

Зависимость радиального прироста *Pinus sylvestris* (Pinaceae) от
метеорологических условий и антропогенного загрязнения воздуха:
Данные по северо-западной части Мурманской области

И.В. Ромашкина, *, Н.В. Генникова, А.М. Крышена, С.А. Мошникова, и Н.В. Поликарпова

Получено 20 мая 2024 г.; рассмотрено 29 мая 2024 г.; принято 6 июня 2024 г.

Аннотация. Исследовано влияние метеорологических факторов и антропогенного загрязнения воздуха на радиальный прирост сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в зависимости от расстояния от горно-металлургического комбината «Печенганикель» (г. Никель, Мурманская область). По сравнению с основным загрязняющим элементом (S, Ni, Cu) в лесной подстилке выделяются три зоны радианта загрязнения (контрольная, буферная и импактная). Значительное ослабление основных насаждений наблюдалось в зоне воздействия и объяснялось совокупным воздействием длительного антропогенного загрязнения 1970-х годов и неблагоприятных погодных явлений середины 1980-х годов. По мере снижения выбросов с 1988 по 2018 год наблюдалось значительное увеличение радиального прироста *P. sylvestris* (до 44%) в зоне воздействия и сохранение его практически на том же уровне в контрольной и буферной зонах. Совсем недавно радиальный прирост деревьев в зоне воздействия достиг значений, наблюдаемых в контрольной зоне, и даже превысил их, хотя исследованные деревья были относительно старыми. Полученные данные еще раз продемонстрировали высокую адаптивную способность *P. sylvestris*.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris*, сосна обыкновенная, радиальный прирост, антропогенное загрязнение, климат, мониторинг DOI: 10.1134/S0012496624701151

ВВЕДЕНИЕ

Добывающие, металлургические и другие обрабатывающие предприятия оказывают негативное воздействие на прилегающие к ним территории, что неизбежно приводит к снижению продуктивности, неустойчивости и постепенной деградации лесных экосистем [1, 2]. Наибольшее антропогенное воздействие оказывают медно-никелевые комбинаты, загрязняющие атмосферу значительными выбросами диоксида серы (SO₂) и тяжелых металлов, в частности меди (Cu) и никеля (Ni) [3]. Хотя в значительных экосистемах наблюдаются разнообразные пути миграции загрязняющих веществ, в большинстве случаев в них участвуют растительные компоненты (продукты) [4]. Снижение устойчивости лесных сообществ подвергает антропогенному загрязнению сопровождающееся изменением структуры древостоя, увеличением доли ослабленных и погибших деревьев [5]. Интенсивность транспорта воды в деревьях может снижаться по мере удаления от источника выбросов, что приводит к нарушению ассимиляционной системы, как следствие, к снижению продуктивности насаждений.

Институт лесного хозяйства Карельского научного центра,
Российская академия наук, Петрозаводск, Россия
Государственный природный заповедник «Пасвик»,
Никель, Россия *e-mail: romashkin@krc.karelia.ru

Радиальный прирост (RI) является одним из наиболее информативных показателей, способных отражать влияние различных факторов на рост деревьев на протяжении его жизни [8–10]. Закономерности изменения RI определяются как видовой принадлежностью дерева, так и совокупным влиянием экологических и климатических условий [11]. Значительное снижение RI с ростом загрязнения наблюдается в большинстве исследований [12–14] и сопровождается увеличением амплитуды колебаний RI и нарушением его цикличности. Такие наблюдения проводились как локально, так и в целом по Евразии [13]. Следует отметить, что RI сильно зависит от климатических колебаний, и этот факт важно учитывать при изучении влияния антропогенного загрязнения на рост деревьев [15–17].

В большинстве работ по изучению влияния антропогенного загрязнения на лесные экосистемы рассматривались относительно короткие периоды времени (например, несколько десятилетий) [13]. В 2018 г. на территории заповедника «Пасвик» и прилегающих к нему территориях (Мурманская область) Институтом лесоведения и лесного хозяйства на сеть постоянных пробных площадей (ПП) с целью наблюдения за динамикой северо-западных лесов в условиях изменения климата и антропогенного загрязнения воздуха. Выбор объекта для долгосрочного мониторинга был обусловлен в первую очередь масштабами его работ на горно-металлургическом комбинате «Печенганикель», поскольку в период между 2018 и 2016 гг. могло быть выделено не несколько периодов, различающихся по антропогенному воздействию.

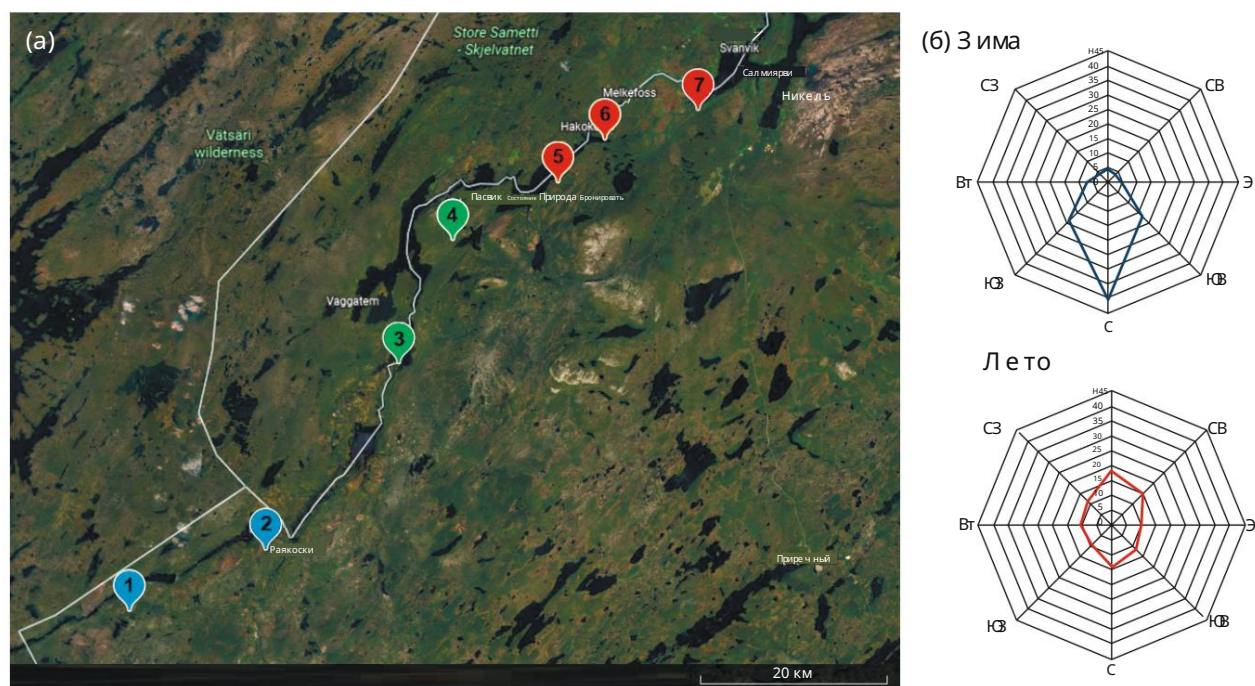


Рис. 1. (а) Расположение постоянных СЗ на разном расстоянии от источника антропогенного загрязнения воздуха (комбинат «Печенганикель», г. Никель). Зоны загрязнения обозначены цветом: синий — зона контроля (СЗ 1 и 2); зеленый — буферная зона (СЗ 3 и 4); красный — зона воздействия (СЗ 5–7). (б) Летняя и зимняя розы ветров г. Никель.

изолирован. Интенсивное промышленное освоение региона началось в 1930-х годах, а комбинат начал работу в 1937 году. Пик производства меди и никеля пришелся на 1970-е годы. К этому времени на комбинаты «Печенганикель» и «Североникель» было поставлено более 1 миллиона тонн норильской руды, а содержание серы (S) в руде (примерно 30%) было существенно выше, чем в руде с рудников Колской АЭС (до 5%). Общий выброс SO_2 в результате достиг 411 тысяч тонн в 1977 году. С запуском первой (1981) и второй (1987) линий по производству серной кислоты выбросы SO_2 снизились на 10,9 и 27,2% соответственно. Руда с рудников Норильска постепенно отказывалась с 1992 и 2002 годов, что привело к стабильному снижению выбросов SO_2 .

Более поздние оптимизационные мероприятия, включающие реинжиниринг систем газоудаления концентратов и совершенствование производства серной кислоты, позволили сократить выбросы SO_2 до 50–56 тыс. тонн/год (2010 г.), Ni – до 250 тонн/год, Cu – до 130 тонн/год (2015 г.) [3, 18]. Комбинат «Печенганикель» прекратил работу в 2021 г.

Целью данной работы было изучение реакции дерева сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. на изменение атмосферных выбросов медно-никелевого комбината «Печенганикель» (пгт. Никель). Мы (1) исследовали динамику RI дерева в *P. sylvestris*, произрастающих на разном расстоянии от источника загрязнения; (2) определили влияние климатических (метеорологических) параметров, таких как среднемесячная температура и среднемесячное количество осадков, на динамику RI в

P. sylvestris; и (3) определили влияние выбросов основных загрязняющих веществ от медной и никелевой промышленности (SO_2 , Ni и Cu) на динамику RI . Мы предположили, что RI постепенно уменьшается с ростом загрязнения и что колебания RI обусловлены как изменениями в выбросах загрязняющих веществ, так и климатическими (погодными) экстремумами. Ожидалось, что снижение антропогенного загрязнения, как во времени, так и в пространственном аспектах, принесет пользу росту *P. sylvestris*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обследование насаждений *Pinus sylvestris* проводилось в государственном природном заповеднике «Пашвик» (Печенгский район Мурманской области) и на прилегающей территории. На разном расстоянии от комбината «Печенганикель» (г. Никель) было заложено семь постоянных СП (рис. 1). Минимальное расстояние от СП до комбината как источника антропогенного загрязнения составило 11 км (СП 7), максимальное — 82 км (СП 1). Характеристики и географические координаты СП приведены в таблице 1.

На основании содержания S, Ni и Cu в лесной подстилке (горизонт О) территория исследования разделена на зоны, различающиеся по уровню антропогенного загрязнения. Содержание S в лесной подстилке по мере удаления от источника загрязнения изменялось незначительно, тогда как содержание тяжелых металлов существенно возросло. Таким образом, были определены три зоны. Контрольная зона (СП 1 и 2) имела среднее содержание Cu и Ni

Образец сосны	Листка	Возраст, лет источник	Дерево в	Высота		Удельный вес	Здоровье сосны	Площадь область	Корневая система	Плотность сосны	Координаты (WGS84)
				В. 3.	В. 5.						
Сосна	вакциниозный	81	0.35	18.6	0.5		1.91	20,1/0,67	790	132	05,00097 08,97658N
Сосна	вакциниозный	68	0.01	18.4	0.1		1.18	19,9/0,68	870	117	06,99143 08,98872N
Сосна	вакциниозный	48	0.01	19.7	0.3		2.05	16,4/0,56	550	81	06,92498 09,17095N
Сосна	эмпетроси	37	0.01	20.8	0.3		2.60	15,5/0,55	470	90	06,94308 09,18049N
Сосна	вакциниозный	26	0.85	17.7	0.6		2.27	12,5/0,47	600	65	06,93806 09,03050E
Сосна	вакциниозный	21	0.85	20.3	0.4		2.77	13,4/0,47	520	81	06,97080 09,18928N
Сосна	вакциниозный	11	0.55	13.8	0.4		2.63	19,2/0,71	1070	100	06,00250 09,98083N

Сосна

Сосна

Сосна

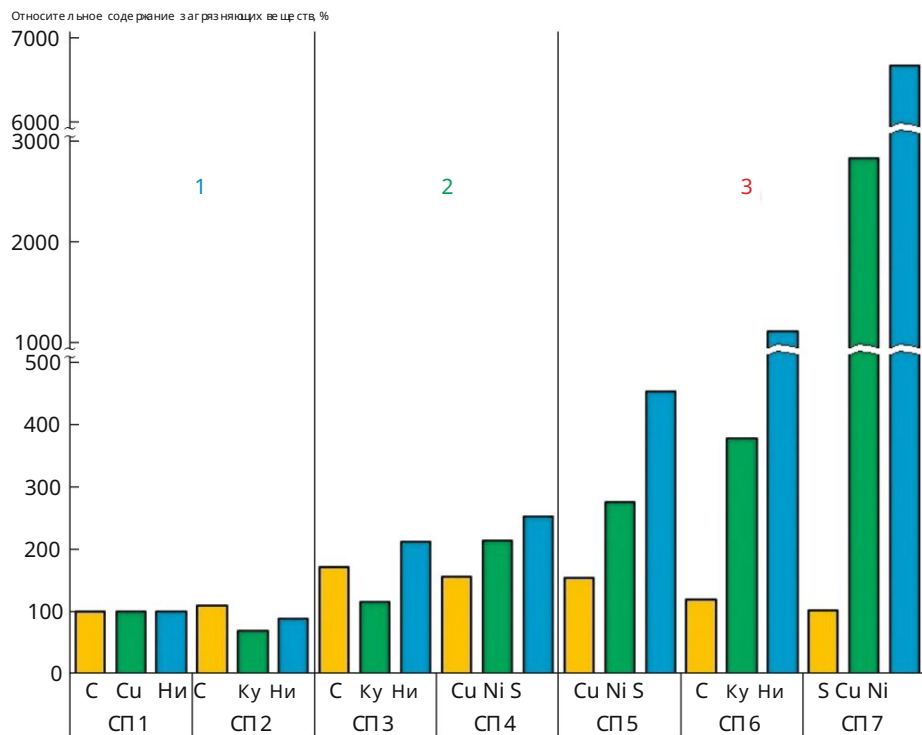


Рис. 2. Содержание загрязняющих веществ (S, Cu, Ni) в лесной подстилке (горизонт O) на обследованных СП. Зоны загрязнения: 1 — контрольная зона (СП 1 и 2); 2, фоновая зона (СП 3 и 4); 3, зона воздействия (СП 5–7). Ось X, загрязняющие вещества; ось Y, содержание загрязняющих веществ относительно контроль (СП 1) (%).

19,9 и 12,0 мг/кг соответственно. Фоновая зона (СП 3 и 4) имели среднее содержание Cu и Ni 31,8 и 33,2 мг/кг соответственно. В зоне воздействия (ПП 5–7) содержание Cu и Ni достигло 728,6 и 879,0 мг/кг соответственно и превысило контроль значения в 28,2 и 65,2 раза соответственно (рис. 2).

Постоянные СП были проложены на наиболее характерных местах лесных площадей. Проведена инвентаризация лесов по общепринятому методу. Полный был проведен подсчет всех деревьев (живых и мертвых), диаметр определялся с точностью до 0,1 см. Измерена высота 20–25 деревьев в СП.

с помощью прибора Suunto. Используя упражнения по возрасту Pressler, кривые были взяты у основания ствола 5–8 деревьев, чтобы определить возраст. Дополнительно, описание живой напочвенный покров и морфологическая структура почв. На основании этих характеристик был определен тип леса.

Состояние насаждений оценено в лесу

Патологоанатомическое исследование с использованием шкалы из Правил санитарных норм Безопасности в лесах [19]. Состояние живого дерева было выделено из набора основных внешних признаков, включая цвет и возраст хвои, истончение кроны и доля мертвых и умирающих ветвей. Эффекты патологических лесных факторов (грибковые заболевания и вредители) насаждений были оценены. Основные образцы были проверены на наличие гнили ствола. Вышеуказанные параметры состояния деревьев

Для расчета среднего балла за здоровье использовались стандарты (таблица 1).

Образцы почвы были исследованы с использованием оборудования Централ-Лесного пользования «Аналитическая лаборатория» Научно-исследовательского института леса (Карельский научный центр). Содержание S измерялось методом Ринкиса. (SF-200). Содержание Ni и Cu оценено с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием AA-6800 и Приборы AA-7000 Shimadzu. Для измерения содержания металлов было проведено разложение образца с использованием микроволновой системы разложения Speedwave Four (Бергхофф Германия).

Для изучения вариации RI у *P. sylvestris* было взято 10–15 деревьев в широкий возрастной диапазон (150–250 лет) был выбран для представления всех СП. Образцы были взяты из стороны, обращенной на юг, на высоте 1,3 м. Образцы были наклеены на деревянную основу, их поверхности были отшлифованы и сглажены. Каждый образец был отсканирован при разрешении 1600 точек на дюйм. Средняя ширина годового кольца определялась с помощью программного обеспечения Cdendro/ CooRecorder 9.3 с учетом всех изгибов [20]. График с Аналитическим образцом проводился методом перекрестного датирования Метод [21]. График RI, основанный на средних значениях ($n = 20-45$) был построен для каждой группы, отличающихся по Расстояние от промышленного предприятия. Оценка деревьев в ответ на изменение условий окружающей среды Индекс RI рассчитывался как отношение фактических RI к теоретическим RI, которые рассчитывались на основе параметров

функция возрастного тренда [22]. Все серии RI, индекс RI, и значения климатических переменных были использованы в 5-летнем скользящем среднем для минимизации высокочастотной составляющей [23].

В образцах керн отмечены годовые слои. В отношении пяти основных периодов промышленного предприятия деятельность с различным объемом выбросов загрязняющих веществ (1) с 1937 по 1970 год, начальный период; (2) с 1971 года до 1980 года - период использования руды с высоким содержанием серы из норильских рудников (3) с 1981 по 1987 год, период когда выбросы SO₂ снились из-за реинжиниринга деятельности; (4) с 1992 по 2002 год, период, когда руда из норильских рудников была отклонена; и (5) с 2001 по 2018 год, современный период оптимизации работы. Данные по объемам выбросов загрязняющих веществ на предприятии «Печенганикель» с 1977 по 2015 годы были получены из доступной литературы [3, 18].

Климатические данные, включая среднесезонные температуры приземного слоя воздуха и среднесезонные осадки (Янискоски, метеостанция 22101), были использованы из специального набора климатических данных Все российский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных [24]. Гидрологический год определялся как период, длящийся от Октября предыдущего календарного года по сентябрь текущего год; зимний сезон, как период с октября предыдущего календарного года по апрель текущего года; и вегетационный период, как период с Май-сентябрь того же года. Селянинова гидрометрический коэффициент (ГТК) рассчитывался по формуле следующее уравнение [25]:

$$HTC (/) 10 = \sum \sum x_i P \quad (1)$$

где $\sum P$ – сумма осадков за период при температуре выше 10°C и $\sum t_{10}$ – это сумма температур, превышающих 10°C за тот же период период.

Эффективная сумма температур (ETS) температура, которые выше 5°C и не обходимы для запуска процссворста у *P. sylvestris* [26] был рассчитывается как

$$(\sum_{i=1}^n = \text{от } 1 \text{ до } 12 (\max(0; (t_i - 5_{\text{средне}}))) \text{ в} \quad (2)$$

где \sum_i — ETS температура выше 5°C (градус-день), 1–12 — месяцы года, N_i — количество дней в месяце, а T_{avg} — это ежемесячное среднее температура воздуха (°C).

Статистический анализ проводился с использованием R Пакет программ [27] с обобщенными линейными моделями (GLM) и тест множественных диапазонов Дункана. Данные Распределения проверялись на нормальность с помощью W-критерия Шапиро-Уилка и при необходимости подвергался преобразованию Бокса-Кокса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика RI у *P. sylvestris* в зависимости от расстояния от источника загрязнения

Различия в динамике RI *P. sylvestris* были наблюдались вдоль радианта загрязнения при анализе у среднесезонных хронологий (рис. 3). В контрольной зоне, с 1939 года наблюдалась устойчивая тенденция к снижению RI. по 1970 год (коэффициент линейной регрессии $A = -0,010$) и Цикличность сохранялась. Сушествственное снижение RI наблюдалось в последующие годы ($A = -0,001$). Экстремумы RI соответствовали 1929, 1946, 1968, 1987, 2000 и 2013; верхние экстремумы по годам 1941, 1960, 1973, 1993 и 2003. Средний RI в Контрольная зона составил 0,76 мм/год ($SE = \pm 0,02$) в среднем за весь период наблюдения (с 1918 по 2018).

В буферной зоне динамика RI была намного то же, что и в контрольной зоне, за исключением последействие десятилетия изучаемого периода. Синхронность изменений RI были искажены последействие десятилетия. Общая тенденция изменений RI была нисходящей в буферной зоне, как в контрольной зоне. Наклон, наблюдаемый в период с 1939 по 1970 год был несколько ниже, чем в контрольной зоне ($A = -0,006$), а наклон наблюдавшийся с 1971 по 2018 год был аналогичен тому, что наблюдался в Контрольная зона. Средний RI составил 0,46 мм/год ($SE = \pm 0,01$) ниже, чем в контрольной зоне.

В зоне воздействия динамика RI *P. sylvestris* наблюдавшаяся до наиболее интенсивной антропогенной нагрузки 1970-х годов динамика в целом была схожа с динамикой в контрольной зоне. Средний RI в зоне воздействия в период с 1918 по 1970 год составил 1,01 мм/год ($SE = \pm 0,04$), что на 16% выше, чем в контрольной зоне за тот же период. Черненко [29] сообщил о подобной закономерности для деревьев *P. sylvestris* моложе 50 лет из регионов прилегающих к Комбинат «Печенганикель». Находка предполагает не только подавление, но и стимуляция процссворста [28, 29]. Наши данные по крайнему мере не противоречат этому предположению.

Начиная с 1970 года, RI деревьев *P. sylvestris* из Зона воздействия сократилась интенсивнее, чем в контрольной зоне ($A = -0,012$) и показала наименьшее значение (0,23 мм) в 1987 г. Снижение RI с 1985 по 1987 г. было обнаружено во всех обследованных деревьях, независимо от Расстояние от источника загрязнения. Средний RI в контрольной зоне в тот период наблюдалось 0,54 мм/год ($SE = \pm 0,02$), на 29% ниже RI у среднесезонных за весь период наблюдения. В буферной и импактной зонах RI составил 0,42 мм/год ($SE = \pm 0,01$) и 0,33 мм/год ($SE = \pm 0,03$) соответственно; т.е. значения были на 46 и 58% ниже соответственно.

В последующий период динамика RI существенно различалась между зонами. RI стабилизировался у деревьев в контрольной и буферной зон. Стабильный восходящий тенденция наблюдалась для RI деревьев *P. sylvestris* в Зона воздействия. Например, средний RI в период с 1988 по 2018 год был на 44% выше, чем в период

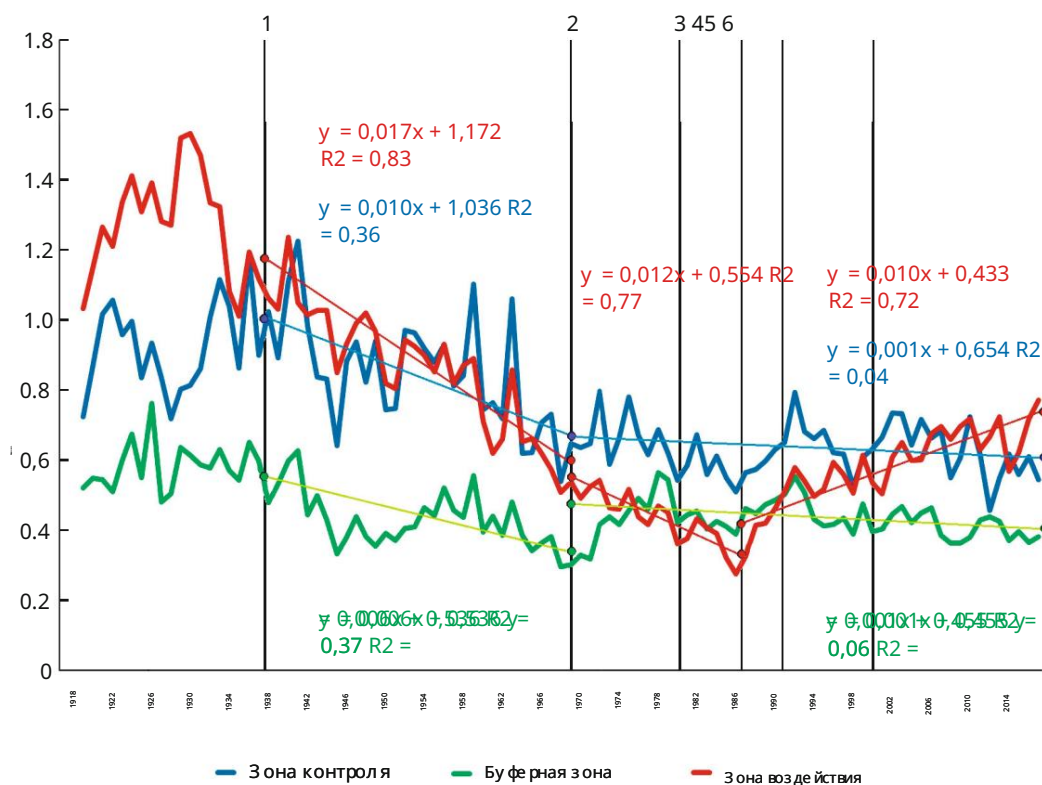


Рис. 3. Динамика ИР *P. sylvestris* с 1918 по 2018 г. в зависимости от расстояния от источника загрязнения. Основные периоды работы «Печенггикангеля»: 1 — 1937 г. — начало эксплуатации; 2 — 1970 г. — начало переработки норильской высококислотной руды; 3–4 — с 1981 по 1987 г. — снижение выбросов SO₂ за счет модернизаций; 5 — с 1992 по 2002 г. — прекращение переработки норильской руды; 6 — с 2001 по 2018 г. — оптимизация производства. Ось X — год; ось Y — ИР, мм.



Рис. 4. Форма кроны дерева в зоне воздействия указывает на улучшение роста *P. sylvestris*.

с 1985 по 1987 г. Таким образом, хотя в 1987 г. в импактной зоне наблюдалось большее снижение RI по сравнению с контрольной и буферной зонами, где антропогенная нагрузка была ниже, в последующие годы RI стабильно увеличивался в импактной зоне ($A = 0,010$). Более того, RI деревьев в импактной зоне были схожи или даже выше, чем в контрольной зоне после 2007 г., хотя средний возраст деревьев в буферной зоне был относительно большим.

Улучшение роста некоторых деревьев в *P. sylvestris* в зоне воздействия было обнаружено визуально. Крона приобрела коническую форму в последние годы (рис. 4), в то время как коническая крона обычно характерна для интенсивно растущих деревьев. Открытие подтвердило более раннее наблюдение, что *P. sylvestris* сохраняет свой потенциал роста в возрасте 180 лет и старше и реализует его при улучшении условий роста [22]. Особый интерес представляет тот факт, что такую способность продемонстрировал только один дерево, растущее в сильно загрязненной зоне. Мы не можем предсказать, как долго будет продолжаться период интенсивного роста *P. sylvestris* после того, как антропогенное загрязнение воздуха уменьшится, а затем прекратится в 2021 году. Этот вопрос был среди проблем, которые необходимо было решить путем создания сети долгосрочного мониторинга.

Поскольку было отмечено, что RI *P. sylvestris* изменяется вдоль градиента загрязнения, будучи ниже в буферной зоне

зона, чем в зоне удара, кажется, трудно
Выбрать пробные площади (прежде всего контрольные) для
дендрохронологических исследований. Определенная разница в возрасте
между деревьями, исследованными в разных зонах, кажется,
быть более значимой для наблюдения расхождения.
Средний возраст деревьев составил 167 лет ($SE = \pm 10$) в контрольной
зоне, 205 лет ($SE = \pm 11$) в буферной зоне и
165 лет ($SE = \pm 7$) в зоне воздействия. Разница объясняет, что время
как RI, наблюдаясь в контрольной зоне
был ниже в раннем периоде исследования и показал
более плавный тренд с течением времени. Изученные выборочные участки
дополнительно различаются по истории пирогеогенного повреждения,
который был вызван в основном наземными пожарами различной степени
интенсивности и встречаемость 110 (SP 3, 5 и 6) до 200
(СП 2 и 7) лет назад. Пожары, безусловно, повлияли на возраст
структура и другие характеристики изучаемого дерева
стоит.

По мере увеличения антропогенной нагрузки становится
сложнее выделить изменения, которые происходят естественным
образом в *P. sylvestris* RI, от изменений, которые вызваны
интенсивная деятельность человека [16]. Средние видных
антропогенное воздействие, следы выборочных рубок,
которые варьировались по интенсивности от 10 до 20% и были
выполнены примерно 30–50 лет назад, были обнаружены
почти во всех СП (за исключением СП 1). Кроме того, в 1950-х годах
в районе Раякоски были построены три гидроэлектростанции

деревья (река Паз) (СП 2) [3]. Их строительство
вероятно, существенно повлияет на местные условия
и, следовательно, RI деревьев в регионе [18]. Более того,
антропогенное воздействие не может быть полностью
исключено в случае лесонасаждений контрольного значения
зоны, хотя они были достаточно далеко (>70 км)
вдали от источника загрязнения и не проявлял никаких признаков
ослабевает.

Влияние метеорологических параметров
на *P. sylvestris* RI

Было обнаружено, что температура воздуха сильно различается по
вегетационный период в исследуемой области. Период
с 1955 по 2019 год среднесуточные температуры воздуха
все лето Янискоски (СП 1) составила 4,3°C (0,9–
10,6°C) в мае, 10,2°C (5,9–14,3°C) в июне, 13,7°C
(9,2–18,8°C) в июле, 11,3°C (8,6–13,6°C) в августе,
и 6,4°C (2,8–9,1°C) в сентябре. Наблюдаясь определенная
периодичность более холодных и более теплых лет.
Среднесуточные температуры растительности
период были ниже соответствующих долгосрочных средних
значений в 1965, 1977, 1981, 1987 и 2008 годах.
Маяская температура в мае снизилась до наибольшего значения
степени вте годы, вероятно, задерживая начало
вегетационный период и сокращение его продолжительности.
Аномально низкие маяские температуры (не менее 50%
ниже долгосрочного среднего) наблюдались
довольно часто, в 1955, 1958, 1965, 1969, 1985, 1996 и
1999 (таблица 2). Аномально теплая майская погода была
обнаружена в 1960, 1963, 1984, 1989, 1992, 2010, 2013,
2016 и 2018 (таблица 2). Это вращение более теплых и

более холодные годы обычно соответствуют 11-летнему
циклу солнечной активности Швабе [30], как это особенно
характерно для северных широт [31].

Годовое количество осадков составило 515 мм (340–
674 мм) на исследуемой территории в период с 1970 по
2019. В течение года наибольшее количество осадков выпало
наблюдаясь летом. Сезонное среднее количество осадков
оценивалось в 84 мм (44–136 мм) в
зимой 96 мм (35–169 мм) весной 202 мм (98–
354 мм) летом и 133 мм (67–210 мм) летом
Осенью (таблица 3). Возможны четыре периода засухи
распознать в период исследования: лето 1980 года,
осень 1984 г. – весна 1987 г., лето 1991 г. и лето
2013. Самый продолжительный период засухи наблюдался с
1984–1987 гг. и, кроме того, температура воздуха в течение
вегетационный период вте годы был ниже своего
долгосрочное среднее значение.

В 1985 году маяские температуры воздуха были относительно
низкий в мае, июне и сентябре и аналогичен
долгосрочное среднее значение июля и августа, что время как
Годовое количество осадков составило всего 340 мм, что составляет 34%
ниже соответствующего среднего значения за весь период
наблюдений. Неблагоприятные погодные условия достигли пика в
1987 году, когда общее похолодание сопровождалось
длительной засухой. Хотя выше описанная погода
события, безусловно, оказали существенное влияние на рост *P.*
sylvestris, корреляционный анализ не выявил существенно
связи между метеорологическими параметрами и
абсолютные значения IP или индекса IP (таблица 4).

Анализ корреляций RI с метеорологическими
параметрами дал однозначных результатов большинство
корреляции были статистически незначимыми. Умеренные
корреляции наблюдались для RI с февраля и
и майские маяские температуры ГТК, ЭТС, сумма осадков октября
предыдущего года, сумма осадков июля текущего года и сумма
осадков за вегетационный период (таблица 5). Индекс RI

показал и наибольшие значения коэффициента корреляции
R при стирании на связь с метеорологическими
параметрами. Коэффициенты корреляции
установлено для индексов RI, наблюдаясь в контроле и
Зоны воздействия составил и соответственно 0,37 и 0,35 с
Майская маяская температура и 0,46 и 0,40 с
Осадки в июне. В целом, выводы подтвердили
общие закономерности реакции дерева на изменения
в погодных условиях. То есть RI больше зависит от
сумма полужительных температур в первой половине
вегетационный период и от общего количества осадков в
Вторая половина вегетационного периода [32, 33]. Закономерно
изменения по градиенту загрязнения не наблюдались
для ассоциаций RI и индекса RI с вышеуказанным
метеорологическими параметрами

Не смотря на относительно слабую корреляцию между
изучаемые параметры погодные условия по-прежнему
сильно влияют на RI в течение вегетационного периода. Ваганов
и др. [34] показали, что полужительное температурно-зависимое
определение прироста в
деревьях в субарктической зоне колеблется от 50 до 80% и

Таблица 2. Разница (%) среднемесячной температуры вегетационный период и средних многолетних значений за этот период с 1955 по 2018 год (Янискоски, СП 1)

Год	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Год	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
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	н/д
2001	-23,3	18,7	3,9	-4,0	11,1	1969	-58,1	-14,6	н/д	н/д	-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	28,8	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	н/д	1960	86,0	6,0	37,5	10,2	-24,9
1991	-18,6	3,0	н/д	н/д	-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

Наиболее значимые крайности выделены жирным шрифтом.

увеличивается к северу. Наиболее благоприятная температура произрастания хвойных в подзоне северной тайги и от 13 до 20°C. Температуры вне этого диапазона уменьшение RI [35]. Кажется вероятным, что уменьшение Среднемесячная температура мая сокращает вегетационный период и тем самым снижает интенсивность Рост *P. sylvestris* в суrowь арктических условиях. Роль осадков по сравнению с ролью температуры режим уменьшаются к северу [35, 36]. Мульгаузен и Панкратова [18, 37] изучала *P. sylvestris* RI в аналогичные условия вдоль градиента загрязнения и наблюдались значительные ассоциации RI как с воздухом

температура и осадки. Не сколько сильнее ассоциации RI с метеорологическими параметрами Для опыту дара был и установлен [14, 38]. В то же время нельзя исключить, что антропогенное загрязнение искажает соотношения между RI и климатические параметры [13, 39].

Полученные нами данные позволяют предположить, что неблагоприятные погодные явления, происходящие в растительном покрове, период наиболее сильно влияет на RI у *P. sylvestris*, набор ключевая положительные и отрицательные температуры аномалии и меньше количество осадков. Однако причинно-следственная связь между RI и метео-

Таблица 3. Различия (%) между сезонными осадками и соответствующими многолетними средними значениями за период с 1970 по 1979 гг. 2019 (Янискоски, СП1)

Годы	Осенние	Весенние	Летние		Годы	Осенние	Весенние	Летние	
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	н/д	-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	н/д	-23,3	-17,8
2013-2014	-1,4	-0,3	1,4	-12,5	1988-1989	4,0	-16,4	н/д	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	н/д	н/д	-16,6	40,8	1973-1974	22,1	13,1	-63,1	22,8
1997-1998	-7,9	14,8	н/д/д	-4,4	1972-1973	12,8	-34,9	-22,0	-13,1
1996-1997	1,8	-44,5			1971-1972	42,1	2,3	11,1	-31,0
1995-1996	52,1	-14,5	-10,0	-20,0	1970-1971	6,5	н/д/	-38,1	-18,3
1994-1995 -15,2		18,6	-13,0	28,7	1969-1970	н/д	д	-52,9	-21,9

Примечание: наиболее значимые крайности выделены жирным шрифтом.

рологические параметры могут быть искажены антропогенным загрязнением. Мы не наблюдали никаких существенных изменений реакции RI на погодные условия вдоль градиента загрязнения, но все же нельзя исключить, что долгосрочное воздействие антропогенных загрязнителей увеличивает чувствительность дерева к неблагоприятным погодным явлениям. В нашем исследовании наиболее значимое снижение RI наблюдалось у *Дерева P. sylvestris* зоны воздействия в период длительная засуха и общее похолодание с 1985 по 1987. Таким образом, совокупное воздействие неблагоприятных погодных условий, вероятно, является одним из главных факторов ответственных для существенного снижения RI в зоне воздействия, где деревья уже ослаблены из-за длительного воздействия антропогенного загрязнения.

Влияние режима выбросов комбината «Печенганикель» по динамике RI у *P. sylvestris*

Сравнение динамики RI у *P. sylvestris* с хронологией работы комбината «Печенганикель» позволяет предположить, что снижение RI

наблюдавшийся с 1937 по 1970 год, был больше связан с естественными возрастными факторами, лишь отчасти с постепенным увеличением антропогенной нагрузки. Выбросы загрязняющих веществ был максимальным в 1970-х годах. Однако график RI (рис. 3) показывает, что RI продолжал снижаться по крайней мере в течение следующего десятилетия. Снижение было объяснено в частности неблагоприятными погодными явлениями середины 1980-х годов. Поэтому можно предположить, что некоторое отставание для влияния антропогенного загрязнения на деревья. Лаг-эффекты обнаруживаются как по отрицательному воздействию на деревья, так и по их положительному ответу на уменьшение выбросов. Наши результаты подтверждают идею о том, что *P. sylvestris* подвергается воздействию антропогенного загрязнения в течение длительного времени более чувствительно к климатическим экстремальным явлениям, чем в контрольной зоне, поскольку воздействие ослабляет как отдельные деревья, и общую популяцию.

Выбросы загрязняющих веществ SO₂, Cu и Ni постепенно снижались в последние десятилетия работы завода [3, 18]. Корреляционный анализ показал, что RI *P. sylvestris* и индекс RI в зоне воздействия были и значительной степени связаны с выбросами загрязняющих веществ.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции абсолютного RI (числитель) и индекса RI (знаменатель) *P. sylvestris* с температурой воздуха (Тср) и осадки (Рср)

Параметры	Градиент загрязнения		
	зона контроля	буферная зона	зона воздействия
Tmean (февраль)	0,16/0,33	0,30/0,14	0,03/0,27
Tmean (май)	0,19/0,37	0,21/0,22	0,24/0,35
НТС	0,01/0,18	-0,16/-0,18 –	0,26/0,33
СТС	0,27/0,11 –	0,15/-0,08 0,04/-	0,10/-0,31
Pmean (октябрь)	0,15/-0,31	0,11	-0,02/-0,22
Pmean (июль)	0,29/0,46	0,04/0,12	0,17/0,40
Pmean (вегетационный период)	0,28/0,37	0,04/0,02	0,26/0,27

Тср — среднемесячная температура; Рср — среднемесячное количество осадков; ГТК — гидротермический коэффициент Селянинова; ЭСТ — сумма эффективных температур. Статистически значимые значения выделены жирным шрифтом.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции абсолютного RI (числитель) и индекса RI (знаменатель) *P. sylvestris* с уровнями эмиссии из основных загрязняющих веществ

Градиент загрязнения	SO ₂ , тыс. тонн/год	Cu, тонн/год	Ni, тонн/год
Зона контроля	-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
Зона воздействия	0,87/-0,23	0,71/-0,30	-0,61/-0,33

Статистически значимые значения выделены жирным шрифтом.

Таблица 6. Статистические параметры влияния выбросов загрязняющих веществ на *P. sylvestris* RI в контрольной, буферной и импактной зонах (GLM, гамма-распределение, функция обратной связи)

Загрязнитель	Параметры равнения					Параметры модели	
	коэффициенты	цепить	КВ	t	p	R ²	p
SO ₂	Перехват	1.5569	0,1050	14.87	< 0,001	0,17	< 0,001
	зона контроля	0.0001	0.0001	0,44	0,662		
	буферная зона	-0,0011	0,0007	-1,54	0,125		
	зона воздействия	0,0034	0,0006	5.27	< 0,001		
Cu	Зона	1.5569	0,1841	8.46	<0,001	0,15	< 0,001
	контроля перехвата	0,0002	0,0009	0,25	0,806		
	буферная зона	-0,0019	0,0015	-1,23	0.219		
	зона воздействия	0,0025	0,0007	3.58	< 0,001		
Ni	Зона	1.5750	0,0022	7.18	< 0,001	0,12	< 0,001
	контроля перехвата	0.0001	0,0006	0,12	0,906		
	буферная зона	-0,0011	0,0010	-1,05	< 0,294		
	зона воздействия	0,0034	0,0009	3.58	< 0,001		

SE — стандартная ошибка; t — t-критерий Стьюдента; p — уровень значимости; R², Коэффициент детерминации. Статистически значимые значения выделены жирным шрифтом.

Коэффициент корреляции R варьировался от -0,61 до -0,87, в зависимости от загрязняющего вещества (таблица 5). Аналогичные данные были зарегистрированы в других исследованиях [3, 18, 40]. Мухомов и Панкратова [18] не наблюдал никакой разницы в коэффициентах корреляции между вышеуказанными параметрами связи с розой ветров и расстоянием от источника загрязнения; т.е. деревья

Зона контроля также отреагировала на изменения в загрязняющих веществах выбросы от завода. Наши выводы предполагают, что напротив т.е. только *P. sylvestris* зоны воздействия показали значительное влияние выбросов загрязняющих веществ по RI (таблица 5). Анализ данных с помощью GLM подтвердил, что выбросы SO₂, Cu и Ni оказывают значительное влияние на *P. syl-*

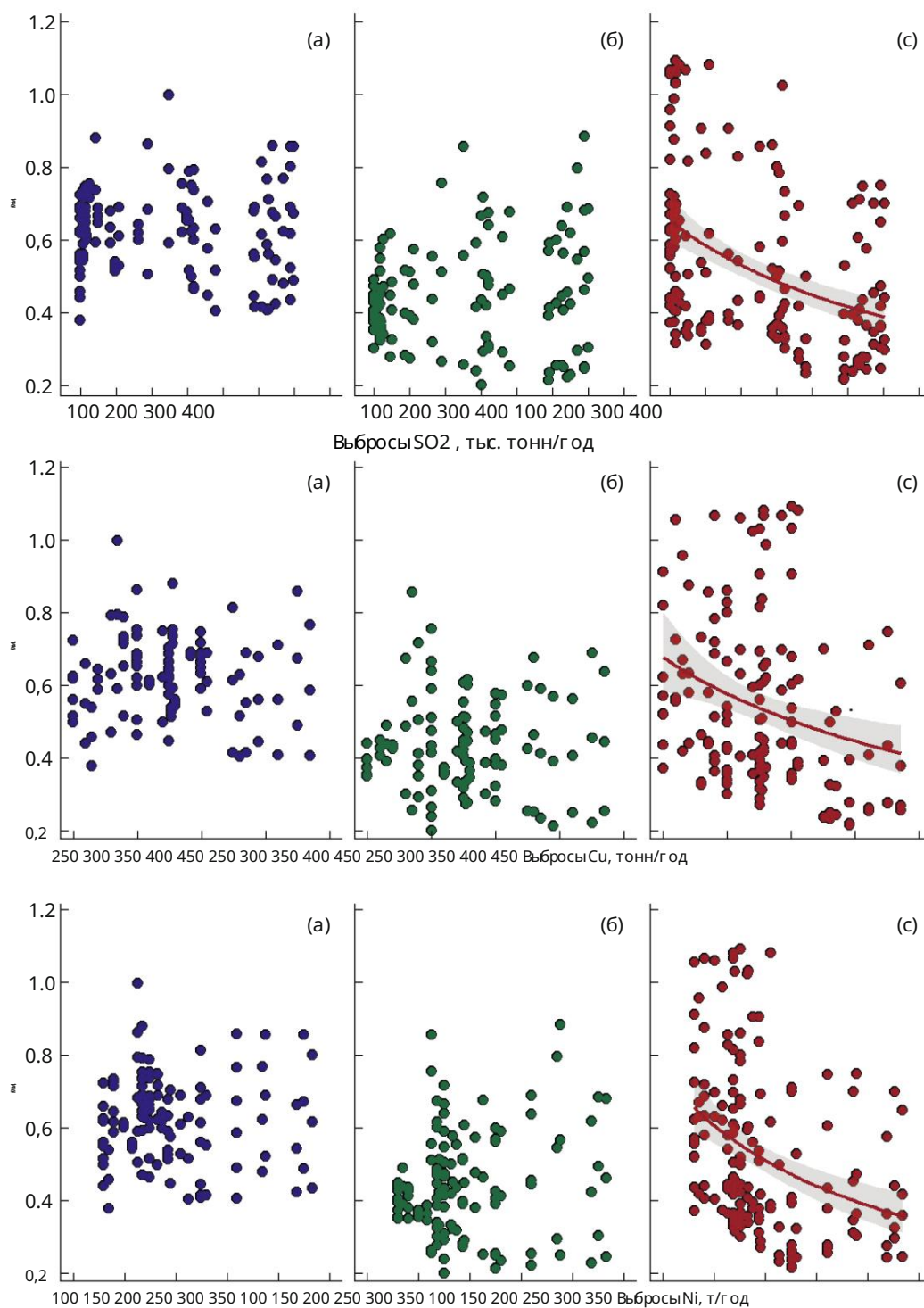


Рис. 5. Зависимость *RI* *P. sylvestris* от эмиссии основных загрязняющих веществ SO_2 , Cu и Ni в контрольной (а), буферной (б) и импактной (в) зонах. Ось X — эмиссия (тонн/год для Cu и Ni и тыс. тонн/год для SO_2); ось Y — *RI* (мм).

Дерево *vestris* было ограничено низкой степенью воздействия (таблица 6, рис. 5). Увеличение *RI*, которое наблюдалось в зоне воздействия в начале 1990-х годов, скорее всего, было связано с тем, что выбросы SO_2 и тяжелых металлов снизились в результате снижения уровня Печенгани-

производства рудника «Кель», суммарный эффект от внедрения изменений в производственные и очистные сооружения, а также отказ от рудников Норильска. Хотя дерево *P. sylvestris*, исследованные в нашей работе, были относительно старыми, вышеуказанные факторы положительно

повлияло на их рост и состояние исследуемых
основные насаждения в зоне воздействия.

Выводы

Помимо прямого неблагоприятного воздействия антропогенных факторов
загрязнение, совокупность неблагоприятных метеорологических явлений
был ответственным за резкое снижение RI, наблюдаемое
в насаждениях P. sylvestris около завода «Печенганикель» в
середине 1980-х годов. Кроме того, в комплект входил убывающий
среднемесячный темпатуры воздуха в вегетационный
период и низкий суммарный годовых осадков в
период с 1985 по 1987 год. Начиная с 1990-х годов
значительное увеличение RI наблюдалось у P. sylvestris
деревьях зоны воздействия. Увеличение отразило их
положительная реакция на снижение антропогенного воздействия на воздух
загрязнение. В ближайшие несколько лет RI деревьев в
зоне воздействия стала аналогичной или даже выше RI
наблюдалось в контрольной зоне, хотя деревья были и
относительно старей. Находка демонстрирует высокий
адаптивный потенциал P. sylvestris, растущего на севере
Предела распространения сосновых лесов. Продолжительность
положительный ответ на снижение выбросов загрязняющих веществ и
механизмы активизирующие процессы роста в
данные условия требуют дальнейшего исследования.

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет государственного исследовательского задания.
в Института (Карельский научный центр
Российская академия наук) и заповедник Пасвик
Заповедник и поддерживается Колыской горно-металлургической
компанией и Научно-образовательным центром
«Российская Арктика: новые материалы, технологии и
методы исследования».

ЭТИЧЕСКОЕ ОДОБРЕНИЕ И СОГЛАСИЕ
ДЛЯ УЧАСТИЯ

Эта работа не содержит никаких исследований с участием человека.
и животные.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ссылки

1. Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические исследования.
циклических соединений азота в атмосфере
Биогеохимические циклы в Северном полушарии.
Леса в условиях азотного загрязнения), Апатиты,
1996, 4-ая стр. 2.

2. Яришко В.Т., Игнатова О.В., Ефимова А.С.
Некоторые аспекты мониторинга сосновых лесов
экстремальных условиях Колыского Севера // Самар. научн.
Вестн., 2019, вып. 8, нет. 2, стр. 81–86. <https://doi.org/10.17816/snv201982115>

3. Ананьева С.И., Белова Е.А., Бульнева Г., Бульнева И.А.,
Закордаев А.А., Задарин И.В., Исаев Л.Г., Косякова А.Ю,
Ларкова М.С., Лукина Н.В.,
Мерц В.В., Поликарпова Н.В., Трущина О.С.,
Собчук И.С., Сухарева Т.А., Хлебосолова О.А.
Колыская горно-металлургическая компания (промышленные
площадки «Никель» и «Заполярный»): влияние
на наземные экосистемы (Колыская горно-металлургическая
компания (промплощадки «Никель» и «Заполярный»):
Влияние на наземные экосистемы), Рязань,
2012.

4. Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Хантмирова Е.В.,
Бергман И.Е., Урзоев А.Ф. Изучение биологической
продуктивности лесов по градиентам промышленного
загрязнения: методический анализ и перспективы // Вестн.
Гос. Технол. ун-та, 2009, вып. 2, стр. 67–76. <https://journals.volgatech.net/forest/article/view/368>

5. Яришко В.Т. Сосна обыкновенная и атмосферное.
Сосна обыкновенная и загрязнение атмосферы в Европе
Север. СПб., 1997.

6. Козлова Л.Н., Онушин А.А. Влияние загрязнения на
транспирацию и структуру хвои сосны
Назаровская котловина, в сборнике «Материалы конференции».
«Анатомия, физиология и экология лесной растительности»
(Труды конф. «Анатомия, физиология и экология
Лесная растительность»), 1992, стр. 67–69.

7. Кайбиайне Л.К., Болондинский В.К. Фотосинтетическая
фиксация CO₂ и биомасса древственного ценоза:
Методические рекомендации CO₂, Физиол. Раст.,
1995, т. 42, № 1, стр. 138–143. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21837990>

8. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец
хвойных. Новосибирск, 2000.

9. Полякова Г.Р. и Уразгильдин Р.В. Влияние
Влияние техногенного загрязнения на деңдрохронологические
показатели сосны обыкновенной (Pinus sylvestris L.) // Бюл. Челябин.
Гос. ун-та, 2013, т. 7, № 298, стр. 191–194. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18958162>

10. Румянцева Д.Е. История и методология лесоводственно-ной
деңдрохронологии.
Лесохозяйственная деңдрохронология), Москва, 2010.
<https://mf.bmstu.ru/info/science/dendro-books/01.pdf>

11. Кирдянов А.Б., Ваганов Е.А. Разделение
климатический сигнал, отраженный в перемещении ширины и плотности
Годичные кольца деревьев // Лесоведение. 2006. Т. 6. С. 71–75.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9309592>

12. Щербаков В.Р., Тарханов С.Н., Радиальный.
Прирост и качество древесины сосны обыкновенной в условиях
атмосферного загрязнения (Радиальный рост и
Качество древесины сосны обыкновенной в условиях атмосферного
загрязнения. Екатеринбург, 2006.

13. Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Бергман И.Е.
Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях
техногенного загрязнения: Исследование системных связей и
закономерности.
Леса в условиях загрязнения воздуха: исследование системных
взаимосвязей и закономерностей. Екатеринбург, 2012.

14. Аминев К.З., Уразгильдин Р.В., Кулагин А.Ю.
Радиальный прирост дуба черешчатого (Quercus robur)
Листоногая древесина в условиях антропогенного загрязнения, Биос-

- Фера, 2014, вып. 6, нет. 4, стр. 388–399.
<https://doi.org/10.24855/biosfera.v6i4.184>
15. Ваганов Е.А., Скомаркова М.В., Шульце Е.-Д., и Линке, П., Изменчивость структуры изотопов состав годичных колец у *Pinus cembra* и *Picea abies* в горах Северной Италии, Лесоведение, 2007, т. 3, стр. 32–39.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9510703>
 16. Ярмишко В.Т., Борисова О.В., Ярмишко М.А. Многолетняя динамика состояния юнговежных лесов в условиях промышленного загрязнения атмосферы // Динамика лесных сообществ Северо-Запада. Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. СПб., 2009. С. 120–156.
 17. Тишин Д.В. Дендрология (методика древоскопического анализа). Методы анализа, Казань, 2011.
 18. Мультгаузен, Д.С. и Панкратова, Л.А. Влияние антропогенного загрязнения на радиальном древостое сосны обыкновенной роста на Колыском Севере, Вестн. С.-Петербург. Гос. ун-та, 2016, т. 7, № 4, стр. 124–133. <https://escjournal.spbu.ru/article/view/1827/2493>
 19. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния и состояния древостоев в состоянии, Лесоведение, 1989, т. 4, с. 51–57.
 20. Cybis Дендрология. Cybis Электроник и данные АБ. <https://www.cybis.se>.
 21. Шиятов С.Г. Дендрология верхних границ леса на Урале (Древесная дендрология на Урале), Москва, 1986.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22426951>
 22. Демаков Ю.П., Андреев Н.В. Закономерности радиального роста сосен в приозерных биотопах Национальный парк Мария Чодр, Эко-Потенциал, 2014, т. 3, № 7, стр. 48–58. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3550>
 23. Николаева С.А., Савчук Д.А. Комплексное подход и методы реконструкции роста и развитие древовидных сообществ Вестн. Томск. Гос. ун-та, Биол., 2009, т. 2, № 6, стр. 111–125.
http://journals.tsu.ru/biology/&journal_page=archive&id=746&article_id=17408.
 24. Специализированные базы данных для климатических исследований 2000–2011–20018–2022 гг. РИХ МИМДЦ. <http://meteo.ru/data>
 25. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., и Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М., 2006.
 26. Лебедево Л.А. Динамика размножения камбияных клеток у сосны ели // Лесовосстановление на Северо-Западе РСФСР (Лесовосстановление в Северо-Западе РСФСР), Ленинград, 1978, с. 101–111.
 27. Проект R для статистических вычислений. Фонд R. <https://www.R-project.org/>
 28. Черненко Т.В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М., 2002.
 29. Кайбиянен Л.К., Сафронова Г.И., Болондинский. Влияние токсичных загрязнителей на дыхание хвои и побеги сосны обыкновенной. Russ. J. Ecol., 1998, т. 29, № 1, стр. 20–23.
 30. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куликин Г.В. Статистика активности солнечных пятен. Солнечная активность. М., 1986.
 31. Матвеев С.М., Румянцева Д.Е., Дендрология, Воронеж 2013.
<https://mf.bmstu.ru/info/science/den-dro/books/02.pdf>
 32. Тимофеев В.П. Продолжительность и интенсивность сезонного роста деревьев как показатель продуктивности насаждений // Питание деревьев растений и повышение продуктивности леса (Питание деревьев растений и продуктивность леса) Ученые труды, Петрозаводск, 1972, с. 111–123.
 33. Антонова Г.Ф. Рост клеток хвойных. Рост хвойных растений. Новосибирск, 1999.
https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_61101
 34. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской субарктике. Новосибирск, 1996. https://ipae.uran.ru/sites/default/files/publications/ipae/1179_1996_VaganovEtAl.pdf
 35. Барзут О.С., Старицын В.В. О влиянии климатических факторов на радиальный прирост желтоголовика обыкновенного // Экологические проблемы Арктики и северных территорий. Архангельск, 2012. Т. 15. С. 6–11.
<https://narfu.ru/iti/departments/kezl/Vy-pusk%2015.pdf>
 36. Барзут В.М. Анализ многолетней и годовой динамики прироста хвойных пород в Беломорье. Автореферат диссертации кандидата биологических наук, Тарту, 1985.
 37. Мультгаузен, Д.С. и Панкратова, Л.А., Радиальный рост сосны обыкновенной в зоне влияния горно-металлургического комбината «Гечиригникель», Вестн. Воронеж. Гос. ун-та, Серия География, 2018, вып. 2, стр. 87–95.
<https://journals.vsu.ru/geo/article/view/2217>
 38. Хлеболов Е.И., Макарова О.А., Хлеболова, О.А., Полкарпова Н.В., Зациринский И.В., Птицы запovednika Pasvik, Рязань, 2007. <http://oopt.aari.ru/ref/1004>.
 39. Кучеров С.Е., Мулдашев А.А. Радиальный прирост сосны обыкновенной в районе Карабашского медеплавильного завода // Лесоведение. 2003. Т. 2. С. 43–49.
<http://lesovedenie.ru/index.php/forestry/article/view/37>
 40. Щекалёв Р.В., Тарханов С.Н., Прожекина Н.В., и Ключихин А.Н. Продуктивность сосновых насаждений в условиях дефицита влаги в условиях длительного антропогенного воздействия, Материалы международной конференции «Проблемы физиологии растений Севера» (Труды международной научно-практической конференции «Проблемы физиологии заводов Севера»), Петрозаводск, 2004.

Перевод Т. Ткачевой

Примечание издателя. Издательство Pleiades Publishing остается нейтральным в отношении юрисдикционных претензий в опубликованные карты институциональная принадлежность.