

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/377471803>

# Dependence of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Radial Growth on Meteorological Conditions and Anthropogenic Air Pollution: Data from Northwestern Part of Murmansk Oblast

Preprint · June 2024

CITATIONS

0

READS

54

5 authors, including:



[Ivan Romashkin](#)

Karelian Research Centre

19 PUBLICATIONS 121 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Alexander Kryshen'](#)

Karelian Research Centre

70 PUBLICATIONS 345 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

# ЗАВИСИМОСТЬ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА *PINUS SYLVESTRIS* ОТ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 г. И.В. Ромашкин<sup>1,\*</sup>, Н.В. Геникова<sup>1</sup>, А.М. Крышень<sup>1</sup>, С.А. Мошников<sup>1</sup>,  
Н.В. Поликарпова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт леса Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Россия

<sup>2</sup>Государственный природный заповедник «Пасвик», п. Никель, Россия

\* e-mail: [romashkin@krc.karelia.ru](mailto:romashkin@krc.karelia.ru)

Поступила в редакцию 20.10.2022 г.

После доработки 29.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Изучено влияние метеорологических факторов и аэротехногенного загрязнения на радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зависимости от удаленности от ГМК «Печенганикель», (пгт. Никель, Мурманская обл.). По содержанию основных элементов-поллютантов (S, Ni и Cu) в лесной подстилке выделено три зоны загрязнения – фоновая, буферная и импактная. Установлено, что значительное ослабление сосновых древостоев в импактной зоне являлось следствием комплекса факторов – длительного техногенного загрязнения территории в 1970-е гг. и неблагоприятных метеорологических явлений в середине 1980-х гг. По мере уменьшения объемов выбросов в период 1988–2018 гг. обнаружено достоверное увеличение (до 44%) радиального прироста деревьев *P. sylvestris* в импактной зоне и отсутствие значимых изменений в фоновой и буферной зонах. В дальнейшем величина радиального прироста деревьев в импактной зоне достигла и даже превзошла значения деревьев фоновой зоны, несмотря на относительно высокий возраст исследуемых растений. Это подчеркивает высокие адаптационные способности *P. sylvestris*.

*Ключевые слова:* *Pinus sylvestris*, сосна обыкновенная, радиальный прирост, техногенное загрязнение, климат, мониторинг

Предприятия горнодобывающей, металлургической и лесоперерабатывающей промышленности оказывают негативное влияние на прилегающие к ним лесные экосистемы, что неминуемо приводит к снижению их продуктивности, нарушению устойчивости и постепенной деградации [1–2]. Наиболее сильное техногенное воздействие связывают с деятельностью медно-никелевых предприятий, выбрасывающих в атмосферу значительные объемы диоксида серы (SO<sub>2</sub>) и тяжелых металлов, в частности, меди (Cu) и никеля (Ni) [3]. Хотя пути миграции загрязняющих веществ в наземных экосистемах разнообразны, в большинстве случаев они проходят через растительные компоненты (продуценты) [4]. Снижение устойчивости лесных сообществ, подверженных влиянию техногенного загрязнения, сопровождается изменением структуры древостоя и увеличением числа ослабленных и погибших растений [5]. По мере приближения к источнику эмиссии у деревьев может наблюдаться снижение интенсивности водного обмена, что приводит к

деформации ассимиляционного аппарата и, следовательно, снижению прироста по высоте и диаметру [2, 6–7].

Радиальный прирост (РП) является одним из наиболее информативных показателей, способных продемонстрировать влияние различных факторов на рост древесного растения на протяжении всей его жизни [8–10]. При этом закономерности изменчивости РП обусловлены как биологическими особенностями породы, так и совокупным действием экологических и климатических условий [11]. В большинстве исследований [12–14] с увеличением объемов загрязнения отмечается достоверное снижение РП, которое сопровождается как увеличением амплитуды его колебаний, так и нарушением цикличности. Подобные результаты получены не только на локальном уровне, но и на всем евразийском пространстве [13]. Стоит отметить, что при изучении влияния техногенного загрязнения на рост древесных растений следует уделять особое внимание высокой зависимости РП от климатических флуктуаций [15–17].

В большинстве исследований влияние техногенного загрязнения на лесные экосистемы рассматривается за относительно короткий временной период, включающий до нескольких десятилетий [13]. В 2018 году Институтом леса КарНЦ РАН с целью создания системы мониторинга северотаежных лесов в условиях климатических изменений и влияния аэротехногенного загрязнения была заложена сеть постоянных пробных площадей (ПП), расположенных на территории заповедника «Пасвик» (Мурманская область) и в его окрестностях. Выбор объекта мониторинга обоснован хронологией работы горно-металлургического комбината (ГМК) «Печенганикель», в которой можно выделить этапы с различным уровнем техногенной нагрузки. Активное промышленное развитие региона началось в 1930-х гг.; начало работы ГМК датируется 1937-м годом. Пик медно-никелевого производства пришелся на 1970-е гг. К этому времени на комбинаты «Печенганикель» и «Североникель» поставлялось более 1 млн тонн норильской руды с более высоким содержанием серы (S) (около 30%) по сравнению с рудой кольских месторождений (до 5 %). Как итог, общий объем выбросов  $\text{SO}_2$  в 1977 г. составил 411 тыс. тонн. Введение в строй первой (1981 г.) и второй (1987 г.) линий сернокислотного производства позволило снизить выбросы  $\text{SO}_2$  на 10,9 и 27,2 %, соответственно. С 1992 по 2002 гг. происходил постепенный отказ от переработки руды норильских месторождений, что привело к устойчивому снижению выбросов как  $\text{SO}_2$ , так и тяжелых металлов. Последующие оптимизационные мероприятия, включающие модернизацию трактов газоудаления конвертеров и реконструкцию сернокислотного производства, позволили сократить выбросы  $\text{SO}_2$  до 50–56

тыс. т/год (2010 г.), Ni и Cu – до 250 и 130 т/год (2015 г.), соответственно [3, 18]. В 2021 г. ГМК «Печенганикель» прекратил свою деятельность.

Цель работы – исследовать реакцию деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на изменение объемов атмосферных выбросов медно-никелевого производства ГМК «Печенганикель» (пгт. Никель). Были поставлены следующие задачи: а) изучить динамику РП деревьев *P. sylvestris*, произрастающих на различной удаленности от источника загрязнения; б) определить влияние климатических (метеорологических) показателей (среднемесячные температура воздуха и уровень осадков) на динамику РП *P. sylvestris* в регионе исследования; в) определить влияние уровня выбросов основных поллютантов медно-никелевого производства – SO<sub>2</sub>, Ni и Cu, на динамику РП исследуемой породы. Мы предположили, что по мере увеличения загрязнения происходит закономерное снижение РП, а его флуктуации обусловлены как изменением уровня выбросов поллютантов, так и климатическими (погодными) экстремумами. При этом снижение аэротехногенной нагрузки как в пространственном, так и временном аспектах должно положительно сказываться на росте *P. sylvestris*.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись насаждения *P. sylvestris*, расположенные на территории и в окрестностях ФГБУ «Государственный природный заповедник (ГПЗ) «Пасвик» (Печенгский район, Мурманская область). На разном удалении от ГМК «Печенганикель» (пгт. Никель) были заложены семь постоянных пробных площадей (ПП) (рис. 1). Минимальное расстояние от ПП до комбината, как источника аэротехногенного загрязнения, составило 11 км (ПП №7), максимальное – 82 км (ПП №1). Характеристика исследуемых ПП и их географические координаты представлены в таблице 1.

На основе данных по содержанию S, Ni и Cu в лесной подстилке (горизонт О) мы разделили территорию исследования на зоны с разным уровнем техногенного загрязнения. Содержание S в лесной подстилке слабо изменялось по мере приближения к источнику загрязнения, в то время как содержание тяжелых металлов значимо возрастало. Это позволило выделить три зоны: 1) фоновую (ПП №1–2), где содержание Cu и Ni в среднем составило 19,9 и 12,0 мг/кг, соответственно; 2) буферную (ПП №3–4), где содержание вышеописанных элементов в среднем составило 31,8 и 33,2 мг/кг, соответственно; 3) импактную (ПП №5–7), где содержание Cu и Ni достигало 728,6 и 879,0 мг/кг, соответственно, то есть превышало фоновые значения в 28,2 и 65,2 раз, соответственно (рис. 2).

Постоянные ПП закладывали в наиболее характерных местах выдела и отграничивались в натуре визирами с постановкой угловых столбиков. Таксационные работы проводили в соответствии с общепринятой методикой. Все деревья (растущая часть и сухостой) нумеровали, производили их сплошной пересчет с точностью определения диаметра до 0,1 см. Высотомером Suunto у 20-25 деревьев на ПП измеряли высоту. С помощью возрастного бурава Пресслера у 5-8 деревьев на уровне шейки корня отбирали керны для определения их возраста. Дополнительно проводили описание живого напочвенного покрова и морфологического строения почв. На основе этих характеристик определяли тип леса.

Для оценки состояния деревьев при лесопатологическом обследовании использована шкала «Правил санитарной безопасности в лесах» [19]. Жизненное состояние деревьев определяли по совокупности основных внешних признаков: цвет и возраст хвои, изреживание скелетной части кроны, долю отмерших и отмирающих ветвей. Дополнительно оценивали влияние лесопатологических факторов (грибных заболеваний и насекомых-вредителей). При отборе кернов определяли наличие стволовой гнили. Исходя из вышеописанных показателей состояния деревьев рассчитывали средний балл санитарного состояния древостоя (см. табл. 1).

Анализ почвенных образцов выполнен на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук". Содержание S определяли методом Ринькиса (СФ-2000), содержание Ni и Cu – с помощью атомно-абсорбционных спектрофотометров Shimadzu серий AA-6800 и AA-7000. Разложение образцов для определения металлов производили с помощью микроволновой системы разложения (SpeedwavefourBerghof, Германия).

Для анализа изменчивости РП *P. sylvestris* были отобраны деревья широкой возрастной группы – 150–250 лет (10–15 деревьев), представленной на всех исследуемых ПП. Отбор кернов осуществляли с южной стороны на высоте 1,3 м. Керны наклеивали на деревянную основу, их поверхность зачищали и полировали. Каждый керн сканировали при разрешении 1600 dpi. В лабораторно-программном комплексе Cdendro/CooRecorder software 9.3 [20] определяли среднее значение ширины годичного кольца с учетом всех изгибов годичного кольца. Графический анализ кернов осуществляли методом перекрестной датировки [21]. Для каждой группы ПП в зависимости от удаленности от ГМК был сформирован график РП на основе усредненных значений ( $n = 20-45$ ). Для оценки реакции деревьев на изменение условий среды были рассчитаны индексы РП, как отношение фактических значений РП к теоретическим, вычисленными по параметрам функции

возрастного тренда [22]. Все серии РП и их индексов, а также климатических переменных для минимизации в них высокочастотной компоненты усредняли по 5-летней скользящей средней [23].

Керны размечали по годичным слоям с выделением пяти основных этапов работы ГМК с различным уровнем выбросов загрязняющих веществ: 1) 1937–1970 гг. – начальный этап работы ГМК; 2) 1971–1980 гг. – период переработки руды норильских месторождений с высоким содержанием S; 3) 1981–1987 гг. – снижение выбросов SO<sub>2</sub> в связи модернизацией производства; 4) 1992–2002 гг. – период отказа от руды норильских месторождений; 5) 2001–2018 гг. – оптимизация производства на современном этапе работы. Данные по объемам выбросов ГМК «Печенганикель» за период 1977-2015 гг. были взяты из доступных литературных источников [3, 18].

Климатические данные, включающие среднемесячные значения температуры приземного слоя воздуха и количества осадков (п. Янискоски, индекс метеостанции 22101), были получены из специализированного массива климатических данных ВНИИГМИ-МЦД [24]. Гидрологический год принимали как период длительностью с октября предыдущего календарного года по сентябрь текущего, зимний период – с октября предыдущего календарного года по апрель текущего, вегетационный сезон – с мая по сентябрь текущего календарного года. Гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) рассчитывали по формуле [25]:

$$\text{ГТК} = (\Sigma P / \Sigma t_{10}) \times 10 \quad (1)$$

где  $\Sigma P$  – сумма осадков за период с температурой выше + 10 °C;

$\Sigma t_{10}$  – сумма температур выше +10 °C за тот же период.

Сумму эффективных температур (СЭТ) выше +5 °C, необходимых для запуска ростовых процессов *P. sylvestris* [26], рассчитывали по формуле:

$$\Sigma i = 1 \text{ to } 12 (\max (0; N_i \times (T_{\text{avg}} - 5))) \quad (2)$$

где  $\Sigma i$  – СЭТ выше +5 °C (градус-день),

1–12 – месяц года,

$N_i$  – количество дней в месяце,

$T_{\text{avg}}$  – среднемесячная температура воздуха (°C).

Статистический анализ проводили в программном пакете R [27] с использованием обобщенных линейных моделей (*GLM*) и многогрангового теста Дункана (*Duncan test*). Данные были проверены на нормальность распределения с помощью теста Шапиро-Уилка (*Shapiro-Wilk's W test*) и при необходимости преобразованы с помощью трансформации Бокса-Кокса (*Box-Cox transformation*).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Динамика РП *P. sylvestris* в зависимости от расстояния до источника загрязнения

Анализ усредненных хронологий показал различия в динамике РП *P. sylvestris* по градиенту загрязнения (рис. 3). В период 1939–1970 гг. в фоновой зоне отмечен устойчивый нисходящий тренд РП (коэффициент линейной регрессии  $A = -0,010$ ) с сохранением цикличности. В последующие годы наблюдается незначительное снижение РП ( $A = -0,001$ ). Нижние экстремумы РП соответствовали 1929, 1946, 1968, 1987, 2000 и 2013 г., верхние – 1941, 1960, 1973, 1993, 2003 г. Среднее значение РП в фоновой зоне за весь период наблюдения (1918–2018 гг.) составило 0,76 мм/год ( $SE = \pm 0,02$ ).

В буферной зоне динамика РП в целом соответствовала таковой в фоновой зоне, за исключением последнего десятилетия исследуемого периода, где их синхронность нарушалась. При этом общий тренд изменения РП деревьев в буферной зоне также имел тенденцию к снижению: в период с 1939 по 1970 гг. он характеризовался несколько меньшим наклоном по сравнению фоновыми условиями ( $A = -0,006$ ), в то время как в период с 1971 по 2018 гг. имел аналогичный наклон ( $A = -0,001$ ). Среднее значение РП было также ниже и составило 0,46 мм/год ( $SE = \pm 0,01$ ).

Динамика РП деревьев в импактной зоне в целом схожа с таковой для *P. sylvestris* в фоновой зоне до начала наиболее интенсивной техногенной нагрузки в 1970-х гг. Среднее значение РП деревьев в импактной зоне в период 1918–1970 гг. составило 1,01 мм/год ( $SE = \pm 0,04$ ), что на 16 % выше контрольных значений в фоновой зоне за аналогичный период. Стоит отметить, что схожая закономерность была отмечена Т.А. Череньковой [28] для деревьев *P. sylvestris* возрастом до 50 лет, произрастающих вблизи ГМК «Печенганикель», что, вероятно, может указывать не только на подавление, но и на стимуляцию отдельных процессов роста [28–29]. Наши данные, как минимум, не опровергают данное утверждение.

Начиная с 1970 г. в импактной зоне наблюдается более интенсивное, чем у деревьев в фоновой зоне, снижение РП ( $A = -0,012$ ) с наименьшим значением в 1987 г. (0,23 мм). Стоит отметить, что снижение РП в период с 1985 по 1987 гг. отмечено у всех исследованных деревьев независимо от удаленности от источника загрязнения. В указанный период в фоновой зоне величина РП составила в среднем 0,54 мм/год ( $SE = \pm 0,02$ ), то есть на 29 % ниже, чем за весь исследуемый период, в буферной зоне и импактной зонах – 0,42 мм/год ( $SE = \pm 0,01$ ) и 0,33 мм/год ( $SE = \pm 0,03$ ), то есть на 46 и 58 %, соответственно.

В последующий период динамика РП в указанных зонах существенно различается. У деревьев в фоновой и буферной зонах наблюдалась стабилизация значений РП или его дальнейшее снижение. В импактной зоне отмечена обратная тенденция – отмечался

устойчивый тренд к увеличению РП *P. sylvestris*. Так, относительно значений в 1985–1987 г. средний РП в период 1988–2018 гг. увеличился на 44 %. Таким образом, деревья в импактной зоне, несмотря на наиболее значительное снижение РП в 1987 г. по сравнению с деревьями, растущими в условиях меньшей техногенной нагрузки, демонстрируют его стабильное увеличение ( $A = 0,010$ ) в последующие годы. Более того, после 2007 г. значения РП деревьев в импактной зоне сравниваются и даже превышают таковые для деревьев фоновой зоны, несмотря относительно высокий средний возраст исследованных растений.

В некоторых случаях улучшение роста *P. sylvestris* в импактной зоне можно было установить визуально – в последние годы крона приобрела конусовидную форму, обычно свойственную активно растущим деревьям (рис. 4). Это подтверждает ранее отмеченную способность сосны обыкновенной сохранять и при улучшении условий произрастания реализовывать потенциальную способность к росту в возрасте 180 лет и старше [22]. Особый интерес вызывает тот факт, что эта способность проявилась только у деревьев в зоне сильного загрязнения. Мы пока не можем ответить на вопрос как долго продлится период активного роста *P. sylvestris* после снижения (после 2021 г. – прекращения) воздействия аэротехногенного загрязнения, это является одной из задач, поставленных при создании сети мониторинга.

Наблюдаемые различия в величине РП *P. sylvestris* по градиенту загрязнения, а именно меньшие значения этого параметра в буферной зоне по сравнению с таковыми в импактной зоне поднимают вопрос о трудности подбора участков (прежде всего, контрольных) для проведения дендрохронологических исследований. Отмеченное несоответствие в большей степени связано с несколько отличающимся возрастом исследованных деревьев, произрастающих в различных зонах. Так, в фоновой зоне средний возраст исследованных деревьев составил 167 лет ( $SE = \pm 10$ ), в буферной зоне – 205 лет ( $SE = \pm 11$ ), в импактной – 165 лет ( $SE = \pm 7$ ). Это объясняет не только более низкие значения РП в буферной зоне в начале исследуемого периода, но и более сглаженный тренд его динамики. Кроме того, исследованные участки имеют различную историю пирогенных нарушений, представленных, как правило, низовыми пожарами различной интенсивности и давностью от 110 (ПП №3, № 5, №6) до 200 лет (ПП №2, №7), что, несомненно, отражается как на возрастной структуре, так и на других характеристиках произрастающих там древостоев.

В настоящее время по мере усиления антропогенной нагрузки становится все сложнее отделить долю естественных изменений РП *P. sylvestris* от тех, которые обусловлены интенсивной деятельностью человека [16]. Так, из видимых нарушений антропогенного характера практически на всех исследованных ПП (за исключением ПП №1) нами



обнаружены следы выборочных рубок интенсивностью от 10 до 20 % и давностью около 30–50 лет. Кроме того, в районе п. Раякоски (ПП №2), расположенном на правом берегу р. Паз, в 1950-х гг. строились три ГЭС [3], что, вероятно, оказывало большое влияние на локальные условия и, как следствие, величину РП произрастающих там деревьев [18]. Более того, хотя сосновые древостои в фоновой зоне расположены на достаточно большом расстоянии от источника загрязнения (более 70 км) и не имеют признаков ослабления, мы не можем полностью исключить влияние на них техногенной нагрузки.

### **Влияние метеорологических показателей на РП *P. sylvestris***

В районе исследования отмечена высокая вариация значений температуры воздуха в течение вегетационного сезона: среднемесячные температуры воздуха в п. Янискоски (ПП №1) за период с 1955 по 2019 гг. составили в мае +4,3 °C (+0,9...+10,6 °C), июне – +10,2 °C (+5,9...+14,3 °C), июле – +13,7 °C (+9,2...+18,8 °C), августе – +11,3 °C (+8,6...+13,6 °C), сентябре – +6,4 °C (+2,8...+9,1 °C). Выявлена определенная цикличность «холодных» и «теплых» лет. Так, среднемесячные температуры в течение вегетационного сезона были ниже средних значений в 1965, 1977, 1981, 1987 и 2008 г. В эти годы особенно заметно снижение температуры в мае, что, вероятно, сдвинуло сроки начала вегетационного сезона и уменьшило его продолжительность. Аномально низкие температуры (снижение на 50 и более % от среднего) в мае наблюдались достаточно часто – в 1955, 1958, 1965, 1969, 1985, 1996 и 1999 г. (прил. А, табл. 1А). При этом аномально теплая погода в мае отмечена в 1960, 1963, 1984, 1989, 1992, 2010, 2013, 2016 и 2018 г. (прил. А, табл. 1А). Указанное чередование «теплых» и «холодных» лет в целом соответствует 11-летними солнечными циклами Швабе-Вольфа [30], что особенно характерно для северных широт [31].

Среднегодовая сумма осадков в районе исследования за период с 1970 по 2019 гг. в среднем составила 515 мм (340...674 мм). Наибольшее количество осадков в течение года отмечено в летний период. Так, средние значения сумм осадков по сезонам составили: зима – 84 мм (44...136 мм), весна – 96 мм (35...169 мм), лето – 202 мм (98...354 мм), осень – 133 мм (67...210 мм) (прил. А, табл. 2А). В течение рассматриваемого периода можно выделить четыре засушливых периода: лето 1980 г., осень 1984 г. – весна 1987 г., лето 1991 г., лето 2013 г. Стоит отметить, что наиболее продолжительный период засухи наблюдался с 1984 г. по 1987 г., а температура воздуха в течение вегетационного сезона в эти годы была ниже средних значений. В 1985 г. на фоне относительно низких температур в мае, июне и сентябре, а также близких к средним значениям в июле и августе, годовое количество осадков составило всего 340 мм, что на 34 % ниже среднего значения за весь период наблюдений. Кульминация неблагоприятных погодных условий прилась на 1987 г., в

течение которого на фоне продолжительной засухи отмечалось общее похолодание. Несмотря на то, что вышеописанные погодные явления не могут не оказывать значительное влияние на рост *P. sylvestris*, результаты корреляционного анализа метеорологических показателей и абсолютных значений и индексов РП не позволяют судить о системности связи между этими параметрами (табл. 2).

Анализ связи РП с метеорологическими показателями не дал однозначных результатов и в большинстве случаев она не была статистически значимой. Умеренная корреляционная связь величины РП отмечена с температурами февраля и мая, ГТК, СЭТ, а также суммами осадков октября предыдущего года, июля текущего года и за вегетационный сезон (табл. 3). При этом наибольшие значения коэффициента корреляции ( $R$ ) с метеопараметрами демонстрируют индексы РП. Так, для температуры мая  $R$  составил 0,37 и 0,35 в фоновой и импактной зонах, соответственно; для количества осадков в июле – 0,46 и 0,40, соответственно. В целом, эти данные подтверждают общие закономерности реакции древесных растений на изменение погодных условий: в первой половине вегетационного сезона величина РП в большей степени зависит от суммы положительных температур, во второй половине – от количества выпадающих осадков [32–33]. Каких-либо закономерностей изменения связи РП или его индексов с вышеописанными метеорологическими показателями по градиенту загрязнения выявлено не было. Тем не менее, несмотря на относительно слабую корреляционную связь между рассмотренными параметрами, следует признать значительный вклад погодных условий в величину РП в течение вегетационного сезона. Так, по данным Е.А. Ваганова с соавторами [34] положительная температурная детерминация прироста деревьев в субарктической зоне варьирует от 50 до 80 % и увеличивается с продвижением на север. Наиболее благоприятная температура воздуха для роста хвойных в северной подзоне тайги находится в диапазоне от +13 до +20 °С. Температура вне данного интервала вызывают уменьшение РП [35]. Весьма вероятно, что понижение среднемесячной температуры мая приводит к уменьшению продолжительности вегетационного сезона и, таким образом, значительно снижает интенсивность роста *P. sylvestris* в и без того суровых условиях Крайнего Севера. В ряде работ отмечается, что с продвижением на север роль осадков в сравнении с термическим режимом становится менее существенной [35, 36]. В исследованиях Д. С. Мюльгаузен и Л.А. Панкратова [18, 37], изучающих РП *P. sylvestris* в сходных условиях и градиенте загрязнения, указано на наличие значимой связи РП как с температурой воздуха, так и с количеством осадков. При этом в импактной зоне зависимость РП от метеорологических показателей несколько возрастала, что отмечалось ранее и в других работах [14, 38]. В то же время нельзя исключать

нарушение или искажение связи между величиной РП и климатическими показателями под влиянием техногенного загрязнения [13, 39].

Полученные нами результаты позволяют предположить, что наиболее значимое влияние на величину РП *P. sylvestris* оказывают неблагоприятные погодные явления в течение вегетационного сезона, в частности, положительные и отрицательные температурные аномалии, а также малое количество осадков. Тем не менее, причинно-следственная связь между величиной РП и метеорологическими показателями может искажаться под влиянием техногенного загрязнения. Хотя нами не установлено значимых реакций РП от погодных условий по градиенту загрязнения, это не исключает большую чувствительность к неблагоприятным климатическим аномалиям у деревьев, находящихся в условиях длительной техногенной нагрузки. Как показывают наши наблюдения, наиболее значительное снижение РП отмечено у деревьев *P. sylvestris* в импактной зоне в период продолжительной засухи и общего похолодания в 1985–1987 гг. Таким образом, совокупное действие неблагоприятных погодных явлений, вероятно, является одной из основных причин значительного снижения РП в импактной зоне, где деревья и без того значительно ослаблены многолетним аэротехногенным загрязнением.

#### **Влияние выбросов ГМК «Печенганикель» на динамику РП *P. sylvestris***

Сопоставление динамики РП *P. sylvestris* с хронологией работы ГМК «Печенганикель» позволяет предположить, что снижение рассматриваемого показателя в период 1937–1970 гг. связано в большей степени с естественными возрастными причинами и лишь частично с постепенным увеличением техногенной нагрузки. Максимальная эмиссия загрязняющих веществ приходилась на 1970-е гг., хотя из графика динамики РП (рис. 3) видно, что еще в течение последующего десятилетия сохранялась отрицательная динамика РП, в том числе из-за неблагоприятных погодных явлений в середине 1980-х гг. Это позволяет предположить существование определенной инертности влияния техногенного загрязнения на древесные растения – как в аспекте негативного воздействия на них, так и их положительного отклика на снижение эмиссионной нагрузки. Наши данные подтверждают тезис о том, что в условиях длительной техногенной нагрузки *P. sylvestris* более чувствительна к климатическим экстремумам, чем в фоновой зоне, что связано с общим ослаблением, как отдельных растений, так и древостоя в целом.

Уровень выбросов загрязняющих веществ – SO<sub>2</sub>, Cu и Ni в течение последних десятилетий работы ГМК постепенно снижался [3, 18]. По результатам корреляционного анализа установлена статистически значимая связь между уровнем выбросов поллютантов и РП (и его индексов) *P. sylvestris* в импактной зоне – в зависимости от загрязнителя *R*

корреляции варьировал от -0,61 до -0,87 (табл. 3). Схожие закономерности получены и другими исследователями [3, 18, 40]. В своем исследовании Д. С. Мюльгаузен и Л. А. Панкратовой [18] не отмечали каких-либо различий в коэффициентах корреляции  $R$  между вышеописанными показателями ни по розе ветров, ни по изменению расстояния от источника загрязнения, то есть деревья в фоновой зоне тоже реагировали на изменение уровня выбросов ГМК. Полученные нами данные указывают на обратное – наиболее значимое влияние уровня выбросов поллютантов на РП *P. sylvestris* наблюдается только в импактной зоне (табл. 3).

Анализ данных с использованием обобщенных генерализированных моделей (GLM) подтвердил статистически значимое влияние уровня выбросов  $\text{SO}_2$ , Cu и Ni на РП деревьев *P. sylvestris*, расположенных только в импактной зоне (табл. 4, рис. 5). Отмеченное увеличение РП в импактной зоне в начале 1990-х гг. с большой вероятностью связано со снижением выбросов  $\text{SO}_2$  и тяжелых металлов в связи со спадом производства, накопительным эффектом модификаций производственного процесса и очистных сооружений, а также отказом от использования руды норильского происхождения. Несмотря на относительно высокий возраст исследуемых деревьев, мы можем констатировать наличие положительного влияния данных обстоятельств на рост *P. sylvestris* и состояние исследуемых древостоев в импактной зоне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным фактором резкого снижения РП *P. sylvestris* в середине 1980-х гг. в сосновых древостоях вблизи ГМК «Печенганикель», помимо непосредственного негативного влияния техногенного загрязнения, следует считать комплекс неблагоприятных метеорологических явлений – снижения среднемесячной температуры воздуха в течение вегетационного сезона и малого количества осадков в течение года в период с 1985 по 1987 гг. Начиная с 1990-х гг. наблюдается статистически значимое увеличение РП деревьев *P. sylvestris*, произрастающих в импактной зоне, что объясняется их положительным откликом на снижение аэротехногенного загрязнения. В течение последующих нескольких лет значения РП деревьев в импактной зоне достигли и даже несколько превзошли таковые у деревьев в фоновой зоне, несмотря на их относительно высокий возраст. Этот факт демонстрирует высокую адаптационную способность *P. sylvestris*, произрастающей на северном пределе распространения сосновых лесов. Тем не менее, продолжительность положительной реакции исследуемой древесной породы на снижение выбросов поллютантов и механизмы активизации ростовых процессов в сложившихся условиях требуют дальнейших исследований.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Карельского научного центра РАН (Институт леса), заповедника «Пасвик» при поддержке АО «Кольская ГМК» и НОЦ «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукина Н.В., Никонов В.В. 1996. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Т. 2. Апатиты. 192 с.
2. Ярмишко В.Т., Игнатьева О.В., Евдокимова А.С. 2019. Некоторые аспекты мониторинга сосновых лесов в экстремальных условиях Кольского Севера. — Самарский научный вестник. Т. 8, 2 (27): 81–86. DOI: 10.24411/2309-4370-2019-12115
3. Ананьева С.И., Белова Е.А., Булычев А.Г., Булычева И.А., Заколдаева А.А., Зацаринный И.В., Исаева Л.Г., Косякова А.Ю., Ларькова М.С., Лукина Н.В., Мерицев А.В., Поликарпова Н.В., Трущицина О.С., Собчук И.С., Сухарева Т.А., Хлебосолова О.А. 2012. Кольская горно-металлургическая компания (промышленные площадки «Никель» и «Заполярный»): влияние на наземные экосистемы. Рязань. 92 с.
4. Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Хантемирова Е.В., Бергман И.Е., Уразова А.Ф. 2009. Исследование биологической продуктивности насаждений по градиентам аэрозатражений: методический анализ и перспективы. — Вестник МагГТУ. 2(6): 67–76.
5. Ярмишко В.Т. 1997. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб. 210 с.
6. Козлова Л.Н., Онучин А.А. 1992. Влияние загрязнения на транспирацию и структуру хвои сосняков Назаровской котловины. — Анатомия, физиология и экология лесной растительности. 1: 67–69.
7. Кайбияйнен Л.К., Болондинский В.К. 1995. Фотосинтетическая фиксация CO<sub>2</sub> и биомасса лесных ценозов. К методике оценки стока CO<sub>2</sub>. — Физиология растений. 42 (1): 138–143.
8. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. 2000. Роль и структура годовых колец хвойных. Новосибирск. 232 с.
9. Полякова Г.Р., Уразгильдин Р.В. 2013. Влияние техногенного загрязнения на дендрохронологические параметры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). — Вестник ЧелГУ. 7 (298): 191–194.
10. Румянцев Д.Е. 2010. История и методология лесоводственной дендрохронологии. М. 109 с.
11. Кирдянов А.В., Ваганов Е.А. 2006. Разделение климатического сигнала, содержащегося в изменчивости ширины и плотности годовых колец древесины. — Лесоведение. 6: 71–75.
12. Щекалев Р.В., Тарханов С.Н. 2006. Радиальный прирост и качество древесины сосны обыкновенной в условиях атмосферного загрязнения. Екатеринбург. 127 с.
13. Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Бергман И.Е. 2012. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: Исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург. 366 с.
14. Аминева, К.З., Уразгильдин, Р.В., Кулагин, А.Ю. 2014. Прирост стволовой древесины дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях техногенного загрязнения. — Биосфера. 6 (4): 388–399.
15. Ваганов Е.А., Скомаркова М.В., Шульце Э.-Д., Линке П. 2007. Вариации структуры и изотопного состава годовых колец ели и сосны в горах Северной Италии. — Лесоведение. 3: 32–39.
16. Ярмишко В.Т., Борисова О.В., Ярмишко М.А. 2009. Многолетняя динамика состояния южнотажных лесов в условиях промышленного атмосферного загрязнения. — В кн.: Динамика лесных сообществ северо-запада России. СПб. С. 120–156.
17. Тишин Д.В. 2011. Дендрэкология. Методика древесно-кольцевого анализа. Казань. 33 с.

18. Мюльгаузен Д.С., Панкратова Л.А. 2016. Влияние аэротехногенного загрязнения на радиальный прирост сосны обыкновенной на Кольском Севере. — Вестник Санкт-Петербургского университета. 7 (4): 124–133.
19. Алексеев В.А. 1989. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев. — Лесоведение. 4: 51–57.
20. Cybis Dendrochronology. Cybis Elektronik & Data AB. Saltsjöbaden, Sweden. 2022. <https://www.cybis.se>.
21. Шиятов С.Г. 1986. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М. 136 с.
22. Демаков Ю.П., Андреев Н.В. 2014. Закономерности радиального прироста деревьев сосны в приозерных биотопах национального парка «Марий Чодра». — Эко-потенциал. 3(7): 48–58.
23. Николаева С.А., Савчук Д.А. 2009. Комплексный подход и методика реконструкции роста и развития деревьев и лесных сообществ. — Вестник Томского ГУ. 2 (6): 111–125.
24. Специализированный массив климатических данных ВНИИГМИ-МЦД. <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>
25. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. 2006. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М. 508 с.
26. Лебеденко Л.А. 1978. Динамика размножения камбиальных клеток у сосны и ели. — В сб.: Восстановление леса на северо-западе РСФСР: сб. тр. ЛенНИИЛХ. Л. С. 101–111.
27. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2022. <https://www.R-project.org/>
28. Черненко Т.В. 2002. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М. 191 с.
29. Кайбияйнен Л.К., Сафронова Г.И., Болондинский В.К. 1998. Влияние токсичных поллютантов на дыхание хвои и побегов сосны обыкновенной. — Экология. 1: 23–27.
30. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. 1986. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М. 296 с.
31. Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. 2013. Дендрохронология. Воронеж. 140 с.
32. Тимофеев В.П. 1972. Продолжительность и интенсивность сезонного роста деревьев как показатели продуктивности насаждений. — В сб.: Питание древесных растений и проблема повышения продуктивности лесов. Петрозаводск. С. 111–123.
33. Антонова Г.Ф. 1999. Рост клеток хвойных. Новосибирск. 232 с.
34. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С. 1996 Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск. 246 с.
35. Барзут О.С., Старицын В.В. 2012. О влиянии климатических факторов на радиальный прирост можжевельника обыкновенного. — В сб.: Экологические проблемы Арктики и северных территорий. Архангельск. 15: 6–11.
36. Барзут В.М. 1985. Анализ многолетней и погодичной динамики прироста хвойных в Беломорье: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тарту. 27 с.
37. Мюльгаузен Д.С., Панкратова Л.А. 2018. Радиальный прирост сосны обыкновенной в районе деятельности ГМК «Печенганикель». — Вестник ВГУ. 2: 87–95.
38. Хлебосолов Е.И., Макарова О.А., Хлебосолова О.А., Поликарпова Н.В., Зацаринный И.В. 2007. Птицы Пасвика. Рязань. 175 с.
39. Кучеров С.Е., Мулдашев А.А. 2003. Радиальный прирост сосны обыкновенной в районе Карабашского медеплавильного комбината. — Лесоведение. 2: 43–49.
40. Щекалёв Р.В., Тарханов С.Н., Прожерина Н.В., Клочихин А.Н. 2004. Продуктивность сосновых древостоев устья Северной Двины в условиях длительного аэротехногенного воздействия. — В сб.: Проблемы физиологии растений Севера. Мат. Межд. конф. Петрозаводск. С. 212.

ТАБЛИЦА 1  
Характеристика древостоев *P. sylvestris* на исследованных ПП.

№ ПП	Тип леса	Расстояние от источника загрязнения, км	Состав древостоя	Средние		Класс бонитета	Класс санитарного состояния	Полнота абс. / отн.	Густота древостоя, шт./га	Наличный запас, м³/га	Географические координаты, UTM (WGS84)
				$D_{1,3}$ , см	$H$ , м						
Sample plot	Forest type	Distance to pollution source, km	Tree species composition	Mean		Site index	Health class	Stand density abs./rel.	Number of trees, pcs/ha	Growing stock, m³/ha	Coordinates, UTM (WGS84)
				$D_{1,3}$ , cm	$H$ , m						
1	Сосняк брусничный	81	9,7С 0,3Б	18,6	12,5	V–Va	1,91	20,1 / 0,67	790	132	35W 0567234 7648097 68,93558N 28,67637E
2	Сосняк брусничный	68	10С + Б	18,4	12,1	V–Va	1,18	19,9 / 0,68	870	117	35W 0579541 7655173 68,99571N 28,98872E
3	Сосняк брусничный	48	10С + Б	19,7	12,3	Va	2,05	16,4 / 0,56	550	81	35W 0590192 7672418 69,14695N 29,27073E
4	Сосняк вороничный	37	10С + Б	20,8	11,3	V–Va	2,60	15,5 / 0,55	470	90	35W 0594306 7686138 69,26849N 29,38765E
5	Сосняк воронично-брусничный	26	9,8С 0,2Б	17,7	9,6	Va	2,27	12,5 / 0,47	600	65	35W 0603805 7692340 69,32056T 29,63459E
6	Сосняк воронично-брусничный	21	9,8С 0,2Б	20,3	11,4	V–Va	2,77	13,4 / 0,47	520	81	35W 0607724 7697060 69,36130N 29,73928E
7	Сосняк воронично-брусничный	11	8,5С 1,5Б	13,8	9,4	Va	2,63	19,2 / 0,71	1070	100	35W 0616250 7700754 69,39083N 29,96027E



ТАБЛИЦА 2

Коэффициенты корреляции абсолютных значений и индексов радиального прироста (РП) *P. sylvestris* и среднемесячных значений температуры воздуха ( $T_{\text{mean}}$ ) и количества осадков ( $P_{\text{mean}}$ ). Жирным шрифтом отмечены статистически значимые значения.

Показатель / Parameters	Градиент загрязнения / Pollution gradient					
	фоновая зона		буферная зона		импактная зона	
	control zone		buffer zone		impact zone	
	РП	индекс РП	РП	индекс РП	РП	индекс РП
	radial increment value	radial increment index	radial increment value	radial increment index	radial increment value	radial increment index
$T_{\text{mean}}$ (февраль)	0,16	<b>0,33</b>	<b>0,30</b>	0,14	0,03	0,27
$T_{\text{mean}}$ (май)	0,19	<b>0,37</b>	0,21	0,22	0,24	<b>0,35</b>
ГТК	0,01	0,18	-0,16	-0,18	0,26	<b>0,33</b>
СЭТ	0,27	0,11	-0,15	-0,08	0,10	<b>-0,31</b>
$P_{\text{mean}}$ (октябрь)	-0,15	<b>-0,31</b>	0,04	-0,11	-0,02	-0,22
$P_{\text{mean}}$ (июль)	0,29	<b>0,46</b>	0,04	0,12	0,17	<b>0,40</b>
$P_{\text{mean}}$ (вегетационный сезон)	0,28	<b>0,37</b>	0,04	0,02	0,26	0,27

ТАБЛИЦА 3

Коэффициенты корреляции абсолютных значений и индексов радиального прироста (РП) *P. sylvestris* с уровнем выбросов основных поллютантов. Жирным шрифтом отмечены статистически значимые значения.

Градиент загрязнения	Показатель	SO <sub>2</sub> , тыс. т / год	Cu, т / год	Ni, т / год
Pollution gradient	Parameter	SO <sub>2</sub> , thousand t / year	Cu, t / year	Ni, t / year
фоновая зона	РП / индекс РП	-0,16 / -0,11	-0,10 / -0,18	-0,10 / -0,23
буферная зона		0,34 / -0,01	0,38 / -0,04	0,31 / -0,01
импактная зона		<b>-0,87 / -0,23</b>	<b>-0,71 / -0,30</b>	<b>-0,61 / -0,33</b>

ТАБЛИЦА 4

Коэффициенты параметров обобщенных линейных моделей, стандартная ошибка среднего ( $SE$ ),  $t$ ,  $R^2$  и значимость ( $p$ ) влияния выбросов основных поллютантов на радиальный прирост (РП) *P. sylvestris* в фоновой, буферной и импактной зонах. Используемая модель: обобщенные линейные модели (*GLM*), Гамма распределение (*Gamma family*), обратная функция связи (*inverse link function*). Жирным шрифтом отмечены статистически значимые значения.

Параметры	Коэффициенты	Значение	$SE$	$t$	$p$	$R^2$ модели	$p$ модели
Parameters	Coefficients	Value	$SE$	$t$	$p$	$R^2$ of the model	$p$ of the model
SO <sub>2</sub>	<i>Intercept</i>	1,5569	0,1050	14,87	<0,001	0,17	<0,001
	фоновая зона	0,0001	0,0001	0,44	0,662		
	буферная зона	-0,0011	0,0007	-1,54	0,125		
	<b>импактная зона</b>	<b>0,0034</b>	<b>0,0006</b>	<b>5,27</b>	<b>&lt;0,001</b>		
Cu	<i>Intercept</i>	1,5569	0,1841	8,46	<0,001	0,15	<0,001
	фоновая зона	0,0002	0,0009	0,25	0,806		
	буферная зона	-0,0019	0,0015	-1,23	0,219		
	<b>импактная зона</b>	<b>0,0025</b>	<b>0,0007</b>	<b>3,58</b>	<b>&lt;0,001</b>		
Ni	<i>Intercept</i>	1,5750	0,0022	7,18	<0,001	0,12	<0,001
	фоновая зона	0,0001	0,0006	0,12	0,906		
	буферная зона	-0,0011	0,0010	-1,05	<0,294		
	<b>импактная зона</b>	<b>0,0034</b>	<b>0,0009</b>	<b>3,58</b>	<b>&lt;0,001</b>		



Рис. 1. А) Расположение постоянных ПП на разной удаленности от источника аэротехногенного загрязнения (ГМК «Печенганикель», пгт. Никель). Цветами обозначены зоны градиента загрязнения: синий – фоновая (ПП №1–2), зеленый – буферная (ПП №3–4), красный – импактная (ПП №5–7). Б) Роза господствующих ветров в зимний и летний периоды в районе пгт. Никель.

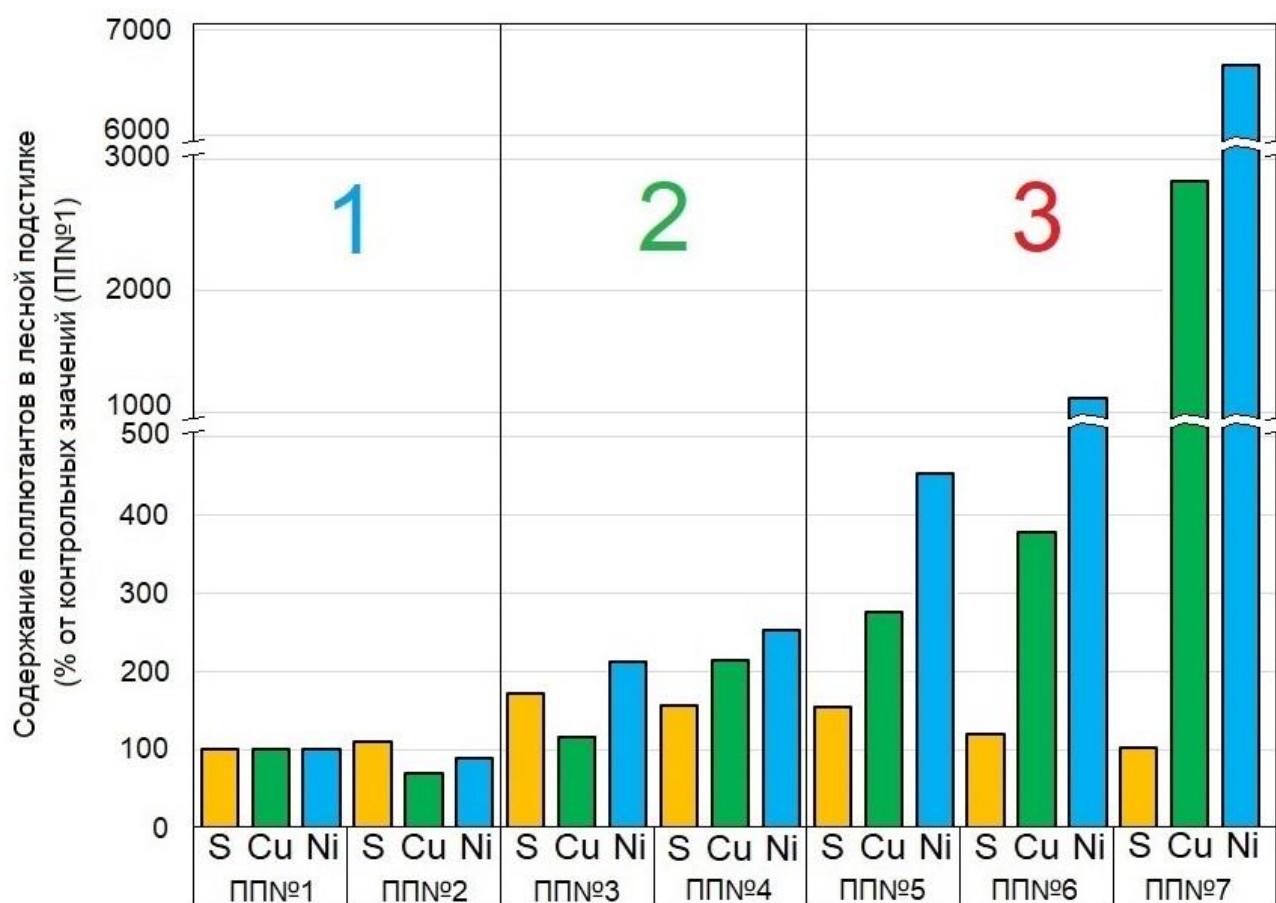


Рис. 2. Содержание элементов (S, Cu, Ni) в верхних горизонтах почвы (горизонт О, лесная подстилка) на исследуемых ПП. Цифрами обозначены выделенные зоны градиента загрязнения: 1 – фоновая (ПП №1–2), 2 – буферная (ПП №3–4), 3 – импактная (ПП №5–7). По горизонтали – изучаемые элементы на исследуемых ПП; по вертикали – % изменения содержания элементов относительно контрольных значений (ПП №1).

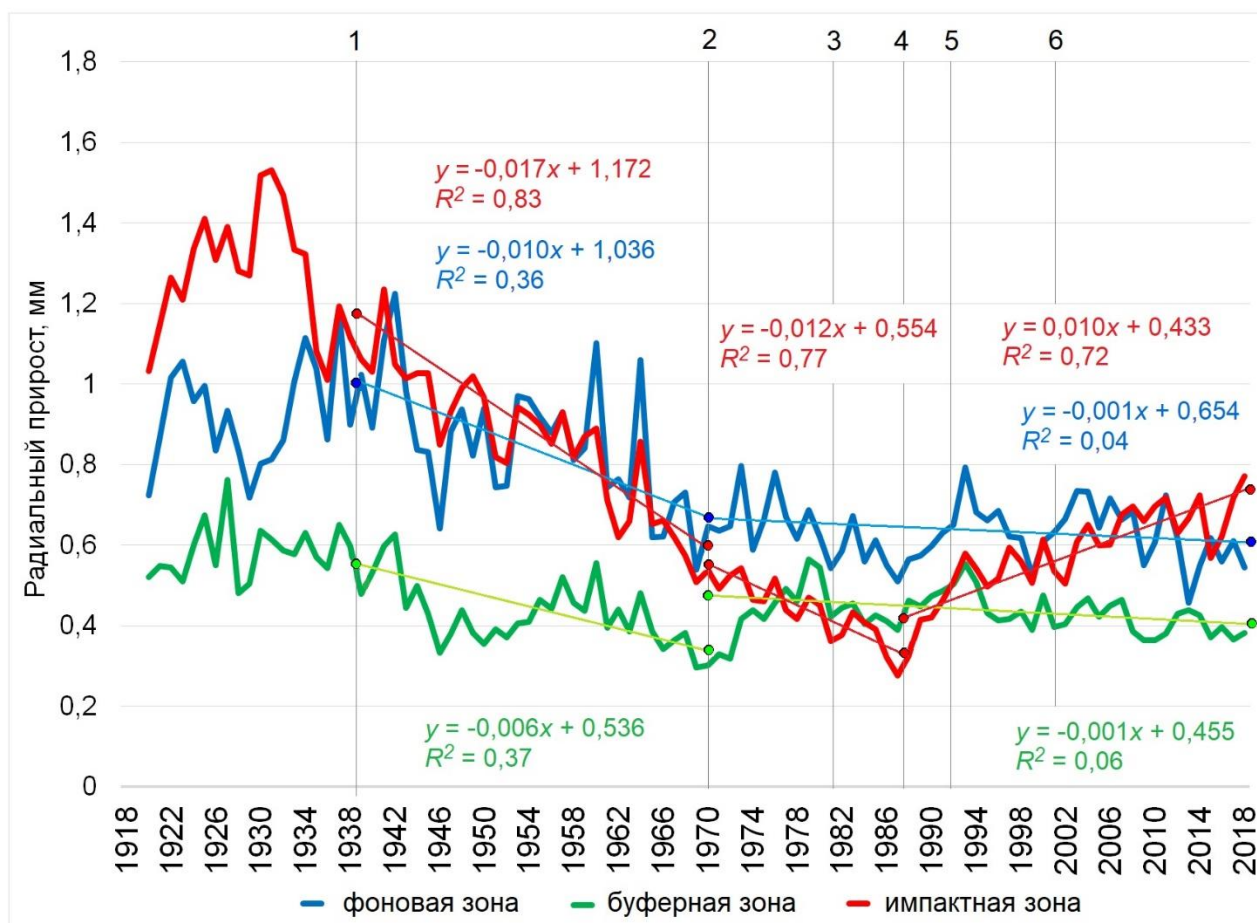


Рис. 3. Динамика радиального прироста (РП) *P. sylvestris* в период 1918–2018 гг. в зависимости от удаленности от источника загрязнения. Цифрами обозначены основные этапы работы ГМК «Печенганикель»: 1) 1937 г. – начало работы; 2) 1970 г. – начало использования руды норильских месторождений с высоким содержанием S; 3–4) 1981–1987 гг. – снижение выбросов  $SO_2$  в связи модернизацией производства; 5) 1992–2002 гг. – отказ от использования руды норильских месторождений; 6) 2001–2018 гг. – оптимизация производства на современном этапе работы.

По горизонтали – годы; по вертикали – величина радиального прироста, мм.



Рис. 4. Форма кроны деревьев в импактной зоне указывает на улучшение роста *P. sylvestris*.



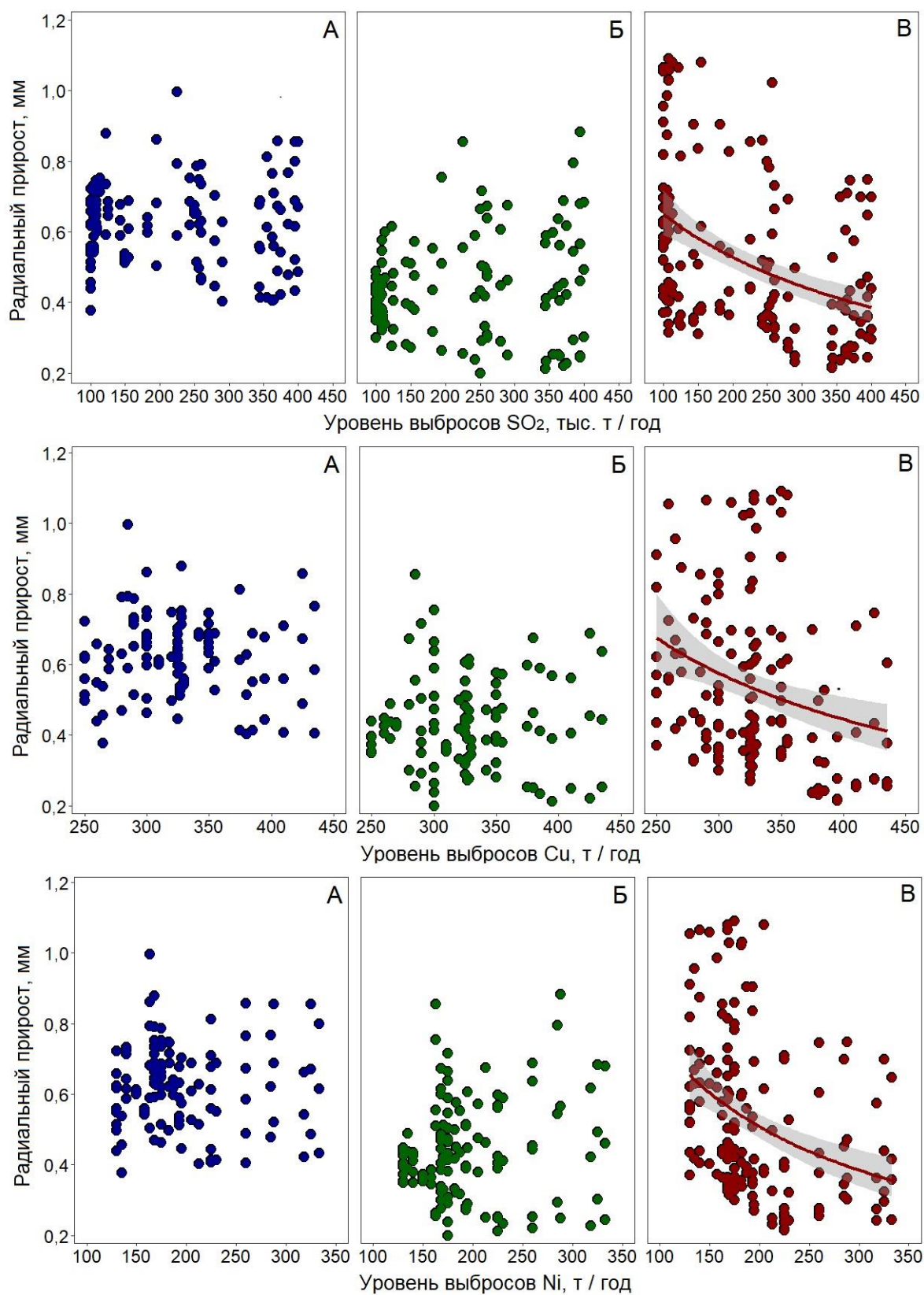


Рис. 5. Зависимость величины радиального прироста (РП) *P. sylvestris* от объемов выбросов основных загрязнителей (SO<sub>2</sub>, Cu, Ni) в фоновой (А), буферной (Б) и импактной (В) зонах. По горизонтали – объем выбросов, т / год (для SO<sub>2</sub> – тыс. т / год); по вертикали – величина радиального прироста, мм.



ТАБЛИЦА 1А

Вариация значений среднемесячной температуры воздуха в вегетационный период относительно средних значений за период с 1955 по 2018 гг. (п. Янискоски, ПП №1).

Жирным шрифтом отмечены наиболее значимые экстремумы.

Год	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Год	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Year	May	June	July	August	September	Year	May	June	July	August	September
<b>2018</b>	<b>83,7</b>	-3,8	35,3	11,1	3,3	1986	2,3	27,6	-7,1	-16,4	4,9
2017	<b>-44,2</b>	-17,6	5,3	-2,2	29,9	<b>1985</b>	<b>-58,1</b>	-1,9	3,9	5,8	-21,8
<b>2016</b>	<b>95,3</b>	6,0	13,4	0,4	<b>42,4</b>	<b>1984</b>	<b>74,4</b>	7,9	-15,1	-9,3	22,1
2015	39,5	-3,8	-21,7	13,8	11,1	1983	14,0	-0,9	1,7	-12,9	-4,5
2014	-4,7	-4,8	15,6	16,4	31,5	1982	-14,0	<b>-42,1</b>	3,1	-8,4	-10,8
<b>2013</b>	<b>97,7</b>	<b>40,3</b>	6,1	20,0	4,9	<b>1981</b>	<b>-20,9</b>	<b>-30,3</b>	<b>-2,0</b>	<b>-10,2</b>	<b>-1,4</b>
2012	30,2	-5,8	-10,0	-6,7	31,5	1980	-30,2	25,6	-9,3	-6,7	11,1
2011	25,6	15,8	6,8	-3,1	15,8	1979	0,0	7,9	3,1	4,0	-13,9
<b>2010</b>	<b>48,8</b>	-9,7	5,3	-8,4	26,8	1978	4,7	-1,9	-16,6	-13,8	-21,8
2009	32,6	-9,7	-10,0	11,1	-15,5	<b>1977</b>	<b>-30,2</b>	<b>-15,6</b>	<b>-3,4</b>	<b>-6,7</b>	<b>-39,0</b>
2008	-20,9	-7,8	-7,8	-17,3	-10,8	1976	37,2	-21,5	-2,7	0,4	15,8
2007	0,0	0,1	-8,6	12,9	-1,4	1975	18,6	-21,5	-16,6	-16,4	39,3
2006	34,9	17,8	-5,6	14,7	1,7	1974	-34,9	17,8	14,9	5,8	<b>-51,5</b>
2005	-16,3	9,9	6,8	13,8	11,1	1973	-2,3	19,7	27,3	-7,6	-9,2
2004	14,0	-5,8	25,1	4,9	-3,0	1972	-25,6	38,4	26,6	17,3	-18,6
2003	34,9	-12,7	22,2	0,4	-13,9	1971	-30,2	-10,7	-8,6	0,4	-3,0
2002	27,9	9,9	7,5	2,2	28,3	1970	-7,0	30,5	14,9	15,6	-
2001	-23,3	18,7	3,9	-4,0	11,1	<b>1969</b>	<b>-58,1</b>	<b>-14,6</b>	-	-	<b>-43,7</b>
2000	7,0	-4,8	2,4	1,3	28,3	<b>1968</b>	<b>-79,1</b>	<b>-5,8</b>	<b>-32,7</b>	<b>-10,2</b>	26,8
<b>1999</b>	<b>-65,1</b>	28,6	1,7	-16,4	-15,5	1967	0,0	-0,9	-2,0	17,3	-43,7
1998	-25,6	-26,4	4,6	-11,1	29,9	1966	-34,9	12,9	3,1	-12,9	3,3
1997	-23,3	-1,9	6,8	20,9	-10,8	<b>1965</b>	<b>-76,7</b>	<b>-5,8</b>	<b>-23,9</b>	<b>-12,0</b>	<b>-21,8</b>
<b>1996</b>	<b>-72,1</b>	-16,6	-9,3	19,1	-9,2	1964	2,3	-3,8	6,1	-4,9	37,7
1995	-18,6	14,8	-15,1	-4,0	-17,1	<b>1963</b>	<b>146,5</b>	-21,5	-12,9	1,3	-9,2
1994	-23,3	-7,8	3,1	7,6	<b>-56,2</b>	1962	-25,6	-14,6	-21,7	-18,2	3,3
1993	-4,7	-36,2	1,0	-0,4	37,7	1961	-37,2	25,6	8,3	4,0	9,5
<b>1992</b>	<b>53,5</b>	17,8	-15,9	-15,6	-	<b>1960</b>	<b>86,0</b>	6,0	37,5	10,2	-24,9
1991	-18,6	3,0	-	-	-15,5	1959	37,2	1,1	-2,7	12,0	-4,5
1990	-16,3	-3,8	-2,7	5,8	6,4	<b>1958</b>	<b>-72,1</b>	-1,9	-13,7	9,3	-9,2
<b>1989</b>	<b>55,8</b>	24,6	-1,2	6,7	11,1	1957	-34,9	-15,6	19,2	7,6	-32,7
1988	-4,7	12,9	13,4	-0,4	-4,5	1956	23,3	19,7	-17,3	-20,0	1,7
<b>1987</b>	<b>-14,0</b>	<b>-11,7</b>	<b>-17,3</b>	<b>-23,6</b>	<b>-43,7</b>	<b>1955</b>	<b>-51,2</b>	<b>-31,3</b>	<b>-8,6</b>	12,0	<b>40,8</b>

ТАБЛИЦА 2А

Вариация значений количества осадков по сезонам относительно средних значений за период с 1970 по 2019 гг. (п. Янискоски, ПП №1). Жирным шрифтом отмечены наиболее значимые экстремумы.

Годы	Осень	Зима	Весна	Лето	Годы	Осень	Зима	Весна	Лето
Years	Autumn	Winter	Spring	Summer	Years	Autumn	Winter	Spring	Summer
2018-2019	-23,1	14,7	-12,3	-13,3	1993-1994	-13,7	29,9	-30,4	-12,8
<b>2017-2018</b>	-19,4	<b>41,8</b>	-3,1	<b>43,7</b>	1992-1993	-19,9	-9,4	19,0	4,1
<b>2016-2017</b>	3,1	<b>62,3</b>	-9,9	14,0	<b>1991-1992</b>	-	-14,8	-31,8	<b>75,8</b>
<b>2015-2016</b>	-33,2	14,0	-15,8	<b>75,4</b>	<b>1990-1991</b>	<b>-49,5</b>	11,0	2,7	<b>-49,7</b>
<b>2014-2015</b>	-32,6	-29,0	<b>60,8</b>	-7,4	1989-1990	-9,8	-	-23,3	-17,8
2013-2014	-1,4	-0,3	1,4	-12,5	1988-1989	4,0	-16,4	-	3,8
<b>2012-2013</b>	<b>57,6</b>	<b>-1,1</b>	<b>-15,3</b>	<b>-45,7</b>	<b>1987-1988</b>	<b>-41,0</b>	-14,7	-5,5	16,3
2011-2012	24,1	-34,9	5,0	2,4	1986-1987	-8,9	-19,4	-9,6	6,7
2010-2011	-9,0	-4,1	9,3	15,4	<b>1985-1986</b>	<b>46,7</b>	<b>-44,7</b>	-21,7	7,1
2009-2010	-18,0	-24,8	24,8	28,8	<b>1984-1985</b>	<b>-36,3</b>	<b>-26,6</b>	<b>-3,9</b>	<b>-49,5</b>
2008-2009	17,8	9,4	15,2	1,4	<b>1983-1984</b>	<b>42,1</b>	8,8	<b>57,2</b>	20,8
2007-2008	4,0	18,6	7,8	-23,7	1982-1983	0,2	-22,0	6,1	-33,8
2006-2007	-4,9	-25,1	30,6	21,2	1981-1982	-14,0	18,1	24,0	14,9
2005-2006	41,9	1,1	6,4	-13,4	1980-1981	13,5	-8,9	10,3	38,5
<b>2004-2005</b>	-1,4	21,4	<b>72,7</b>	-0,7	<b>1979-1980</b>	2,5	5,2	-10,4	<b>-51,4</b>
2003-2004	11,8	-38,6	14,4	13,3	1978-1979	0,0	29,3	-2,7	-34,3
2002-2003	-12,5	9,0	-10,0	4,8	1977-1978	-20,9	-8,5	-26,0	-8,7
2001-2002	-12,1	19,1	-23,1	-8,6	1976-1977	4,0	-10,1	37,3	22,3
<b>2000-2001</b>	-32,8	<b>58,0</b>	0,5	26,6	<b>1975-1976</b>	2,7	38,5	<b>-57,9</b>	-11,7
<b>1999-2000</b>	31,1	<b>-47,6</b>	<b>76,3</b>	-15,9	1974-1975	-13,8	35,5	39,8	3,3
1998-1999	-	-	-16,6	40,8	<b>1973-1974</b>	22,1	13,1	<b>-63,1</b>	22,8
1997-1998	-7,9	14,8	-	-	1972-1973	12,8	-34,9	-22,0	-13,1
<b>1996-1997</b>	1,8	<b>-44,5</b>	<b>-4,4</b>	<b>-37,3</b>	1971-1972	42,1	2,3	11,1	-31,0
1995-1996	<b>52,1</b>	-14,5	-10,0	-20,0	1970-1971	6,5	-	-38,1	-18,3
1994-1995	-15,2	18,6	-13,0	28,7	<b>1969-1970</b>	-	-	<b>-52,9</b>	-21,9