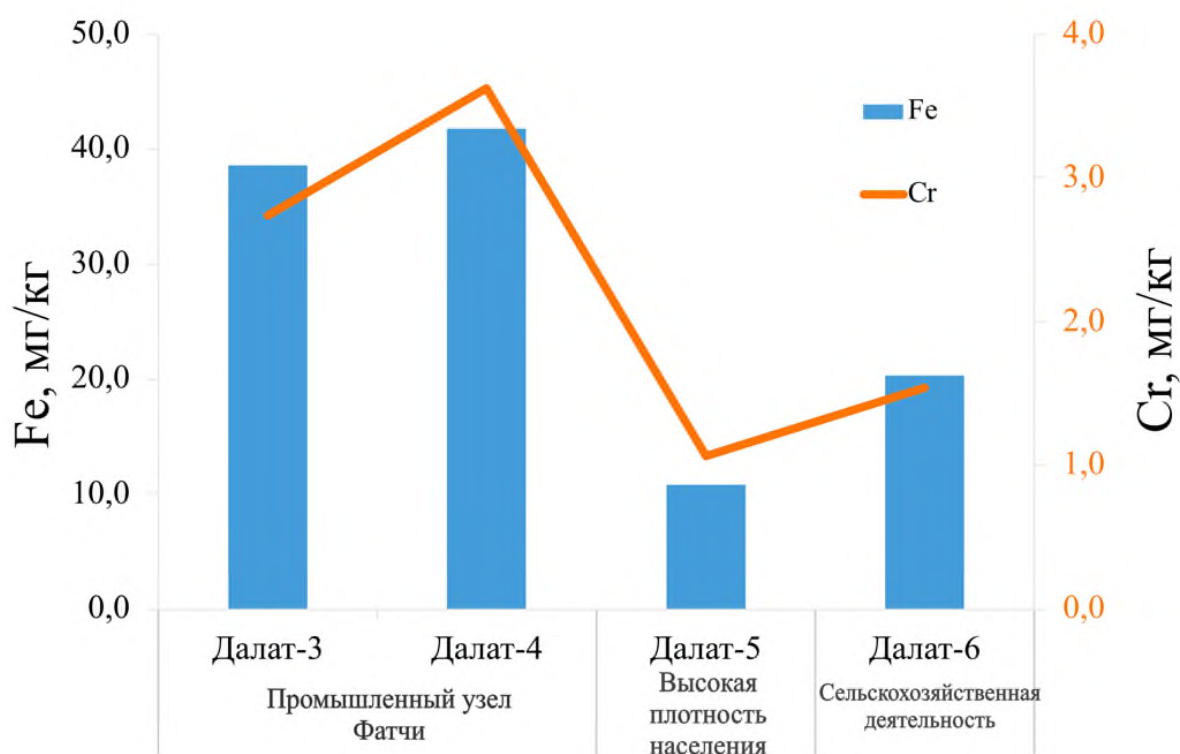


Рисунок 5.3.1 – Характер накопления Fe и Cr в годовые кольца сосны разных территорий г. Далат (мг/кг, св)

Известно, что железо и хром являются важными показателями промышленного производства в черной металлургии, машиностроении и металлообработке [8, 282]. В период 1945–1962 гг. наблюдалось значительное повышение поглощения этих элементов древесиной деревьев, произрастающих на юго-востоке г. Далат. Юго-восточная часть г. Далат признана районом насаждений с 1920-х гг. Железнодорожный маршрут был открыт в 1932г. и но прекратил работу в 1972г. [193, 283]. Сегодня участок железнодорожной линии между станциями

Далат и Чаймат длиной около 7 км восстанавливается для эксплуатации в качестве туристического объекта [283]. Кроме того, во время войны против Франции и США этот район служил военной базой и местом военных действий для многочисленных революционных кадров и организаций [191, 283]. Сегодня в этой зоне работает промышленный узел Фатчи площадью 26,4 га. Здесь занимаются переработкой сельскохозяйственной продукции и производством продуктов питания. Узел включает пять крупных предприятий: акционерное общество «Ламдонг Фуд», ООО «Далат Файбер», ООО «Фушенг», ООО «Бонир Фарм» и ООО «Лонгдинг чай».

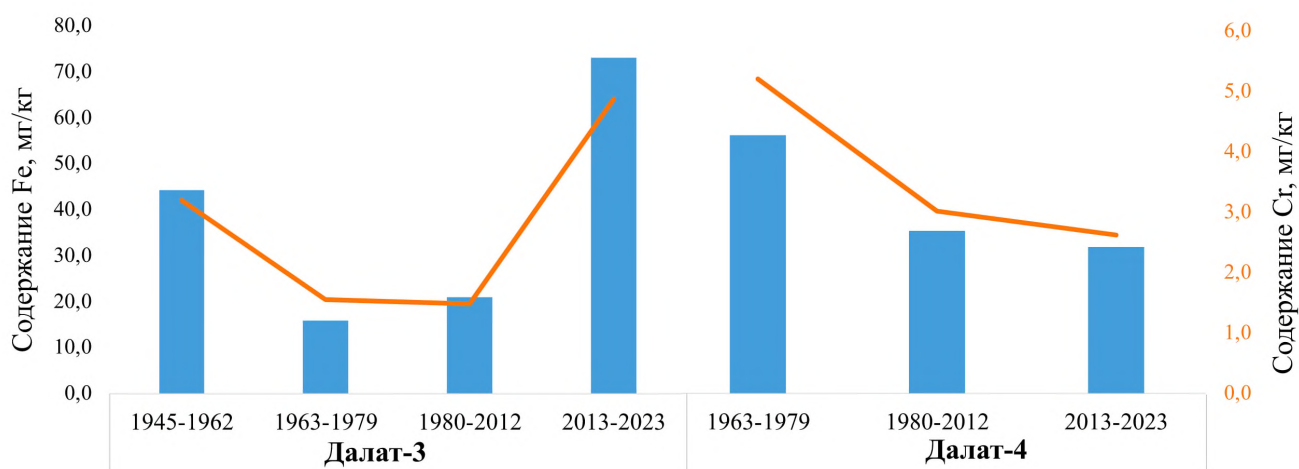


Рисунок 5.3.2 – Характер накопления Fe и Cr в годовых кольцах сосны территории Республики Вьетнам (мг/кг, св)

Подробный анализ содержания химических элементов в годовых кольцах сосны указывает на тенденцию к снижению концентраций железа и хрома с 1963 по 2023 гг. в точке «Далат-4», расположенной вблизи промышленного узла Фатчи (рисунок 5.3.2). Кроме того, в составе отходов крупных предприятий данной зоны отсутствуют железо и хром, что указывает на незначительный вклад этого промышленного узла в их аккумуляцию годовыми кольцами деревьев. Однако в точке «Далат-3» повышенное содержание этих элементов было выявлено в период 1945–1962 и 2013–2023 гг., сниженное – в период 1963–2012 гг. Полученные данные позволяют предположить, что пространственно-временное распределение хрома и железа тесно коррелирует с периодами активной эксплуатации железнодорожных маршрутов Тхатям–Далат и Далат–Чаймат и с техническим

воздействием во время Вьетнамской войны на сбой в их динамике, а также возможными нарушениями естественной динамики накопления элементов.

Картина перераспределения элементов между корой и древесиной свидетельствует о значимой роли фактора водной миграции элементов, являющегося ведущим для формирования элементного состава древесины и фактора эолового приноса, более существенного для коры. Именно это позволяет применять состав коры в качестве преимущественного индикатора техногенеза. В то же время распределение элементов по кольцам свидетельствует о значительной чувствительности древесины к техногенному воздействию. Так, применение дефолиантов во время военных действий во Вьетнаме привело к резкому увеличению его содержания в период, включающий начало войны (с 1955 г.) (рисунок 5.3.3).



Рисунок 5.3.3 – Карта применения гербицидов в южной части, Республики Вьетнам [284]

Применение гербицидов происходило в большинстве южных провинций Республики Вьетнам, но некоторые районы страны подвержены более интенсивному распылению. Согласно картографическим данным миссий по дефолиации гербицидов на территории Республики Вьетнам [14, 284], основные целевые районы для уничтожения посевов риса и лесов расположены в пределах Первого военного корпуса и вдоль высокогорных и горных долин Второго корпуса (рисунок 5.3.3).

Один из первых гербицидов, использовавшихся во время войны во Вьетнаме, представлял собой смесь какодиловой кислоты и её натриевой соли и использовался для уничтожения посевов риса. Какодиловая кислота (химическая формула $C_2H_7AsO_2$) и её соли использовались для создания гербицидов множеством производителей и продавались под многочисленными брендами. Разновидность, использовавшаяся во Вьетнаме (Агент Блю), называлась Phytar 560G [284]. Именно этот период характеризуется максимальным накоплением химических элементов (таблица 5.3.1, рисунок 5.3.4).

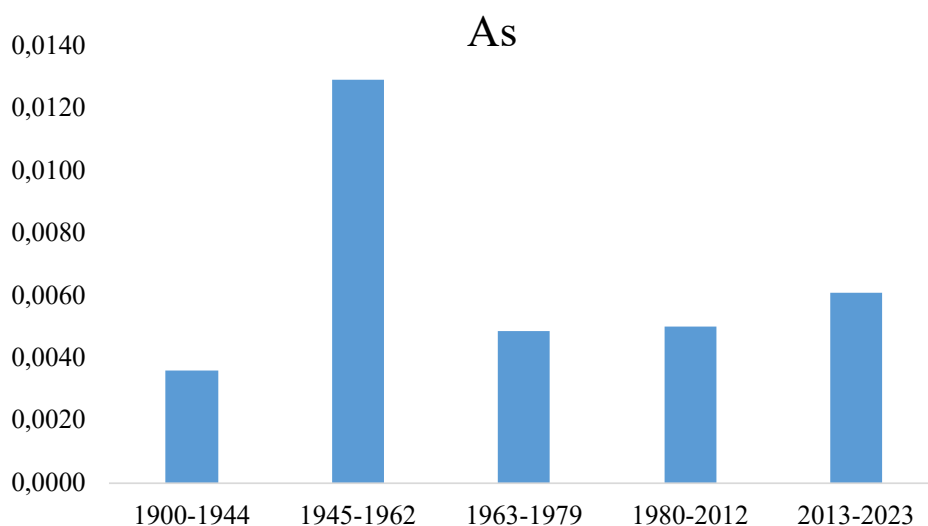


Рисунок 5.3.4 – Диаграмма изменения содержания (мг/кг, св) мышьяка в кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) на территории г.Далат, Республика Вьетнам

Таблица 5.3.1 – Геохимические ряды концентрирования элементов в кольцах деревьев на территории Республики Вьетнам (указаны химические элементы с коэффициентом от единицы и выше)

Временной период (годы)	Геохимический ряд (коэффициенты рассчитаны относительно среднего по выборке, n=31)	Z _{спн}
2024-2013	Rb _{1,4} Br _{1,3} Eu _{1,1} Ba ₁	0,8
2012-1980	Nd _{1,7} Rb _{1,4} Br _{1,3} Na _{1,2} Zn _{1,1} Au ₁	1,7
1979-1963	Zn _{1,4} Ba = Co _{1,2} Rb = Na ₁	0,8
1962-1945	Ag ₅ As _{4,2} Tb _{2,8} Zn _{1,8} Br _{1,6} Na _{1,1} Rb ₁	10,5
1900-1944	Eu ₂ Lu _{1,1} Zn = Cr ₁	1,1

Помимо непосредственного содержания элементов, индикатором специфики территории могут выступать показатели соотношений элементов [68, 166]. Соотношение Th к U позволяет обнаружить нарушения в естественном балансе этих элементов. Отношение Th к U в растительных и почвенных средах, с одной стороны, отражает природный геохимический состав региона, а с другой – служит индикатором техногенного воздействия на этот регион [7, 25, 71, 143]. Отношение Th к U в годовых кольцах сосны г. Далат свидетельствует о неравномерном распределении содержания Th и U по временным периодам и пространствам. Торий-урановое отношения изменяется от 0,2 до 4,9 в годовых кольцах сосны, что представлено на диаграмме (рисунок 5.3.5).

Большинство значения торий-урановых отношений в древесине г. Далат (к 16 из 27 проб) превышает 1, что свидетельствует об обогащении растения в большей степени торием.

Повышенные значения отношения Th/U хорошо выявлены во всех периодах точек «Далат-01» и «Далат-6», за исключение период 1945–1962 гг. точки «Далат-1». Высокие значения Th/U (1–4,9) обусловлены локальными природными факторами окружающей среды, где распространены преимущественно гранитоидные массивы в регионе Центрального нагорья Республики Вьетнам.

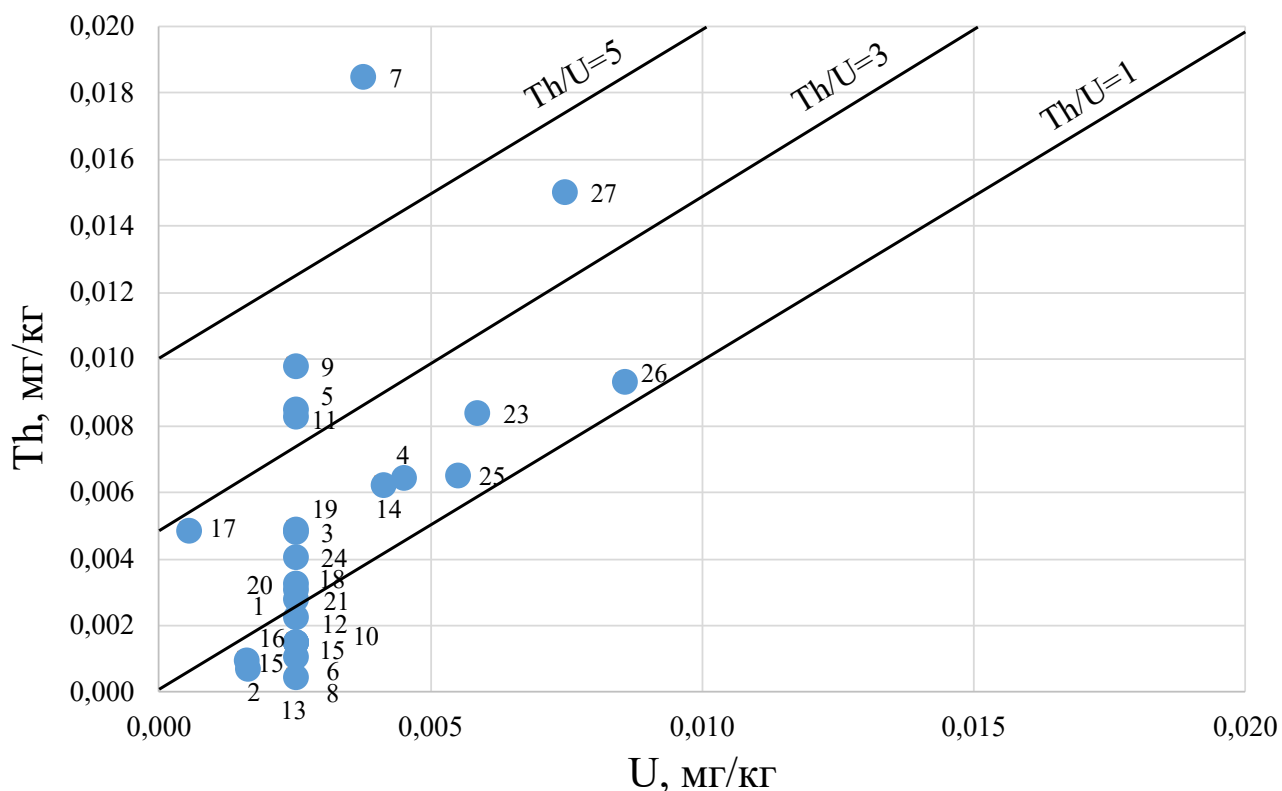


Рисунок 5.3.5 –Поля соотношения урана и тория в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) г. Далат, Республики Вьетнам.

1-5 – «Далат-1»: 1 – 1900-1944гг., 2 – 1945-1962гг., 3 – 1963-1979гг., 4 – 1980-2012гг., 5 – 2013-2023гг.; 6-10 – «Далат-2»: 6 – 1941-1945гг., 7 – 1945-1962, 8 – 1963-1979гг., 9 – 1980-2012гг, 10 – 2013-2023гг.; 11-14 – «Далат-3»: 11 – 1945-1962гг., 12 – 1963-1979гг., 13 – 1980-2012гг., 14 – 2013-2023гг.; 15-17 – «Далат-4»: 15 – 1970-1979гг., 16 – 1980-2012гг., 17 – 2013-2023гг.; 18-22 – «Далат-5»: 18 – 1900-1944гг., 19 – 1945-1962гг., 20 – 1963-1979гг., 21 – 1980-2012гг., 22 – 2013-2023гг.; 23-27 – «Далат-6»: 23 – 1923-1944гг., 24 – 1945-1962гг., 25 – 1963-1979гг., 26 – 1980-2012гг., 27 – 2013-2023гг.

Как известно, для города Далат наиболее характерна рудная зона, обогащенная оловянной рудой. По литературным данным [7, 166] на территории России, а также по фактическим геологическим условиям на территории г. Далат [277], оловянные руды сами по себе не содержат высоких концентраций урана и тория, но акцессорные минералы с высокой концентрацией альфа-радиоактивных элементов образуются при обогащении руды вместе с минералами олова.

При низкой растворимости и миграции Th в разных компонентах окружающей среды [7, 166, 285] усиливается поглощение Th и выщелачивание U в зонах окисления выветренной коры, характерной для ферралитовых почв Центрального нагорья Республики Вьетнам.

Минимальные значения отношения Th/U в древесине г. Далат являются техногенной аномалией, что было установлено в период 1963–1979 и 2012–2023 гг. в точках «Далат-2» и «Далат-5» и в период 1963–1979 и 1980–2012 гг. в точках «Далат-3» и «Далат-4», что свидетельствуют о большей степени обогащения деревьев урана.

Накопление урана древесиной может быть связано с эксплуатацией Далатского исследовательского ядерного реактора и активными ядерными испытаниями в атмосфере. Кроме того, применение фосфорных удобрений (содержащих урана) на сельскохозяйственных площадях способствует увеличению содержания урана в окружающей среде, что приводит к снижению отношения Th/U. Это свидетельствует о том, что на содержание урана и тория в древесине сосны влияют природные и антропогенные факторы как регионального, так и глобального характера.

Таким образом, полученные нами данные свидетельствуют о высокой индикаторной роли дендрогеохимических показателей как в выявлении локальных природных, так и техногенных факторов, формирующих эколого – геохимический фон территорий.

Выводы по главе 5

*Таким образом, проведенные исследования динамики накопления химических элементов в соснах далаттенской (*Pinus dalatensis* Ferré) г. Далат Социалистической Республики Вьетнам позволяют выявить региональные геохимические особенности территории их произрастания. Повышенные содержания всех элементов отмечаются в коре, что отражает локальные геохимические условия г. Далат. Содержания химических элементов в древесине хорошо отражают изменение в окружающей среде на протяжении длительного*

времени. Наибольшее содержание хрома и железа зафиксировано в юго-восточной части города, где отмечены максимальные техногенные нагрузки. Повышенные содержания этих элементов в период 1945–1963 и 2013–2023 гг. может быть связаны с железнодорожной деятельностью и техногенным воздействием во время Вьетнамской войны. Кроме того, древесина сосен обогащена натрием, мышьяком, которые присутствуют в составе дефолиантов, применявшихся с начала Вьетнамской войны (с 1955 г.). Природная геохимическая аномалия редкоземельных, щелочных, щелочноземельных и радиоактивных элементов зафиксирована не только в коре, но в годовых кольцах в точке «Далат-1» г. Далат, Республики Вьетнам. Следует отметить повышение содержания натрия в районе природных геохимических аномалий. Можно предложить естественную природу натрия, ореол повышенных концентраций которого связан с метасоматическим изменениями фельзитовых пород формации Донзыонг.

6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ НАКОПЛЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ГОДОВЫХ КОЛЬЦАХ ДЕРЕВЬЕВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ОСКОЛОЧНОЙ F-РАДИОГРАФИИ

6.1 Влияние ядерных испытаний на распределение глобальных выпадений

По данным [166], в мире в период 1940–1990 гг. в северном и южном полушариях было проведено 2060 ядерных взрывов восьмью странами, почти 85 % из них произведены в США и в Советском Союзе (1030 и 715 взрывов, соответственно) (рисунок 6.1.1) [7, 286].

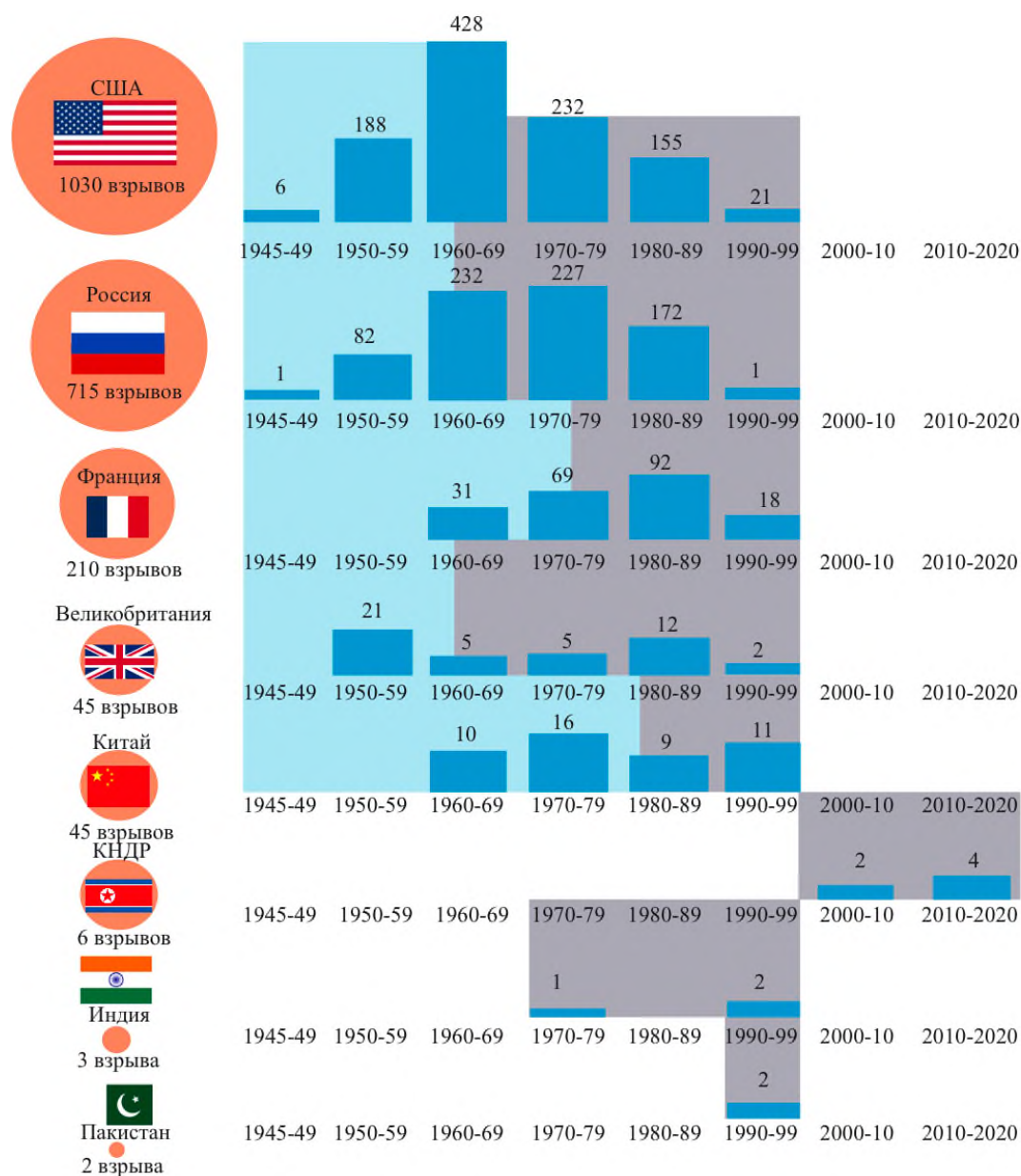


Рисунок 6.1.1 – Количества проведенных ядерных испытаний всего мира.

Голобой цвет – атмосферные ядерные взрывы; серый цвет – подземные ядерные взрывы [287]

Ядерные испытания оружия проводились во всех средах, в том числе 530 испытаний (25 %) – в атмосфере в период 1945–1963 гг. и 1517 испытаний (75 %) – под землей в период 1964–1992 гг. (рисунок 6.1.1). При делении образуются все радиоядра (изотопы U^{235} и Pu^{239}), в то время как при синтезе обычно образуется только тритий (H^3). В период 1951–1993 гг. ядерные испытания имели общую взрывную мощность около 530 милл т, из которой 440 милл т (83 %) были получены в результате атмосферных ядерных испытаний и 90 милл т (17 %) – в результате подземных испытаний. Из 440 милл т, полученные в результате атмосферных испытаний, 251 милл т (57 %) были получены за счет термоядерного синтеза, а 189 милл т (43 %) – за счет деления. В результате атмосферных ядерных взрывов были зафиксированы более высокие уровни радиоактивного изотопного загрязнения окружающей среды, чем при подземных взрывах.

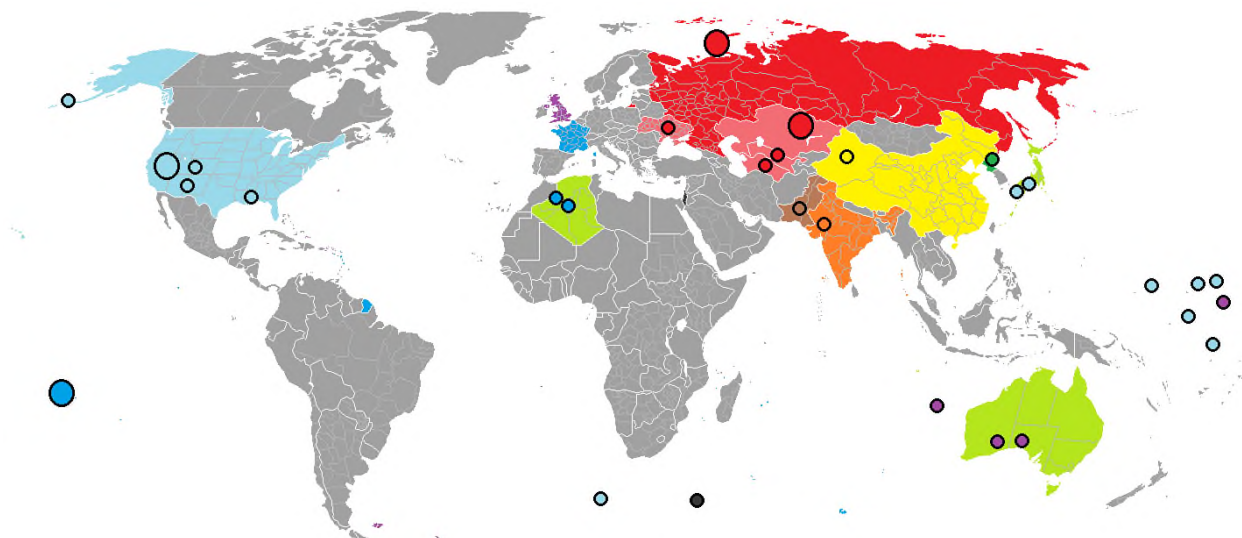


Рисунок 6.1.2– Карта распределении более 2000 проведенных ядерных взрывов более 10 странах мира [288]. (Красный – Россия/Советский Союз; синий – Франция; светло-голубой – Соединенные Штаты Америки; фиолетовый – Великобритания; желтый – Китай; оранжевый – Индия; коричневый – Пакистан; зеленый – Северная Корея; светло-зеленый (территории, подвергшиеся воздействию ядерных бомб)

Географическое расположение испытаний ядерного оружия в атмосфере показывает, что большинство из них было проведено в Северном полушарии (90

%) (рисунок 6.1.2). Эти различия распределения проведенных взрывов указывают на то, что выпадение радионуклидов представляет собой изменение атмосферной циркуляции в северной и южной полярной тропосфере. Таким образом, в Северном полушарии присутствует большее количество радиоактивных изотопов, выброшенных в результате испытаний ядерного оружия.

Повышенные уровни радиоизотопов также были зафиксированы в Северном полушарии из-за аварий на атомных электростанциях, таких как Чернобыльская атомная электростанция в 1986 г. и Фукусима в 2011 г.

Характерное изменение интенсивности глобальных выпадений радионуклидов достигло пика в год максимального количества воздушных ядерных взрывов, 1963 г., после чего была зафиксирована тенденция к снижению, вплоть до аварии на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 г. [7] (рисунок 6.1.3а). Это свидетельствует об изменении глобальной радиационной обстановки в результате техногенной радиоактивной деятельности. Аварии на атомных электростанциях в Чернобыле в 1986г. и Фукусиме в 2011 г. привели к выбросу большого количества радионуклидов в атмосферу [7, 166].

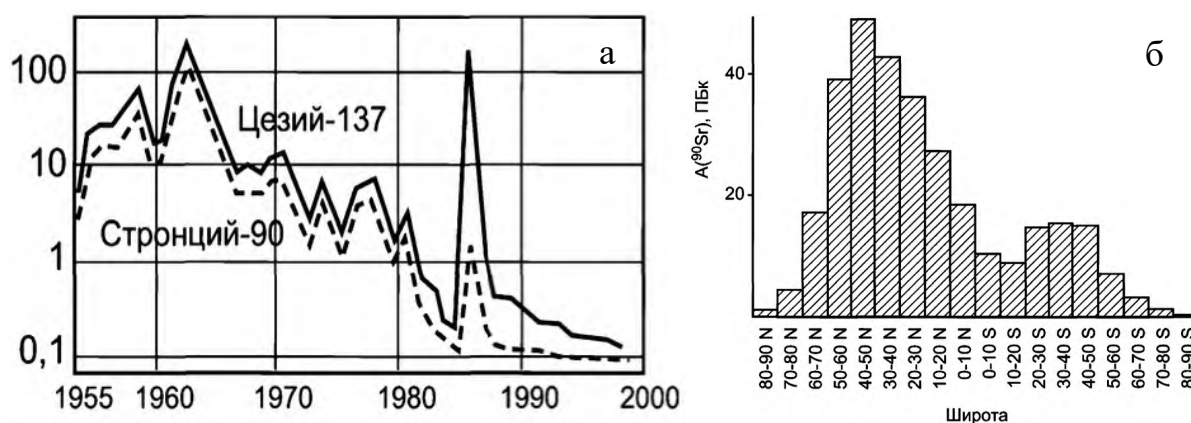


Рисунок 6.1.3 – Глобальное изменение концентраций радиоактивных элементов.

а) Содержание цезия-137 и стронция-90 в воздухе при испытаниях ядерного оружия в атмосфере и при Чернобыльской аварии; б) широтное распределение кумулятивных выпадений стронция-90 с учетом радиоактивного распада [7]

Тем не менее большое количество испытаний ядерного оружия, проведенных в атмосфере и под землей в период с 1945 по 2013 гг. (последнее ядерное

испытание, проведенное Северной Кореей), является причиной нынешнего загрязнения окружающей среды радиоактивной пылью, что приводит к экологическому и социальному разрушению объектов из-за высокого уровня радиоактивности [7, 166, 286]. Установлено, что почти 90 % радиоактивных изотопов выпадает во время дождей и ассимилируется почвой и растениями. Уровень выпадения радиоактивных элементов зависит от климатических условий, физико-химических свойств почвы, генетических особенностей растений. Это свидетельствуют о «пятнистом» характере выпадения радиоактивных элементов на поверхности Земли.

В целом максимальное глобальное распределение выпадения радионуклидов приходится на широте от 20 до 70 с. ш., с пиком накопления между 40⁰ и 50⁰ с. ш. (рисунок 6.1.3, б). Территория Вьетнама расположена с 102⁰10' по 109⁰24' в. д. и с 8⁰30' по 23⁰34' с. ш. и относится к стране среднего широтного накопления глобальных радиоактивных осадков (рисунок 6.1.3, б).

На сегодняшний день исследования влияния радиоактивных осадков на радиационную обстановку во Вьетнаме отсутствуют. Авторы данной работы обнаруживают следы радиоактивности в годовых кольцах деревьев, что позволяет оценить локальную радиационную обстановку, формирующуюся под влиянием глобальных радиоактивных осадков.

В данном исследовании используется комплекс методов альфа-спектропии, радиографии и электронной микроскопии в проходящем свете при 5- и 10-кратном увеличении. Такой комплексный методический подход позволяет обнаруживать точные следы делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев.

Первоначально детектор был проанализирован с пятикратным увеличением, для рассмотрения распределения следов от осколков деления по всему детектору. Количество следов от осколков деления на слюдяном детекторе в контакте с образцом древесины детально подсчитывается на оптическом микроскопе с десятикратным увеличением. Одновременно с разными типами пространственных

распределений следов в годовом кольце нами отмечались и различия количественных соотношений на карте-схеме детектора.

Согласно литературным данным, равномерное распределение треков связано с молекурно-рассеянным размещением изучаемых элементов [3]. Равномерное распределение выражается в виде единичных следов и обнаруживается повсеместно. Неравномерное распределение делящихся осколков проявляется как скопления треков разного размера и формы с высокой плотностью [3]. Радионуклиды, участвующие в распаде, находятся в микровключениях собственных минеральных образований, таких как оксиды, карбонаты и силикаты. Типичными формами такого распределения являются звездчатые и точечные скопления треков.

Таким образом, глобальные выпадения делящихся радионуклидов рассеиваются в атмосфере после проведенных ядерных взрывов и аварий на атомных электростанциях. Радиоактивные изотопы, образующиеся в процессе испытаний, способны не только воздействовать на ближайшие окрестности, но и оказывать долгосрочное влияние на экосистемы и здоровье человека. Плотность выпадения радионуклидов зависит как от широты, так и от долготы, при этом максимальная широта выпадения – с 20⁰ до 70⁰ с. ш. Глобальный уровень выпадения радионуклидов в удаленных районах остается еще не до конца изученной областью исследований. Необходимы дальнейшие исследования для более полного понимания экологических последствий. Следовательно, использование современных исследовательских методик в мониторинге воздействия радионуклидов на окружающую среду имеет огромное значение для оценки потенциальных последствий ядерных испытаний для биосферы.

6.2 Распределения плотности треков от осколков деления в древесных кернах на территории провинции Зялай Республики Вьетнам

Для оценки степени техногенного воздействия радиоактивного загрязнения необходимо определить фоновое значение радиации на данной территории. Были выделены отдельные территории для уточнения фоновых значений и оценки

техногенного воздействия, а также для анализа степени влияния глобальных выпадений на радиационную обстановку территории. В ходе исследования изучались распределения треков от осколков деления радионуклидов в составе древесных кернов сосны на двух территориях: в кjerne сосны г. Далат и в спиле сосны провинции Зялай, расположенной в 360 км к северо-западу от города Далат.

Плотность и характер распределения треков от осколков деления в годовых кольцах спила сосны из провинции Зялай, выбранной в качестве фоновой для территории Республики Вьетнам, представлены в таблице 6.2.1.

Таблица 6.2.1 – Количество следов осколков деления радионуклидов для каждого кольца сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) провинции Зялай, Республики

Вьетнам

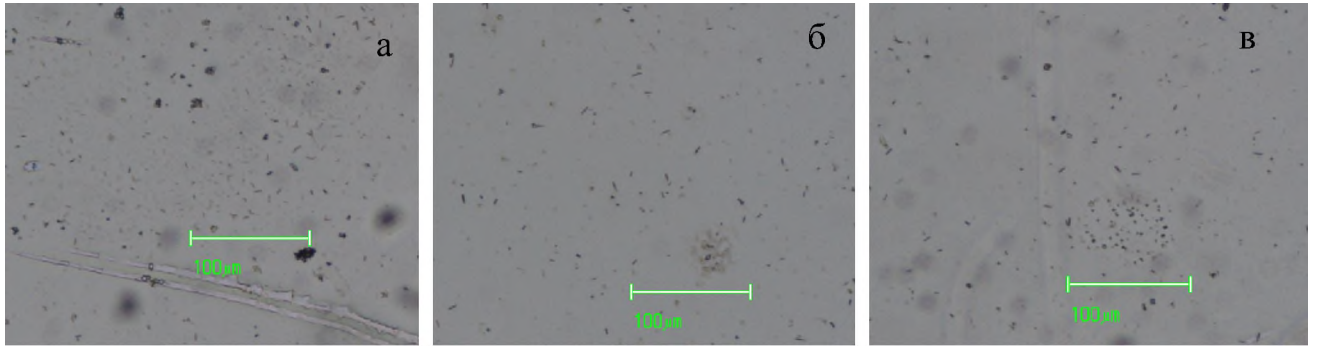
Год	Единичные треки	Количество скопления треков от осколков деления	Количество скопления треков от осколков деления «звезда»	Сумма количества треков от осколков деления
1989	Мало	—	—	—
1990		—	—	—
1991		2	—	2
1992		1	—	1
1993		2	—	2
1994		—	6	6
1995		1	10	11
1996		3	26	29
1997		—	53	53
1998		7	—	7
1999		7	—	7
2000		8	—	8
2001		5	—	5
2002		2	—	2
2003		4	—	4
2004		4	—	4
2005		5	—	5
2006		10	—	10

Продолжение таблицы 3.2

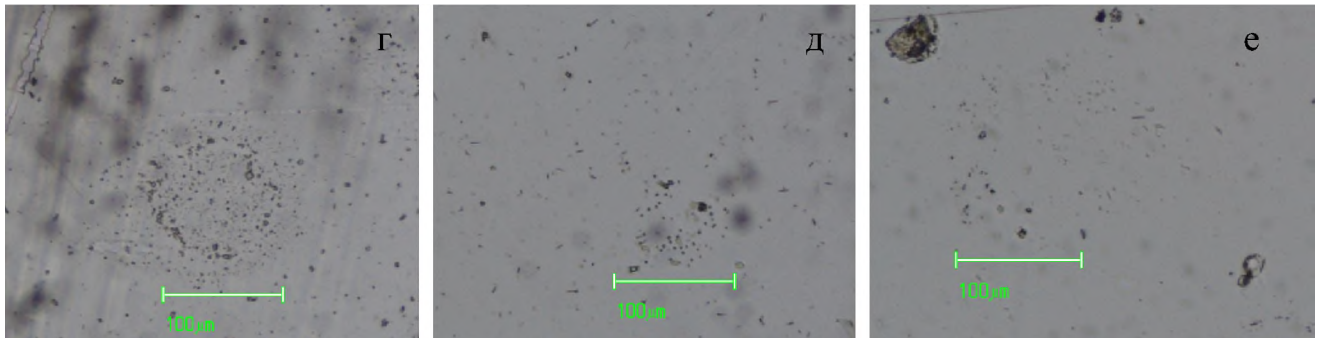
Год	Единичные треки	Количество скопления треков от осколков деления	Количество скопления треков от осколков деления «звезда»	Сумма количества треков от осколков деления
2007	Мало	6	—	6
2008		10	—	10
2009		11	1	11
2010		4	—	4
2011		9	—	9
2012		4	—	4
2013		—	—	—
2014		2	—	2
2015		3	—	3
2016		2	—	2
2017		1	—	1
2018		5	—	5
2019		1	—	1
2020		2	—	2
2021		3	—	3
2022		7	—	7

При изучении небольшого временного ряда (1989–2022 гг.) спилов сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) из провинции Зялай обнаружено неравномерное распределение следов от осколков деления урана. На рисунке 6.2.1 представлены разные типы распределения радионуклидов в годовых кольцах. Как видно на фотографиях (рисунок 6.2.1, а–в), равномерное рассеяние встречается на всем спиле с невысокой плотностью треков от осколков деления. Скопления треков наблюдается в каждом кольце, в том числе максимальные скопления треков встречаются в период 2006–2011 гг. (рисунок 6.2.1, г–з). Кроме того, в период 1994–1997 гг. отмечается наличие треков в виде «звезд» (рисунок 6.2.1, и–к).

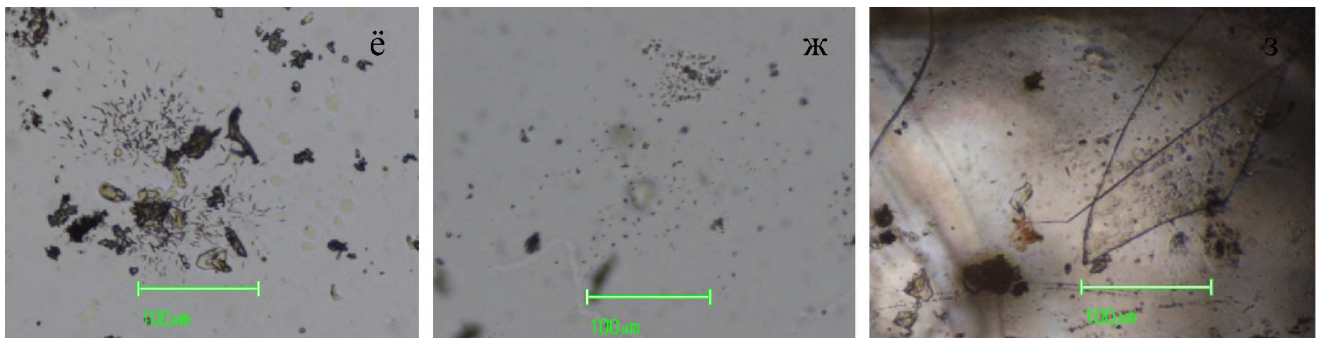
Равномерное распределение в виде единичных треков



Скопления треков от осколков деления



Скопление треков от осколков деления



Скопление треков от осколков деления в виде «звезд»

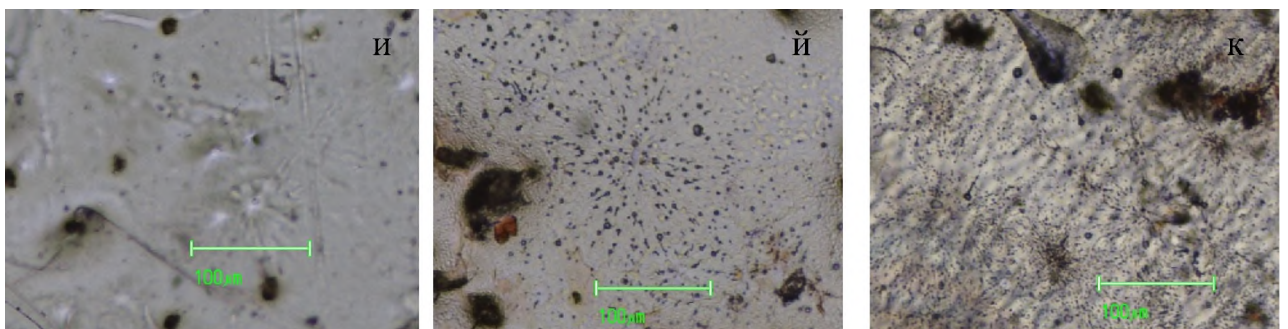


Рисунок 6.2.1– Характер распределения следов радионуклидов на слюдяном детекторе находившемся в контакте с образцом древесины; увеличение $20\times$, годы:

а) 2022; б) 2018; в) 2022; г) 2021; д) 2018; е) 2010; ё) 2009; ж) 2008; з) 1995; и) 1997; й) 1996; к) 1992

Анализ полученных кривых распределения плотности треков от осколков деления радионуклидов фиксирует резкое поступление делящихся радионуклидов в временном ряду с 1995 по 1997 гг. (рисунок 6.2.2). После данного периода количество треков вновь снижается и становится на 10 меньше для каждого кольца. Повышение плотности следов радиоактивных элементов совпадает с последними ядерными взрывами в таких странах как: Советский Союз (1990 г.), США (1992 г.), Великобритания (1991 г.), особенно Франция и Китай (1996 г.), до подписания этими странами в 1996г. Договора о всеобъемлющем запрете ядерных испытаний. В провинции Зялай промышленная деятельность почти отсутствует, и территория в основном представляет собой большой сельскохозяйственный район. На окружающую среду, скорее всего, значительное влияние оказывает использование пестицидов и гербицидов в сельском хозяйстве, также геологические условия местности, которые нуждаются в более детальном изучении.

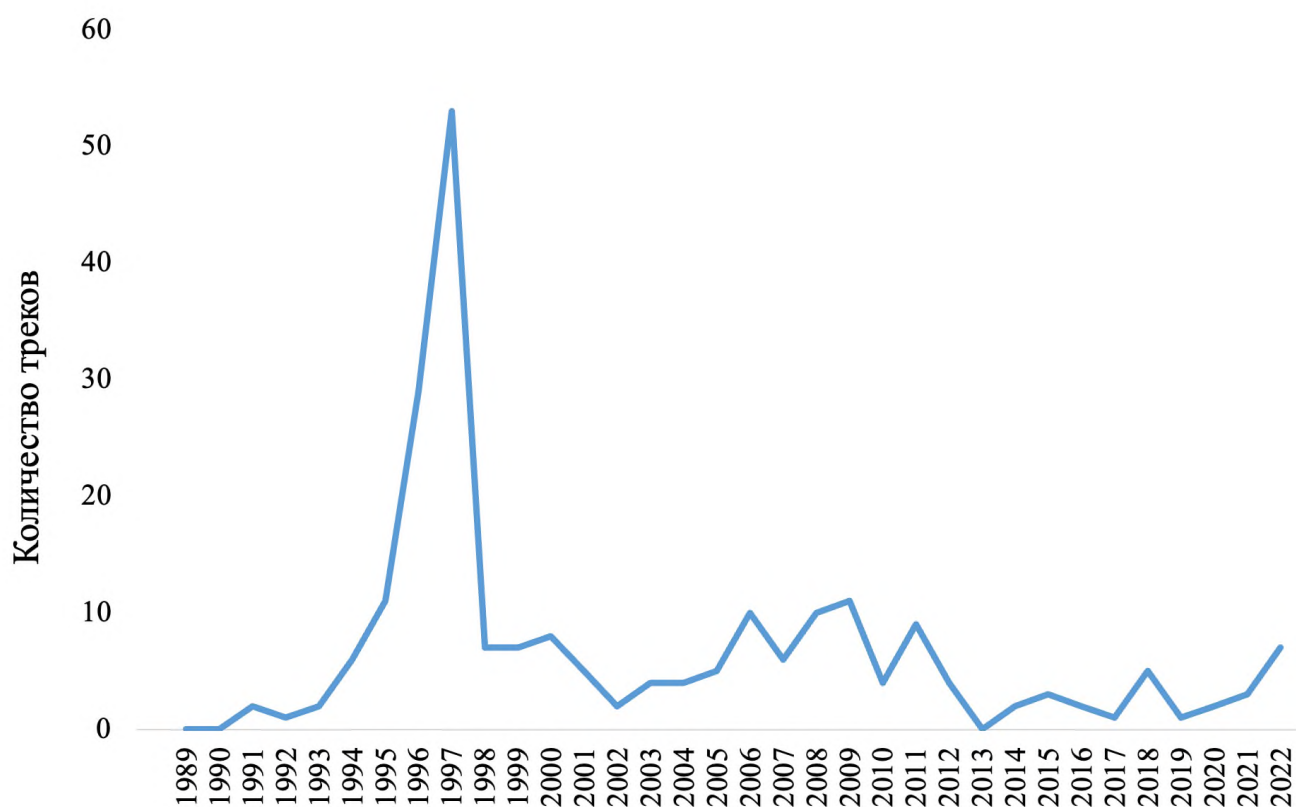


Рисунок 6.2.2 – Распределение треков от осколков деления в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) провинции Зялай.

Анализ архивных данных помог определить 12 ядерных взрывов, внесших свой вклад в формирование радиационной обстановки на территории республики в 90-х гг. прошлого века (таблица 6.2.2).

Таблица 6.2.2 – Характеристика ядерных взрывов, формировавших радиоэкологическую обстановку территории провинции Зялай, Республики Вьетнам, с начала 90-х гг.

№ п/п	Дата взрыва	Полигон	Тип взрыва	Мощность взрыва, кт
1	26.05.1990	Лобнор	надземный	12
2	16.08.1990			189
3	21.05.1992			660
4	25.09.1992			8
5	02.11.1992			1
6	05.10.1993			80
7	10.06.1994			90
8	07.10.1994			90
9	15.05.1995			95
10	17.08.1995			90
11	08.06.1996			50
12	29.07.1996			3

После взрывов в начале 1990-х гг. было проведено еще четыре взрыва в 1995–1996 гг., из-за которых был значительно повышен уровень фоновой радиоактивности в провинции Зялай, о чем свидетельствует наличие треков в виде «звезд» на детекторе.

Таким образом, в фоновом регионе Республики Вьетнам в древесном керне в период 1989–2022 гг. были обнаружены следы делящихся радиоактивных элементов в виде равномерного распределения, скопления и «звезд», с разной плотностью. Повышенное количество треков на детекторе от осколков делящихся радиоактивных элементов зафиксировано в период 1995–1997 гг.

Следует отметить, что проявление скопления треков в виде «звезд» коррелирует с последними ядерными взрывами на Китайском ядерном полигоне Лобнор.

6.3 Распределение плотности треков от осколков деления в древесных кернах на территории г. Далат Республики Вьетнам

Полученные результаты изучения распределения треков от осколков деления радионуклидов в керне сосны с территории г. Далат во временном ряду с 1936 по 2023 гг. представлены в таблице 6.3.1.

Таблица 6.3.1 – Количество следов осколков деления радионуклидов для каждого кольца сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré), г. Далат, Республики Вьетнам

Год	Единичные треки	Количество скоплений треков от осколков деления	Количество треков от осколков деления в виде «звезд»	Сумма треков от осколков деления
1936	много	1	—	1
1937		6	4	10
1938		—	—	—
1939		4	4	8
1940		17	3	20
1941		—	—	—
1942		—	—	—
1943		—	—	—
1944		—	—	—
1945		3	15	18
1946		11	7	18
1947		28	25	53
1948		25	88	113
1949		65	101	166
1950		8	6	14
1951		22	1	23
1952		8	3	11
1953		15	15	30

Продолжение таблицы 6.3.1

Год	Единичные треки	Количество скоплений треков от осколков деления	Количество треков от осколков деления в виде «звезд»	Сумма треков от осколков деления
1954	много	13	28	41
1955		11	21	32
1956		16	27	43
1957		35	4	39
1958		37	3	40
1959		29	4	33
1960		15	12	27
1961		26	25	51
1962		33	33	66
1963		38	5	42
1964		18	14	32
1965		50	35	85
1966		16	13	29
1967		15	6	21
1968		21	4	25
1969		23	8	31
1970		10	5	15
1971		10	4	14
1972		22	10	22
1973		21	12	33
1974		33	14	47
1975		13	17	30
1976		5	9	14
1977		1	5	6
1978		—	—	—
1979		—	—	—
1980		12	6	18
1981		5	0	5
1982		9	2	11
1983		14	1	15

Продолжение таблицы 6.3.1

Год	Единичные треки	Количество скоплений треков от осколков деления	Количество треков от осколков деления в виде «звезд»	Сумма треков от осколков деления
1984	много	12	4	16
1985		7	—	7
1986		2	—	2
1987		19	—	19
1988		6	—	6
1989		3	—	3
1990		10	2	12
1991		10	—	10
1992		7	1	8
1993		5	1	6
1994		8	—	8
1995		18	2	20
1996		6	3	9
1997		10	1	11
1998		7	3	10
1999		9	1	10
2000		17	3	20
2001		11	6	17
2002		4	6	10
2003		3	1	4
2004		1	—	1
2005		1	2	3
2006		4	—	4
2007		2	1	3
2008		5	1	6
2009		6	—	6
2010		12	2	14
2011		12	1	13
2012		3	1	4
2013		8	1	9

Продолжение таблицы 6.3.1

Год	Единичные треки	Количество скоплений треков от осколков деления	Количество треков от осколков деления в виде «звезд»	Сумма треков от осколков деления
2014	много	5	—	5
2015		4	1	5
2016		15	5	20
2017		7	9	16
2018		14	2	16
2019		13	6	19
2020		8	4	12
2021		—	—	—
2022		—	—	—
2023		—	—	—

Анализ распределения треков от осколков деления урана в керне сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) г. Далат Республики Вьетнам позволил получить четкое представление о накоплении урана и суммы делящихся элементов (после 1945 г.) в годовых кольцах исследуемого дерева (рисунок 6.3.1).

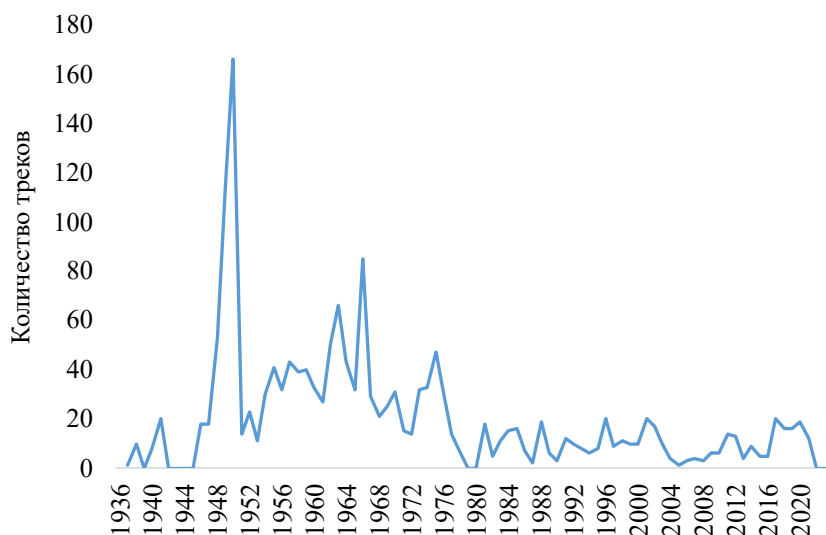


Рисунок 6.3.1 – Распределение треков от осколков деления в годовых кольцах сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) г. Далат.

В период 1946–1980 гг. наблюдалось значительное накопление делящихся элементов, максимальное количество треков было отмечено в 1949 г., когда началось испытание ядерного оружия в атмосфере.

Следует отметить, что в отличие от условно – фонового района Зялай, на территории г.Далат в кернах сосны нами отмечены многочисленные единичные треки. Мы связываем это с возможным влиянием природной радиактивности. Имеющей место в данном районе. Для подтверждения этого факта нами подробно рассмотрен факт концентрирования валовых содержаний урана и тория. Установлено, что средние содержания радионуклидов в годовых кольцах деревьев г. Далат составляют 0,003 мг/кг для урана и тория. Для урана характерно относительно равномерное распределение на протяжении всего исследуемого временного ряда. Повышение среднего содержания тория наблюдается в период 1945–1962 и 1963–1979 гг., что совпадает с увеличением плотности треков от осколков деления (рисунки 6.3.1, 6.3.2).

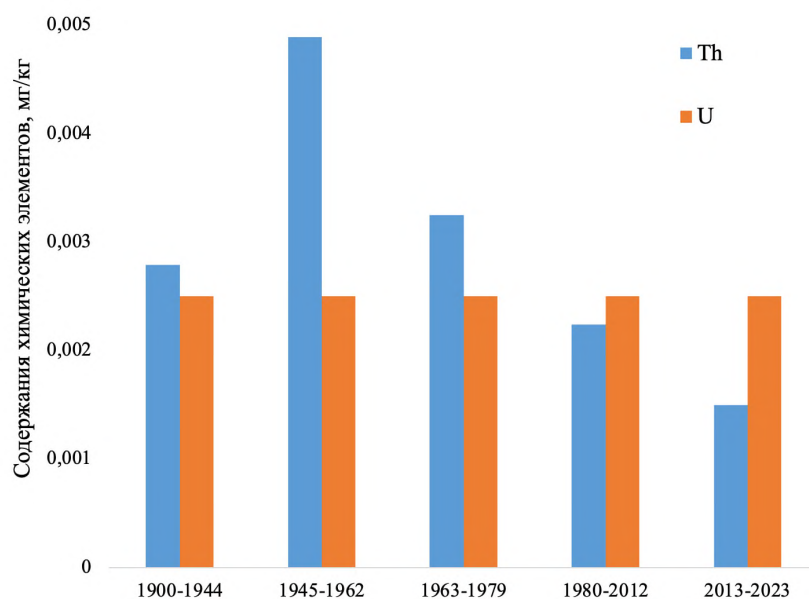


Рисунок 6.3.2 – Характер накопления урана и тория в годовых кольцах сосны территории Республики Вьетнам (мг/кг св).

Значения Th/U отношения близки к 1 в период 1980–2012 и 2013–2023 гг., а в период 1940–1980 гг. превышает 1. Высокое значение торий-уранового отношения на уровне, близком к 2, может объясняться сильным привносом тория

в растения территории г. Далат, особенно в период 1945–1962 гг. Минимальное значение отношения Th/U выявлены в периоды 1980–2012 гг. и 2013–2023 гг., которые совпадают с периодом эксплуатации Далатского ядерного исследовательского института. Далатский исследовательский реактор работает на невысокой мощности, и соответственно в окружающую среду выбрасывается меньшее количество радиоактивных элементов. Потенциальная опасность этого реактора для окружающей среды по-прежнему высока и обусловлена рядом особенностей: высокий уровень повторяемости переходных процессов в результате эксплуатации пуска-остановки-изменения уровней мощности реактора (в период остановки 1968–1981 гг. теплоноситель оставался в бассейне реактора, но его химический состав не контролировалось должным образом); высокая плотность потока нейтронов в активной зоне реактора; наличие высокообогащенных топлив; количество защитных барьеров меньше, чем у коммерческих энергетических реакторов; расположение его в крупном городе с высокой плотностью населения [196].

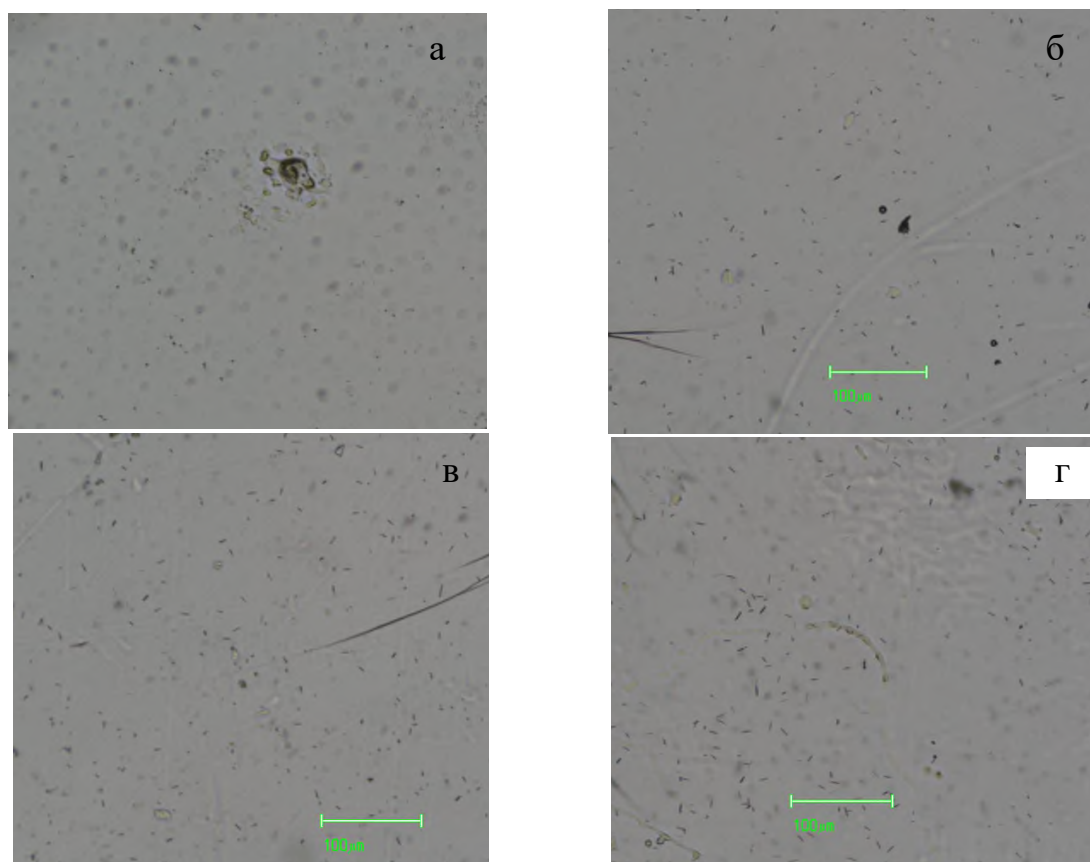


Рисунок 6.3.3 – Характер равномерного распределения треков от осколков деления радиоактивных элементов на слюдяном детекторе, находившемся в

контакте с образцом древесины. Датирование колец дерева, г.: а) 1951; б) 1989; в) 1993; г) 2004

В таблице 6.3.1 показано количество треков от делящихся элементов по годам в керне сосны на точке «Далат-5» в период с 1936 по 2023 гг. Равномерное распределение треков характерно для периода после атмосферных ядерных испытаний, с 1980-х гг. до настоящего времени (рисунок 6.3.3).

Оригинальные формы скопления делящихся осколков, совпадающие с результатами [3, 74–75, 170] при применении лавсанового детектора, были четко зафиксированы в 1951, 1959, 1980 и 1988 гг. (рисунок 6.3.4).

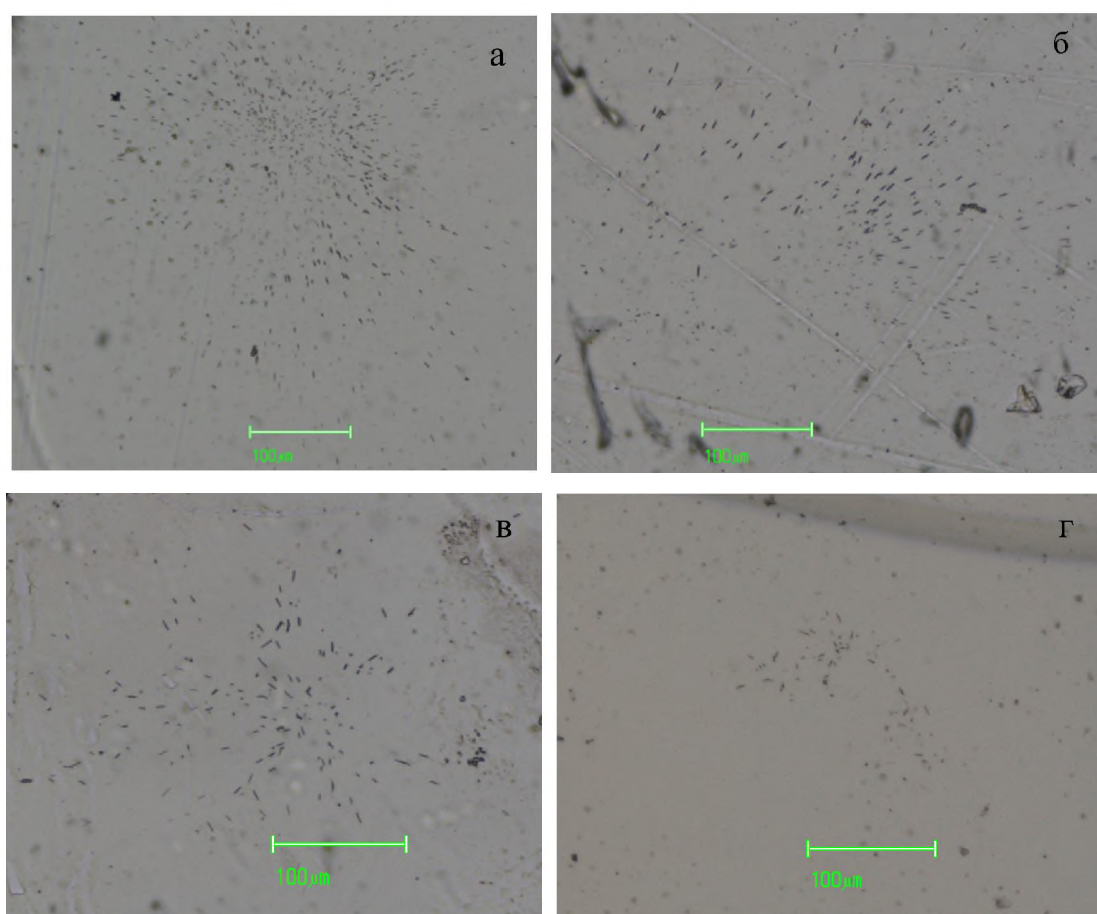


Рисунок 6.3.4 – Скопление треков от осколков деления на слюдяном детекторе, находившемся в контакте с образцом древесины; увеличение 20×: а) 1951 г.; б) 1959 г.; в) 1980 г.; г) 1988 г.

Использования синтетической слюды могут быть получены замечательные по качеству треки от осколков деления [3]. На рисунках 6.3.5, 6.3.6 представлены различные типы распределения скопления треков, которые отличаются от типов

распределения в радиографическом исследовании [10, 75] в спилах деревьев. Распространение скопления треков от осколков деления в период 1940–1980 гг. фиксируется с высокой плотностью, к настоящему периоду отчетливо видны следы осколков деления по сравнению с 1980 г.

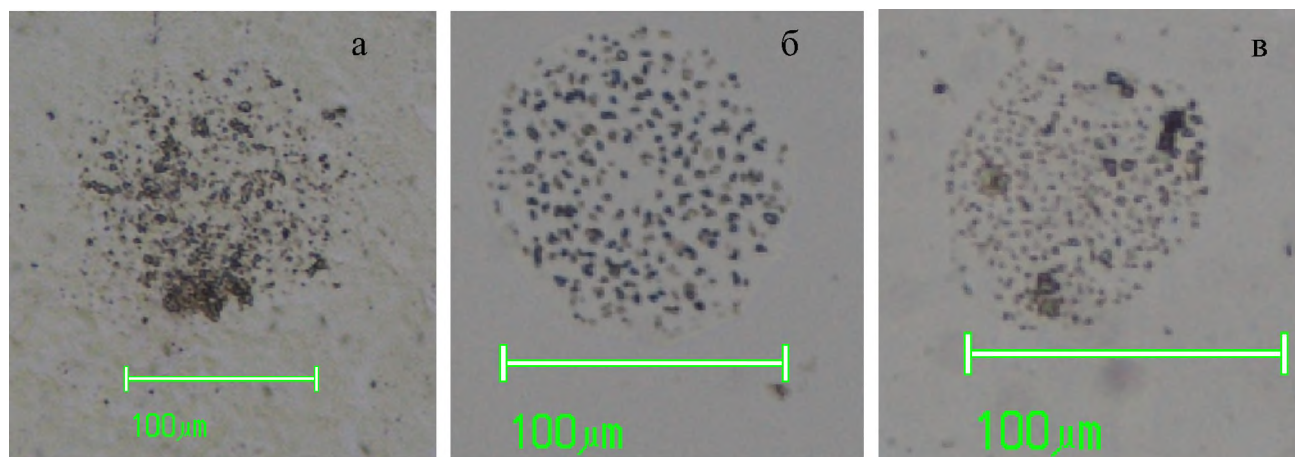


Рисунок 6.3.5 – Скопление треков от осколков деления с высокой плотностью на слюдяном детекторе, находившемся в контакте с образцом древесины; увеличение 20×: а) 1949 г.; б) 1958 г.; в) 1962 г.

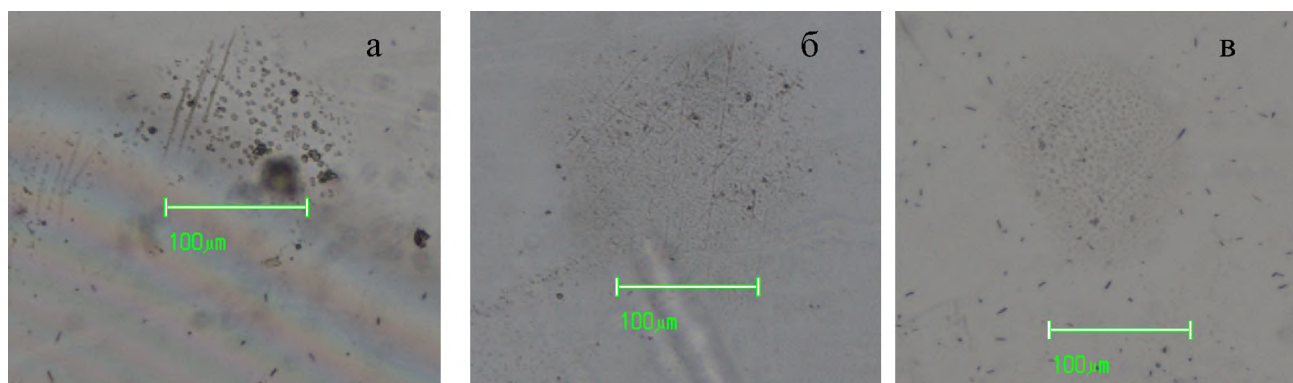


Рисунок 6.3.6 – Скопление треков от осколков деления с невысокой плотностью на слюдяном детекторе, находившемся в контакте с образцом древесины; увеличение 20×: а) 2010 г.; б) 2014 г., в) 2015 г.

Анализ данных таблицы 6.3.1 показывает, что наиболее типичны одиночные скопления треков от осколков деления «звезда» в наиболее активный период проведения ядерных испытаний (1940–1980 гг.) (суммарное количество – 579). Согласно предыдущим исследованиям [7, 166], следы от делящихся осколков в виде «звезд» обусловлены аномально высоким радиационным загрязнением,

возникающим из-за повышенного уровня «горячих частиц» в древесине (рисунок 6.3.7)

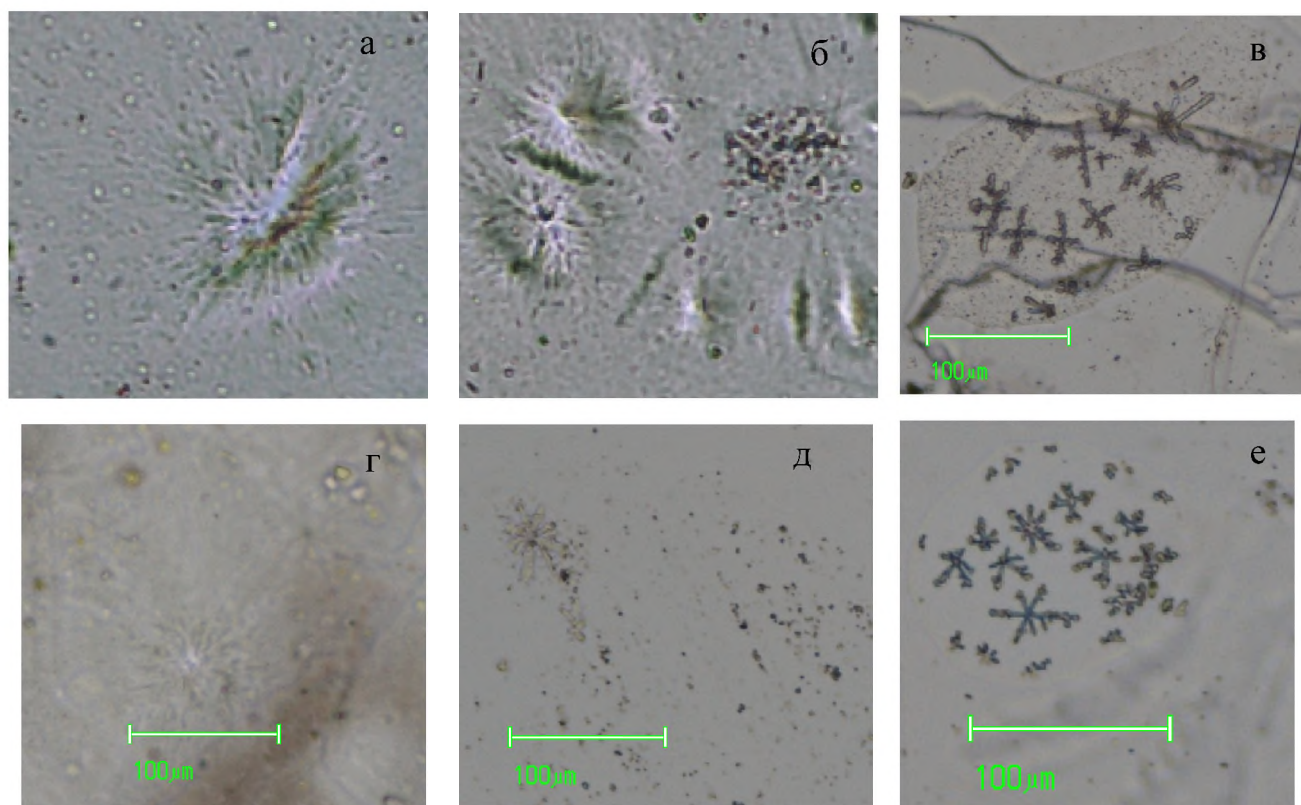


Рисунок 6.3.7 – Скопление треков от осколков деления «звезда» на слюдяном детекторе, находившемся в контакте с образцом древесины; увеличение 20×:

а) 1947 г.; б) 1949 г.; в) 1950 г.; г) 1954 г.; д) 1960 г.; е) 1961 г.

При анализе характера распределения треков от осколков деления по годовым кольцам отмечаются повышенные значения количества треков от осколков деления в период наиболее активных ядерных испытаний в атмосфере: 1947–1949, 1954, 1956, 1958, 1961–1963, 1965, 1974 гг. Пики 40-х, 50-х и 60-х гг. прошлого века и совпадают с периодом активных атмосферных и подземных ядерных испытаний. В это время проведены взрывы с наибольшей мощностью на Семипалатинском полигоне: 1949 г. – 20 килотонн, 1953 г. – 400 килотонн, и на Новоземельском полигоне: 1961 г. – 58,6 мегатонн, 1962 г. – 19 мегатонн, 20 мегатонн, 21,1 мегатонны и 24,2 мегатонны. После подписания в 1963 г. Договора о частичном запрете ядерных испытаний США, СССР и Великобритания договорились прекратить ядерные испытания на поверхности Земли. В 1964 г. было

отмечено снижение количества радиоактивных элементов. После первого ядерного испытания, проведенного Китаем в 1965 г., количество радиоактивных следов увеличилось в два раза по сравнению с 1963 г. Последний пик отвечает периоду работы полигона Лобнор в северно-западном Китае (1964–1993 гг.). С начала 1980-х гг. количество треков от осколков деления значительно уменьшилось, и теперь они обычно отличаются наличием точечных скоплений, наблюдаются звездчатые скопления треков. Это может быть связано с прекращением ядерных испытаний в атмосфере в 1980 г., после чего все испытания выполнялись под землей. Полученные данные подчеркивают значительное воздействие на окружающую среду воздушных испытаний ядерного оружия, результатом которых, как известно, был выброс значительного количества радиоактивной пыли, что приводило к существенному негативному воздействию на окружающую среду. И также наши результаты подтверждают, что годовые кольца сосен в центральном нагорье южной части Республики Вьетнам являются надежным индикатором для оценки глобального радиоактивного загрязнения и мониторинга состояния локальной радиоэкологической обстановки, что демонстрирует значимость данного подхода для радиоэкологического мониторинга окружающей среды.

Выводы по главе 6

Таким образом, в данной работе метод f-радиографии эффективно используется для обнаружения следов делящихся элементов в годовых кольцах деревьев. Изучение треков от осколков деления на детекторе на электронном микроскопе позволяет зафиксировать плотность их распределения. Применение осколочной радиографии позволяет зафиксировать следы осколков деления урана и других делящихся элементов, присутствующих в годовом кольце дерева. Количество треков от делящихся осколков, обнаруженных на электронном микроскопе, свидетельствует о характере их распределения. Содержание радиоактивных частиц в годовых кольцах выражено в виде рассеянных, точечных и звездных скоплений. На фоновой территории отмечаются максимальные количества треков в период 1994–1997 гг., после этого периода их количество вновь уменьшается и находится в пределах 10 в каждом кольце. На техногенно-

измененной территории г. Далат были зафиксированы повышенные количества треков в период наиболее активных атмосферных ядерных испытаний, 1949–1976 гг. В этот период наблюдалось повышенное количество скоплений треков от осколков деления в виде «звезд», а в период подземных ядерных испытаний преобладали скопления в виде скоплений и равномерных распределений в виде повышенного количества единичных треков. Поэтому можно предположить, что наличие делящихся осколков в виде «звезд» в период активных атмосферных испытаний свидетельствует о накоплении «горячих частиц» в древесине сосен южных провинций Республики Вьетнам. Источники «горячих частиц», вероятно, переносились преобладающими ветрами с северных ядерных полигонов: Семипалатинского испытательного полигона в Восточном Казахстане (1949 г.), Новоземельского полигона (1963 г.) и полигона Лобнор (1964–1993 гг.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выявлена эколого-геохимическая специфика накопления и распределения химических элементов в древесине сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Томского района и сосны далатенской (*Pinus dalatensis* Ferré) в южных провинциях Социалистической Республики Вьетнам. В целом можно сделать следующие выводы.

Радиальный прирост древесины на исследованных территориях за изученные временные отрезки не отличается в значениях и имеет тенденцию уменьшения к современному периоду. В условиях положительной динамики изменения глобальной температуры, на ширину годового кольца влияние оказывает сумма осадков, вне зависимости от территорий.

Установлена общая тенденция к снижению содержания Hg в древесине независимо от территории в период 1930–2021/2023 гг. на фоне вариативности ее содержания в растениях, произрастающих в разной локальной эколого-геохимической обстановке, что отражается в средних и медианных значениях. Повышенные медианные значения концентрации Hg в древесине Томского района по сравнению с таковым в южных провинциях Республики Вьетнам (30,8 нг/г; 9,4 нг/г) обусловлены интенсивной локальной техногенной нагрузкой, в частности, влиянием Северного промышленного узла г. Томска. Повышенное среднее содержание элемента отмечается в древесине Республики Вьетнам по сравнению с Томским районом ($594 \pm 161,1$ нг/г; $113 \pm 32,1$ нг/г), что обусловлено аномалиями содержаний Hg в отдельных годовых кольцах в периоды военных конфликтов.

Выделяется максимальный всплеск содержания Hg в период 1930–1970 гг. независимо от территории, что согласуется с трансграничным переносом ртути из континентальной части Восточной Азии и применением химического оружия во время военных действий на территории Республики Вьетнам, а также ростом промышленного производства в годы Великой Отечественной войны и послевоенного восстановления страны на территории Томского района.

Природные индикаторы, характеризующие рудную минерализацию г. Далат, выявлены в равномерном распределении в кольцах сосны во всех временных периодах Ca, K, Rb и Zn. Спецификой элементного состава древесины в рудной зоне г. Далат является повышение содержания основного минерала – Sn и

сопутствующих As, Bi, Cu, Mo, W, Au, Pb, обусловленных интенсификацией пыления. Повышение содержания хрома и железа на территории городской агломерации, а также повышение уровня натрия и мышьяка в ответ на распыление гербицидов во время военных действий являются индикаторами техногенеза для города Далат.

По результатам изучения особенностей делящихся радиоактивных элементов в древесине сосны зафиксированы разные плотности и характеристики основных форм треков в зависимости от напряженности поля радиоактивной ситуации изучаемой территории. Пики распределения треков в виде «звезд» и скоплений, обнаруженных в годовых кольцах, соответствуют периодам ядерных взрывов, производимых в разных частях мира, а также реакцией на аварии на ядерных объектах. Большой временной ряд сосны с территории г. Далат показал, что максимум треков в виде скоплений и звезд отмечается в период активных ядерных испытаний в атмосфере, а на условно-фоновой территории провинции Зялай – в период 1990-х и 2000-х гг., когда было осуществлено множество взрывов в Китае, Индии и Северной Корее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В. И. Биосфера. Избр. соч. т. 5. – 1960.
2. Xu H. Progress on dendrochemistry for monitoring heavy metal pollution in environment (in Chinese) //Earth Environmental. – 2004. – Т. 32. – №. 3–4. – С. 1-6.
3. Рихванов Л. П. Дендрорадиография как метод ретроспективной оценки радиоэкологической ситуации / Л. П. Рихванов, Т. А. Архангельская, Ю. Л. Замятина // Томский политехнический университет. – Томск: Дельтаплан, 2015. – С. 148.
4. Ваганов Е. А. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктики / Е. А. Ваганов, С. Г. Шиятов, В. С. Мазепа. – Новосибирск: Наука, 1996. – 246 с.
5. Ваганов Е.А. Дендрохронология элементного состава как перспективное направление биогеохимии / Е.А. Ваганов, А.М. Грачев, В.В. Шишов, И.П. Панюшкина, С.У. Левитт, А.А. Кнорре, Е.П. Чебыкин, О.В. Меняйло // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 453. – № 6. – С. 702–706.
6. Адама А.М. Экология Северного промышленного узла города Томска: проблемы и решения / Под ред. А.М. Адама. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. – 260с.
7. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии: учебное пособие. - Томск: STT, 2009. - 430 с.
8. Миронова, А. С. и др. Годовые кольца сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – индикатор геохимической обстановки и хронологического изменения химического элементного состава окружающей среды / А. С. Миронова, Л. П. Рихванов, Н. В. Барановская, А. Ф. Судыко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 1. – Р. 106–116.
9. Ляпина Е.Е. Экогеохимия ртути в природных средах Томского региона: дис. ...канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 154 с.
10. Архангельская Т.А. Ретроспективная оценка радиоэкологической ситуации по результатам изучения годовых колец срезов деревьев: автореф. дис. на

соискание ученой степени канд. геол.-минералог. наук / Т.А. Архангельская. – Томск. – 2004. – 22 с.

11. Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 170 с.

12. Юсупов Д. В. Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий / Д. В. Юсупов [и др.] // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. – 2016а. – Т. 327, № 6. – С. 25-36.

13. Юсупов Д. В. Бром в листьях тополя урбанизированных территорий: природные и антропогенные источники поступления / Д. В. Юсупов, Л. П. Рихванов, Н. В. Барановская {и др.] // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. – 2021.а – Т. 332, № 1. – [С. 76-87].

14. National Academy of Sciences (NAS) (1974) Report: The Effects of herbicides in South Vietnam, Part A – summary and conclusions. Special Collections, USDA National Agricultural Library. <https://www.nal.usda.gov/exhibits/speccoll/items/show/1318>

15. Stellman, J. M. A geographic information system for characterizing exposure to Agent Orange and other herbicides in Vietnam / J. M. Stellman, S. D. Stellman, T. Weber, C. Tomasallo, A. B. Stellman, R. Christian // Environmental Health Perspectives. – 2003. – V. 111. – N. 3. – P. 321–328. <https://doi.org/10.1289/EHP.5755>

16. UN Environment (UNEP). Global Mercury Assessment 2018. Geneva, Switzerland: United Nations Environment Programme, Chemicals and Health Branch, 2019.

17. Tang K. et al. An interhemispheric difference in atmospheric gaseous elemental mercury isotopes reveals a new insight in oceanic mercury emissions / K. Tang, Z. Song, X. Fu, Y. Zhang, H. Zhang, Y. Sun // Journal of Geophysical Research: Atmospheres – 2025. – V. 130. – №. e2024JD042178. <https://doi.org/10.1029/2024JD042178>

18. Chen Q. Mercury records from natural archives reveal ecosystem responses to changing atmospheric deposition / Q. Chen, Q. Wu, Y. Cui, S. Wang // National science review. – 2024. – Vol. 11. – № 12. – nwae417. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae417>
19. Phu Nguyen, L. S. и др. Eight-year dry deposition of atmospheric mercury to a tropical high mountain background site downwind of the East Asian continent / L. S. Phu Nguyen, L. Zhang, D.-W. Lin, N.-H. Lin, G.-R. Sheu // Environmental pollution (Barking, Essex: 1987). – 2019. – Vol. 255. – № Pt 1. – P. 113128.
20. Nguyen, L. S. P. и др. Trans-boundary air pollution in a Southeast Asian megacity: Case studies of the synoptic meteorological mechanisms and impacts on air quality / L. S. P. Nguyen, J. Hian-Wui Chang, S. M. Griffith, T. T. Hien, S. Soon-Kai Kong, H. N. Le, H.-Y. Huang, G.-R. Sheu, N.-H. Lin // Atmospheric pollution research. – 2022. – Vol. 13. – № 4. – P. 101366.
21. Nguyen, L. S. P. и др. Long-range atmospheric mercury transport from across East Asia to a suburban coastal area in southern Vietnam / L. S. P. Nguyen, T. T. Hien // Bulletin of environmental contamination and toxicology. – 2024. – Vol. 112. – № 1. – P. 14.
22. Yuan, C. S. Seasonal variation and source identification of atmospheric speciated mercury in an industrial harbor area in East Asia / C. S. Yuan, C. E. Lee, I. R. Ie, K. C. Chiang, Y. L. Tseng, K. W. Wong // The Science of the total environment. – 2022. – Vol. 815. – 152785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152785>
23. Вернадский В.И. Биосфера / В. И. Вернадский, 1926. - 147 с.
24. Вернадский В.И. Радиоактивность и новые проблемы геологии / Основные идеи геохимии. – Л.: Изд-во АН СССР, 1935. – Вып. 2. – С. 23–40.
25. Барановская Н. В. Закономерности накопления и распределения химических элементов в организмах природных и природно-антропогенных экосистем : автореф. дис. ... д-р. биолог. наук / Барановская Наталья Владимировна. – Томск, 2011. – 46 с.
26. Рихванов Л. П. Реконструкция радиационной обстановки на территории Томской области по стратифицированным природным образованиям / Л.П. Рихванов, Ю.Л. Замятина, А.М. Межибор, Т.А. Архангельская, А.Ю. Иванов

// Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1 – С. 199-203

27. Рихванов Л.П. Особенности распределения химических элементов в талой воде ледника Большой Актру (Горный Алтай) / Л.П. Рихванов, Ю.В. Робертус, А.В. Таловская, Р.В. Любимов, А.Ю. Шатилов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 97–103.

28. Робертус Ю.В. Дендрогеохимическая индикация трансграничных переносов экотоксикантов на территорию Алтая / Ю.В. Робертус, Л.П. Рихванов, Р.В. Любимов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 173–177.

29. Bargagli R. Trace elements in terrestrial plants: an ecological approach to biomonitoring and biorecovery. – М.: GEOS, 2005. – 457 p.

30. Казимиров Н.И. и др. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера / Н.И. Казимиров, А.Д. Волков, С.С. Зябченко, А.А. Иванчиков, Р.М. Морозова // Л.: Наука – 1977. – С. 302.

31. Hagemeyer J. Monitoring trace metal pollution with tree rings: a critical assessment / J. Hagemeyer // In: Markert B, ed. Plants as Biomonitors. Indicators for Heavy Metals in the Terrestrial Environment.– Weinheim: VCH, 1993. – P. 541–563.

32. Hagemeyer, J. и др. Seasonal variations of nickel concentrations in annual xylem rings of beech trees (*Fagus sylvatica* L.) / J. Hagemeyer, H. Schäfer, S.-W. Breckle // The Science of the total environment. – 1994. – Vol. 145. – № 1–2. – P. 111–118.

33. Hagemeyer J. Trace metals in tree rings: what do they tell us? / J. Hagemeyer // Trace elements – their distribution and effects in the environment – Elsevier Science, 2000. – P. 375–385.

34. Kang, H. и др. Increased mercury pollution revealed by tree rings from the China's Tianshan Mountains / H. Kang, X. Liu, J. Guo, G. Xu, G. Wu, X. Zeng, B. Wang, S. Kang // Science bulletin. – 2018. – Vol. 63. – № 20. – P. 1328–1331.

35. Marija, P. и др. Evaluation of urban contamination with trace elements in city parks in Serbia using pine (*Pinus nigra* Arnold) needles, bark and urban topsoil / P. Marija, P. Dragana, K. Olga, J. Snežana, Č. Dragan, P. Pavle, M. Miroslava //

International journal of environmental of research. – 2017. – Vol. 11. – № 5–6. – P. 625–639.

36. Pearson, C. L. и др. Dendrochemical analysis of a tree-ring growth anomaly associated with the Late Bronze Age eruption of Thera / C. L. Pearson, D. S. Dale, P. W. Brewer, P. I. Kuniholm, J. Lipton, S. W. Manning // Journal of archaeological science. – 2009a. – Vol. 36. – № 6. – P. 1206–1214.

37. Pearson, C. L. и др. Dendrochemistry of White Mountain bristlecone pines: An investigation via Synchrotron Radiation Scanning X-Ray Fluorescence Microscopy / C. L. Pearson, D. S. Dale, P. W. Brewer, M. W. Salzer, J. Lipton, S. W. Manning // Journal of geophysical research. – 2009b. – Vol. 114. – № G1. – 1206–1214.

38. Рихванов Л. П. Комплексные геохимические исследования компонентов природной среды в эндемичных районах Забайкалья / Л. П. Рихванов, Б. Р. Соктоев, Н. В. Барановская [и др.] // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. – 2021.а – Т. 332, № 2. – [С. 7-25]

39. Рихванов Л.П. и др. Дендрогеохимические особенности ископаемой лиственницы (урочище Пазырык) и современных лиственниц Горного Алтая / Л.П. Рихванов, Ю.В. Робертус, А.С. Миронова, Ф.Б.Бакшт, А.Ф. Судыко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т.328. – № 6. – С. 108–119.

40. Барановская Н. В. Ртуть в почвах и растительности на заповедных территориях Приморского Края / Н. В Барановская, В. В. Иванов, Н. А. Осипова, А. М. Паничев, И. Ю. Чекрыжов, В. Д. Доронина, А. А. Хвощевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 90–100

41. Большунова, Т. С. Элементный состав лишайников как индикатор загрязнения атмосферы / Т. С. Большунова, Л. П. Рихванов, Н. В. Барановская // Экология и промышленность России. – 2014. – № 11. – С. 26–31.

42. Большунова, Т.С. К вопросу о выборе фоновых концентраций химических элементов в лишайниках-эпифитах / Т.С. Большунова, Л.П. Рихванов,

Н.В. Барановская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2015. – Т. 326. – № 9. – С 33-46

43. Cataldo D.A. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants / D.A. Cataldo, R.E. Wildung // Perspectives of Environmental Hygiene. – 1978. – V. 27. – P. 149–159.

44. Lepp N. W., The potencial on tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns. – Environ Pollut 1975. – Vol. 9. – P. 49–61

45. Chellman, N. и др. Reassessment of the upper Fremont glacier ice-core chronologies by synchronizing of ice-core-water isotopes to a nearby tree-ring chronology / N. Chellman, J. R. McConnell, M. Arienzo, G. T. Pederson, S. M. Aarons, A. Csank // Environmental science & technology. – 2017. – Vol. 51. – № 8. – P. 4230–4238.

46. Clackett, S. P. и др. 400-year record of atmospheric mercury from tree-rings in northwestern Canada / S. P. Clackett, T. J. Porter, I. Lehnher // Environmental science & technology. – 2018. – Vol. 52. – № 17. – P. 9625–9633.

47. Гончаров Г. А. и др. Эколого-геохимическая оценка состояния территории города Уфы по данным изучения листьев тополя (*populus balsamifera* L.) / Г. А. Гончаров, Б. Р. Соктоев, Е. Е. Ляпина, И. М. Фархутдинов // Учёные записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2024. – Т. 166. – № 3. – P. 476–494.

48. Rühling A. и др. An ecological approach to the lead problem / A. Rühling, G. Tyler // Botaniska Notiser. – 1968. – № 121. – P. 321–342.

49. Coccozza, C. и др. Monitoring air pollution close to a cement plant and in a multi-source industrial area through tree-ring analysis / C. Coccozza, E. Alterio, O. Bachmann, M. Guillon, T. Sitzia, P. Cherubini // Environmental science and pollution research international. – 2021. – Vol. 28. – № 38. – P. 54030–54040.

50. Balraju, W. и др. Assessing toxic element accumulation trend in magnolia champaca tree rings at tuirial dumping site in Mizoram, northeast India using dendrochemical analysis / W. Balraju, K. K. Upadhyay, S. K. Tripathi // Water, air, and soil pollution. – 2023. – Vol. 234. – № 12.

51. Watmough, S. A. Monitoring historical changes in soil and atmospheric trace metal levels by dendrochemical analysis / S. A. Watmough // *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987). – 1999. – Vol. 106. – № 3. – P. 391–403.
52. Smith, K.T. Dendrochemistry of base cations in red spruce: the fallacy of the passive recorder / K. T. Smith, W. C. Shortle // *Transactions of the American Geophysical Union Fall Meeting Supplement. Abstract.* – 2003. – Vol. 84. – №46. – B12F-04.
53. Wang, Y. и др. Study on model of correlation between chemical element contents in tree rings and tree roots in soil from the south of Beijing / Y. Wang, C. Xu, S. Wang, Z. An // *Chinese journal of geochemistry.* – 2006. – Vol. 25. – № S1. – P. 15.
54. Уфимцева, М. Д. Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях / М. Д. Уфимцева // *Геохимия.* – 2015. – Vol. 2015. – № 5. – P. 450–465.
55. Черненькова Т.В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение / Т.В. Черненькова // Москва : Наука, 2002, с. 191.
56. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города / Е.П. Янин. – Москва, 1992. – С. 3-63.
57. Cataldo, D. A. и др. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants / D. A. Cataldo, R. E. Wildung // *Environmental health perspectives.* – 1978. – Vol. 27. – P. 149–159.
58. Gustin, M. S. и др. Investigation of the biochemical controls on mercury uptake and mobility in trees / M. S. Gustin, S. M. Dunham-Cheatham, J. F. Harper, W.-G. Choi, J. D. Blum, M. W. Johnson // *The Science of the total environment.* – 2022. – Vol. 851. – № Pt 1. – P. 158101.
59. Шиятов, С. .Г Дендрохронология, её принципы и методы /С. Г. Шиятов // *Записки Свердловского отделения Всесоюз. ботанич. общества.* - Свердловск, 1973. - Вып. 6. - С. 53-81.
60. Гавриков В.Л. и др. Фертиков А.И., Шарафутдинов Р.А., Ваганов Е.А. Изменчивость элементного состава годовичных колец хвойных пород / В.Л. Гавриков, А.И. Фертиков, Р.А. Шарафутдинов, Е.А. Ваганов // *Изв. вузов. Лесн. журн.* – 2021. – № 6. – С. 24–37.

61. Cutter, B. E. и др. Anatomical, chemical, and ecological factors affecting tree species choice in dendrochemistry studies / B. E. Cutter, R. P. Guyette // *Journal of environmental quality*. – 1993. – Vol. 22. – № 3. – P. 611–619.
62. Турсуналиева, Е. М. Экогеохимия ртути в древесных растениях рода тополь (листьях и годовых кольцах) урбанизированных территорий Сибири и Дальнего Востока. Дисс. канд. геол.-мин.Наук. Томск, 2022, с. 140.
63. Ahn, Y. S. и др. Approaches to understand historical changes of mercury in tree rings of Japanese cypress in industrial areas / Y. S. Ahn, R. Jung, J.-H. Moon // *Forests*. – 2020. – Vol. 11. – № 8. – P. 800.
64. Афанасьева Л. В. Элементный состав хвои и морфометрические параметры сосны обыкновенной в условиях атмосферного промышленного загрязнения в западном Забайкалье / Л. В. Афанасьева, В. К. Кашин, А. С. Плешанов, Т. А. Михайлова, Н. С. Бережная // *Хвойные бореальные зоны*. Т. 22 – №. 1-2. – 2004. – С. 112-119.
65. Afanasyeva, L. V. и др. The effect of aluminum smelter emissions on nutritional status of coniferous trees (Irkutsk Region, Russia) / L. V. Afanasyeva, O. V. Kalugina, T. A. Mikhailova // *Environmental science and pollution research international*. – 2021. – Vol. 28. – № 44. – P. 62605–62615.
66. Робертус Ю. В. Индикация компонентами природной среды трансграничного переноса загрязняющих веществ на территорию Горного Алтая / Ю.В. Робертус, В.Н. Удачкин, Л.П. Рихванов [и др.] // *Известия Томского политехнического университета*. 2016. – Т. 327. – № 9. – С. 39–48.
67. Перегудина, Е. В. Эколого-биогеохимическая характеристика территории расположения железорудных объектов Томской и Кемеровской областей : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Е. В. Перегудина. – Томск, 2024. – 152 с.
68. Черненькая, Е. В. Плутоний в некоторых типах травянистой и кустарничковой растительности юга Западной Сибири / Е. В. Черненькая, Л. П. Рихванов, Н. В. Барановская // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 2-5. – С. 984– 991.

69. Peng, H. и др. Tree rings mercury controlled by atmospheric gaseous elemental mercury and tree physiology / H. Peng, X. Zhang, K. Bishop, J. Marshall, M. B. Nilsson, C. Li, E. Björn, W. Zhu // *Environmental science & technology*. – 2024. – Vol. 58 – P. 16833 – 16842.

70. Турсуналиева Е. М. Геохимические особенности распределения ртути в листьях и годовых кольцах тополя урбанизированных территорий на примере г. Новосибирск / Е. М. Турсуналиева, Д. В. Юсупов, Л. П. Рихванов, Е. Е. Ляпина // *Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331, № 9. – [С. 28-38].

71. Юсупов Д. В. Методология биогеохимической индикации урбанизированных и горнопромышленных территорий на основе анализа древесной растительности : дис. ... д-ра геолого-минералог. наук / Юсупов Дмитрий Валерьевич. – Томск, 2022. – 344 с.

72. Рихванов Л.П. Эманации ртути Байкальского рифта по данным изучения годовых колец деревьев (на примере тункинской впадины) / Л.П. Рихванов, Е.Е. Ляпина, Д.В. Юсупов, Е.М. Турсуналиева, А.А. Павлова // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. – 2021. 6 – Т. 496. – №1. – С.30 - 35.

73. Робертус, Ю. В. Радиоэкологическая обстановка на территории Республики Алтай / Ю. В. Робертус // *Материалы IV Международной конференции*. – Томск, 2013. – С. 456–460.

74. Рихванов Л. П. Радиографические исследования в радиоэкологическом мониторинге / Л. П. Рихванов, Ю. Л. Замятина, Т. А. Архангельская // *Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]*. – 2007. – Т. 311, № 1 : *Науки о Земле*. – [С. 123-127].

75. Замятина Ю.Л. Изучение истории поступления радионуклидов в окружающую среду на основе f-радиографического анализа годовичных колец деревьев: автореф. дис.... канд. геол.-минерал. наук. / Ю.Л. Замятина. – Томск. – 2008. – 26 с.

76. Cook E. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences / E. Cook, L. A. Kairiukstis, et al. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1990. – 394 p.
77. Tout R. E. Neutron activation studies of trace elements in tree rings / R. E. Tout, W. B. Gilboy, N. M. Spyrou // Journal of Radioanalytical Chemistry, 1977, 37. – P. 705–715.
78. Watmough, S. A. и др. Analysis of tree rings using inductively coupled plasma mass spectrometry to record fluctuations in a metal pollution episode / S. A. Watmough, T. C. Hutchinson // Environmental pollution (Barking, Essex: 1987). – 1996. – Vol. 93. – № 1. – P. 93–102.
79. Ault, W. U. и др. Isotopic composition as a natural tracer of lead in the environment / W. U. Ault, R. G. Senechal, W. E. Erlebach // Environmental science & technology. – 1970. – Vol. 4. – № 4. – P. 305–313.
80. Ward, N. I. и др. Effect of lead from motor-vehicle exhausts on trees along a major thoroughfare in Palmerston North, New Zealand / N. I. Ward, R. R. Brooks, R. D. Reeves // Environmental pollution. – 1974. – Vol. 6. – № 2. – P. 149–158.
81. Szopa, P.S. Distribution of lead within the xylem of trees exposed to airborne lead compounds / P.S. Szopa, E.A. Jr. McGinnes, J.O. Pierce // Wood Science and Technology. – 1973. – Vol. 6. – № 6. – P. 72–77.
82. Bukovac, M. J. и др. Absorption and mobility of foliar applied nutrients / M. J. Bukovac, S. H. Wittwer // Plant physiology. – 1957. – Vol. 32. – № 5. – P. 428–435.
83. Jonsson, A. и др. Heavy metals of the 20th century recorded in Oak Tree rings / A. Jonsson, M. Eklund, K. Håkansson // Journal of environmental quality. – 1997. – Vol. 26. – № 6. – P. 1638–1643.
84. Zhang, C. и др. Biomonitoring of atmospheric particulate matter using magnetic properties of Salix matsudana tree ring cores / C. Zhang, B. Huang, J. D. A. Piper, R. Luo // The Science of the total environment. – 2008. – Vol. 393. – № 1. – P. 177–190.

85. Padilla, K. L. и др. Trace element concentration in tree-rings biomonitoring centuries of environmental change / K. L. Padilla, K. A. Anderson // *Chemosphere*. – 2002. – Vol. 49. – № 6. – P. 575–585.
86. Rodríguez Martín, J. A. и др. Wood and bark of *Pinus halepensis* as archives of heavy metal pollution in the Mediterranean Region / J. A. Rodríguez Martín, C. Gutiérrez, M. Torrijos, N. Nanos // *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987). – 2018. – Vol. 239. – P. 438–447.
87. Ляпина Е. Е. Эколого-геохимические особенности накопления ртути древесиной хвойных растений на территории Алтайского края / Е. Е. Ляпина // *Лесотехнический журнал*. – 2023. – Т. 13. – № 4. – P. 95–109.
88. Arnold, J. и др. Evidence for nonstomatal uptake of Hg by Aspen and translocation of Hg from foliage to tree rings in Austrian pine / J. Arnold, M. S. Gustin, P. J. Weisberg // *Environ. Sci. technol.* – 2018. – Vol. 52. – № 3. – P. 1174–1182.
89. Yusupov, D. V. и др. Poplar tree (*Populus balsamifera* L.) as indicator of mercury emission from a point source / D. V. Yusupov, E. E. Lyapina, E. M. Tursunaliyeva, N. A. Osipova, N. V. Baranovskaya // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 287. – № Pt 3. – P. 132157.
90. Xu, J. и др. Heavy metal contamination of soil and tree-ring in urban forest around highway in Shanghai, China / J. Xu, B. Jing, K. Zhang, Y. Cui, D. Malkinson, D. Kopel, K. Song, L. Da // *Human and ecological risk assessment: HERA*. – 2017. – Vol. 23. – № 7. – P. 1745.
91. Vogel, F. и др. Tracking local radiocarbon releases from nuclear power plants in southern Ontario (Canada) using annually-dated tree-ring records / F. Vogel, C. Crann, M. F. J. Pisaric // *Anthropocene*. – 2022. – Vol. 38. – № 100338.
92. Бергальи Роберто. Биогеохимия наземных растений. – М.: Geos, 2005. – 457 с.
93. Rolfe, G.L. Lead distribution in tree rings / G.L. Rolfe // *Forest Science*. – 1974. – Vol. 20. – № 3. – P. 283–286.

94. Symeonides, C. Tree-ring analysis for tracing the history of pollution: Application to a study in northern Sweden / C. Symeonides // *Journal of environmental quality*. – 1979. – Vol. 8. – № 4. – P. 482–486.
95. Robitaille, G. Heavy-metal accumulation in the annual rings of balsam fir *Abies balsamea* (L.) Mill / G. Robitaille // *Environmental Pollution Series B Chemical and Physical*. – 1981. – Vol. 2. – № 3. – P. 193–202.
96. Jordan, D. N. и др. Relationship between xylem trace metals and radial growth of loblolly pine in rural Alabama / D. N. Jordan, L. M. Wright, B. G. Lockaby // *Journal of environmental quality*. – 1990. – Vol. 19. – № 3. – P. 504–508.
97. Watmough, S. A. и др. Development of solid calibration standards for trace elemental analyses of tree rings by laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry / S. A. Watmough, T. C. Hutchinson, R. D. Evans // *Environmental science & technology*. – 1998. – Vol. 32. – № 14. – P. 2185–2190.
98. Eklund, M. Cadmium and lead deposition around a Swedish battery plant as recorded in Oak Tree rings / M. Eklund // *Journal of environmental quality*. – 1995. – Vol. 24. – № 1. – P. 126–131.
99. Guyette, R. P. и др. Long-term correlations between mining activity and levels of lead and cadmium in tree-rings of eastern Red-Cedar / R. P. Guyette, B. E. Cutter, G. S. Henderson // *Journal of environmental quality*. – 1991. – Vol. 20. – № 1. – P. 146–150.
100. Shortle, W. C. и др. Acidic deposition, cation mobilization, and biochemical indicators of stress in healthy red spruce / W. C. Shortle, K. T. Smith, R. Minocha, G. B. Lawrence, M. B. David // *Journal of environmental quality*. – 1997. – Vol. 26. – № 3. – P. 871–876.
101. Pongrac, P. и др. Tissue-specific element profiles in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles / P. Pongrac, E. Baltreinaite, P. Vavpetič, M. Kelemen, A. Kladnik, B. Budič, K. Vogel-Mikuš, M. Regvar, P. Baltrenas, P. Pelicon // *Trees* (Berlin, Germany: West). – 2019. – Vol. 33. – № 1. – P. 91–101.
102. Churakova Sidorova O. V. Response of Temperature-limited Forests to Recent Moisture Changes Derived from Tree-ring Stable Carbon Isotopes / O. V.

Churakova Sidorova, M. V. Fonti, A. V. Kirdyanov [et al.] // Russian Journal of Ecology. – 2021. – Vol. 52, No. 5. – P. 368-375.

103. Юсупов Д. В. Методология биогеохимической индикации урбанизированных и горнопромышленных территорий на основе анализа древесной растительности. Дисс. канд. геол.-мин.Наук. Томск – 2022. – с. 344.

104. Арбузов С.И. Редкометалльный потенциал углей Сибири и перспективы его освоения / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, Л.П. Рихванов // Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы и предприятий ТЭК Сибири: Материалы межрегиональной научно-практической конференции. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та. – 2005. – С. 13-20.

105. Арбузов С.И. Редкометалльный потенциал углей Сибири и Дальнего Востока России и перспективы его освоения / С.И. Арбузов, И.Ю. Чекрызов, И.А. Тарасенко // Вестн. ДВО РАН. 2023. – No 5. – С. 31–51. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_231_05_3.

106. Tatzber, M. и др. Mercury in tree rings close to emission sources in Austria / M. Tatzber, A. Fürst // Environmental science and pollution research international. – 2023. – Vol. 30. – № 36. – P. 86084–86096.

107. Горохова, А.Г. Содержание ртути в почвах и биологических объектах природных и техногенных территорий / А.Г. Горохова, А.И. Иванов, Н.А. Язынина // Теоретическая и прикладная экология. – 2017. – №4. – С. 100–105.

108. Lyapina, E. E. и др. Assessment of mercury content in poplar leaves of Novokuznetsk agglomeration / E. E. Lyapina, D. V. Yusupov, E. M. Tursunalieva, V. V. Osipova // IOP conference series. Earth and environmental science. – 2016. – Vol. 48. – P. 012022.

109. Ляпина Е.Е. и др. Содержание ртути в хвое Юго-Западного Прибайкалья / Е.Е. Ляпина, Е.В. Шворнева, Н.Н. Воропай // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – № 1. – С. 69–72. DOI: 10.15372/AOO20180111.

110. Lyapina, E. E. Spatial distribution of mercury load on the territory of the Altai region according to the bioindication research data / E. E. Lyapina // 25th

International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2019.

111. Ляпина Е.Е. Дендрогеохимия Hg по данным изучения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на территории Томского района / Е.Е. Ляпина, Ле Тхи Хонг Шанг, М. Г. Крачнакова, Н. В. Барановская, А. Н. Маркелова, С. Ю. Золотов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 125–136.

112. Liu, X. и др. Assessment of tree-ring mercury radial translocation and age effect in Masson pine: Implications for historical atmospheric mercury reconstruction / X. Liu, X. Wang, D. Wang // Journal of environmental sciences (China). – 2024. – Vol. 138. – P. 266.

113. Kang, H. и др. Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China / H. Kang, X. Liu, J. Guo, B. Wang, G. Xu, G. Wu, S. Kang, J. Huang // Ecological indicators. – 2019. – V. 104. – P. 24.

114. Nováková, T. и др. Contrasting tree ring Hg records in two conifer species: Multi-site evidence of species-specific radial translocation effects in Scots pine versus European larch / T. Nováková, T. Navrátil, J. D. Demers, M. Roll, J. Rohovec // The Science of the total environment. – 2021. – Vol. 762. – № 144022.

115. Nováková, T. и др. Reconstructing atmospheric Hg levels near the oldest chemical factory in central Europe using a tree ring archive / T. Nováková, T. Navrátil, M. Schütze, J. Rohovec, Š. Matoušková, M. Hošek, T. Matys Grygar // Environmental pollution (Barking, Essex: 1987). – 2022. – Vol. 304. – № 119215.

116. Assad M. Mercury uptake into poplar leaves / M. Assad, J. Parelle, D. Cazaux, F. Gimbert, M. Chalot, F. Tatin-Froux // Chemosphere. – 2016. – vol.146. – P. 1–7

117. Baroni, D. и др. Tree-rings analysis to reconstruct atmospheric mercury contamination at a historical mining site / D. Baroni, S. Ancora, J. Franzaring, S. Loppi, F. Monaci // Frontiers in plant science. – 2023. – Vol. 14. – P. 1260431.

118. Li, C. и др. Mercury deposition and redox transformation processes in peatland constrained by mercury stable isotopes / C. Li, M. Jiskra, M. B. Nilsson, S. Osterwalder, W. Zhu, D. Mauquoy, U. Skyllberg, M. Enrico, H. Peng, Y. Song, E. Björn, K. Bishop // *Nature communications*. – 2023. – Vol. 14. – № 1. – P. 7389.

119. Scanlon, T. M. и др. Mercury accumulation in tree rings: Observed trends in quantity and isotopic composition in Shenandoah National Park, Virginia / T. M. Scanlon, A. L. Riscassi, J. D. Demers, T. D. Camper, T. R. Lee, D. L. Druckenbrod // *Journal of geophysical research. Biogeosciences*. – 2020. – Vol. 125. – № 2.

120. Евстафьева, Е. В. и др. Содержание ртути в эпифитных лишайниках на территории Республики Крым / Е. В. Евстафьева, А. М. Богданова, Т. С. Большунова, Н. В. Барановская, Н. А. Осипова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 7. – С. 93–103.

121. Юсупов Д. В. Распределение ртути в компонентах окружающей среды горнорудных районов Республики Алтай / Д. В. Юсупов, Ю. В. Робертус, Л. П. Рихванов, Р. В. Любимов, Е. Е. Ляпина, Е. М. Турсуналиева // *Оптика атмосферы и океана*. – 2018а. – Т. 31 – №1 – С. 73–78.

122. Юсупов Д. В. Ртуть в листьях тополя на урбанизированных территориях Юга Сибири и Дальнего Востока / Д. В. Юсупов, Л. П. Рихванов, Ю. В. Робертус [и др.] // *Экология и промышленность России*. – 2018б. – Т. 22, № 12. – С. 56-62. – DOI 10.18412/1816-0395-2018-12-56-62.

123. Peckham M. A. Results of a controlled field experiment to assess the use of tree tissue concentrations as bioindicators of air Hg / M.A. Peckham, M.S. Gustin, P.J. Weisberg, P. Weiss-Penzias // *Biogeochemistry* – 2019.a – vol. 142 – PP. 265-279.

124. Peckham M.A. Assessment of the suitability of tree rings as archives of global and regional atmospheric mercury pollution / M.A. Peckham, M.S. Gustin, P.J. Weisberg // *Environ. Sci. Technol.* – 2019.b – V. 53 – P. 3663-3671.

125. Yang Y. Concentrations and content of mercury in bark, wood, and leaves in hardwoods and conifers in four forested sites in the northeastern USA / Y. Yang, R.D. Yanai, C.T. Driscoll, M. Montesdeoca, K.T. Smith // *PLoS One*. – 2018. – V. 13. – P. 1-14.
126. Gačnik, J. и др. Tree rings as historical archives of atmospheric mercury: A critical review / J. Gačnik, M. S. Gustin // *The Science of the total environment*. – 2023. – Vol. 898. – № 10.
127. Mashyanov N.R. Air mercury monitoring at the Baikal area / N.R. Mashyanov, V.A. Obolkin, S.E. Pogarev, V.V. Ryzhov, S.E. Sholupov, V.L. Potemkin, E.V. Molozhnikova, T.V. Khodzher // *Atmosphere*. – 2021. – Vol. 12. – № 7. – P. 807. DOI: 10.3390/atmos12070807.
128. Mashyanov N.R. Air mercury monitoring in the Baikal area (2011–2021) / N.R. Mashyanov, S.E. Pogarev, S.E. Sholupov, V.V. Ryzhov, V.A. Obolkin, T.V. Khodzher, V.L. Potemkin, E.V. Molozhnikova, V.V. Kalinchuk // *Limnol. Freshwater Biology*. – 2022. – Vol. 3 – № 3 – P. 1315–1318. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1315.
129. Marumoto K. Atmospheric mercury concentrations at two sites in the Kyushu Islands, Japan, and evidence of long-range transport from East Asia / K. Marumoto, M. Hayashi, A. Takami // *Atmospheric Environment*. – 2015. – Vol. 117 – P. 147-155.
130. Lee, S. Influence of transboundary air pollutants from China on the high-PM10 episode in Seoul, Korea for the period October 16–20, 2008 / S. Lee, C.-H. Ho, Y. G. Lee, H.-J. Choi, C.-K. Song // *Atmospheric Environment*. – 2013. – Vol. 77 – P. 430-439. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.006>
131. Samsuddin N. A. C. Local and transboundary factors' impacts on trace gases and aerosol during haze episode in 2015 El Niño in Malaysia / N. A. C. Samsuddin, M. F. Khan, K. N. A. Maulud, A. H. Hamid, F. T. Munna, M. A. A. Rahim, M. T. Latif, M. Akhtaruzzaman // *The Science of the total environment*. – 2018. Vol. 630 – P. 1502–1514. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.289>

132. Qin X. Tracing the transboundary transport of atmospheric Particulate Bound Mercury driven by the East Asian monsoon / X. Qin, X. Dong, Z. Tao, R. Wei, H. Zhang, Q. Guo // J. Hazard. Mater. – 2023. – V. 446. – Article 130678.

133. Chellman N. Comparison of co-located ice-core and tree-ring mercury records indicates potential radial translocation of mercury in whitebark pine / N. Chellman, A. Z. Csank, M. S. Gustin, M. M. Arienzo, M. V. Estrada, J. R. McConnell // Science of The Total Environment. – 2020. – V. 743. – P. 140695. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140695>

134. Liu, X., Wang, X., Yuan, W., Wang, D., & Feng, X. (2023). Tree rings recording historical atmospheric mercury: A review of progresses and challenges / X. Liu, X. Wang, W. Yuan, D. Wang, X. Feng // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2023. – V. 54, №6 – P. 445–462. <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2250706>

135. Cheng, Z. и др. Arsenic in tree rings at a highly contaminated site / Z. Cheng, B. M. Buckley, B. Katz, W. Wright, R. Bailey, K. T. Smith, J. Li, A. Curtis, A. van Geen // The Science of the total environment. – 2007. – Vol. 376. – № 1–3. – P. 324.

136. Edmands, J. D. и др. Uptake and mobility of uranium in black oaks: implications for biomonitoring depleted uranium-contaminated groundwater / J. D. Edmands, D. J. Brabander, D. S. Coleman // Chemosphere. – 2001. – Vol. 44. – № 4. – P. 789–795.

137. Lageard, J. G. A. и др. The utility of *Pinus sylvestris* L. in dendrochemical investigations: pollution impact of lead mining and smelting in Darley Dale, Derbyshire, UK / J. G. A. Lageard, J. A. Howell, J. J. Rothwell, I. B. Drew // Environmental pollution (Barking, Essex: 1987). – 2008. – Vol. 153. – № 2. – P. 284–294.

138. Okada, N. и др. Application of activable tracers to investigate radial movement of minerals in the stem of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) / N. Okada, Y. Hirakawa, Y. Katayama // Journal of wood science. – 2011. – Vol. 57. – № 5. – P. 421–428.

139. Nabais, C. и др. Dendroanalysis: a tool for biomonitoring environmental pollution? / C. Nabais, H. Freitas, J. Hagemeyer // *The Science of the total environment*. – 1999. – Vol. 232. – № 1–2. – P. 33–37.

140. Navrátil, T. и др. The history of mercury pollution near the Spolana chlor-alkali plant (Neratovice, Czech Republic) as recorded by Scots pine tree rings and other bioindicators / T. Navrátil, M. Šimeček, J. B. Shanley, J. Rohovec, M. Hojdová, J. Houška // *The Science of the total environment*. – 2017. – Vol. 586. – P. 1182–1192.

141. Navrátil, T. и др. Larch tree rings as a tool for reconstructing 20th century central European atmospheric mercury trends / T. Navrátil, T. Nováková, J. B. Shanley, J. Rohovec, Š. Matoušková, M. Vaňková, S. A. Norton // *Environmental science & technology*. – 2018. – Vol. 52. – № 19. – P. 11060–11068.

142. Дорохова, Л. А. и др. Анализ распределения урана в аэрозольных выпадениях на территории города Новосибирска / Л. А. Дорохова, Д. В. Юсупов, А. С. Торопов, В. Ф. Рапута, Л. М. Павлова, В. И. Радомская, А. Ф. Судыко, Н. В. Барановская // *Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 7–18

143. Юсупов Д. В. О проявленности природно-техногенных факторов по соотношению содержания тория и урана в листьях тополя на урбанизированных территориях / Д. В. Юсупов [и др.] // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : материалы V Международной конференции, 13-16 сентября 2016 г., г. Томск*. – Томск : Изд-во ТПУ, 2016. – С. 729-733.

144. Scanlon T.M. Mercury accumulation in tree rings: Observed trends in quantity and isotopic composition in Shenandoah National Park, Virginia / T.M. Scanlon, A.L. Riscassi, J.D. Demers, T.D. Camper, T.R. Lee, D.L. Druckenbrod // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. – 2020. – V.125. doi.org 10.1029/2019JG005445.

145. Wang, X. и др. Stable mercury isotopes stored in Masson Pinus tree rings as atmospheric mercury archives / X. Wang, W. Yuan, C.-J. Lin, F. Wu, X. Feng // *Journal of hazardous materials*. – 2021. – Vol. 415. – № 125678. – P. 125678.

146. Ghotra, A. и др. Tree-ring inferred atmospheric mercury concentrations in the Mackenzie delta (NWT, Canada) peaked in the 1970s but are increasing once more / A. Ghotra, I. Lehnherr, T. J. Porter, M. F. J. Pisaric // *ACS earth & space chemistry*. – 2020. – Vol. 4. – № 3. – P. 457–466.

147. Morgado, F. и др. Chronological trends and mercury bioaccumulation in an aquatic semiarid ecosystem under a global climate change scenario in the northeastern coast of Brazil / F. Morgado, R. M. A. L. Santos, D. Sampaio, L. D. de Lacerda, A. M. V. M. Soares, H. C. Vieira, S. Abreu // *Animals: an open access journal from MDPI*. – 2021. – Vol. 11. – № 8. – P. 2402.

148. Zhou, J. и др. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling / J. Zhou, D. Obrist, A. Dastoor, M. Jiskra, A. Ryjkov // *Nature reviews. Earth & environment*. – 2021. – Vol. 2. – № 4. – P. 269–284.

149. Юсупов Д.В. Распределение ртути в компонентах окружающей среды горнорудных районов Республики Алтай / Д.В. Юсупов, Ю.В. Робертус, Л.П. Рихванов, Р.В. Любимов., Е.Е. Ляпина, Е.М. Турсуналиева // *Оптика атмосферы и океана*. – 2018. – Т.31. – No 1. – С.73–78.

150. Робертус Ю. В. Элементный состав лишайника *Rhizocarpon* на намне как индикатор переноса загрязняющих веществ на территорию Алтая / Ю. В. Робертус, Л. П. Рихванов, Д. В. Юсупов, Р. В. Любимов, А. В. Кивацкая, В. А. Ситникова, Т. С. Большунова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – No 3. – С. 72–79

151. Świątek, B. и др. Adaptation of *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L., and *Larix decidua* Mill. to environmental stress caused by tailings waste highly contaminated by trace elements / B. Świątek, W. Kraj, M. Pietrzykowski // *Environmental monitoring and assessment*. – 2023. – Vol. 196. – № 1. – P. 52.

152. Schuster, P. F. и др. Atmospheric mercury deposition during the last 270 years: A glacial ice core record of natural and anthropogenic sources / P. F. Schuster, D. P. Krabbenhoft, D. L. Naftz, L. D. Cecil, M. L. Olson, J. F. Dewild, D. D. Susong, J. R. Green, M. L. Abbott // *Environmental science & technology*. – 2002. – Vol. 36. – № 11. – P. 2303–2310.

153. Faïn, X. и др. Polar firn air reveals large-scale impact of anthropogenic mercury emissions during the 1970s / X. Faïn, C. P. Ferrari, A. Dommergue, M. R. Albert, M. Battle, J. Severinghaus, L. Arnaud, J.-M. Barnola, W. Cairns, C. Barbante, C. Boutron // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2009. – Vol. 106. – № 38. – P. 16114–16119.
154. Zhang, Y. и др. Six centuries of changing oceanic mercury / Y. Zhang, L. Jaeglé, L. Thompson, D. G. Streets // *Global biogeochemical cycles*. – 2014. – Vol. 28. – № 11. – P. 1251–1261.
155. Chen, C. Y. и др. A critical time for mercury science to inform global policy / C. Y. Chen, C. T. Driscoll, C. A. Eagles-Smith, C. S. Eckley, D. A. Gay, H. Hsu-Kim, S. E. Keane, J. L. Kirk, R. P. Mason, D. Obrist, H. Selin, N. E. Selin, M. R. Thompson // *Environmental science & technology*. – 2018. – Vol. 52. – № 17. – P. 9556–9561.
156. Soerensen, A. L. и др. Multi-decadal decline of mercury in the North Atlantic atmosphere explained by changing subsurface seawater concentrations / A. L. Soerensen, D. J. Jacob, D. G. Streets, M. L. I. Witt, R. Ebinghaus, R. P. Mason, M. Andersson, E. M. Sunderland // *Geophysical research letters*. – 2012. – Vol. 39. – № 21.
157. Global Mercury Assessment 2013: Sources / Global Mercury Assessment. – 2013. URL: <http://unep.org/hazardoussubstances/>.
158. Enrico, M. и др. Holocene atmospheric mercury levels reconstructed from peat bog mercury stable isotopes / M. Enrico, G. Le Roux, L.-E. Heimbürger, P. Van Beek, M. Souhaut, J. Chmeleff, J. E. Sonke // *Environmental science & technology*. – 2017. – Vol. 51. – № 11. – P. 5899–5906.
159. Chlorine Institute. Chlor-alkali Industry 2008 mercury use and emissions in the United States – twelfth annual report. – Arlington, Va. – 2009.
160. Cain, A. и др. Substance flow analysis of mercury intentionally used in products in the United States / A. Cain, S. Disch, C. Twaroski, J. Reindl, C. R. Case // *Journal of industrial ecology*. – 2007. – Vol. 11. – № 3. – P. 61–75. [Available at www.epa.gov/Region5/mercury/pdfs/12thcl2report.pdf].
161. Ракитский В.Н., Сеницкая Т.А., Скупневский С.В. Современные проблемы загрязнения ртутью окружающей среды (обзор литературы) / *Гигиена и*

санитария. – 2020. – № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-problemy-zagryazneniya-rtutyu-okruzhayushchey-sredy-obzor-literatury> (дата обращения: 22.10.2023).

162. Ваганов Е. А., Шашкин А. В. Рост и структура годичных колец хвойных. – Новосибирск: Наука, 2000. – 214 с.

163. Шиятов С.Г. Методы дендрохронологии / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов, В.Б. Круглов, В.С. Мазепа, М.М. Наурзбаев, Р.М. Хантемиров // Учебно-методич. пособие. – Красноярск: КрасГУ, 2000. – 80 с

164. Кабанов, М. В. Некоторые закономерности климатических и экосистемных изменений в Сибири / М. В. Кабанов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2008. – Т. 1, № 4. – С. 312-322.

165. Рихванов Л.П. К истории развития радиогеохимических исследований в Сибири / Л. П. Рихванов, И.Т. Лозовский, и др. // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. Междунар. конф. – Томск: Издво ТПУ, 1996. – С. 36–38.

166. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии / Л.П. Рихванов // Томск: Изд-во ТПУ. – 1997. – 384 с.

167. Орлов П.П. К вопросу о нахождении радиоактивных веществ в шлихах золотоносных россыпей – М.: Труды Императорской Академии наук. – 1915. – № 6. – 52 с.

168. Домаренко В. А. Очерки по истории изучения радиоактивности и становлении урановой геологии в Центральной Сибири. Очерк первый. Истоки / В. А. Домаренко, Л. П. Рихванов // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. – 2007. – Т. 311, № 1 : Науки о Земле. – С. 146-150.

169. Рихванов Л. П. Вклад вузов города Томска в исследования радиоактивности и радиоактивных элементов / Л. П. Рихванов, П. С. Чубик, В. А. Лойша // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : материалы V Международной конференции, 13-16 сентября 2016 г., г. Томск. – Томск : Изд-во ТПУ. – 2016. – С. 563-567.

170. Жорняк, Л. В. Эколого-геохимическая оценка территории г. Томска по данным изучения почв : специальность 25.00.36 "Геоэкология (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Л. В. Жорняк – Томск. – 2009. – 22 с.

171. Рихванов Л.П. Геохимия почв и здоровье детей Томска / Л.П. Рихванов, С.Т. Нарзулаев, Е.Г. Языков // Изд-во ТГУ: Томск. – 1993.

172. Рихванов Л.П. Изучение уровня и динамика накопления делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев / Л.П. Рихванов, Т.А. Архангельская, В.Д. Несветаило // Геохимия. – 2002. – №1. – СЛ238-1245.

173. Șofletea, N. и др. Genetic diversity and spatial genetic structure in isolated Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) populations native to Eastern and southern Carpathians / N. Șofletea, G. Mihai, E. Ciocîrlan, A. L. Curtu // Forests. – 2020. – Vol. 11. – № 10. – P. 1047.

174. Naydenov, K. и др. Glacial vicariance in Eurasia: mitochondrial DNA evidence from Scots pine for a complex heritage involving genetically distinct refugia at mid-northern latitudes and in Asia Minor / K. Naydenov, S. Senneville, J. Beaulieu, F. Tremblay, J. Bousquet // BMC evolutionary biology. – 2007. – Vol. 7. – P. 233.

175. Sebastiani, F. и др. Novel polymorphic nuclear microsatellite markers for *Pinus sylvestris* L / F. Sebastiani, F. Pinzauti, S. T. Kujala, S. C. González-Martínez, G. G. Vendramin // Conservation genetics resources. – 2012. – Vol. 4. – № 2. – P. 231.

176. Sheller, M. и др. Chloroplast DNA diversity in populations of *P. sylvestris* L. from Middle Siberia and the Romanian Carpathians / M. Sheller, E. Ciocîrlan, P. Mikhaylov, S. Kulakov, N. Kulakova, A. Ibe, T. Sukhikh, A. Curtu // Forests. – 2021. – Vol. 12. – № 12. – P. 1757.

177. Vasilyeva, Y. и др. Genetic structure, differentiation and originality of *Pinus sylvestris* L. populations in the east of the East European Plain / Y. Vasilyeva, N. Chertov, Y. Nechaeva, Y. Sboeva, N. Pystogova, S. Boronnikova, R. Kalendar // Forests. – 2021. – Vol. 12. – № 8. – P. 999.

178. Przybylski, P. и др. Conservation of genetic diversity of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in a Central European National Park based on cpDNA studies / P.

Przybylski, A. Tereba, J. Meger, I. Szyp-Borowska, Ł. Tyburski // Diversity. – 2022. – Vol. 14. – № 2. – P. 93.

179. Ivanova G. A., Kukavskaya E. A., Zhila S. V. Fire impact on carbon balance parameters and ecosystem components of light-coniferous forests of central Siberia // GEO-Siberia-2010: International Exhibition and Scientific Congress; SSGA: Novosibirsk, Russia. – 2010.

180. Ekart, A. K. и др. Genetic diversity and differentiation of populations of scots pine in Southern Siberia and Mongolia / A. K. Ekart, A. Y. Larionova, K. G. Zatsepina, A. N. Kravchenko, S. Zham'yansuren, I. V. Tikhonova, V. V. Tarakanov // Contemporary problems of ecology. – 2014. – Vol. 7. – № 1. – P. 52.

181. Электронный учебник Воробейков Г.А., Дубенская Г.И. Основы биологии растений. - РГПУ им.А.И.Герцена. Режим доступа URL: https://agroatlas.ru/ru/content/related/Pinus_sylvestris/map/index.html (Дата обращения 25.02.2025)

182. Phong, D. T. и др. Genetic diversity in the natural populations of *Pinus dalatensis* Ferre' (Pinaceae) assessed by SSR markers / D. T. Phong, V. T. Thu Hien, T. T. Lieu, N. T. Hiep // Vietnam Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 54. – № 2. – P. 178–189.

183. Hiep N. T. et al. Vietnam Conifers: Conservation Status Review, Fauna & Flora International. – 2004. – P. 158

184. IUCN, 2019. The IUCN Red list of Threatened Species. Available at <https://www.iucnredlist.org/>, accessed on March 3, 2019.

185. The Plant List [Электронный ресурс]. URL: <http://www.theplantlist.org/>.

186. Luu N. D. T. и др. Conifers of Vietnam: an illustrative field guide for the most important forest trees / N. D. T. Luu, P. I. Thomas // Central Forest Seed Company of Vietnam, Hanoi. – 2004. – P. 121.

187. Truong, N. K. и др. Geographical variation in vegetative growth, sexual reproduction and genetic diversity of *Pinus krempfii* H. Lec. and *Pinus dalatensis* Ferré in Tay Nguyen Plateau, Vietnam – The Endemic Pine Conservation Group of Vietnam /

N. K. Truong, T. Van Tien, L. N. Trieu, N. Van Giang, T. T. L. Anh, N. H. Nghia, H. T. Truong // Annual Report of Pro Natura Foundation Japan. – 2020. – Vol. 28. – P. 211.

188. Huy, B. и др. Individual tree diameter growth modeling system for Dalat pine (*Pinus dalatensis* Ferré) of the upland mixed tropical forests / B. Huy, L. Canh Nam, K. P. Poudel, H. Temesgen // Forest ecology and management. – 2021. – Vol. 480. – № 118612. – P. 118612.

189. Thomas, P. и др. New records of conifers in Cambodia and Laos / P. Thomas, K. Sengdala, V. Lamxay, E. Khou // Edinburgh journal of botany. – 2007. – Vol. 64. – № 1. – P. 37.

190. Anh, H. T. H. и др. Geochemical constraints on the evolution of the lithospheric mantle beneath central and southern Vietnam / H. T. H. Anh, S. H. Choi, Y. Yu, P. T. Hieu // Geosciences Journal. – 2021. – Vol. 25. – № 4. – P. 433.

191. Lam Dong Portal. 14.01.2020. Natural. <https://lamdong.gov.vn/sites/en/dalatcity/SitePages/nature.aspx> (дата обращения: 12.01.2025). Текст: электронный.

192. Hieu, P. T. и др. Zircon U–Pb geochronology and Sr–Nd–Hf isotopic compositions of the felsic dykes from the Dalat zone, southern Vietnam: petrogenesis and geological significance / P. T. Hieu, P. Minh, W. X. Lei, A. T. Q. Nong, K. Kawaguchi, T. C. Cuong // International geology review. – 2022. – Vol. 64. – № 19. – P. 2822.

193. Huy T. Ha. Features of development in Dalat City in the early 20th century and recommendations for its current development // Journal of Science Quy Nhon University. – 2022. – Vol. 15(6). – P.45-55.

194. Bùi Thế Vinh и др. Mineral characteristics and associated mineralization of weathering crust from ankroet complex (K2ak) at Mat camp, Da Lat / Bùi Thế Vinh, T. Phuong Duy // Science and Technology Development Journal - Natural Sciences. – 2020. – Vol. 4. – № 1. – P. First.

195. Новиков, В. М. и др. Каолин-бокситовое месторождение Чаймат (Южный Вьетнам): типоморфные признаки каолинита и механизм формирования зонального профиля бокситоносной коры выветривания гранитов / В. М. Новиков,

Н. М. Боева, Н. С. Бортников, А. П. Жухлистов, В. В. Крупская, Е. Б. Бушуева // Геология рудных месторождений. – 2018. – Vol. 60. – № 6. – P. 575.

196. Tran Q.D. et al. Determination of the Activity Inventory in the Structural Components of the Dalat Nuclear Research Reactor for Its Decommissioning Planning / Q.D. Tran, K.C. Nguyen, B.V. Luong, T.N. Huynh, Q.H. Pham, D.H. Dang Vo, N.D. Nguyen // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2022. – Vol. 2022. – P. 5174696.

197. Шиятов С. Г. и др. Цикличность радиального прироста деревьев в высокогорьях Урала / С. Г. Шиятов, В.С. Мазепа // В кн.: Дендрохронология и дендроклиматология. – Н.: Наука, Сиб. отд-ние, 1986. – С. 134–160.

198. Бахур А. Е. и др. Радиоактивные частицы в почвах Семипалатинского полигона / А. Е. Бахур, В. Т. Дубинчук, Л. А. Березина, Л. И. Мануилова, В. И. Малышев, Б. Р. Берикболов, И. А. Шишков, А. П. Ермилов // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – 1997. – №9. – С. 71–84.

199. Архангельская Т.А., Рихваиов Л П Использование метода осколочной радиографии для изучения уровня и динамики накопления делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев // Горно-геологическое образование в Сибири 100 лет на службе науки и производства Материалы Международной научно-технической конференции – Томск. – 2001. – С. 127-131

200. Архангельская Т.А. Изучение геохимических особенностей годичных колец деревьев из зоны падения Тунгусского метеорита / Т.А. Архангельская // Проблемы геологии и освоения недр: труды Четвертого Международного научного симпозиума имени академика М.А. Усова. – Томск, 2000. – С. 457–458.

201. Берзина И.Г. Обнаружение радиоактивного загрязнения окружающей среды по радиографии растений / И.Г. Берзина // Радиографические исследования в радиогеохимии и смежных областях. – Новосибирск, 1991. – С. 102–103.

202. Миронов А.Г. Авторадиографический метод в геологических исследованиях / А.Г. Миронов // Авторадиографический метод в научных исследованиях. – М.: Наука, 1990. – С. 108–109.

203. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высшая школа, 1988. – 327с.
204. Виноградов А.П. Проблемы геохимии и космохимии. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – 336 с.
205. Markert B. Plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment. – Weinheim: VCH, 1993. – 644 p.
206. Томская область в предвоенные, военные годы и послевоенное восстановление: Юб. стат. сб./Томскстат – Томск, 2020. – 105 с.
207. Ляпина Е.Е. Мониторинг техногенной трансформации городских почв (на примере г. Томска) // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – 2020. – Т. 1. – № 5. – С. 154–160. DOI: 10.23885/2500-395X-2020-1-5-154-160.
208. Барановская Н. В. Ртуть в ряске как индикатор техногенеза на территории России / Н. В. Барановская, А. Ю. Барановская, О. А. Капитонова // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 10. – [С. 23-31].
209. Nguyen, L. S. P. и др. Characteristics of total gaseous mercury at a tropical megacity in Vietnam and influence of tropical cyclones / L. S. P. Nguyen, T. D. Huong Pham, M. T. Truong, T. A. Ngan // Atmospheric pollution research. – 2023. – № 101813.
210. Wang F. Enhanced production of oxidised mercury over the tropical Pacific Ocean: a key missing oxidation pathway / F. Wang, A. Saiz-Lopez, A. Mahajan, J. G'omez Martin, D. Armstrong, M. Lemes, T. Hay, and C. Prados-Roman // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2014. – № 14. – P. 1323–1335. doi: 10.5194/acp-14-1323-2014.
211. Wang S.H et al. Transport characteristics of Chinese haze over Northern Taiwan in winter, 2005-2014 / S.H. Wang, W.T. Hung, S.C. Chang, M.C. Yen // Atmos. Environ. – 2016. – Vol. 126. – P. 76–86.
212. Costa M. F. Mercury in tropical and subtropical coastal environments / M. F. Costa, W. M. Landing, H. A. Kehrig, M. Barletta, C. D. Holmes, P. R. Barrocas, D. C. Evers, D. G. Buck, A. Vasconcellos, S. S. Hacon, J. C. Moreira, and O. Malm //

Environmental Research. – 2012. – Vol.119. – P. 88–100. doi: 10.1016/j.envres.2012.07.008.

213. Барановская, Н. В. Региональная специфика элементного состава волос детей, проживающих на территории Томской области / Н. В. Барановская, Д. В. Наркович, А. Ф. Судыко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 212–220.

214. Наркович, Д. В. Элементный состав волос детей как индикатор природно-техногенной обстановки территории (на примере Томской области): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.36 / Наркович Дина Владимировна. – Томск, 2012. – 21 с.

215. Таловская, А. В. Ртуть в пылеаэрозолях на территории г. Томска / А. В. Таловская, Е. А. Филимоненко, Н. А. Осипова, Е. Г. Язиков // Безопасность в техносфере. – 2012. – №. 2. – С. 30–34.

216. Межибор, А. М. Биогеохимическая характеристика сфагновых мхов и эпифитных лишайников в районах нефтегазодобывающего комплекса Томской области / А. М. Межибор, Т.С. Большунова // Известия Томского политехнического университета. Ресурсы планеты. – 2014. – Т.325. – № 1. – С. 205–215.

217. Межибор, А. М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области: автореф. дис. канд. геол.-мин. наук: 25.00.36 / Межибор Антонина Михайловна. – Томск, 2009.

218. Рихванов, Л. П. Ртуть в почвах Томского региона / Л. П. Рихванов, Н. А. Осипова, Л. А. Петрова // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: Материалы Международного симпозиума. – М.: ГЕОХИ РАН, 2010. – С. 200–202.

219. Lyapina E.E., Peregudina E.V. Mercury pressure in the Tomsk region based on biomonitoring studies // Limnology and Freshwater Biology. – 2022. – P. 1292–1294. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1292.

220. Rydberg, J. и др. Assessing the stability of mercury and methylmercury in a varved lake sediment deposit / J. Rydberg, V. Gälman, I. Renberg, R. Bindler, L. Lambertsson, A. Martínez-Cortizas // Environmental science & technology. – 2008. – Vol. 42. – № 12. – P. 4391–4396.

221. Statistical Review of World Energy. – 2022. – 71st edition. – London, UK. – P. 57
222. Verbrugge B. Global Gold Production Touching Ground: Expansion, Informalization, and Technological Innovation / B. Verbrugge, S. Geenen // Cham: Springer International Publishing. – 2020
223. Veiga M. M., Fadina O. A review of the failed attempts to curb mercury use at artisanal gold mines and a proposed solution / M. M. Veiga, Fadina O. // Extract Ind and Soc. – 2020. – № 7. – P. 1135–1146
224. Prasad, M. N. V. и др. Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems / M. N. V. Prasad, J. Hagemeyer // Springer Verlag. – Berlin, Germany. – 1999.
225. Fernández, V. и др. From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients / V. Fernández, P. H. Brown // Frontiers in plant science. – 2013. – Vol. 4. – P. 289.
226. Chen, S. и др. Tree-ring recorded variations of 10 heavy metal elements over the past 168 years in southeastern China / S. Chen, Q. Yao, X. Chen, J. Liu, D. Chen, T. Ou, J. Liu, Z. Dong, Z. Zheng, K. Fang // Elementa (Washington, D.C.). – 2021. – Vol. 9. – № 1.
227. Fritts H. C. Tree Rings and Climate. Academic Press / H. C. Fritts // New York. – 1976. – P. 567.
228. Zhirnova, D. F. и др. Climatic reactions in the radial growth of *Pinus sibirica* Du Tour from the lower to the upper limit along the Western Sayan Mountains, Siberia / D. F. Zhirnova, L. V. Belokopytova, K. K. Upadhyay, N. N. Koshurnikova, N. B. Mapitov, Y. A. Kholdaenko, E. A. Vaganov, E. A. Babushkina // Forest ecology and management. – 2024. – Vol. 563. – P. 121995.
229. Douglass A. E. Climatic cycles and tree-growth. A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity. – Washington: Carnegie Inst., 1919. – Vol. 1. – P. 127.
230. Schulman E. Dendroclimatic changes in semiarid America. – Tucson, Arizona: University of Arizona Press, 1956. – 142 p.

231. Becker, M. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France / M. Becker // Canadian journal of forest research. – 1989. – Vol. 19. – № 9. – P. 1110–1117.

232. Biondi, F. Climatic signals in tree-rings of *Fagus sylvatica* from the central Apennines. – Italy. Acta Oecol. – 1993. – vol. 14. – P. 57–71.

233. Liang, H. и др. Radial growth response of *Picea crassifolia* to climatic conditions in a dryland forest ecosystem in Northwest China / H. Liang, S. Jiang, A. Muhammad, J. Kang, H. Zhu, X. Li, L. Chen, L. Zhu, J.-G. Huang // Forests. – 2021. – Vol. 12. – № 10. – P. 1382.

234. Niu, Z. и др. Tree-ring $\Delta^{14}\text{C}$ time series from 1948 to 2018 at a regional background site, China: Influences of atmospheric nuclear weapons tests and fossil fuel emissions / Z. Niu, X. Feng, W. Zhou, P. Wang, Y. Liu, X. Lu, H. Du, Y. Fu, M. Li, R. Mei, Q. Li, Q. Cai // Atmospheric environment (Oxford, England: 1994). – 2021. – Vol. 246. – № 118156.

235. Hulst A. DendroCorr - simple powerful software calculate growth, climate response, Trace. Tree Rings Archaeology / A. Hulst, K. Janecka, R.J. Kaczka. Climatology Ecology // Proceedings of the dendrosymposium. – 2015. – № 14. – P. 44–49.

236. Matveev, S. M. и др. Climatic changes in the east-European forest-steppe and effects on Scots pine productivity / S. M. Matveev, Y. G. Chendev, A. R. Lupo, J. A. Hubbart, D. A. Timashchuk // Pure and applied geophysics. – 2017. – Vol. 174. – № 1. – P. 427–443.

237. Büntgen, U. и др. Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia / U. Büntgen, D. C. Frank, R. J. Kaczka, A. Verstege, T. Zwijacz-Kozica, J. Esper // Tree physiology. – 2007. – Vol. 27. – № 5. – P. 689–702.

238. Büntgen, U. и др. 2500 years of European climate variability and human susceptibility / U. Büntgen, W. Tegel, K. Nicolussi, M. McCormick, D. Frank, V. Trouet, J. O. Kaplan, F. Herzig, K.-U. Heussner, H. Wanner, J. Luterbacher, J. Esper // Science (New York, N.Y.). – 2011. – Vol. 331. – № 6017. – P. 578–582.

239. Salzer, M. W. и др. Recent unprecedented tree-ring growth in bristlecone pine at the highest elevations and possible causes / M. W. Salzer, M. K. Hughes, A. G. Bunn, K. F. Kipfmüller // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2009. – Vol. 106. – № 48. – P. 20348–20353.

240. D'Arrigo, R. и др. 1738 years of Mongolian temperature variability inferred from a tree-ring width chronology of Siberian pine / R. D'Arrigo, G. Jacoby, D. Frank, N. Pederson, E. Cook, B. Buckley, B. Nachin, R. Mijiddorj, C. Dugarjav // *Geophysical research letters*. – 2001. – Vol. 28. – № 3. – P. 543–546.

241. Dolezal, J. и др. Climate warming drives Himalayan alpine plant growth and recruitment dynamics / J. Dolezal, V. Jandova, M. Macek, O. Mudrak, J. Altman, F. H. Schweingruber, P. Liancourt // *The Journal of ecology*. – 2021. – Vol. 109. – № 1. – P. 179–190.

242. Lo, Y.-H. и др. Relationships between climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada / Y.-H. Lo, J. A. Blanco, B. Seely, C. Welham, J. P. (hamish) Kimmins // *Forest ecology and management*. – 2010. – Vol. 259. – № 5. – P. 932–942.

243. Назаров А.Н. и др. Перспективы построения 6000-летней хронологии по сосне сибирской для территории Центрального Алтая / А.Н. Назаров, В.С. Мыглан // *Журнал Сибирского федерального университета: Биология*. – 2012. – Т. 5. – № 1 – С.70-88

244. Ning, Q.R. и др. Differences in growth pattern and response to climate warming between *Larix olgensis* and *Pinus koraiensis* in Northeast China are related to their distinctions in xylem hydraulics / Q.R. Ning, X.W. Gong, M.Y. Li, G.Y. Hao // *Agricultural and forest meteorology*. – 2022. – Vol. 312. – № 108724. – P. 108724.

245. Gruber, A. и др. Effects of climate variables on intra-annual stem radial increment in *Pinus cembra* (L.) along the alpine treeline ecotone / A. Gruber, J. Zimmermann, G. Wieser, W. Oberhuber // *Annals of forest science*. – 2009. – Vol. 66. – № 5. – P. 503.

246. Li, Y. и др. A tree-ring chronology spanning 210 years in the coastal area of southeastern China, and its relationship with climate change / Y. Li, K. Fang, C. Cao, D.

Li, F. Zhou, Z. Dong, Y. Zhang, Z. Gan // *Climate research*. – 2016. – Vol. 67. – № 3. – P. 209–220.

247. Fang, K. и др. Drought variation of western Chinese Loess Plateau since 1568 and its linkages with droughts in western North America / K. Fang, Z. Guo, D. Chen, H. W. Linderholm, J. Li, F. Zhou, G. Guo, Z. Dong, Y. Li // *Climate dynamics*. – 2017. – Vol. 49. – № 11–12. – P. 3839–3850.

248. Penninckx, V. и др. Ring width and element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurban forest in central Belgium / V. Penninckx, P. Meerts, J. Herbauts, W. Gruber // *Forest ecology and management*. – 1999. – Vol. 113. – № 1. – P. 23–33.

249. Schweingruber, F. H. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology [Text] / F. H. Schweingruber, D. Eckstein, F. Serre-Bachet, O. U. Braker // *Dendrochronologia*. – N° 8. – 1990. – P. 9–38.

250. Hubbard, R. M. и др. Evidence that hydraulic conductance limits photosynthesis in old *Pinus ponderosa* trees / R. M. Hubbard, B. J. Bond, M. G. Ryan // *Tree physiology*. – 1999. – Vol. 19. – № 3. – P. 165–172.

251. Schreiber, L. Polar paths of diffusion across plant cuticles: new evidence for an old hypothesis / L. Schreiber // *Annals of botany*. – 2005. – Vol. 95. – № 7. – P. 1069–1073.

252. Матвеев С.М. и др. Дедрохронология: учебное пособие / С.М. Матвеев, Д.Е. Румянцев. – Воронеж : «ВГЛТА», 2013. –С. 140.

253. Шишлов, В. И. Организация циклов средообразующих и климатообразующих процессов. II. Трансформация ландшафта и перестройка организации циклов процессов / В. И. Шишлов // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*. – 2009. – Т. 2, № 1. – С. 103–116.

254. Luo, W. Climatic Warming Caused a Transition in Tree Growth Sensitivity from Temperature to Moisture Conditions: Evidence from Multi-Species Tree-Ring Data in the Southeastern Tibetan Plateau / W. Luo, C. Xie, S. Shi, J. Li, G. Wang, X. Bie // *Forests*. – 2015. – Vol.15. – № 241.

255. Paulsen, J. Tree Growth near Treeline: Abrupt or Gradual Reduction with Altitude? / J. Paulsen, U. M. Weber, Ch. Körner // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. – 2000. – Vol. 32. – № 1. – P. 14–20.

256. Jiang, S. и др. Spatial and temporal differences in the response of *Larix sibirica* to climate change in the central Altai Mountains / S. Jiang, H. Liang, P. Zhou, Z. Wang, H. Zhu, J. Kang, J.-G. Huang // *Dendrochronologia*. – 2021. – Vol. 67. – P. 125827.

257. Kang, J. и др. Radial growth responses of two dominant conifers to climate in the Altai Mountains, Central Asia / J. Kang, S. Jiang, J. C. Tardif, H. Liang, S. Zhang, J. Li, B. Yu, Y. Bergeron, S. Rossi, Z. Wang, P. Zhou, J.-G. Huang // *Agricultural and forest meteorology*. – 2021. – Vol. 298–299. – P. 108297.

258. Kharuk, V. I. и др. Mountain taiga in a warming climate: Contrast of Siberian pine growth along an elevation gradient / V. I. Kharuk, I. A. Petrov, A. S. Golyukov, S. T. Im, A. S. Shushpanov // *Forests*. – 2024. – Vol. 15. – № 1. – P. 50.

259. Zheng, L. и др. Climate sensitivity of high altitude tree growth across the Hindu Kush Himalaya / L. Zheng, P. Shi, M. Song, T. Zhou, N. Zong, X. Zhang // *Forest ecology and management*. – 2021. – Vol. 486. – P. 118963.

260. Harvey, J. E. и др. Tree growth influenced by warming winter climate and summer moisture availability in northern temperate forests / J. E. Harvey, M. Smiljanić, T. Scharnweber, A. Buras, A. Cedro, R. Cruz-García, I. Drobyshev, K. Janecka, Ā. Jansons, R. Kaczka, M. Klisz, A. Läänelaid, R. Matisons, L. Muffler, K. Sohar, B. Spyt, J. Stolz, E. van der Maaten, M. van der Maaten-Theunissen, A. Vitas, R. Weigel, J. Kreyling, M. Wilmking // *Global change biology*. – 2020. – Vol. 26. – № 4. – P. 2505–2518.

261. Morice, C. P. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set / C. P. Morice, J. J. Kennedy, N. A. Rayner, J. P. Winn, E. Hogan, R. E. Killick, R. J. H. Dunn, T. J. Osborn, P. D. Jones, I. R. Simpson // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2021. – Vol. 126. – № 3. – e2019JD032361

262. The World Bank Group and the Asian Development Bank. Climate Risk Country Profile: Vietnam. – 2021
263. Vu MT et al. Investigating drought over the Central Highland, Vietnam, using regional climate models / MT. Vu, VS. Raghavan, DM. Pham, SY. Liong // *Journal of Hydrology*. – 2015. – Vol. 526. – P. 265-273
264. Nguyen-Minh T. et al. Meteorological and hydrological drought characteristics and their relationships in the Central Highlands of Vietnam / T. Nguyen-Minh, H. Vu-Thanh, H. Do-Thanh, K. Nguyen-Chinh, H. Duong-Thi-Thanh // *Theor Appl Climatol*. – 2025. – vol. 156 – № 8.
265. Zhirnova, D. F. и др. Spatial-coherent dynamics and climatic signals in the radial growth of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) in subalpine stands along the Western Sayan Mountains / D. F. Zhirnova, L. V. Belokopytova, K. V. Krutovsky, Y. A. Kholdaenko, E. A. Babushkina, E. A. Vaganov // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – № 12. – P. 1994.
266. Zhirnova, D. F. и др. Climate change and tree growth in the Khakass-Minusinsk Depression (South Siberia) impacted by large water reservoirs / D. F. Zhirnova, L. V. Belokopytova, D. M. Meko, E. A. Babushkina, E. A. Vaganov // *Scientific reports*. 2021. – Vol. 11, №1. – P. 14266. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93745-0>
267. Rossi, S. и др. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates / S. Rossi, A. Deslauriers, J. Gričar, J.-W. Seo, C. B. K. Rathgeber, T. Anfodillo, H. Morin, T. Levanic, P. Oven, R. Jalkanen // *Global ecology and biogeography: a journal of macroecology*. – 2008. – Vol. 17. – № 6. – P. 696–707.
268. Rossi, S. и др. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes / S. Rossi, A. Deslauriers, T. Anfodillo, V. Carraro // *Oecologia*. – 2007. – Vol. 152. – № 1. – P. 1–12.
269. Tchebakova, N. M. и др. From vegetation zones to climatotypes: Effects of climate warming on Siberian ecosystems / N. M. Tchebakova, G. E. Rehfeldt, E. I. Parfenova // *Ecological Studies*. – 2010. – P. 427–446.

270. Chen, F. и др. Rapid warming in mid-latitude central Asia for the past 100 years / F. Chen, J. Wang, L. Jin, Q. Zhang, J. Li, J. Chen // *Frontiers of Earth Science in China*. – 2009. – Vol. 3. – № 1. – P. 42–50.
271. Rogers, J. C. и др. Atlantic Arctic cyclones and the mild Siberian winters of the 1980s / J. C. Rogers, E. Mosley-Thompson // *Geophysical research letters*. – 1995. – Vol. 22. – № 7. – P. 799–802.
272. Zheng L. High-altitude tree growth responses to climate change across the Hindu Kush Himalaya / L. Zheng, N.P. Gaire, P. Shi // *Journal of Plant Ecology*. – 2021. – Vol. 14. – №5. – P. 829–842.
273. Ань Ч. Т. Золоторудное месторождение Та Нанг в черносланцевых толщах Центрального Вьетнама // *Геология и геофизика*. – 2015. – Т. 56. – № 10. – С. 1797-1812.
274. Касаткин С.А. Меловые сдвиговые дислокации зоны Далат (юго-восточный Вьетнам) / С.А. Касаткин, Фунг Вань Фать, Ле Дык Ань, В.В. Голозубов // *Тихоокеанская геология*. – 2017. -Т. 36. – №6. – С. 29-42
275. Vũ Như Hùng, Huỳnh Thị Minh Hằng, Trịnh Văn Long, 2004 : Tiềm năng khoáng hoá Thiếc của các thành tạo Granit sáng màu cao nhôm tuổi Creta muộn đối Đà Lạt. Tạp chí các khoa học về Trái Đất, 30(1), 21-30. Tp Hồ Chí Minh
276. Nguyễn Xuân Bao, 2001 : Báo Cáo đề tài Nghiên cứu kiến tạo và sinh khoáng Nam Việt Nam”. Lưu trữ Cục địa chất và khoáng sản Việt Nam. Hà Nội.
277. Nguyễn Kim Hoàng, Phân vùng sinh khoáng và triển vọng, Tạp chí phát triển KH&CN, tập 16, số M2 – 2013, tr 85-96.
278. Trần Trọng Hòa. Hoạt động magma Permi-Trias liên quan tới gắn kết địa khối Đông Dương và địa khu liên hợp Việt-Trung / T. T. Chan, T. A. Chan, N. C. Phạm, A. E. Изох и др. // *Kỷ yếu hội nghị: Nghiên cứu cơ bản trong “khoa học Trái đất và Môi trường”*. 2019. – tr. 37–41
279. Владимиров А.Г., Фан Л.А., Травин А.В., Михеев Е.И., Мурзинцев Н.Г., Анникова И.Ю. Геология и термохронология мелового магматизма юго-восточного вьетнама // *Тихоокеанская геология*. - 2020. - Т.39. - № 4. - С.16-37. - ISSN 0207-4028.

280. Zhang F.F. Paleo-Pacific subduction in Southeast Vietnam: Evidence from Late Cretaceous intrusive rocks in the Dalat zone / F.F. Zhang; Y.J. Wang; X. Qian; P.A. Cawood; C.S. Gan; Y.P. Dong; H.S. Gao; M.X. Wang // *Lithos.* – 2023. – P. 454–455. – 107233

281. Головин А.А. Оценка ущерба окружающей среде от загрязнения токсичными металлами / А.А. Головин, И.А. Морозова, Н.Г. Гуляева, Н.Я. Трефилова // М.: ИМГРЭ. – 2000. – 134 с.

282. Долинина, А. Р. Далат / А. Р. Долинина, М. А. Сюннерберг // Научно-образовательный портал "Большая российская энциклопедия". – 2024. – № 1. – DOI 10.54972/00000001_2024_1_78. – EDN TWIBZX.

283. Ветошкина А.В. Радиоактивные (Th, U) и редкоземельные элементы в природных водах центрального Сихотэ-Алиня (Приморский край) / А.В. Ветошкина, И.Ю. Чекрыжов, А.М. Паничев, Е.А. Вах, Н.В. Барановская, Т.Н. Луценко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 45-56

284. Institute of Medicine. Veterans and Agent Orange: Health Effects of Herbicides Used in Vietnam. Washington // DC: The National Academies Press. – 1994. – P. 832. <https://doi.org/10.17226/2141>.

285. Právělie R. Nuclear weapons tests and environmental consequences: a global perspective / R Právělie // *AMBIO: A Journal of the Human Environment* – 2014. – Vol.43 - № 6. – P. 729-744. doi: 10.1007/s13280-014-0491-1.

286. Infographic: The impact of nuclear tests around the world. Режим доступа URL: <https://www.aljazeera.com/news/2022/8/29/infographic-what-is-the-impact-of-nuclear-tests-around-the-world-interactive>. (Дата обращения 09.05.2025)

287. Fichier: Nuclear use locations world map. Режим доступа URL: https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Nuclear_use_locations_world_map.PNG (Дата обращения 09.05.2025)