

АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

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

© 2023 г. И. В. Ромашкин¹ *, Н. В. Геникова¹, А. М. Крышень¹,
С. А. Мошников¹, Н. В. Поликарпова²

¹Институт леса Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Россия

²Государственный природный заповедник “Пасвик”, п. Никель, Россия

*e-mail: 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 соответствующие показатели в фоновой зоне, 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

DOI: 10.31857/S0033994623010089, **EDN:** YAP0VC

Предприятия горнодобывающей, металлургической и лесоперерабатывающей промышленности оказывают негативное влияние на прилегающие к ним территории, что неминуемо приводит к снижению продуктивности, нарушению устойчивости и постепенной деградации лесных экосистем [1, 2]. Наиболее сильное техногенное воздействие связывают с деятельностью медно-никелевых предприятий, выбрасывающих в атмосферу значительные объемы диоксида серы (SO₂) 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 древостоев 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 повреждению 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 вида, так и совокупным действием экологических и климатических условий [11]. В большинстве исследований [12–14] с увеличением объемов загрязнения отмечается достоверное снижение РП, которое сопровождается увеличением амплитуды его колебаний 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 несколько десятилетий [13]. В 2018 г. 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 обл.) 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 г. Пик медно-никелевого производства пришелся на 1970-е гг. К этому времени на комбинаты “Печенганикель” и “Североникель” поставлялось более 1 млн т норильской руды с более высоким содержанием серы (S) (около 30%) по сравнению с рудой Кольских месторождений (до 5%). Как итог, общий объем выбросов SO₂ в 1977 г. составил 411 тыс. т. Введение в строй первой (1981 г.) и второй (1987 г.) линий сернокислотного производства позволило снизить выбросы SO₂ 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 SO₂, так и тяжелых металлов. Последующие оптимизационные мероприятия, включающие модернизацию трактов газоудаления конвертеров и реконструкцию сернокислотного производства, позволили сократить выбросы SO₂ 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 разном удалении от источника загрязнения; б) определить влияние климатических (метеорологических) показателей (среднемесячные температура воздуха и количество осадков) на динамику РП *P. sylvestris*; в) определить влияние объема выбросов основных поллютантов медно-никелевого производства – SO₂, Ni и Cu, на динамику РП сосны. 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 р-н, Мурманская обл.). 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 табл. 1.

На основе данных по содержанию S, Ni и Cu в лесной подстилке (горизонт O) 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 лесных массивов. Таксационные работы проводили в соответствии с общепринятой методикой. Проводили сплошной пересчет всех деревьев (живых и сухостоя) с определением диаметра с точностью до 0.1 см. Высотомером Suunto у 20–25 деревьев на ПП измеряли высоту. С помощью возрастного бурава Пресслера у основания ствола 5–8 деревьев отбирали керны для определения 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 использовали шкалу “Правил санитарной безопасности в лесах” [19]. Жизненное состояние деревьев определяли по совокупности основных внешних признаков: цвет и возраст хвои, изреживание скелетной части кроны, доля отмерших и отмирающих ветвей. Дополнительно оценивали влияние лесопатоло-

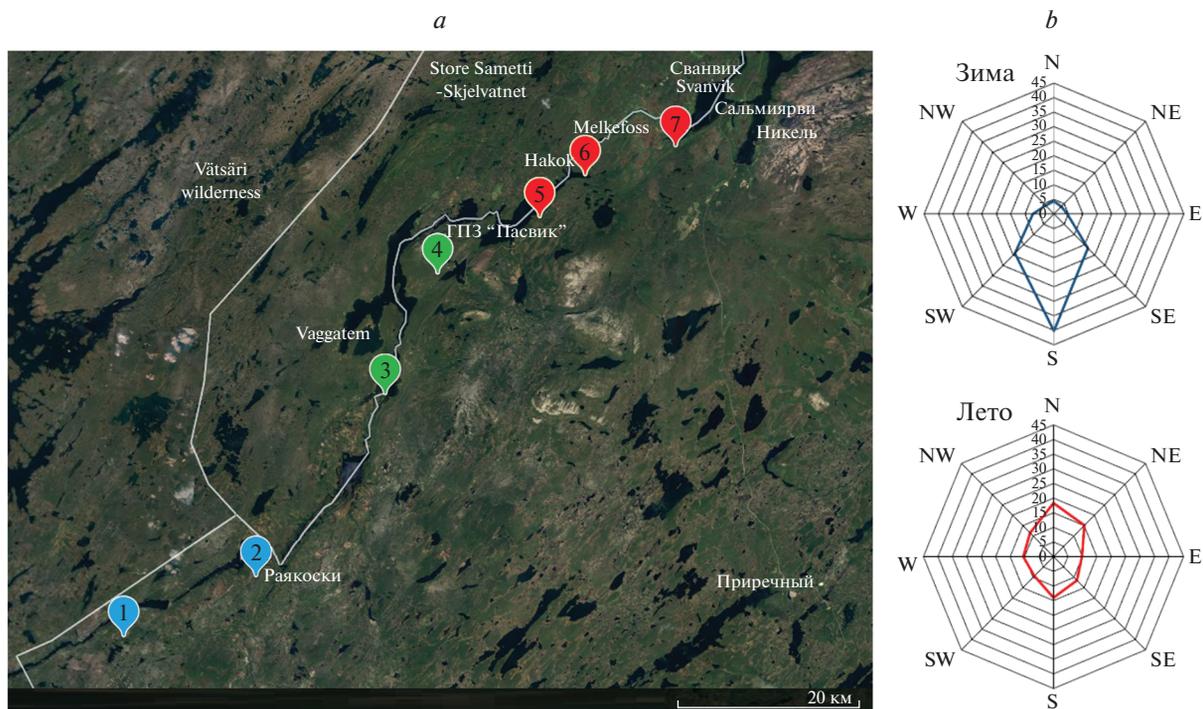


Рис. 1. а) Расположение постоянных ПП на разном удалении от источника аэротехногенного загрязнения (ГМК “Печенганикель”, пгт. Никель). Цветами обозначены зоны загрязнения: синий – фоновая (ПП № 1–2), зеленый – буферная (ПП № 3–4), красный – импактная (ПП № 5–7). б) Роза господствующих ветров в зимний и летний периоды в районе пгт. Никель.

Fig. 1. а) Location of the permanent sample plots at different distances from the source of aerotechnogenic pollution (“Pechenganikel”, Nickel). The colors indicate pollution zones: blue – control zone (PSP № 1–2), green – buffer zone (PSP № 3–4), red – impact zone (PSP № 5–7). б) Summer and winter wind roses of the town of Nickel.

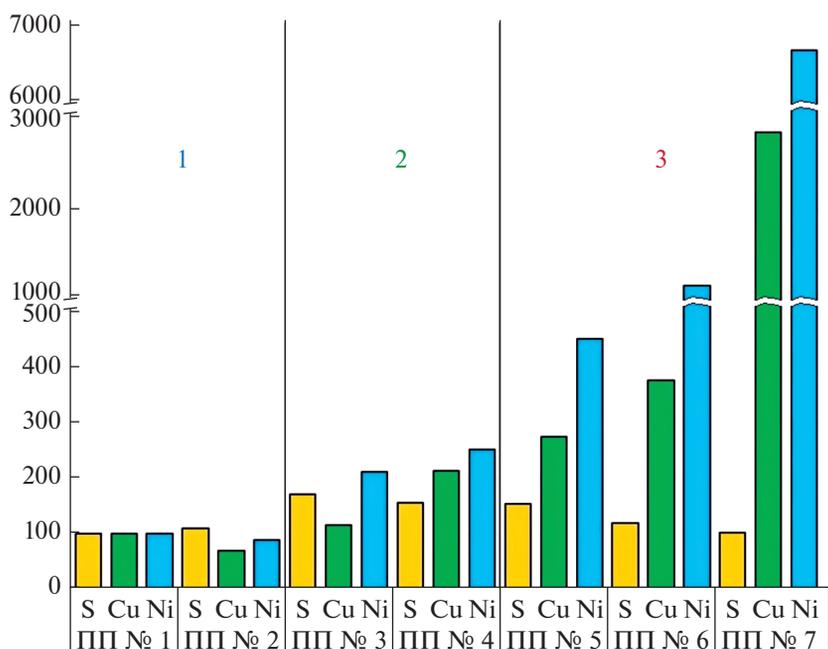


Рис. 2. Содержание элементов-загрязнителей (S, Cu, Ni) в лесной подстилке (горизонт O) на исследуемых ПП. Цифрами обозначены выделенные зоны загрязнения: 1 – фоновая (ПП № 1–2), 2 – буферная (ПП № 3–4), 3 – импактная (ПП № 5–7). По горизонтали – изучаемые элементы; по вертикали – изменения содержания элементов относительно контрольных (ПП № 1) значений (%).

Fig. 2. The pollutants content (S, Cu, Ni) in the forest litter (O horizon) at the studied sample plots. The numbers indicate pollution zones: 1 – control zone (PSP № 1–2), 2 – buffer zone (PSP № 3–4), 3 – impact zone (PSP № 5–7). X-axis – the studied elements; y-axis – change in the element content relative to the control (PSP № 1) level (%).

Таблица 1. Характеристика древостоев *Pinus sylvestris* L. на исследованных пробных площадях (ПП)
Table 1. Characteristics of the studied *P. sylvestris* forest stands

№ ПП Sample plot	Тип леса Forest type	Расстояние от источника загрязнения, км Distance to source of pollution, km	Состав древостоя Tree species composition	Средние Mean		Класс бонитета Site index	Класс санитарного состояния Health class	Полнота абс./отн. Stand density abs./rel.	Густота древостоя, шт./га Number of trees, pcs/ha	Наличный запас, м ³ /га Growing stock, m ³ /ha	Географические координаты, UTM (WGS84) Coordinates, UTM (WGS84)
				$D_{1.3}$, см $D_{1.3}$, cm	H , м H , m						
1	Сосняк брусничный Pinetum vacciniosum	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 Pinetum vacciniosum	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 Pinetum vacciniosum	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 Pinetum empetrosium	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 Pinetum empetroso-vacciniosum	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 Pinetum empetroso-vacciniosum	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 Pinetum empetroso-vacciniosum	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

Примечание: С – *Pinus sylvestris*, Б – *Betula pubescens*, $D_{1.3}$ – диаметр ствола на высоте 1.3 м, H – высота.
Note: С – *Pinus sylvestris*, Б – *Betula pubescens*, $D_{1.3}$ – trunk diameter at 1.3 m height, H – height.

гических 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 (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* отбирали 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. 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, вычисленным 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 SO₂ в связи с 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]:

$$\text{ГТК} = (\Sigma P / \Sigma_{t10}) \times 10, \quad (1)$$

где ΣP – сумма осадков за период с температурой выше +10 °С; Σ_{t10} – сумма температур выше +10 °С за тот же период.

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

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

где Σi – СЭТ выше +5 °С (градус-день), 1–12 – месяц года, Ni – количество дней в месяце, T_{avg} – среднемесячная температура воздуха (°С).

Статистический анализ проводили в программном пакете R [27] с использованием обобщенных линейных моделей (*GLM*) и многогранного 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 гг., верхние – 1941, 1960, 1973, 1993, 2003 гг. 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 общая тенденция изменения РП деревьев в буферной зоне, так же как в фоновой, состояла в его снижении. В период с 1939 по 1970 гг. кривая харак-

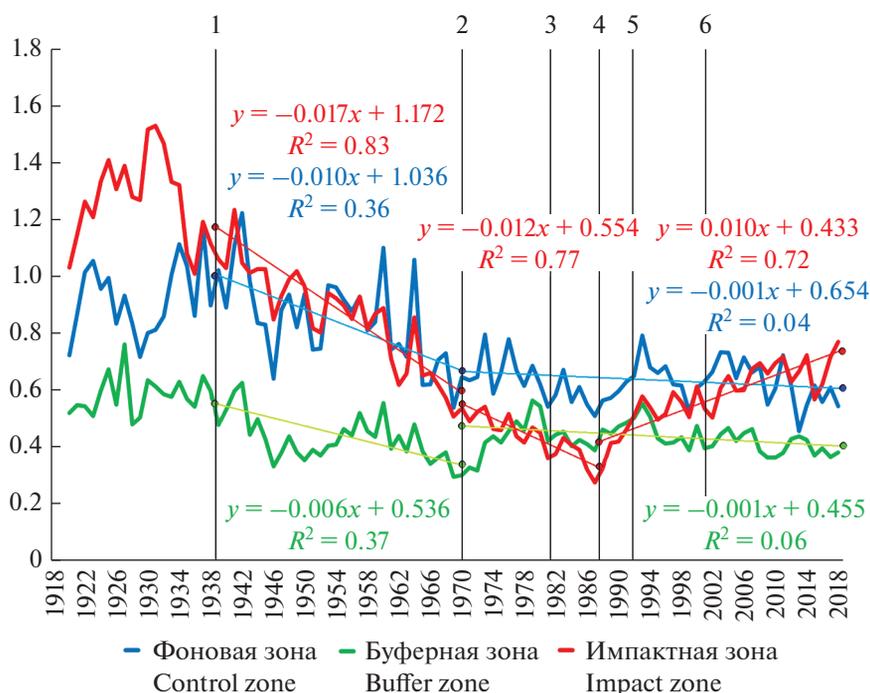


Рис. 3. Динамика радиального прироста *Pinus sylvestris* в период 1918–2018 гг. в зависимости от удаленности от источника загрязнения. Цифрами обозначены основные этапы работы ГМК “Печенганикель”: 1) 1937 г. – начало работы; 2) 1970 г. – начало использования руды норильских месторождений с высоким содержанием серы; 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.

Fig. 3. Dynamics of *P. sylvestris* radial increment in 1918–2018 depending on the distance from the pollution source. The numbers indicate the main stages of the “Pechenganikel” functioning: 1) 1937 – the beginning of the operation; 2) 1970 – start of Norilsk high-sulfur ore processing; 3–4) 1981–1987 – reduction of SO_2 emissions due to the modernizations; 5) 1992–2002 – cessation of Norilsk ore processing; 6) 2001–2018 – production optimizations at the present stage. X-axis – years; y-axis – the radial increment, mm.

теризовалась несколько меньшим наклоном по сравнению с фоновыми условиями ($A = -0.006$), в то время как в период с 1971 по 2018 гг. она имела аналогичный наклон. Среднее значение РП было ниже фонового и составило 0.46 мм/год ($SE = \pm 0.01$).

Динамика РП деревьев *P. sylvestris* в импактной зоне в целом схожа с таковой 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. Черненьковой [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 процессов роста [28, 29]. Наши данные, как минимум, не опровергают данное утверждение.

Начиная с 1970 г. в импактной зоне наблюдается более интенсивное, чем в фоновой зоне, сни-

жение РП деревьев сосны ($A = -0.012$) 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 РП от источника загрязнения. В указанный период в фоновой зоне величина РП составила в среднем 0.54 мм/год ($SE = \pm 0.02$), то есть была на 29% ниже, чем за весь исследуемый период. В буферной и импактной зонах, прирост составил 0.42 мм/год ($SE = \pm 0.01$) и 0.33 мм/год ($SE = \pm 0.03$), то есть был ниже 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. В импактной зоне 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 на-



Рис. 4. Форма кроны деревьев в импактной зоне указывает на улучшение роста *Pinus sylvestris*.
Fig. 4. The tree crown shape in the impact zone indicates an improvement in the *Pinus sylvestris* growth.

грузки, демонстрируют его стабильное увеличение ($A = 0.010$) в последующие годы. Более того, после 2007 г. значения РП деревьев в импактной зоне оказываются равными и даже превышают таковые деревьев фоновой зоны, несмотря на 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 под-

нимают вопрос о трудности подбора участков (прежде всего контрольных) для проведения дендрохронологических исследований. Отмеченное несоответствие в большей степени связано с некоторыми различиями возраста 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 $+4.3^\circ\text{C}$ ($+0.9...+10.6^\circ\text{C}$), июне — $+10.2^\circ\text{C}$ ($+5.9...+14.3^\circ\text{C}$), июле — $+13.7^\circ\text{C}$ ($+9.2...+18.8^\circ\text{C}$), августе — $+11.3^\circ\text{C}$ ($+8.6...+13.6^\circ\text{C}$), сентябре — $+6.4^\circ\text{C}$ ($+2.8...+9.1^\circ\text{C}$). 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 гг. В эти годы особенно заметно снижение температуры в мае, что, вероятно, сдвинуло сроки начала вегетационного сезона и уменьшило

Таблица 2. Различие (%) среднемесячной температуры воздуха в вегетационный период по годам и средних многолетних значений за период с 1955 по 2018 гг. (п. Янискоски, ПП № 1)**Table 2.** Difference (%) of monthly average temperature over the growing season and long-term averages for the period of 1955–2018 (Yaniskoski, PSP № 1)

Год Year	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Сентябрь September	Год Year	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Сентябрь September
2018	83.7	–3.8	35.3	11.1	3.3	1986	2.3	27.6	–7.1	–16.4	4.9
2017	–44.2	–17.6	5.3	–2.2	29.9	1985	–58.1	–1.9	3.9	5.8	–21.8
2016	95.3	6.0	13.4	0.4	42.4	1984	74.4	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	–42.1	3.1	–8.4	–10.8
2013	97.7	40.3	6.1	20.0	4.9	1981	–20.9	–30.3	–2.0	–10.2	–1.4
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
2010	48.8	–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	1977	–30.2	–15.6	–3.4	–6.7	–39.0
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	–51.5
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	1969	–58.1	–14.6	–	–	–43.7
2000	7.0	–4.8	2.4	1.3	28.3	1968	–79.1	–5.8	–32.7	–10.2	26.8
1999	–65.1	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	1965	–76.7	–5.8	–23.9	–12.0	–21.8
1996	–72.1	–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	1963	146.5	–21.5	–12.9	1.3	–9.2
1994	–23.3	–7.8	3.1	7.6	–56.2	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
1992	53.5	17.8	–15.9	–15.6	–	1960	86.0	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	1958	–72.1	–1.9	–13.7	9.3	–9.2
1989	55.8	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
1987	–14.0	–11.7	–17.3	–23.6	–43.7	1955	–51.2	–31.3	–8.6	12.0	40.8

Примечание. Жирным шрифтом отмечены наиболее значимые экстремумы.

Note. The most significant extremes are given in bold.

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 гг. (табл. 2). При этом аномально теплая погода в мае отмечена в 1960, 1963, 1984, 1989, 1992, 2010, 2013, 2016 и 2018 гг. (табл. 2). Указанное чередование “теплых” и “холодных” лет в целом соответствует 11-летним

солнечным циклам 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

Таблица 3. Различие (%) количества осадков по сезонам и средних многолетних значений за период с 1970 по 2019 гг. (п. Янискоски, ПП № 1)**Table 3.** Difference (%) of precipitation by seasons and long-term averages for the period of 1970–2019 (Yaniskoski, PSP № 1)

Годы Years	Осень Autumn	Зима Winter	Весна Spring	Лето Summer	Годы Years	Осень Autumn	Зима Winter	Весна Spring	Лето Summer
2018–2019	–23.1	14.7	–12.3	–13.3	1993–1994	–13.7	29.9	–30.4	–12.8
2017–2018	–19.4	41.8	–3.1	43.7	1992–1993	–19.9	–9.4	19.0	4.1
2016–2017	3.1	62.3	–9.9	14.0	1991–1992	–	–14.8	–31.8	75.8
2015–2016	–33.2	14.0	–15.8	75.4	1990–1991	–49.5	11.0	2.7	–49.7
2014–2015	–32.6	–29.0	60.8	–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
2012–2013	57.6	–1.1	–15.3	–45.7	1987–1988	–41.0	–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	1985–1986	46.7	–44.7	–21.7	7.1
2009–2010	–18.0	–24.8	24.8	28.8	1984–1985	–36.3	–26.6	–3.9	–49.5
2008–2009	17.8	9.4	15.2	1.4	1983–1984	42.1	8.8	57.2	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
2004–2005	–1.4	21.4	72.7	–0.7	1979–1980	2.5	5.2	–10.4	–51.4
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
2000–2001	–32.8	58.0	0.5	26.6	1975–1976	2.7	38.5	–57.9	–11.7
1999–2000	31.1	–47.6	76.3	–15.9	1974–1975	–13.8	35.5	39.8	3.3
1998–1999	–	–	–16.6	40.8	1973–1974	22.1	13.1	–63.1	22.8
1997–1998	–7.9	14.8	–	–	1972–1973	12.8	–34.9	–22.0	–13.1
1996–1997	1.8	–44.5	–4.4	–37.3	1971–1972	42.1	2.3	11.1	–31.0
1995–1996	52.1	–14.5	–10.0	–20.0	1970–1971	6.5	–	–38.1	–18.3
1994–1995	–15.2	18.6	–13.0	28.7	1969–1970	–	–	–52.9	–21.9

Примечание. Жирным шрифтом отмечены наиболее значимые экстремумы.
Note. The most significant extremes are given in bold.

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) (табл. 3). В течение рассматриваемого периода можно выделить четыре засушливых периода: лето 1980 г., осень 1984–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 пришлась 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 закономерности связи между этими параметрами (табл. 4).

Анализ связи РП с метеорологическими показателями не дал однозначных результатов, 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. 5). При этом наибольшие значения коэффициента корреляции (*R*) с метеопараметрами демонстрируют индексы РП. Так,

Таблица 4. Коэффициенты корреляции абсолютных значений (над чертой) и индексов радиального прироста (под чертой) *Pinus sylvestris* и среднемесячных значений температуры воздуха (T_{mean}) и количества осадков (P_{mean})
Table 4. Correlation coefficients of absolute values (in numerator) and radial growth indices (in denominator) of *Pinus sylvestris* and the values of air temperature (T_{mean}) and precipitation (P_{mean})

Показатель/ Parameters	Градиент загрязнения/Pollution gradient		
	фоновая зона control zone	буферная зона buffer zone	импактная зона impact zone
$T_{\text{среднее}}$ (февраль) T_{mean} (february)	0.16/ 0.33	0.30 /0.14	0.03/0.27
$T_{\text{среднее}}$ (май) T_{mean} (may)	0.19/ 0.37	0.21/0.22	0.24/ 0.35
ГТК	0.01/0.18	-0.16/-0.18	0.26/ 0.33
НТК			
СЭТ	0.27/0.11	-0.15/-0.08	0.10/ -0.31
SET			
P_{mean} (октябрь) P_{mean} (october)	-0.15/ -0.31	0.04/-0.11	-0.02/-0.22
P_{mean} (июль) P_{mean} (july)	0.29/ 0.46	0.04/0.12	0.17/ 0.40
P_{mean} (вегетационный сезон) P_{mean} (growing season)	0.28/ 0.37	0.04/0.02	0.26/0.27

Примечание: T_{mean} – среднемесячные значения температуры воздуха; P_{mean} – среднемесячные значения количества осадков; ГТК – гидротермический коэффициент Селянинова; СЭТ – сумма эффективных температур. Жирным шрифтом отмечены статистически значимые значения.

Note: T_{mean} – monthly average temperature values; P_{mean} – monthly average precipitation values; НТК – Selyaninov's hydrothermal coefficient; SET – the sum of effective temperatures. Statistically significant values are given in bold.

для температуры мая коэффициент корреляции 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 соавт. [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 вызывает уменьшение РП [35]. Весьма вероятно, что понижение средне-

месячной температуры мая приводит к уменьшению продолжительности вегетационного сезона и, таким образом, значительно снижает интенсивность роста *P. sylvestris* в условиях Крайнего Севера и без того достаточно суровых. 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 на 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 возростала, 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, причин-

Таблица 5. Коэффициенты корреляции абсолютных значений (над чертой) и индексов радиального прироста (под чертой) *Pinus sylvestris* с уровнем выбросов основных поллютантов
Table 5. Correlation coefficients of absolute values (in numerator) and radial growth indices (in denominator) of *P. sylvestris* and the emission levels of the main pollutants

Градиент загрязнения Pollution gradient	SO ₂ , тыс. т/год SO ₂ , thousand t/year	Cu, т/год Cu, t/year	Ni, т/год Ni, t/year
Фоновая зона Control zone	-0.16/-0.11	-0.10/-0.18	-0.10/-0.23
Буферная зона Buffer zone	0.34/-0.01	0.38/-0.04	0.31/-0.01
Импактная зона Impact zone	-0.87/-0.23	-0.71/-0.30	-0.61/-0.33

Примечание. Жирным шрифтом отмечены статистически значимые значения.

Note. Statistically significant values are given in bold.

но-следственная связь между величиной РП и метеорологическими показателями может искажаться под влиянием техногенного загрязнения. Хотя нами не установлено значимых изменений реакции РП на погодные условия 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 режима 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 отношении 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 – SO₂, 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 *P. sylvestris* и его индексом в импактной зоне: в зависимости от загрязнителя *R* корреляции варьировал от –0.61 до –0.87 (табл. 5). Схожие закономерности получены и другими исследователями [3, 18, 40]. В своем исследовании Д.С. Мюльгаузен и Л.А. Панкратова [18] не отмечали каких-либо различий в коэффициентах корреляции 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. 5).

Анализ данных с использованием обобщенных генерализированных моделей (GLM) подтвердил статистически значимое влияние уровня выбросов SO₂, Cu и Ni на РП деревьев *P. sylvestris*, расположенных только в импактной зоне (табл. 6, рис. 5). Отмеченное увеличение РП в импактной зоне в начале 1990-х гг. с большой вероятностью связано со снижением выбросов SO₂ 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 мо-

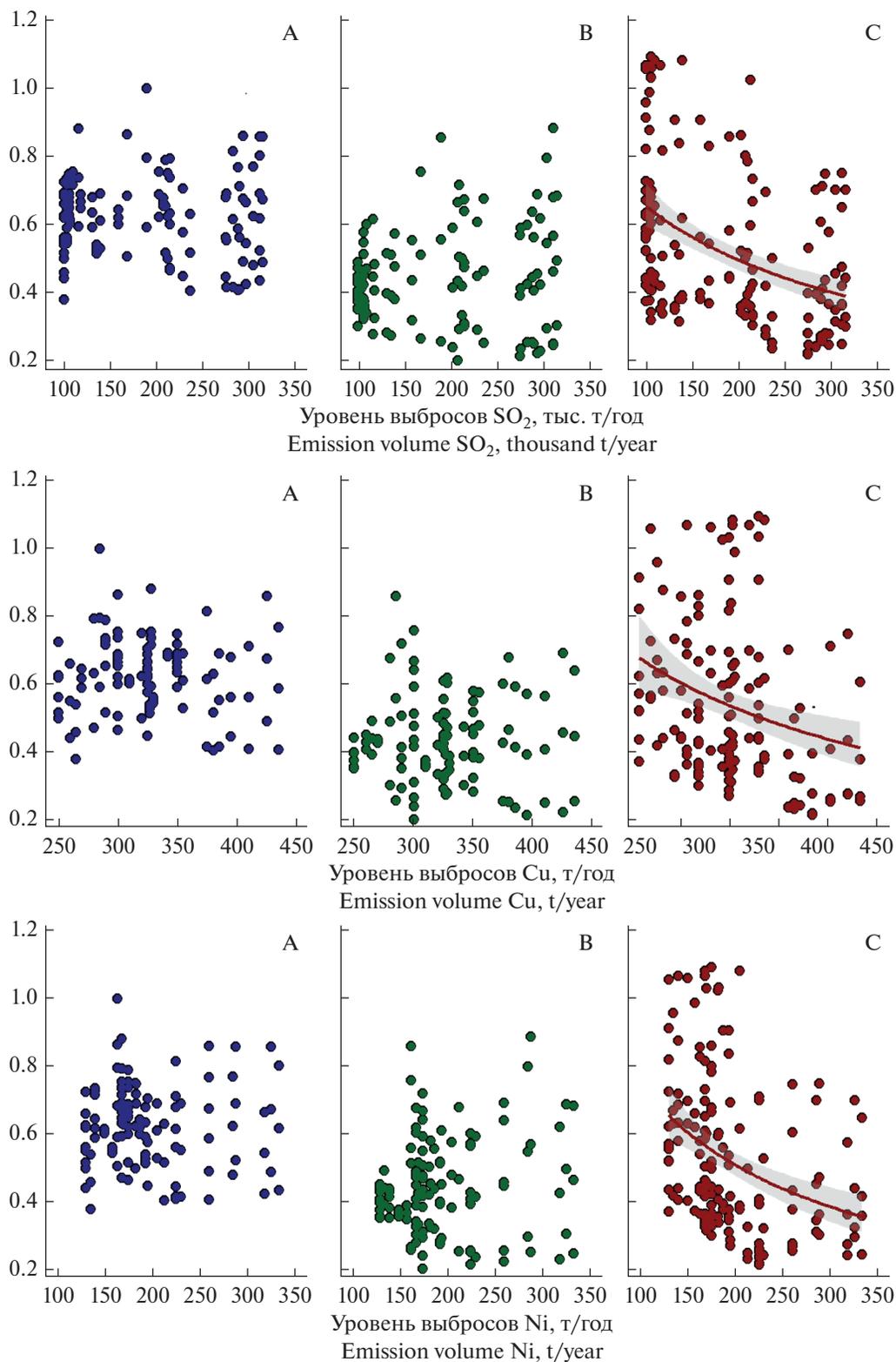


Рис. 5. Зависимость величины радиального прироста *Pinus sylvestris* от объемов выбросов основных загрязнителей (SO₂, Cu, Ni) в фоновой (А), буферной (В) и импактной (С) зонах.

По горизонтали – объем выбросов, т/год (для SO₂ – тыс. т/год); по вертикали – величина радиального прироста, мм.
Fig. 5. Dependence of *Pinus sylvestris* radial increment of on the volume of the main pollutants emission (SO₂, Cu, Ni) in the control (A), buffer (B), and impact (C) zones. X-axis – emission volume, t/year (for SO₂ – thousand t/year); y-axis – the radial increment, mm.

Таблица 6. Статистические параметры оценки влияния выбросов основных загрязнителей на радиальный прирост *Pinus sylvestris* в фоновой, буферной и импактной зонах. Используемая модель: обобщенные линейные модели (GLM), гамма распределение (*Gamma distribution*), обратная функция связи (*inverse link function*)

Table 6. Statistical parameters of the effect of pollutant emissions on the radial increment of *P. sylvestris* in the control, buffer and impact zones. Applied model: *GLM, Gamma distribution, inverse link function*

Загрязнители Pollutants	Параметры уравнений Parameters of the equations					Параметры модели Parameters of the model	
	Коэффициенты Coefficients	Значение Value	SE	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>R</i> ²	<i>p</i>
SO ₂	<i>Intercept</i>	1.5569	0.1050	14.87	<0.001	0.17	<0.001
	Фоновая зона Control zone	0.0001	0.0001	0.44	0.662		
	Буферная зона Buffer zone	-0.0011	0.0007	-1.54	0.125		
	Импактная зона Impact zone	0.0034	0.0006	5.27	<0.001		
Cu	<i>Intercept</i>	1.5569	0.1841	8.46	<0.001	0.15	<0.001
	Фоновая зона Control zone	0.0002	0.0009	0.25	0.806		
	Буферная зона Buffer zone	-0.0019	0.0015	-1.23	0.219		
	Импактная зона Impact zone	0.0025	0.0007	3.58	<0.001		
Ni	<i>Intercept</i>	1.5750	0.0022	7.18	<0.001	0.12	<0.001
	Фоновая зона Control zone	0.0001	0.0006	0.12	0.906		
	Буферная зона Buffer zone	-0.0011	0.0010	-1.05	<0.294		
	Импактная зона Impact zone	0.0034	0.0009	3.58	<0.001		

Примечание. SE – стандартная ошибка, *t* – критерий Стьюдента, *p* – уровень значимости, *R*² – коэффициент детерминации. Жирным шрифтом отмечены статистически значимые значения.

Note. SE – standard error, *t* – Student's test, *p* – level of significance, *R*² – coefficient of determination. Statistically significant values are given in bold.

жем констатировать наличие положительного влияния этих факторов 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 импакт-

ной зоне достигли и даже несколько превосходили 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 загрязнителей 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., Игнатъева 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. <https://doi.org/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., Мерищев 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. – Вестн. 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 CO₂ и биомасса лесных ценозов. К методике оценки стока CO₂. – Физиология растений. 42 (1): 138–143.
8. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. 2000. Роль и структура годичных колец хвойных. Новосибирск. 232 с.
9. Полякова Г.Р., Уразгильдин Р.В. 2013. Влияние техногенного загрязнения на дендрохронологические параметры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). – Вестн. 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 годичных колец древесины. – Лесоведение. 6: 71–75.
12. Шекалев 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. Аминова К.З., Уразгильдин Р.В., Кулагин А.Ю. 2014. Прирост ствольной древесины дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях техногенного загрязнения. – Биосфера. 6(4): 388–399. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v6i4.184>
15. Ваганов Е.А., Скомаркова М.В., Шульце Э.-Д., Линке П. 2007. Вариации структуры и изотопного состава годичных 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 южнотаежных лесов в условиях промышленного атмосферного загрязнения. – В кн.: Динамика лесных сообществ северо-запада России. СПб. С. 120–156.
17. Тишин Д.В. 2011. Дендрозкология. 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. – Вестн. 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. – Вестн. 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. 2022. Vienna, Austria. <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., Мазена 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”. — Вестн. 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.

Dependence of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Radial Growth on Meteorological Conditions and Aerotechnogenic Pollution (Data on the North-West of the Murmansk Region)

I. V. Romashkin^{a, *}, N. V. Genikova^a, A. M. Kryshen^a, S. A. Moshnikov^a, N. V. Polikarpova^b

^aForest Research Institute of the Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk, Russia

^bPasvik State Nature Reserve, Nikel, Russia

*e-mail: romashkin@krc.karelia.ru

Abstract—We studied the influence of meteorological factors and aerotechnogenic pollution on the radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) depending on the distance from the mining and metallurgical combine “Pechenganickel” (Nikel, Murmansk region). According to the content of the main polluting elements (S, Ni and Cu) in the forest litter, we identified three zones of the pollution gradient — control, buffer and impact zones. We found a significant weakening of pine stands in the impact zone due to the integrated effect of — long-term exposure to pollution (since the 1970s) and unfavorable weather events in the mid-1980s. As the emission decreased over the period 1988–2018, we observed the significant increase (up to 44%) in the radial increment of *P. sylvestris* in the impact zone and no meaningful changes in control and buffer ones. Further, the radial increment of trees in the impact zone reached and even exceeded the values in control conditions, despite the relatively high age of the studied trees. This indicated the high adaptive capacity of *P. sylvestris*.

Keywords: *Pinus sylvestris*, Scots pine, radial increment, technogenic pollution, climate, monitoring

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was funded by the state research assignment of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Forest Institute) and the Pasvik Nature Reserve with the support of the JSC Kola Mining and Metallurgical Company and the Scientific and Educational Centre “Russian Arctic: New Materials, Technologies and Research Methods”.

REFERENCES

1. Lukina N.V., Nikonov V.V. 1996. [Biogeochemical cycles in the northern forests under aerotechnogenic pollution]. Part 2. Apatity. 192 p. (In Russian)
2. Yarmishko V.T., Ignateva O.V., Evdokimova A.S. 2019. Some aspects of Scots pine forests monitoring in extreme conditions of the Kola North. — Samara Journal of Science. 8(2): 81–86. <https://doi.org/10.17816/snv201982115> (In Russian)
3. Ananyeva S.I., Belova E.A., Bulychev A.G., Bulycheva I.A., Zakoldayeva A.A., Zatsarinny I.V., Isaeva L.G., Kosyakova A.Yu., Larkova M.S., Lukina N.V., Mershchikov A.V., Polikarpova N.V., Trushchitsina O.S., Sobchuk I.S., Sukhareva T.A., Khlebosolova O.A. 2012. [Kola Mining and Metallurgical Company (industrial sites Nickel and Zapolyarny): impact on terrestrial ecosystems]. Ryazan. 92 p. (In Russian)

4. *Usolstev V.A., Vorobeichik E.L., Khantemirova E.V., Bergman I.E., Urazova A.F.* 2009. Studying forest biological productivity along industrial pollution gradients: methodical analysis and outlooks. – Vestnik MarGTU. Ser. “Forest. Ecology. Nature Management”. 2: 67–76. <https://journals.volgatech.net/forest/article/view/368> (In Russian)
5. *Yarmishko V.T.* 1997. [Scots pine and atmospheric pollution in the European North]. Saint-Petersburg. 210 p. (In Russian)
6. *Kozlova L.N., Onuchin A.A.* 1992. [Influence of pollution on transpiration and structure of pine needles in the Nazarovskaya Hollow]. – In: [Anatomy, physiology and ecology of the forest vegetation: conference proceedings]. P. 67–69. (In Russian)
7. *Kaibiyainen L.K., Bolondinsky V.K.* 1995. [Photosynthetic CO₂ fixation and biomass of the arboreal cenosis: method of estimating of CO₂ sequestering]. – Fiziologiya rastenii. 42(1): 138–143. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21837990> (In Russian)
8. *Vaganov E.A., Shashkin A.V.* 2000. [Growth and tree ring structure of conifers]. Novosibirsk. 232 p. (In Russian)
9. *Polyakova G.R., Urazgildin R.V.* 2013. [Influence of technogenic pollution on dendrochronological parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)]. – Bulletin of Chelyabinsk State University. 7(298): 191–194. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18958162> (In Russian)
10. *Rumyanstev D.E.* 2010. [History and methodology of silvicultural dendrochronology]. Moscow. 109 p. <https://mf.bmstu.ru/info/science/dendro/books/01.pdf> (In Russian)
11. *Kirdyanov A.B., Vaganov E.A.* 2006. [Separation of the climatic signal reflected in variable width and density of annual tree rings]. – Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie). 6: 71–75. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9309592> (In Russian)
12. *Shchekalev R.V., Tarkhanov S.N.* 2006. [Radial growth and quality of Scots pine wood under atmospheric pollution]. Yekaterinburg. 127 p. (In Russian)
13. *Usoltsev V.A., Vorobeichik E.L., Bergman I.E.* 2012. [Biological productivity of Ural forests under air pollution: investigation of system interrelations and patterns]. Ekaterinburg. 366 p. (In Russian)
14. *Amineva K.Z., Urazgildin R.V., Kulagin A.Yu.* 2014. Radial increment of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stem wood under anthropogenic pollution. – Biosfera. 6(4): 388–399. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v6i4.184> (In Russian)
15. *Vaganov E.A., Skomarkova M.V., Schulze E.-D., Linke P.* 2007. Variability of the structure and isotope composition of tree rings in *Pinus cembra* and *Picea abies* in the mountains of Northern Italy]. – Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie). 3: 32–39. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9510703> (In Russian)
16. *Yarmishko V.T., Borisova O.V., Yarmishko M.A.* 2009. [Long-term dynamics of the state of southern taiga forests under conditions of industrial atmospheric pollution]. – In: [Dynamics of forest communities in North-West Russia]. Saint-Petersburg. P. 120–156. (In Russian)
17. *Tishin D.V.* 2011. [Dendroecology (the tree ring analysis techniques)]. Kazan. 33 p. (In Russian)
18. *Mulgauzen D.S., Pankratova L.A.* 2016. [The influence of aerotechnogenic pollution on Scots pine’s radial growth in Kola North]. – Vestnik SPbSU. Earth Sciences. 7(4): 124–133. <https://escjournal.spbu.ru/article/view/1827/2493> (In Russian)
19. *Alekseev V.A.* 1989. Diagnostics of tree vitality and stand condition. – Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie). 4: 51–57. (In Russian)
20. *Cybis Dendrochronology.* Cybis Elektronik & Data AB. <https://www.cybis.se>
21. *Shiyatov S.G.* 1986. [Tree line dendrochronology in the Urals]. Moscow. 136 p. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22426951> (In Russian)
22. *Demakov Yu.P., Andreev N.V.* 2014. [Patterns of radial growth of pine trees in the lakeside biotopes of the Mariy Chodra National Park]. – Eko-potencial. 3(7): 48–58. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3550> (In Russian)
23. *Nikolaeva S.A., Savchuk D.A.* 2009. [Comprehensive approach and methods for the growth reconstruction and development of trees and forest community]. – Vestnik Tomskogo GU. Biologiya (Tomsk State University Journal of Biology). 2(6): 111–125. http://journals.tsu.ru/biology/&journal_page=archive&id=746&article_id=17408 (In Russian)
24. *Specialized Datasets for Climatic Studies.* 2000-2011-20018-2022. RIHMI-WDC. <http://meteo.ru/data>
25. *Gordeev A.V., Kleshchenko A.D., Chernyakov B.A., Sirotenko O.D.* 2006. [Bioclimatic potential of Russia: theory and practice]. Moscow. 508 p. (In Russian)
26. *Lebedenko L.A.* 1978. [Dynamics of the cambial cells reproduction in pine and spruce]. – In: [Forest restoration in the northwest of the RSFSR]. Leningrad. P. 101–111. (In Russian)
27. *The R Project for Statistical Computing.* The R Foundation. <https://www.R-project.org/>
28. *Chernenkova T.V.* 2002. [Response of forest vegetation to industrial pollution]. Moscow. 191 p. (In Russian)
29. *Kaibiyainen L.K., Safronova G.I., Bolondinskiy.* 1998. Effect of toxic pollutants on the respiration of needles and shoots in Scots pine. – Russ. J. Ecol. 29(1): 20–23.
30. *Vitinsky Yu.I., Kopetskiy M., Kuklin G.V.* 1986. [Statistics of sunspot activity]. Moscow. 296 p. (In Russian)
31. *Matveev S.M., Rumyantsev D.E.* 2013. [Dendrochronology]. Voronezh. 140 p. <https://mf.bmstu.ru/info/science/dendro/books/02.pdf>

32. *Timofeev V.P.* 1972. [Seasonal tree growth duration and intensity as indicators of plantation productivity]. – In: [Nutrition of woody plants and forest productivity enhancement]. Petrozavodsk. P. 111–123. (In Russian)
33. *Antonova G.F.* 1999. [Cellular growth in conifers]. Novosibirsk. 232 p. https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_61101 (In Russian)
34. *Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S.* 1996. Dendroclimatic study in Ural-Siberian Subarctic. Novosibirsk. 246 p. https://ipae.uran.ru/sites/default/files/publications/ipae/1179_1996_VaganovEtAl.pdf (In Russian)
35. *Barzut O.S., Staritsyn V.V.* 2012. [On the influence of climatic factors on the radial growth of common juniper]. – In: [Environmental problems of the Arctic and northern territories]. Arhangel'sk. 15: 6–11. <https://narfu.ru/lti/departments/kezl/Vypusk%2015.pdf> (In Russian)
36. *Barzut V.M.* 1985. [Analysis of long-term and annual dynamics of coniferous growth in the White Sea region: Abstr. ... Dis. Cand. (Biology) Sci.]. Tartu. 27 p. (In Russian)
37. *Mulgauzen D.S., Pankratova L.A.* 2018. [Radial growth of Scots pine in the area affected by mining and metallurgical combine “Pechenganickel”]. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology. 2: 87–95. <https://journals.vsu.ru/geo/article/view/2217> (In Russian)
38. *Khlebosolov E.I., Makarova O.A., Khlebosolova O.A., Polikarpova N.V., Zatsarinnyy I.V.* 2007. [Birds of the Pasvik Nature Reserve]. Ryazan. 175 p. <http://oopt.aari.ru/ref/1004> (In Russian)
39. *Kucherov S.E., Muldashev A.A.* 2003. [Radial increment of Scots pine in the vicinity of the Karabash copper smelter]. – Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie). 2: 43–49. <http://lesovedenie.ru/index.php/forestry/article/view/37> (In Russian)
40. *Shekalyov R.V., Tarkhanov S.N., Prozherina N.V., Klochikhin A.N.* 2004. [Productivity of pine stands at the mouth of the Northern Dvina under conditions of long-term aerotechnogenic impact]. – In: [Problems of the physiology of the northern plants: Proc. of the International scientific conference]. Petrozavodsk. P. 212. (In Russian)