

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/18>

УДК 630*181:581.52:574.24



Особенности динамики радиального прироста *Pinus sylvestris* L. при разном уровне промышленного загрязнения на Кольском полуострове

Павел Н. Катютин^{1,2} ✉, PauRussia@binran.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4938-9638>

Ирина В. Лянгузова¹, ILyanguzova@binran.ru <https://orcid.org/0000-0003-3874-9925>

¹ФГБУН Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, ул. Профессора Попова, 2, литер В, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

С начала XXI века во многих странах, в том числе в России на Кольском полуострове, произошло резкое снижение объемов атмосферных выбросов промышленных предприятий, что позволило проследить реакцию растений на уменьшение аэротехногенной нагрузки. В некоторых регионах началось очень медленное восстановление отдельных компонентов нарушенных наземных экосистем, в связи с этим актуальной задачей данного исследования было выявить ответную реакцию радиального прироста стволовой древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на сниженные объемы атмосферных выбросов загрязняющих веществ комбината «Североникель» (Мурманская обл.). На пробных площадях, заложенных в сосняках лишайниково-зеленомошных, удаленных на 60–65 (фоновые районы), 30 (буферная зона) и 10 (импактная зона) км от источника загрязнения, у ослабленных и сильно ослабленных деревьев сосны на высоте 1.3 м от поверхности земли были взяты керны стволовой древесины (20–50 шт.) с помощью бурава Пресслера. Одновременно на каждой пробной площади были отобраны средние образцы верхнего органогенного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов для оценки уровня загрязнения местообитаний тяжелыми металлами (Ni, Cu, Co), содержание кислоторастворимых форм которых определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии. На полуавтоматическом приборе ЛИНТАБ 6 измеряли ширину годичных колец каждого керна, проводили перекрестную датировку и вычисляли индекс синхронности. Установлено, что современный уровень загрязнения тяжелыми металлами местообитаний сохраняется высоким (буферная зона, индекс техногенной нагрузки варьирует 7–18 отн. ед.) и очень высоким (импактная зона, средний индекс техногенной нагрузки составляет свыше 140 отн. ед.). Наиболее ярко ответная реакция радиального прироста сосны на снижение аэротехногенной нагрузки проявляется в импактной зоне, где за период 2000–2019 гг. ширина годичных колец возросла в 2–3 раза по отношению к периоду 1980–1999 гг., и в настоящее время сопоставима или даже превышает фоновые значения. Таким образом, при дальнейшем снижении объемов атмосферных выбросов комбинатом «Североникель» возможно восстановление продуктивности стволовой древесины сосны обыкновенной на загрязненной территории.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, радиальный прирост, жизненное состояние, северная тайга, аэротехногенное загрязнение, Кольский полуостров

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-26-00193, <https://rscf.ru/project/23-26-00193/>).

Благодарности: Авторы выражают признательность Чечельницкой В.А. за помощь в камеральной обработке экспедиционного материала, а также Беляевой А.И. за помощь в проведении химических анализов. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Катютин П. Н. Особенности динамики радиального прироста *Pinus sylvestris* L. при разном уровне промышленного загрязнения на Кольском полуострове / П. Н. Катютин, И. В. Лянгузова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 2. – С. 76–94. – Библиогр.: с. 88–93 (49 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/18>.

Поступила 01.11.2023 *Пересмотрена* 07.12.2023 *Принята* 07.12.2023 *Опубликована онлайн* 16.01.2024

Article

Radial growth of *Pinus sylvestris* L. under industrial pollution on the Kola Peninsula

Paul N. Katjutin^{1,2}✉, PauRussia@binran.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4938-9638>

Irina V. Lyanguzova¹, ILyanguzova@binran.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3874-9925>

¹*Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, ul. Professor Popov, 2, letter B, Saint-Petersburg, 197022, Russian Federation*

²*Saint Petersburg State University, 7-9 Universitetskaya emb., Saint-Petersburg, 199034, Russian Federation*

Abstract

Since the beginning of the 21st century in many countries, including Russia (Kola Peninsula), there has been a sharp decrease in the volume of atmospheric emissions from industrial enterprises, which made it possible to trace the reaction of plants to the reduction of aerotechnogenic load. In some regions, very slow recovery of some components of disturbed terrestrial ecosystems has begun; therefore, the urgent task of this study was to reveal the response of radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stem wood to reduced atmospheric emissions of pollutants from the “Severonickel” Combine (Murmansk Region). At the sample plots, established in lichen-green-moss pine forests, 60–65 (background areas), 30 (buffer zone) and 10 (impact zone) km away from the pollution source, stem wood cores (20–50 pieces) were taken from weakened and severely weakened Scots pine trees at a height of 1.3 m from the ground surface using a Pressler drill. At the same time, average samples of the upper organogenic horizon of Al-Fe-humus podzols were taken from each sample plot to assess the level of habitat contamination by heavy metals (Ni, Cu, Co), the content of acid-soluble forms of which was determined by atomic absorption spectrometry. The width of annual rings of each core was measured on a semi-automatic device LINTAB 6, cross-dated and the synchrony index was calculated. It was found that the current level of heavy metal pollution of habitats remains high (buffer zone, the anthropogenic load index varies 7–18 rel. units) and very high (impact zone, the average anthropogenic load index is over 140 rel. units). The most pronounced response of Scots pine radial growth to the reduction of aerotechnogenic load is manifested in the impact zone, where for the period 2000–2019 the width of annual rings increased 2–3 times in relation to the period 1980–1999, and is now comparable or even exceeds the background values. Thus, with further reduction of atmospheric emissions by the “Severonickel” Combine, it is possible to restore the productivity of Scots pine trunk wood in the polluted area.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., radial growth, life state, northern taiga, aerotechnogenic pollution, Kola peninsula

Funding: This study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF № 23-26-00193, <https://rscf.ru/project/23-26-00193/>

Acknowledgments: The authors express their gratitude to V.A. Chechel'nitskaya for her assistance in the camera processing of the expedition material, and to A.I. Belyaeva for her help in chemical analyses. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Katjutin P. N., Lyanguzova I. V. (2023). Radial growth of *Pinus sylvestris* L. under industrial pollution on the Kola Peninsula. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 2, pp. 76-94 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/18>.

Received 01.11.2023. *Revised* 07.12.2023. *Accepted* 07.12.2023. *Published online* 16.01.2024

Введение

В настоящее время на территории многих регионов Российской Федерации по-прежнему сохраняются повышенные уровни загрязнения, как по ряду контролируемых показателей, так и по комплексным оценкам, согласно многолетним данным мониторинга Росгидромета [12]. К умеренно опасной и опасной категориям загрязнения продолжают относиться почвы вблизи предприятий черной и цветной металлургии, именно эти отрасли промышленности вносят доминирующий вклад в загрязнение почв свинцом и медью в 5-километровой зоне промышленных предприятий [28]. Мурманская область, расположенная за Полярным кругом и занимающая практически полностью Кольский полуостров, – один из наиболее индустриально развитых регионов России, на ее территории расположены крупные предприятия цветной и черной металлургии, минеральных удобрений и строительных материалов, лесной, деревообрабатывающей и рыбной промышленности. Газопылевые выбросы промышленных предприятий оказывают негативное воздействие на природу, что задокументировано многочисленными публикациями. 40-летний мониторинг состояния сосновых лесов на разном удалении от комбината «Североникель» (Мурманская обл.) позволил оценить динамические изменения в лесных экосистемах при высокой и сниженной аэротехногенной нагрузке [8, 39]. В зоне воздействия аэротехногенного загрязнения зарегистрировано увеличение продолжительности жизни хвои *Pinus sylvestris* L. и уменьшение ее поврежда-

емости, улучшение жизненного состояния древостоев, снижение уровня накопления тяжелых металлов в ассимиляционных органах растений [32, 40, 47].

Годичный или радиальный прирост древесных растений является основой дендрохронологических и дендроэкологических исследований вследствие высокой чувствительности к воздействию различных внешних факторов (климатических, экотопических, антропогенных). Показана высокая степень скоррелированности ширины годичных колец *Larix sibirica* L. с разными экологическими факторами (климатическими, техногенного загрязнения, вулканической деятельностью) [38]. Выявлены значимые корреляции между шириной годичных колец и погодой в вегетационный период [2, 13, 48].

В меньшей степени изучены взаимосвязи радиального прироста ствола деревьев с внутриценотическими факторами, конкурентными отношениями особей в составе древостоев и популяций древесных видов, которые проявляются в естественной дифференциации деревьев по степени их развития, а также по уровню жизненного состояния. Установлена значимая корреляция между радиальным приростом ствола и основными показателями жизнеспособности хвойных деревьев, такими как плотность кроны [7, 33, 34] и масса хвои [49]. В южной части Северо-Восточного Алтая радиальный прирост у сильно ослабленных особей *Pinus sibirica* Du Roi в возрасте 60 лет и 140 лет на 35% и 65% меньше, чем у здоровых [6]. У суховершинных де-

ревьев лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), произрастающих в одновозрастном древостое на многолетнемерзлой почве склона северной экспозиции, средняя ширина годовых колец на всех уровнях высоты ствола значительно меньше, чем у здоровых [20]. На Кольском полуострове в средневозрастных лишайниково-зеленомошных и зеленомошных сосновых лесах в начале периода наблюдения (1960 г.) разница в радиальном приросте здоровых и отмирающих особей *Pinus sylvestris* составляла около 30%, а к концу периода исследования (2010 г.) она увеличилась примерно до 70% [37]. Радиальный прирост ослабленных и сильно ослабленных деревьев *Pinus sylvestris* достоверно не различался в обоих типах сосновых лесов.

В последнее время возрастает интерес к воздействию техногенеза на радиальный прирост древесных растений, в частности *Pinus sylvestris*, обзор современных публикаций на эту тему приведен в работе [26]. Аэротехногенное загрязнение, как правило, вызывает снижение ширины годовых колец древесных растений, но степень его воздействия проявляется по-разному: от ярко выраженного резкого снижения радиального прироста многих древесных пород в зоне влияния промышленных предприятий [16, 31, 32] до полного отсутствия связи этого показателя с концентрацией диоксида серы в воздухе [25]. В некоторых случаях даже отмечалось увеличение радиального прироста (обычно кратковременное) или ширины годового слоя ранней и поздней древесины деревьев в условиях атмосферного загрязнения [1, 29].

Целью настоящей работы было выявление особенностей радиального прироста ослабленных и

сильно ослабленных деревьев сосны обыкновенной при разном уровне промышленного загрязнения.

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Исследование проводили в 2021-2022 гг. в западной части Кольского полуострова в сосновых лесах, расположенных в юго-юго-западном и северо-восточном направлении на разном удалении от комбината «Североникель» (г. Мончегорск). Металлургический комбинат был основан в середине 30-х годов прошлого века в Мурманской области для производства цветных металлов из полиметаллических руд. На различных этапах производственного цикла в атмосферу поступает двуокись серы с примесью мелкодисперсной полиметаллической пыли, которая содержит смеси сульфидов и оксиды металлов, частицы меди, никеля и кобальта. В результате многолетнего техногенного воздействия комбината на окружающую среду значительные территории оказались трансформированы. На конец XX века общая площадь зоны загрязнения от деятельности комбината составляла по разным оценкам около 100 тыс. га. На площади 3,7 тыс. га леса оказались полностью уничтожены и превратились в техногенную пустошь [24].

Согласно данным Кольской горно-металлургической компании, в последние два десятилетия наблюдается значительное сокращение объемов атмосферных выбросов (рис. 1). При сравнении значений выбросов в 2021 г. с их максимальными величинами, которые наблюдались в 1980-х гг., поступление в атмосферу сернистого ангидрида и полиметаллической пыли снизилось в 15 раз и 25 раз соответственно.

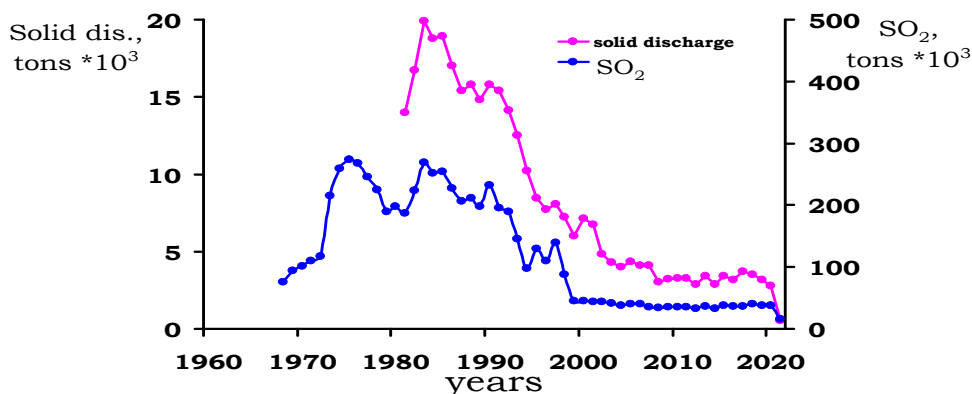


Рисунок 1. Динамика объемов атмосферных выбросов диоксида серы и твердых веществ комбинатом «Североникель» (АО «Кольская ГМК»)

Figure 1. Dynamics of atmospheric emissions of sulfur dioxide and solid dust by the “Severonickel” Combine (Kola MMC)

Источник: по данным Позняков, 1999; Дубровский, 2000; Ежегодник ГМК, 2007, 2010; <https://www.nornickel.ru/>; <https://www.kolagmk.ru/>

Source: according to Poznyakov, 1999, Dubrovsky, 2000; GМК, 2007, Yearbook..., 2010; <https://www.nornickel.ru/>; <https://www.kolagmk.ru/>

Согласно лесорастительному районированию, исследуемые сосновые сообщества относятся к Северо-таежному району европейской части Российской Федерации [17]. В Мурманской области сосновые леса занимают 2.2 млн га или 43% покрытой лесом площади [18] и сформированы низкополнотными древостоями естественного происхождения. Для абсолютного большинства сосновых древостоев свойственна высокая разреженность, малая сомкнутость и низкие значения продуктивности, наиболее часто встречаются сосняки лишайниково-зеленомошные и лишайниковые [27, 31]. В фоновых районах в лишайниково-зеленомошных лесах общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 16–20%, а проективное покрытие мохово-лишайникового яруса варьирует в пределах 70–95% [8].

Сбор данных

Для выявления воздействия фактора аэротехногенного загрязнения все растительные сообщества подбирали в однотипных местообитаниях с учетом положения в макро- и мезорельефе, сукцессионного статуса и типа почвы. В импактной зоне (10–15 км от комбината) ввиду полного разрушения мохово-лишайникового покрова определение типовой принадлежности сообществ проводилось по косвенным признакам. В первую очередь принима-

лись во внимание такие характеристики, как состав и возраст древесного яруса, видовой состав кустарничков и их участие в сложении напочвенного покрова, условия увлажнения корнеобитаемого слоя.

При описании сообществ закладывали пробные площади (ПП) размером 50 x 20 м, в пределах которых проводили сплошной учет и нумерацию деревьев, измеряли их диаметр ствола и высоту (табл. 1). Категорию жизненного состояния определяли глазомерно по степени ажурности кроны с учетом дехромации и дефолиации ассимиляционного аппарата [21]. Было выделено 5 категорий состояния деревьев: I – здоровые; II – ослабленные; III – сильно ослабленные; IV – усыхающие; V – сухие.

На каждой пробной площади отбирали керны древесины с восточной – юго-восточной стороны при помощи бурава Пресслера на высоте 1.3 м у модельных деревьев сосны, которые относились к ослабленным и сильно ослабленным категориям жизненного состояния, которые наиболее распространены в лесах северной тайги [4, 37, 46]. Всего было взято 248 кернов (табл. 2).

На каждой ПП отбирали не менее 5 индивидуальных образцов органогенного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов (лесной подстилки), которые

объединяли для получения средних проб. Конечное определение содержания кислоторастворимых форм Ni, Cu, Co в образцах подстилки проводилось в вытяжке 1.0 N HCl на спектрометре КВАНТ–Z.ЭТА ЭТА (Kortek, Moscow, Russia) атомно-абсорбционным методом.

В камеральных условиях определяли возраст и ширину годичных колец на полуавтоматической установке LINTAB-6 (Frank Rinn, Germany) с применением специализированного пакета TSAP Win с точностью 0.01 мм [35, 42]. Для лучшей видимости границы между соседними кольцами поверхность керн зачищали канцелярским ножом.

Анализ данных

Для оценки уровня загрязнения местообитаний тяжелыми металлами рассчитывали индекс техногенной нагрузки (ИТН), который представляет собой превышение суммарного содержания кислоторастворимых форм преобладающих металлов

(Ni, Cu и Co) в лесной подстилке над их фоновым содержанием [21].

Для анализа использовали усредненные данные радиального прироста модельных деревьев в пределах пробных площадей, расположенных на разном удалении от комбината. Средние значения определяли по 5-летиям и 20-летиям для периода с 1955 по 2020 гг. Из-за недостаточного количества деревьев старше 65 лет (которые заселились до 1955 г.) на некоторых пробных площадях значения прироста за начальный период жизни у таких особей в учет не принималось. Перекрестную датировку выполняли с помощью программы TSAP Win и рассчитывали коэффициенты синхронности (GLK).

В связи с многократным сокращением объемов атмосферных выбросов загрязняющих веществ на комбинате «Североникель» (рис. 1)

Таблица 1

Краткая таксационная характеристика древостоев сосны обыкновенной в фоновых районах, буферной и импактной зонах

Table 1

Brief taxation characteristics of Scots pine stands in background, buffer and impact zones

ПП Sample plot	Координаты Geographical coordinates	Расстояние до комбината, км Distance, km	Направление от комбината Direction	Древостой, % Stand, %	G, м ² /га	D, см	H, м	N, шт./га
Фоновые районы Background zone								
1 (L99)	67°48'54"N 31°19'12"E	65	ЗЮЗ	95P5B	26.4	15.0	14.2	1420
2 (Y20)	67°30'59"N 31°46'50"E	64	ЮЮЗ	96P4B	10.6	10.4	12.9	1225
Буферная зона Buffer zone								
3 (M27)	68°06'53"N 33°19'30"E	30	СВ	90P10B	25.6	10.3	13.0	2750
4 (CH3)	67°38'12"N 32°42'11"E	31	ЮЮЗ	93P7B	12.8	13.0	15.2	1033
Импактная зона Impact zone								
5 (M10)	68°00'24"N 32°55'29"E	11	СВ	84P16B	12.5	7.6	8.8	2333
6 (M29)	67°49'21"N 32°46'28"E	11	ЮЮЗ	87P13B	14.3	8.3	10.3	2283

Примечание: G – сумма площадей сечения, м²/га; D – диаметр ствола на высоте 1.3 м, см; H – высота, м; N – количество стволов, шт./га; P – сосна; B – береза. В скобках приведено полевое обозначение ПП.

Note: G – basal area, м²/ha; D – diameter at the breast height (DBH), cm; H – tree height, m; N – density, trees/ha; P – *Pinus sylvestris*; B – *Betula pubescens*. Field sample plot is indicated in brackets.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations.

с начала XXI века, интересно было проследить ответную реакцию радиального прироста деревьев сосны на снижение аэротехногенной нагрузки. Был выделен временной промежуток с 1980 по 2019 гг., который был разделен на два периода: 1980–1999 гг. (с высокой интенсивностью промышленного загрязнения атмосферы) и 2000–2019 гг. (при сниженном объеме атмосферных выбросов).

Статистическую обработку результатов проводили в стандартных пакетах Statistica 12

(StatSoft), Excel 2016 (Microsoft, USA) с использованием ANOVA, корреляционного и регрессионного анализа. Для оценки значимости различий использовали параметрические критерии Фишера (F) и Стьюдента (t), а также непараметрические критерии Краскела–Уоллиса (H) и Манна–Уитни (z). Данные представлены в виде значений медиан и их квартилей (Q_{25} и Q_{75}), либо среднеарифметических значений и их стандартного отклонения.

Характеристика модельных деревьев сосны обыкновенной, с которых отбирались керны

Таблица 2

Table 2

Scots pine trees from which were taken patterns

ПП Sample plot	Год отбора кернов Collection time	Число кернов Patterns number			Возраст, лет Age, years	Диаметр, см DBH, cm	Высота, м Height, m
		всего total	ослабленные weak	сильно ослабленные extremely weak			
Фоновые районы Background zone							
1	2016	33	18	15	52–69	7.8–27.2	10.2–17.5
2	2023	25	9	16	48–59	12.3–21.2	9.0–12.3
Буферная зона Buffer zone							
3	2021	54	21	33	64–75	7.7–21.5	7.8–14.1
4	2021	46	18	28	53–66	9.4–24.6	6.3–15.5
Импактная зона Impact zone							
5	2022	48	12	36	56–70	4.0–19.0	6.0–11.0
6	2023	42	9	33	53–66	5.7–19.0	5.0–12.0

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Результаты и обсуждение

В фоновых сосновых лесах Кольского полуострова среднее значение суммарного содержания кислоторастворимых форм Ni, Cu и Co в органическом горизонте Al-Fe-гумусовых подзолов составляет 20.0 ± 0.5 мг/кг, при расчете ИТН оно было принято за 1. В настоящее время в фоновом районе на ПП2 наблюдается увеличение индекса техноген-

ной нагрузки до 2.5 отн. ед. (рис. 2), которое не сказывается на состоянии лесных экосистем.

По мере приближения к комбинату «Североникель» возрастает уровень загрязнения почв тяжелыми металлами, что выражается в увеличении значений ИТН (рис. 2). На территории буферной зоны средние значения медиан и размах варьирования ИТН на ПП3 и ПП4, удаленных от комбината на 30 км в северо-восточном и юго-западном

направлениях соответственно, различаются более чем в 2 раза и составляют соответственно 7.6 (7.1–8.0) и 18.1 (16.2–18.9) отн. ед., что обусловлено преобладанием ветров, дующих в юго-западном направлении от комбината. На территории импакт-

ной зоны в северо-восточном и юго-западном направлениях от комбината средние значения медиан ИТН достоверно не различаются на ПП5 и ПП6 ($z=1.59$, $p=0.11$) и в среднем составляют 142 отн. ед.

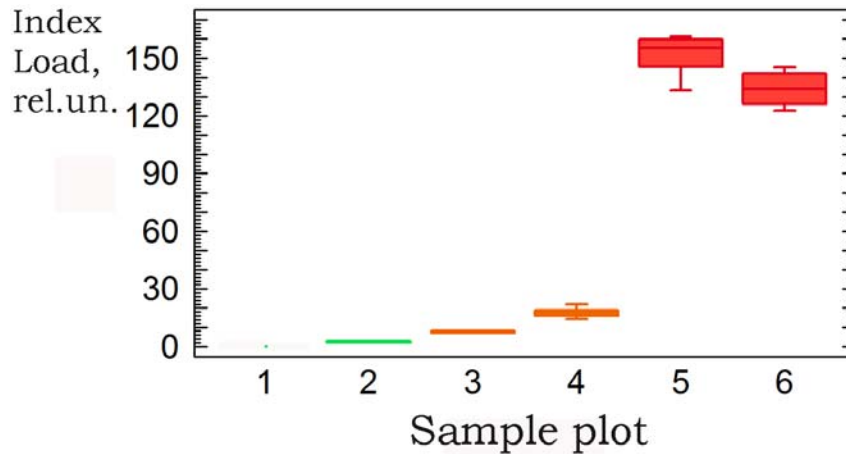


Рисунок 2. Индекс техногенной нагрузки на исследуемых пробных площадях в фоновых районах (ПП1 и ПП2), буферной (ПП3 и ПП4) и импактной (ПП5 и ПП6) зонах

Figure 2. Index of technogenic load on the studied sample plots in the background areas (SP1 and SP2), buffer (SP3 and SP4) and impact (SP5 and SP6) zones

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Интервал коэффициентов синхронности (*GLK*) со средним значением, полученным для каждой пробной площади, составляет 65–72%. В качестве примера в табл. 3 приведено распределение деревьев с разным уровнем синхронности на пробных площадях из фонового района (ПП2), буферной (ПП4) и импактной (ПП6) зон. Согласно полученным данным, по мере приближения к источнику загрязнения снижаются среднее значение коэффициента синхронности и количество деревьев с достоверными значениями *GLK*.

За период с 1950 по 2023 г. средний радиальный прирост сосны варьирует в пределах от 0.70 до 1.25 мм в год и на территории с разным уровнем загрязнения местообитаний тяжелыми металлами, достоверно не различается ($t = 2.0$, $p = 0.37$; $F = 1.04$, $p > 0.01$).

Во всех исследованных сообществах максимальные значения прироста были зафиксированы за первые 10 лет жизни деревьев, которые приходились на 1950-60-е годы прошлого столетия (рис. 3). Но в одном случае (ПП2) этот период наступил

позже (конец 70-х годов), что связано с меньшим возрастом древесного яруса (рис. 36). В фоновых районах максимальные значения прироста достигали 2.20 ± 0.10 мм в год, что выше в 1.3–1.5 раза, чем в буферной и импактной зонах ($F = 234.8$, $p < 0.005$).

Таблица 3

Распределение деревьев (%) в фоновом районе, буферной и импактной зонах с разными значениями коэффициента синхронности *GLK*

Table 3

Distribution of trees (%) on sample plots of the background, buffer and impact zones for different values of *GLK*

<i>GLK</i> , %	<i>p</i>	ПП 2 SP2	ПП 4 SP4	ПП 6 SP6
≥66	<0.01	88	78	65
60-65	0.01–0.05	0	17	17
≤60	>0.05	12	4	17
Всего Total		100	100	100

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

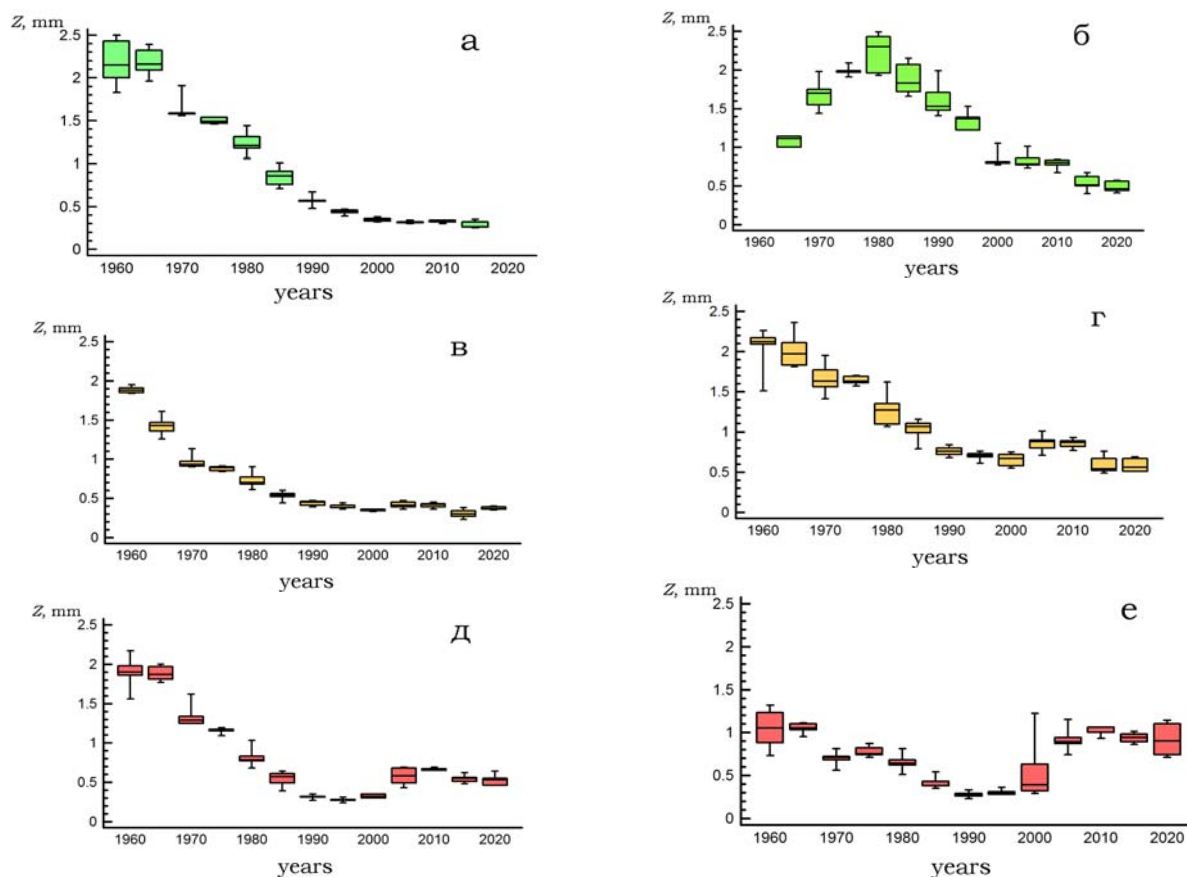


Рисунок 3. Динамика радиального прироста (Z) деревьев *Pinus sylvestris* на высоте 1.3 м от поверхности земли в фоновых районах (а, б), буферной (в, г) и импактной (д, е) зонах

Figure 3. Dynamics of radial growth (Z) of *Pinus sylvestris* trees at a height of 1.3 m from the ground surface in background (a, b), buffer (c, d) and impact (e, f) areas

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Минимальные значения прироста варьируют от 0.27 до 0.60 мм в год и достоверно не различаются за весь период наблюдений ($t = 2.1, p = 0.36; F = 0.65, p > 0.01$). Однако периоды времени, в которые зафиксированы минимальные значения, различаются. Для фоновых районов период с минимальными значениями радиального прироста четко выражен с 2000 по 2020 гг. (рис. 3а и 3б). В буферной зоне минимальные значения прироста сосны наблюдаются раньше на 10 лет, т.е. этот период более растянут во времени. В импактной зоне начало такого периода совпадает с таковым в буферной зоне, но продолжительность этого периода ограничена лишь одним десятилетием 1990-2000 гг., а затем происходит увеличение радиального прироста (рис. 3д и 3е).

Абсолютные величины минимальных значений радиального прироста деревьев и продолжительность периода с минимальными значениями на загрязненной территории больше в 3–6 раз, чем аналогичные параметры для подроста сосны, который находится в условиях жесткого подавления материнским пологом в сосновых лесах Кольского полуострова [14].

Для большинства исследованных древостоев характерно постепенное снижение прироста и относительная стабилизация параметра на постоянном уровне (рис. 3). При аппроксимации основного тренда радиального прироста использовали линейное регрессионное уравнение (табл. 4).

Результаты регрессионного анализа динамики среднего радиального прироста ($Z_5=a+bx$) ослабленных и сильно ослабленных деревьев сосны обыкновенной, произрастающих на разном расстоянии от комбината

Table 4

Regression analysis of the dynamics of average radial growth of weak and extremely weak Scots pine trees growing at different distances from the combine (model $Z_5=a+bx$)

Период усреднения, лет Average period, years	ПП Sample plot	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Se</i>	<i>T</i>
Фоновые районы Background zone							
5	2	57	-0.79	<i>a</i>	2.5	0.12	21.4***
				<i>b</i>	-0.15	0.013	-11.24***
20	2	57	-0.82		3.2	0.18	17.4***
					-0.61	0.0058	-10.7***
Буферная зона Buffer zone							
5	4	65	-0.88	<i>a</i>	2.0	0.066	30.2***
				<i>b</i>	-0.12	0.0083	-15.1***
20	4	65	-0.84	<i>a</i>	2.5	0.12	21.5***
				<i>b</i>	-0.47	0.038	-12.4***
Импактная зона Impact zone							
5	5	72	-0.82	<i>a</i>	1.6	0.076	21.5***
				<i>b</i>	-0.11	0.010	-11.3***
20	5	72	-0.77	<i>a</i>	1.9	0.10	18.0***
				<i>b</i>	-0.36	0.036	-10.2***
5	6	75	0.03	<i>a</i>	0.72	0.078	9.3***
				<i>b</i>	0.0025	0.0096	0.25
20	6	75	-0.37	<i>a</i>	1.22	0.12	10.6***
				<i>b</i>	-0.14	0.041	-3.5***

Примечание: *N* – объем анализируемой выборки; *R* – коэффициент корреляции; *K* – коэффициенты уравнения; *M* – значения коэффициентов; *Se* – ошибка коэффициентов регрессии; *T* – расчетное значение критерия Стьюдента; *, **, *** – коэффициенты регрессионных уравнений и корреляции отличны от нуля при уровнях значимости *p* соответственно 0.05, 0.01, 0.001.

Note: *N* – volume of analyzed sample; *R* – correlation coefficient; *K* – equation coefficients; *M* – coefficient values; *Se* – standard error; *T* – calculated value of Student's statistics; *, **, *** – coefficients of regression equations and correlations are different from zero at *p*-value of 0.05, 0.01, 0.001 respectively.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

В отличие от фонового района и буферной зоны, на территории импактной зоны линейное снижение радиального прироста сосны регистрируется не во всех случаях (табл. 4). Отсутствие значимой связи на ПП6 обусловлено выраженной бимодальностью в динамике прироста за счет его относительно высоких значений (~1 мм в год) в периоды 1955-1965 гг. и 2000-2020 гг. (рис. 3е). Согласно лесоводственным и дендрохронологическим

представлениям, слабая выраженность тренда и отсутствие кривой большого роста характерны для деревьев, которые растут в пессимальных условиях и связаны с ограничением роста со стороны внешних факторов [3, 30, 41, 45]. Ограничения в росте обусловлены как генетически, так и влиянием внешних факторов абиотического или антропогенного происхождения. В условиях отсутствия или слабой внутривидовой и межвидовой конкуренции

со стороны древесных растений на начальных стадиях восстановления (например, при зарастании залежей, после рубки или пожара) радиальный прирост достигает максимальных значений и отличается высокой вариабельностью [5, 43]. В дальнейшем на фоне возрастания конкуренции между растениями за ресурсы окружающей среды увеличение значений радиального прироста не происходит. Для разреженных лесов на северном пределе распространения это связано с недостатком питательных элементов в почве [15, 19, 23]. У последующих поколений, которые появляются под пологом материнского древостоя, в возрастном тренде отсутствует начальный период с повышенной величиной радиального прироста [14].

Согласно нашим расчетам, снижение прироста по мере роста деревьев происходит быстрее в фоновых сосняках, чем в условиях аэротехногенного загрязнения. Выявленная закономерность проявляется при усреднении, как по 5-тилетиям, так и по 20-летним периодам (табл. 4), и обусловлена различиями в величине прироста на начальных этапах роста деревьев, когда прирост достигает максимальных значений. Данное различие составляет 20–25% и 30–40% в пределах буферной и импактной зон соответственно.

Корреляционный анализ данных радиального прироста сосны и объемов атмосферных выбросов диоксида серы и полиметаллической пыли выявил различия во взаимосвязи этих параметров при отсутствии атмосферного загрязнения и при аэротехногенной нагрузке. В фоновых районах Кольского полуострова зарегистрированы высокие значения коэффициентов корреляции ($r = 0.88–0.94$, $p < 0.05$) между кривой роста деревьев и объемом атмосферных выбросов, как диоксида серы, так и полиметаллической пыли. Однако данное совпадение является случайным, поскольку снижение радиального прироста обусловлено возрастанием диаметра ствола с увеличением возраста дерева, а вовсе не связано с интенсивностью эмиссии загрязняющих веществ. На территории буферной зоны взаимосвязь между указанными параметрами либо отсутствует, либо она аналогична наблюдаемой в фоновых районах ($r = 0.08$, $p > 0.05$; $r = 0.60$, $p < 0.05$).

В пределах импактной зоны установлена значимая отрицательная корреляция ($r = -|0.51–0.81|$, $p < 0.05$) между радиальным приростом сосны и объемами атмосферных выбросов диоксида серы и полиметаллической пыли комбинации «Североникель», что можно рассматривать, как ответную реакцию ростовых процессов на снижением аэротехногенной нагрузки.

Сравнительный анализ радиального прироста деревьев сосны за два периода исследований (1980–1999 и 2000–2019 гг.) показал различия в реакции этого параметра на снижение аэротехногенного загрязнения (табл. 5). В фоновых условиях во второй период наблюдений произошло достоверное уменьшение радиального прироста в 1.7–2.1 раза по отношению к первому периоду. Снижение данного параметра не связано с уменьшением интенсивности аэротехногенного загрязнения, а обусловлено увеличением возраста дерева вследствие возрастания диаметра ствола, что неоднократно отмечали и другие исследователи [22, 31, 44].

На территории буферной зоны наблюдается различная реакция радиального прироста на снижение интенсивности аэротехногенного загрязнения (табл. 5). На ППЗ, удаленной на 30 км от источника загрязнения в северо-восточном направлении, выявлено достоверное снижение радиального прироста во второй период наблюдений, что характерно для фоновых сосняков. На ПП4, удаленной также на 30 км от источника загрязнения, но в юго-западном направлении, различия в значениях радиального прироста за два сравниваемых периода недостоверны. Возможной причиной этих различий является отмеченная выше 2-кратная разница в уровне загрязнения лесной подстилки тяжелыми металлами (рис. 2).

Радиальный прирост сосны обыкновенной в фоновых районах, буферной и импактной зонах в периоды с высокой (1980–1999 гг.) и низкой (2000–2019 гг.) интенсивностью атмосферных эмиссий загрязняющих веществ

Table 5

Radial growth of Scots pine trees in background area, buffer and impact zones in periods with high (1980-1999) and low (2000-2019) intensity of atmospheric emissions of pollutants

ПП Sam- ple Plot	Период Period	Медиана Median	Квартиль Q25	Квартиль Q75	<i>z</i> Mann– Whitney test	<i>p</i> <i>p</i> -value
Фоновые районы Background zone						
1	1980–1999	0.62	0.53	0.86	4.58	0.0000
	2000–2019	0.36	0.34	0.40		
2	1980–1999	1.48	1.20	1.76	4.84	0.0000
	2000–2019	0.70	0.54	0.80		
Буферная зона Buffer zone						
3	1980–1999	0.44	0.37	0.50	2.25	0.025
	2000–2019	0.40	0.36	0.42		
4	1980–1999	0.71	0.64	0.89	–0.55	0.579
	2000–2019	0.77	0.65	0.86		
Импактная зона Impact zone						
5	1980–1999	0.34	0.31	0.45	–4.07	0.0000
	2000–2019	0.61	0.55	0.68		
6	1980–1999	0.33	0.29	0.41	–5.40	0.0000
	2000–2019	0.97	0.90	1.07		

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

В пределах импактной зоны ответная реакция радиального прироста сосны на снижение интенсивности аэротехногенной нагрузки выражена наиболее ярко. В настоящее время значения медианы радиального прироста в 1.8–3 раза превышают таковые в первый период наблюдений (табл. 5). Сопоставление данных из импактной зоны и фонового района показывает, что в условиях сниженной аэротехногенной нагрузки (2000–2019 гг.) значения

медиан радиального прироста значительно превышают таковые в фоновом районе. Иными словами, закономерности изменения радиального прироста сосны с увеличением возраста существенно различаются в фоновых условиях (при отсутствии загрязнения окружающей среды) и на территории импактной зоны (при сильном уровне загрязнения).

Полученные нами результаты хорошо согласуются с данными других исследователей, прово-

дивших изучение динамики радиального прироста *Pinus sylvestris* при различном уровне аэротехногенного загрязнения на Кольском полуострове [31, 32]. Авторы приведенных публикаций также регистрировали наименьшие величины радиального прироста *Pinus sylvestris* в импактной зоне по сравнению с его трендом в фоновых районах Кольского полуострова, особенно в период высокой интенсивности аэротехногенной нагрузки (1980–1995 гг.). Однако при резком снижении объемов атмосферных выбросов загрязняющих веществ, начиная с 2000 г., отмечается увеличение радиального прироста на 10–15%. В период 2000–2014 гг. радиальный прирост *Pinus sylvestris* в импактной зоне достоверно либо не отличается от его значений в фоновых сосновых лесах, либо регистрируется его 2-кратное увеличение [31, 32].

Заключение

В результате проведенных исследований в фоновых сосновых лесах Кольского полуострова и на территории, подвергающейся аэротехногенному загрязнению, установлено, что фитотоксичность Al-Fe-гумусовых подзолов сохраняется высокой в буферной зоне (индекс техногенной нагрузки варьирует 7–18 отн. ед.) и очень высокой в импактной зоне (средний индекс техногенной нагрузки со-

ставляет свыше 140 отн. ед.), вследствие загрязнения верхнего органогенного горизонта почвы тяжелыми металлами.

В условиях загрязнения минимальные значения радиального прироста сосны обыкновенной, составляющие 0.25–0.40 мм в год, зарегистрированы в период с 1985 по 1995 гг. За период с 2000 по 2022 гг. средний радиальный прирост ослабленных и сильно ослабленных деревьев сосны стабильно возрастает. В настоящее время радиальный прирост сосны составляет 0.40–0.50 мм в год, что соответствует значениям для ослабленных и сильно ослабленных деревьев, произрастающих в фоновых районах.

Наиболее ярко ответная реакция радиального прироста сосны на снижение аэротехногенной нагрузки проявляется в импактной зоне, где за период 2000–2019 гг. ширина годичных колец возросла в 2–3 раза по отношению к периоду 1980–1999 гг., и в настоящее время сопоставима или даже превышает фоновые значения. Таким образом, при дальнейшем снижении объемов атмосферных выбросов комбинатом «Североникель» возможно восстановление продуктивности стволовой древесины сосны обыкновенной на загрязненной территории.

Список литературы

1. Алексеев, А. С. Колебания радиального прироста в древостоях при атмосферном загрязнении / А. С. Алексеев // Лесоведение. – 1990. – № 2. – С. 82–86.
2. Ачиколова, Ю. С. Особенности радиального роста сосны сибирской в условиях меняющегося климата горного хребта Хамар-Дабан / Ю. С. Ачиколова, А. А. Агеев, С. А. Астапенко, А. Н. Головина // Лесохозяйственная информация. – 2023. – № 3. – С. 37–54. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.3.03.
3. Битвинская, Т. Т. Дендроклиматические исследования / Т. Т. Битвинская. – Л., 1974. – 170 с.
4. Горшков, В. В. Радиальный прирост сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в северотаежных лишайниковых сосновых лесах и редколесьях / В. В. Горшков, Н. И. Ставрова, П. Н. Катютин, А. Ю. Лянгузов // Известия РАН. Сер. Биологическая. – 2021. – № 2. – С. 200–210. DOI: 10.31857/S0002332921020053.
5. Демаков, Ю. П. Динамика радиального прироста деревьев в сосняках лишайниково-мшистых заповедника «Большая Кокшага» / Ю. П. Демаков // Научные труды Государственного природного заповедника «Большая Кокшага». – 2013. – № 6. С. 143–162.
6. Демидко, Д. А. Связь радиального прироста и жизненного состояния у деревьев кедра сибирского / Д. А. Демидко, С. А. Кривец, Э. М. Бисирова // Вестник Томского гос. ун.-та. Биология. – 2010 – № 4. – С. 68–80.
7. Демидко, Д. А. Состояние кедровых древостоев Северо-Восточного Алтая и методы его оценки / Д. А. Демидко // Лесоведение. – 2011. № 1. – С. 19–27.

8. Динамика лесных сообществ Северо-Запада России / В. Т. Ярмишко, И. Ю. Баккал, О. В. Игнатова [и др.]. – СПб., 2009. 276 с.
9. Дубровский, В. Л. О комбинате «Североникель» / В. Л. Дубровский // Ежегодник Лапландского гос. природного биосферного заповедника. Мурманск: Мурманское областное книжное издательство, 2000. – № 1. – С. 44–45.
10. Ежегодник Кольской ГМК. – Мурманск, 2007. – № 5. – 87 с.
11. Ежегодник Кольской ГМК. – Мурманск, 2010. – № 8. – 81 с.
12. Ежегодник: Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2020 г. – 2021. – 128 с. – URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/tpp/tpp_2020.pdf/ (дата обращения 31.10.2023 г.).
13. Иванов, В. П. Радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при ингибировании / В. П. Иванов, С. И. Марченко, Д. И. Нартов, Л. П. Балухта // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2021. – № 1. – С. 69–81. – DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-69-81
14. Катютин, П. Н. Начальный радиальный прирост разных поколений сосны обыкновенной в средневозрастных сосновых лесах Кольского полуострова / П. Н. Катютин, Н. И. Ставрова, В. В. Горшков [и др.] // Лесоведение – 2021. – № 5. – С. 472–493. DOI: 10.31857/S0024114821040057
15. Кашулина, Г. М. Аэрогенная трансформация почв европейского субарктического региона. Ч. 2. / Г. М. Кашулина. – Апатиты, 2002. – 234 с.
16. Кладько, Ю. В. Радиальный рост древесных видов в условиях высокой антропогенной нагрузки г. Красноярск / Ю. В. Кладько, В. Е. Бенькова // Сибирский лесной журнал. – 2018. – № 4. – С. 49–57. – DOI: 10.15372/SJFS20180406
17. Лесной кодекс Российской Федерации: от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 04.08.2023) // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=133350> (дата обращения: 30.10.2023).
18. Лесной план Мурманской области в 2 т. – Мурманск, 2019.
19. Лукина, Н. В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения / Н. В. Лукина, В. В. Никонов. – Апатиты, 1996. – 213 с.
20. Машуков, Д. А. Радиальный прирост и анатомическая структура древесины стволов здоровых и суховершинных деревьев лиственницы на многолетней мерзлоте / Д. А. Машуков, А. В. Бенькова, В. Е. Бенькова и др. // Лесоведение. – 2020. – № 6. С. 483–492.
21. Методы изучения лесных сообществ / отв. ред. В. Т. Ярмишко, И. В. Лянгузова. – СПб. : НИИХимии, 2002. – 240 с.
22. Неверов, Н. А. Динамика радиального прироста лиственницы (*Larix sibirica* L.) в притундровых лесах Архангельской области / Н. А. Неверов, Е. В. Полякова // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 12. – С. 9–14.
23. Переверзев, В. Н. Лесные почвы Кольского полуострова / В. Н. Переверзев. – М., 2004. – 232 с.
24. Позняков, В. Я. Североникель / В. Я. Поздняков. – М. – 1999. – 432 с.
25. Попов, А. С. Влияние мезоклимата и атмосферных промышленных загрязнений на радиальный прирост сосны обыкновенной / А. С. Попов, В. В. Фомин, Ю. В. Шалаумова // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 4 (83). С. 15–18.
26. Уразгильдин, Р.В. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Ч. 3. Влияние на радиальный прирост и корневые системы / Р. В. Уразгильдин, А. Ю. Кулагин // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». – 2021. № 13(4). С. 188–205. DOI: 10.24855/biosfera.v13i4.580.
27. Цветков, В. Ф. Сосняки Кольской лесорастительной области и ведение хозяйства в них / В. Ф. Цветков. – Архангельск. – 2002. – 380 с.

28. Черногаева, Г. М. Тенденции и динамика состояния и загрязнения природной среды РФ в начале XXI века. Обзор данных многолетнего мониторинга Росгидромета / Г. М. Черногаева, Л. Р. Журавлева // Экологический мониторинг и моделирование экосистем. – 2022. – № XXIII(1-2). С. 1318-147. DOI: 10.21513/0207-2564-2022-1-2-1318-147.
29. Чжан, С. А. Изменение радиального прироста сосны обыкновенной в зоне длительного воздействия промышленного загрязнения / С. А. Чжан, Е. М. Рунова, О. А. Пузанова, Л. А. Чжан // Хвойные бореальной зоны. – 2011. № 29(3–4). – С. 304–308.
30. Шиятов, С. Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале / С. Г. Шиятов. – М., 1986. – 136 с.
31. Ярмишко, В.Т. Многолетний импактный мониторинг состояния сосновых лесов центральной части Кольского полуострова / В. Т. Ярмишко, О. В. Игнатъева // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. – 2019. – № 6. – С. 658–668. DOI: 10.1134/S0002332919060134
32. Ярмишко, В.Т. Сообщества *Pinus sylvestris* L. в техногенной среде на Европейском Севере России: структура, особенности роста, состояние / В. Т. Ярмишко, О. В. Игнатъева // Сибирский лесной журнал. – 2021. № 3. С. 44–55. DOI: 10.15372/SJFS20210305
33. Cortini, F. White spruce growth and wood properties over multiple time periods in relation to current tree and stand attributes / F. Cortini, D. A. MacIsaac, Ph. G. Comeau // Forests. – 2016. – № 7(3). – P. 49–66. <https://doi.org/10.3390/f7030049>.
34. Donnelly, L. Inter- and intra-annual wood property variation in juvenile wood between six Sitka spruce clones / L. Donnelly, S.-O. Lundqvist, C. O'Reilly // Silva Fennica. – 2017. – № 51(4). – Article 7728. <https://doi.org/10.14214/sf.7728>.
35. Guiterman, C. H. Dendroecological methods for reconstructing high-severity fire in pine-oak forests / C. H. Guiterman, E. Q. Margolis, T. W. Swetnam // Tree-Ring Res. – 2015/ – № 71. – P. 67–77.
36. Juknys, R. Dynamic response of tree growth to changing environmental pollution / R. Juknys, A. Augustaitis, J. Vencloviene, A. Kliučius, A. Vitas, E. Bartkevičius, N. Jurkonis // European Journal of Forest Research. – 2014. – № 133. – P. 713–724. – <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0712-3>.
37. Katjutin, P. N. Radial growth of trees differing in their vitality in the middle-aged Scots pine forests in the Kola peninsula / P. N. Katjutin, N. I. Stavrova, V. V. Gorshkov et al. // Silva Fennica. – 2020. – № 54(3). – Article id 10263. – <https://doi.org/10.14214/sf.10263>
38. Kirdeyanov, A. V. Die-off dynamics of Siberian larch under the impact of pollutants emitted by Norilsk enterprises / A. V. Kirdeyanov, V. S. Myglan, A. V. Pimenov et al. // Contemporary Problems of Ecology. – 2014. – № 7(6). Pp. 679–684.
39. Lyanguzova, I. Effects of High and Low Aerotechnogenic Emissions of heavy Metals on Wild Plants / I. Lyanguzova, P. Katjutin // Forests. – 2023. – № 14(8). – Article 1650. – <https://doi.org/10.3390/f14081650>
40. Lyanguzova, I. V. Dynamic trends of heavy metal contents in plants and soil under different industrial air pollution regimes / I. V. Lyanguzova // Russian Journal of Ecology. – 2017. – № 48(4). Pp. 311–320. – DOI: 10.1134/S1067413617040117
41. Methods of Dendrochronology. Applications in environmental sciences / Eds. E. Cook, L. Kairiukstis. – Dordrecht: Kluwer Acad. Press., 1989. – 394 p.
42. Rinn, F. TSAP-Win: Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications: User Reference / F. Rinn // Heidelberg, 2003. – 110 p.
43. Rummyantsev, D. E. Dendroclimatic diagnostics of pine and spruce growth in the Kivach Reserve (Russian Karelia) / D. E. Rummyantsev // Ecology, Environment and Conservation. – 2021. – № 27 (S). – Pp. 322–329. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45612648>

44. Ryabinina, Z. N. Radial growth of artificial forest stands under the aerotechnogenic impact of the Orenburg gas chemical complex / Z. N. Ryabinina, G. T. Bastaeva, O. A. Lyavdanskaya et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. –2020. – № 579. – Pp. 012115. – DOI:10.1088/1755-1315/579/1/012115
45. Schweingruber, F. H. Tree rings and environment dendroecology / F. H. Schweingruber – Berne, Stuttgart, Vienna: Haupt, 1996. – 609 p.
46. Stavrova, N. I. The Structure of Northern Siberian Spruce–Scots Pine Forests at Different Stages of Post-Fire Succession / N. I. Stavrova, V. V. Gorshkov, P. N. Katjutin, I. J. Bakkal // Forests. – 2020. –№ 11. – Article 558. – <https://doi.org/10.3390/fl11050558>.
47. Sukhareva, T. A. Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution in the Kola Peninsula / T. A. Sukhareva, N. V. Lukina // Russian Journal of Ecology. – 2014. –№ 45(2). – Pp. 95–102. – DOI 10.1134/S1067413614020088
48. Vacek, S. Sensitivity of unmanaged relict pine forest in the Czech Republic to climate change and air pollution / S. Vacek, Z. Vacek, J. Remeš et al. // Trees. – 2017. – № 31. – Pp. 1599–1617. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1572-0>.
49. Vanninen, P. Allocation of above-ground growth in *Pinus sylvestris* – impacts of tree size and competition / P. Vanninen // Silva Fennica. – 2004. –№ 38(2). – Pp. 155–166. – <https://doi.org/10.14214/sf.425>.

References

1. Alekseev A.S. Fluctuations in radial growth in forest stands under atmospheric pollution. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1990, no. 2, pp. 82–86. (In Russian).
2. Achikolova Yu.S., Ageev A.A., Astapenko S.A., Golovina A.N. Siberian pine’s radial growth features in a changing climate of the Khamar-Daban Mountain Range. *Forestry information*, 2023, no. 3, pp. 37–54. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.3.03. (In Russian).
3. Bitvinskis T.T. *Dendroklimaticheskie issledovaniya* [Dendroclimatic research]. Leningrad, 1974. 170 p. (In Russian).
4. Gorshkov V.V., Stavrova N.I., Katyutin P.N., Lyanguzov A.Yu. Radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in lichen pine forests and woodlands of the northern taiga. *Biology Bulletin*, 2021, no. 2, pp. 214–223. DOI: 10.31857/S0002332921020053.
5. Demakov Yu.P. The dynamics of radial recruitment in lichen and moss-covered pine forests in the Bolshaya Kokshaga Reserve. *Science papers of State nature reserve «Bolshaya Kokshaga»*, 2013, no. 6, pp. 143–162. (In Russian).
6. Demidko D.A., Krivets S.A., Bisirova E.M. Connection between radial increment and tree vitality of Siberian stone pine. *Tomsk State University Journal. Biologiya*. 2010, no. 4, pp. 68–80. (In Russian).
7. Demidko D.A. The state of Siberian pine forests in Northeastern Altai and methods for its assessment. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2011, no. 1, pp. 19–27. (In Russian).
8. Dynamics of forest communities in North-West Russia. Yarmishko V.T., Bakkal I.Yu., Ignatova O.V. et al. *Sant-Petersburg*, 2009. 276 p. (In Russian).
9. Dubrovskiy V.L. *O kombinatе «Severonikel'»* [About the the “Severonickel” Combine] *Ezhegodnik Laplandskogo gos. prirodnogo biosfernogo zapovednika* [Yearbook of the Lapland Nature Biosphere Reserve] Murmansk, 2000, no. 1, pp. 44–45. (In Russian).
10. *Ezhegodnik Kol'skoy GMK* [Yearbook of the Kola MMC]. Murmansk, 2007. no. 5. 87 p. (In Russian).
11. *Ezhegodnik Kol'skoy GMK* [Yearbook of the Kola MMC]. Murmansk, 2010. no. 8. 81 p. (In Russian).
12. *Ezhegodnik: Zagryaznenie pochv Rossiyskoy Federatsii toksikantami promyshlennogo proiskhozhdeniya v 2020 g* [Yearbook: Soil contamination of the Russian Federation with toxicants of industrial origin in 2020]. – 2021. – 128 p. – URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/tpp/tpp_2020.pdf/ (accessed 31.10.2023). (In Russian).

13. Ivanov V.P., Marchenko S.I., Nartov D.I., Balukhta L.P. Radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under inhibition. *Lesnoy zhurnal* [Russian forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 69–81. – DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-69-81
14. Katyutin P.N., Stavrova N.I., Gorshkov V.V. et al. The initial radial growth of different generations of the Scots pine in middle-aged forests of the Kola Peninsula *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2021, no. 5, pp. 472–493. DOI: 10.31857/S0024114821040057 (In Russian).
15. Kashulina G.M. Aerotechnogenic transformation of soils in subarctic european regiona. In 2 parts. Apatity, 2002. 234 p. (In Russian).
16. Klad'ko Yu.V., Ben'kova V.E. Radial growth of woody species in the conditions of high anthropogenic load in the city of Krasnoyarsk. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Sib. J. For. Sci.], 2018, no. 4, pp. 49–57. DOI: 10.15372/SJFS20180406 (In Russian).
17. Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii: ot 04.12.2006 no. 200-FZ (04.08.2023) SPS «Konsul'tantPlyus». – URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=133350> (accessed 30.10.2023). (In Russian).
18. *Lesnoy plan Murmanskoy oblasti* [Forest plan of the Murmansk region]. In 2 parts. Murmansk, 2019. (In Russian).
19. Lukina N.V., Nikonov V.V. Biogeochemical cycles in the Northern forests subjected to air pollution. Apatity, 1996. 213 p. (In Russian).
20. Mashukov D.A., Ben'kova A.V., Ben'kova V.E. et al. Radial growth and anatomic structure of the trunk wood of healthy and stag-headed larch trees on permafrost. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2020, no. 6, pp. 483–492. (In Russian).
21. Methods for forest community study. Eds. by Yarmishko V.T., Lyanguzova I.V. Sant-Petersburg, 2002. 240 s. (In Russian).
22. Neverov N.A., Polyakova E.V. Dynamics of radial growth of larch (*Larix sibirica* L.) in the tundra forests of the Arkhangelsk region. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in modern natural science], 2022, no. 1, pp. 9–14. (In Russian).
23. Pereverzev V.N. Forest soils of the Kola Peninsula. Moscow. 232 p. (In Russian).
24. Poznyakov V.Ya. The Severonickel. Moscow, 1999. 432 p. (In Russian).
25. Popov A.S., Fomin V.V., Shalaumova Yu.V. The influence of mesoclimate and atmospheric industrial pollution on the radial growth of Scots pine. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2011, no. 4 (83), pp. 15–18. (In Russian).
26. Urazgil'din R.V., Kulagin A.Yu. Technogenesis and structural-functional reactions of tree species: damage, adaptation, strategies. Part 3. Effect on radial growth and root systems. *Biosphere*, 2021, no. 13(4), pp. 188–205. DOI: 10.24855/biosfera.v13i4.580.
27. Tsvetkov V.F. Pine forests of the Kola forest region and forestry in them. Arkhangel'sk. 2002. 380 p. (In Russian).
28. Chernogaeva G.M., Zhuravleva L.R. Trends and dynamics of the state and pollution of the natural environment of the Russian Federation at the beginning of the XXI century. Review of data from the long-term monitoring of Roshydromet. *Environmental monitoring and ecosystem modelling*, 2022, no. XXIII(1-2), pp. 1318-147. DOI: 10.21513/0207-2564-2022-1-2-1318-147. (In Russian).
29. Chzhan S.A., Runova E.M., Puzanova O.A., Chzhan L.A. Changes in the radial growth of Scots pine in the zone of long-term exposure to industrial pollution. *Conifers of the boreal area*, 2011, no. 29 (3–4), pp. 304–308. (In Russian).
30. Shiyatov S.G. Dendrochronology of the upper forest limit in the Urals. Moscow, 1986. 136 p. (In Russian).
31. Yarmishko V.T., Ignat'eva O.V. Impact Multi-year Monitoring of Pine Forests in the Central Part of the Kola Peninsula. *Biology Bulletin*, 2019, no. 6, pp. 636-645. DOI: 10.1134/S0002332919060134

32. Yarmishko V.T., Ignat'eva O.V. Communities of *Pinus sylvestris* L. in the technogenic environment in the European North of Russia: structure, features of growth, state. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Sib. J. For. Sci.], 2021, no. 3, pp. 44–55. DOI: 10.15372/SJFS20210305 (In Russian)
33. Cortini F., MacIsaac D.A., Comeau Ph.G. White spruce growth and wood properties over multiple time periods in relation to current tree and stand attributes. *Forests*, 2016, no. 7(3), pp. 49–66. <https://doi.org/10.3390/f7030049>.
34. Donnelly L., Lundqvist S.-O., O'Reilly C. Inter- and intra-annual wood property variation in juvenile wood between six Sitka spruce clones. *Silva Fennica*, 2017, no. 51(4), article 7728. <https://doi.org/10.14214/sf.7728>.
35. Guiterman C.H., Margolis E.Q., Swetnam T.W. Dendroecological methods for reconstructing high-severity fire in pine-oak forests. *Tree-Ring Res*, 2015, no. 71, pp. 67–77.
36. Juknys R., Augustaitis A., Vencloviene J. et al. Dynamic response of tree growth to changing environmental pollution. *European Journal of Forest Research*, 2014, no. 133, pp. 713–724. – <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0712-3>.
37. Katjutin P.N., Stavrova N.I., Gorshkov V.V. et al. Radial growth of trees differing in their vitality in the middle-aged Scots pine forests in the Kola Peninsula. *Silva Fennica*, 2020, no. 54(3), article id 10263. <https://doi.org/10.14214/sf.10263>
38. Kirdyanov A.V., Myglan V.S., Pimenov A.V. et al. Die-off dynamics of Siberian larch under the impact of pollutants emitted by Norilsk enterprises. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, no. 7(6), pp. 679–684.
39. Lyanguzova I., Katjutin P. Effects of high and low aerotechnogenic emissions of heavy metals on wild plants. *Forests*, 2023, no. 14(8), article 1650. <https://doi.org/10.3390/f14081650>
40. Lyanguzova I.V. Dynamic trends of heavy metal contents in plants and soil under different industrial air pollution regimes. *Russian Journal of Ecology*, 2017, no. 48(4), pp. 311–320. DOI: 10.1134/S1067413617040117
41. Methods of dendrochronology. Applications in environmental sciences. Eds. E. Cook, L. Kairiukstis. Dordrecht: Kluwer Acad. Press., 1989. 394 p.
42. Rinn F. TSAP-Win: time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications: user reference. Heidelberg, 2003. 110 p.
43. Rumyantsev D.E. Dendroclimatic diagnostics of pine and spruce growth in the Kivach Reserve (Russian Karelia). *Ecology, Environment and Conservation*, 2021, no. 27 (S), pp. 322–329. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45612648>
44. Ryabinina Z.N., Bastaeva G.T., Lyavdanskaya O.A. et al. Radial growth of artificial forest stands under the aerotechnogenic impact of the Orenburg gas chemical complex. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, no. 579, pp. 012115. DOI:10.1088/1755-1315/579/1/012115
45. Schweingruber F. H. Tree rings and environment dendroecology. Berne, Stuttgart, Vienna: Haupt, 1996. 609 p.
46. Stavrova N.I., Gorshkov V.V., Katjutin P.N., Bakkal I.J. The structure of northern Siberian spruce–Scots pine forests at different stages of post-fire succession/ *Forests*, 2020, no. 11, article 558. <https://doi.org/10.3390/f11050558>.
47. Sukhareva T.A., Lukina N.V. Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution in the Kola Peninsula. *Russian Journal of Ecology*, 2014, no. 45(2), pp. 95–102. DOI 10.1134/S1067413614020088
48. Vacek S., Vacek Z., Remeš J. et al. Sensitivity of unmanaged relict pine forest in the Czech Republic to climate change and air pollution. *Trees*, 2017, no. 31, pp. 1599–1617. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1572-0>.
49. Vanninen P. Allocation of above-ground growth in *Pinus sylvestris* – impacts of tree size and competition. *Silva Fennica*, 2004, no. 38(2), pp. 155–166. <https://doi.org/10.14214/sf.425>.

Сведения об авторах

✉ *Катютин Павел Николаевич* – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории экологии растительных сообществ, ФГБУН Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, ул. Профессора Попова, 2, литер В, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация; старший преподаватель кафедры биогеографии и охраны природы, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4938-9638>, e-mail: PauRussia@binran.ru.

Лянгузова Ирина Владимировна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии растительных сообществ, ФГБУН Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, ул. Профессора Попова, 2, литер В, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3874-9925>, e-mail: ILyanguzova@binran.ru.

Information about the authors

✉ *Paul N. Katjutin* – Cand. Sci. (Biology), Laboratory of Ecology of Plant Communities, Komarov Botanical Institute of RAS, ul. Professor Popov, 2, 197022, Saint-Petersburg, Russian Federation; Department of Biogeography and Environmental Protection, Saint Petersburg State University, 7-9 Universitetskaya emb., 199034, Saint-Petersburg, Russia ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4938-9638>, e-mail: PauRussia@binran.ru.

Irina V. Lyanguzova – Dr. Sci. (Biology), Laboratory of Ecology of Plant Communities, Komarov Botanical Institute of RAS, ul. Professor Popov, 2, 197022, Saint-Petersburg, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3874-9925>, e-mail: ILyanguzova@binran.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author