

АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

УДК 504.054:504.056:581.55:630*181.351

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ДРЕВОСТОЕВ *PINUS SYLVESTRIS* (PINACEAE) В УСЛОВИЯХ СНИЖЕНИЯ АЭРОТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

© 2024 г. И. В. Лянгузова^{1, *}, П. Н. Катютин^{1, 2}

¹Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: ILyanguzova@binran.ru

Поступила в редакцию 22.06.2024 г.

После доработки 28.08.2024 г.

Принята к публикации 04.09.2024 г.

На фоне сниженных объемов атмосферных выбросов крупного медно-никелевого комбината (Мурманская обл.), регистрируемых в течение последних двадцати лет, исследованы размерная и виталитетная структуры древостоев *Pinus sylvestris* L. в средневозрастных сосновых лесах в фоновом районе, буферной и импактной зонах, а также оценено современное содержание Ni и Cu в лесной подстилке. Установлено, что сниженная аэротехногенная нагрузка не привела к уменьшению уровня загрязнения органогенного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов тяжелыми металлами, на территории импактной зоны их содержание по-прежнему более чем в 100 раз превышает фоновые концентрации. Распределения всех морфометрических параметров древостоев сосны независимо от уровня аэротехногенной нагрузки отличаются положительной асимметрией, что свидетельствует о преобладании малоразмерных особей в составе сосновых древостоев. В виталитетных спектрах фоновых сосновых древостоев преобладают ослабленные и сильно ослабленные особи, с увеличением уровня загрязнения местообитаний тяжелыми металлами ухудшается жизненное состояние древостоев, а абсолютный максимум в виталитетных спектрах смещается на долю усыхающих особей.

Ключевые слова: северная тайга, сосновые леса, древостой, размерная структура, виталитетная структура, тяжелые металлы, аэротехногенное загрязнение, Мурманская область

DOI: 10.31857/S0033994624040071, EDN: PQSUEG

Промышленное загрязнение окружающей среды по-прежнему остается в центре внимания исследователей-экологов, несмотря на предпринимаемые усилия многих стран к снижению объемов атмосферных выбросов промышленными предприятиями. Регистрируемое в последние десятилетия уменьшение промышленных эмиссий загрязняющих веществ обусловлено разными причинами: закрытие предприятий из-за их опасности или нерентабельности, переход на новые технологии, перенос производства в другие страны [1–3]. Независимо от причин снижения интенсивности аэротехногенного загрязнения или остановки промышленного производства, это позволяет выявлять ответную реакцию отдельных компонентов или экосистем в целом на уменьшение токсического пресса, а также оценивать возможности естественного восстановления

наземных экосистем. Однако согласно последнему обзору современного состояния исследований естественного восстановления наземных экосистем после прекращения промышленного загрязнения [4], эти исследования носят пока что фрагментарный характер, и имеются многочисленные пробелы в изученности этого процесса. Об актуальности восполнения имеющихся пробелов свидетельствуют последние публикации, характеризующие ответную реакцию различных организмов на снижение аэротехногенной нагрузки, а также начальные этапы естественного восстановления отдельных компонентов наземных экосистем [5–17]. Особенно актуальны и важны долговременные мониторинговые наблюдения за состоянием биогеоценозов в периоды с разной интенсивностью техногенного стресса [18–24], а также оценка современного состояния различных

компонентов и экосистем в целом [5, 12, 25, 26], которая позволит обозначить начавшиеся этапы естественного восстановления наземных экосистем после снятия техногенной нагрузки.

Цель настоящей работы — количественная оценка современного состояния древостоев *Pinus sylvestris* L. в условиях сниженной интенсивности аэротехногенного загрязнения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены в 2022–2023 гг. в центральной части Кольского полуострова в средневозрастных сосновых лесах, расположенных на разном удалении от комбината «Североникель» в юго-западном и северо-восточном направлениях. Для выявления воздействия фактора аэротехногенного загрязнения среди абиотических факторов окружающей среды все растительные сообщества подбирали в однотипных местообитаниях с учетом положения в макро- и мезорельефе, сукцессионного статуса, типа почвы и давности нарушения (80 лет после последнего пожара). Древесный ярус исследованных сообществ сформирован *Pinus sylvestris* L. с небольшим участием *Betula pubescens* Ehrh. В травяно-кустарничковом ярусе фоновых сосновых лесов доминирующими видами являются кустарнички *Vaccinium vitis-idaea* L., *V. myrtillus* L., *Empetrum hermaphroditum* Hagerup, в мохово-лишайниковом — зеленые мхи *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Dicranum* spp. и лишайники *Cladonia rangiferina* (L.) Weber ex F. H. Wigg., *Cl. stellaris* (Opiz.) Pouzar et Vězda, *Cl. arbuscula* (Wallr.) Flot. На загрязненной территории в травяно-кустарничковом ярусе доминируют те же виды кустарничков, а в мохово-лишайниковом ярусе преобладают лишайники р. *Cladonia* с шиловидными и сцифовидными подециями. Согласно современной классификации почв России [28, 29], исследуемые почвы относятся к Al-Fe-гумусовым подзолам.

Металлургический комбинат «Североникель» (г. Мончегорск, Мурманская обл.) был введен в строй в 1938 г. для производства цветных металлов из медно-никелевых руд местных месторождений, которые истощились к концу 1960-х годов. В 1968 г. комбинат перешел на использование полиметаллических руд Норильского месторождения, которые отличались высоким содержанием серы, что привело к резкому увеличению объемов

выбросов диоксида серы и твердых веществ [27]. В результате многолетнего техногенного воздействия комбината на окружающую среду значительные территории оказались трансформированы. К концу XX века общая площадь зоны загрязнения составляла около 100 тыс. га, при этом на площади 3.7 тыс. га леса оказались полностью уничтожены. Согласно опубликованным данным, в период 1981–1990 гг. ежегодный объем атмосферных выбросов SO₂ ОАО «Североникель» превышал в среднем 220 тыс. т, твердых веществ — 16 тыс. т, затем происходило постепенное снижение объемов выбросов, и к концу XX в. они составляли соответственно 45.8 и 6.0 тыс. т в год. В настоящее время ежегодный объем выбросов SO₂ и твердых веществ на комбинате «Североникель» составляет соответственно 35–37 и 2.9–3.4 тыс. т в год. На различных этапах производственного цикла в атмосферу поступает диоксид серы с примесью мелкодисперсной полиметаллической пыли, содержащей сульфиды и оксиды металлов, а также частицы Ni, Cu, Co.

Сеть мониторинговых пробных площадей в средневозрастных сосновых лесах по градиенту промышленного загрязнения атмосферными выбросами комбината «Североникель» была заложена еще в начале 1980-х годов [30]. В течение более 40 лет на этих пробных площадях проводились различные исследования, что, возможно, оказало влияние на состояние лесных экосистем вследствие дополнительной рекреационной нагрузки. В связи с этим в 2022–2023 гг. были заложены новые пробные площади (ПП) размером 0.06–0.10 га в аналогичных сосняках, расположенные недалеко от сети мониторинговых пробных площадей. В пределах вновь заложённых ПП проводили сплошной учет и нумерацию живых деревьев, измеряли диаметр основания ствола и на высоте 1.3 м, а также высоту каждого дерева. К древесному ярусу относили особи сосны высотой более 1.3 м и диаметром ствола на высоте 1.3 м свыше 4 см. В таблице 1 приведены местоположение ПП и средние параметры древостоев. В зависимости от плотности древостоев, суммы площадей сечения и размеров ПП число учетных деревьев сосны варьировало от 38 до 147 экз.

Категорию жизненного состояния определяли глазомерно по степени ажурности кроны с учетом дехромации и дефолиации ассимиляционного аппарата [30]. Выделяли 4 категории состояния деревьев: 1 — без признаков ослабления; 2 — ос-

Таблица 1. Средние характеристики исследуемых сосновых древостоев по градиенту аэротехногенной нагрузки
Table 1. Average characteristics of the studied pine stands by aerotechnogenic load gradient

№ ПП Number of permanent sample plot (PSP)	Расстояние, км и направление Distance, km and direction	Координаты Coordinates	Диаметр на высоте 1.3 м, см DBH, cm	Диаметр основания ствола, см, Trunk base diameter, cm	Высота, м Height, m	Плотность, экз./га Density, ind./ha	Сумма площадей сечения, м²/га Basal area, m²/ha
Фоновый район / Background area							
1	64 ЮЮЗ 64 SSW	67030'59"N 31046'50"E	10.4	12.9	8.5	1238	10.6
2	60 ЮЗЗ 60 SSW	67084'24"N 31041'25"E	12.8	16.0	11.3	667	9.5
Буферная зона / Buffer zone							
3	30 СВ 30 NE	68006'53"N 33019'30"E	11.3	13.8	10.1	2450	25.6
4	30 ЮЮЗ 30 SSW	67038'37"N 32045'06"E	11.2	13.6	8.7	1183	10.0
5	31 ЮЮЗ 31 SSW	67038'12"N 32042'11"E	12.9	15.9	10.1	1033	12.8
Импактная зона / Impacted zone							
6	11 ЮЮЗ 11 SSW	67049'21"N 32046'28"E	9.4	11.6	7.4	1933	14.3
7	11 ЮЮЗ 11 SSW	67049'21"N 32045'09"E	7.1	9.0	5.6	3147	13.2
8	11 ЮЮЗ 11 SSW	67049'19"N 32045'05"E	6.9	9.0	4.8	1040	4.3
9	11 СВ 11 NE	68000'25"N 32055'29"E	8.8	11.2	7.0	1867	12.5

лабленные; 3 — сильно ослабленные; 4 — усыхающие. Для оценки жизненного состояния вычисляли индекс жизненного состояния древостоев сосны (L_n) с учетом актуализации коэффициентов массы хвои для соответствующих категорий состояния [31] и среднеарифметическое значение категории состояния ($KС$).

На каждой ПП отбирали не менее 5 индивидуальных образцов органогенного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов (лесной подстилки), которые объединяли для получения средних проб. Конечное определение содержания кислотора-

створимых форм Ni, Cu в образцах подстилки проводили в вытяжке 1.0 N HCl методом атомно-абсорбционной спектроскопии в 3-кратной повторности. Для оценки уровня загрязнения местообитаний тяжелыми металлами рассчитывали индекс техногенной нагрузки (ИТН), который представляет собой превышение суммарного содержания кислоторастворимых форм преобладающих металлов (Ni, Cu) в лесной подстилке над их фоновым содержанием [30].

При анализе размерной и виталитетной структур древостоев сосны использовали базовые пара-

метры распределений: коэффициенты асимметрии и эксцесса, а также диапазон изменения размерных параметров. Распределения размерных параметров деревьев сосны аппроксимировали различными теоретическими распределениями (нормальным, логнормальным, экспоненциальным, Вейбулла, Гамма, χ^2 -распределением), значимость различий оценивали с помощью критерия χ^2 .

Статистическую обработку результатов проводили с использованием ANOVA, корреляционного и регрессионного анализа. Для оценки значимости различий использовали непараметрические критерии Краскела—Уоллиса (H) и Манна—Уитни (z). Данные представлены в виде значений медиан и их квартилей (Q_{25} и Q_{75}), либо среднеарифметических значений и их стандартного отклонения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Современный уровень загрязнения местообитаний тяжелыми металлами

В фоновых сосновых лесах Кольского полуострова среднее значение суммарного содержания кислоторастворимых форм Ni и Cu в органогенном горизонте (лесной подстилке) Al-Fe-гумусовых подзолов составляет $20.0 \pm \pm 0.5$ мг/кг. При расчете ИТН данное значение было принято за 1. По мере приближения к комбинату «Североникель» возрастает уровень загрязнения почв тяжелыми металлами, что выражается в увеличении значений ИТН (рис. 1).

На территории буферной зоны минимальное значение ИТН (6.3 отн. ед.) зарегистриро-

вано на ПП3, удаленной от комбината на 30 км в северо-восточном направлении, а максимальное (17.4 отн. ед.) — на ПП5, удаленной на такое же расстояние в юго-западном направлении от комбината (рис. 1). Зарегистрированное 3-кратное различие ИТН в пределах буферной зоны по двум противоположным направлениям обусловлено преобладанием ветров, дующих в юго-западном направлении от комбината и особенностями рельефа. На территории импактной зоны средние значения ИТН варьируют в интервале 130–140 отн. ед. и достоверно не различаются на пробных площадях, расположенных в северо-восточном (ПП9) и юго-западном (ПП6–8) направлениях от комбината.

Размерная структура древостоев сосны

Прежде всего, необходимо было установить соответствие или несоответствие распределений исследуемых параметров нормальному закону; проверка выявила их значимые различия. Аппроксимация распределений размерных параметров деревьев сосны теоретическими распределениями (нормальное, логнормальное, экспоненциальное, Вейбулла, Гамма и др.) выявила неоднозначную картину. Из всего массива полученных данных примерно в половине случаев распределение размерных параметров деревьев сосны подчиняются закону нормального распределения. Экспоненциальное и распределение Вейбулла оказались неприменимы для аппроксимации ни одного из эмпирических размерных параметров исследуемых древостоев сосны. В остальных случаях для некоторых параметров (диаметр у основания ствола или на высоте 1.3 м,

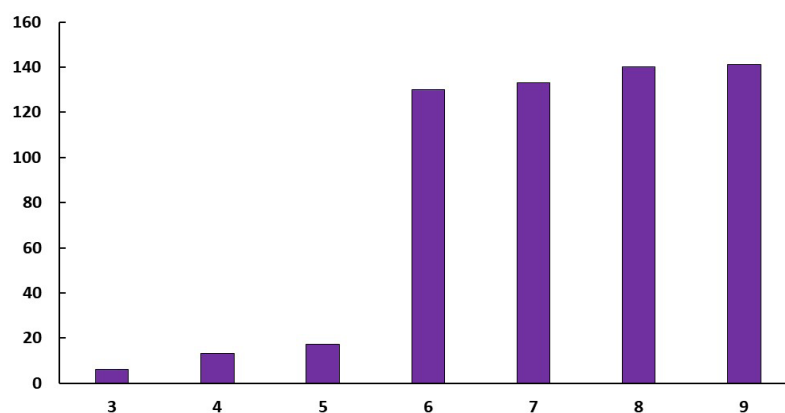


Рис. 1. Индекс техногенной нагрузки (ИТН) на исследуемых пробных площадях (ПП). По горизонтали — номера пробных площадей; по вертикали — индекс техногенной нагрузки, отн. ед.

Fig. 1. Index of technogenic load (ITL) at the studied sample plots (PSP). X-axis — numbers of sample plots; y-axis — anthropogenic load index, relative units.

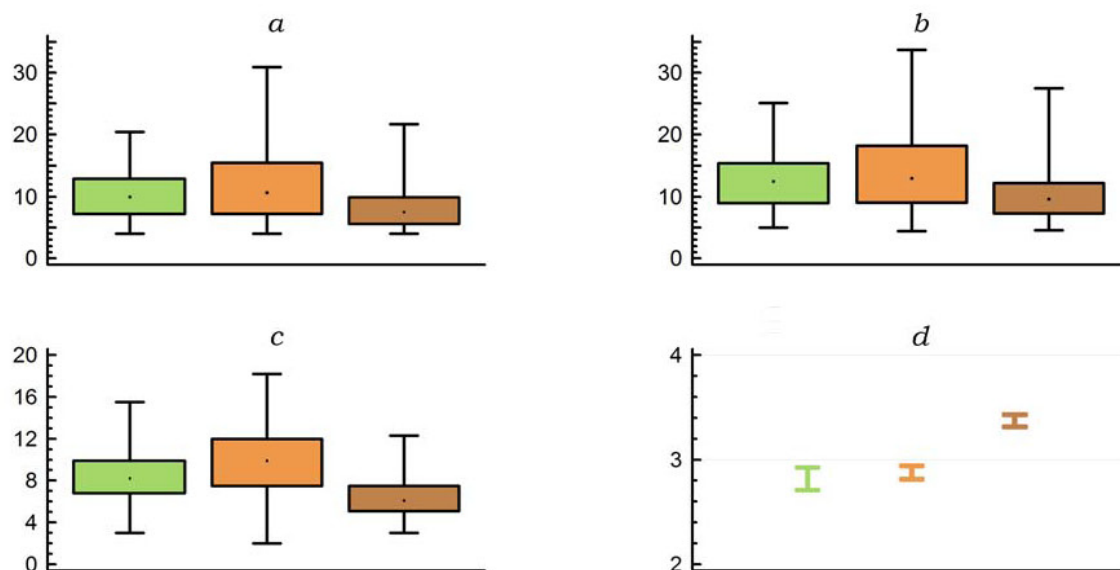


Рис. 2. Усредненные параметры древостоев сосны по градиенту аэротехногенного загрязнения. По горизонтали: названия зон слева направо: фоновый район, буферная зона, импактная зона; по вертикали: *a* — медианы диаметра (см) ствола на высоте 1.3 м, *b* — медианы диаметра (см) основания ствола, *c* — медианы высоты (м) дерева, *d* — средние значения категории жизненного состояния дерева.

Fig. 2. Average parameters of pine stands along the gradient of aerotechnogenic pollution. X-axis — zones (from left to right: background, buffer, impacted); y-axis: *a* — medians of trunk diameter (cm) at a DBH, *b* — medians of trunk base diameter (cm), *c* — medians of tree height (m), *d* — average values of tree vitality status.

или высота дерева) или конкретных древостоев (ПП1, 4, 9) отсутствовали значимые различия с Гамма-распределением. В ряде случаев (30%) была применима аппроксимация либо χ^2 -распределением, либо логнормальным распределением, для которого характерно преобладание низших градаций параметров. Вследствие вышесказанного на рис. 2 представлены медианы и квартили исследуемых параметров, усредненных для фоновой, буферной и импактной зон.

В фоновых сосновых древостоях диаметр ствола на высоте 1.3 м варьирует от 4 до 20 см, а диаметр основания ствола — от 5 до 25 см, средние значения медиан составляют 11.8 и 12.9 см соответственно (рис. 2). В буферной зоне интервал варьирования указанных параметров более широкий: 4–31 см и 5–33 см соответственно, при этом значимые различия средних значений этих показателей в фоновом районе и буферной зоне отсутствуют ($H = 6.33$ и 6.69 , $p = 0.097$ и 0.083 соответственно). В импактной зоне средние значения медиан диаметров на высоте 1.3 м и у основания стволов составляют соответственно 7.7 и 9.7 см, что значительно меньше по сравнению с этими показателями в фоновой и буферной зонах ($H = 75.5$ и 65.3 , $p = 0.000$).

Высота деревьев в фоновых средневозрастных сосновых лесах Кольского полуострова варьирует от 4 до 18 м, среднее значение медианы равно 8.2 м (рис. 2). В буферной зоне средняя величина медианы высоты составляет 11.9 м, что значительно больше ($H = 26.1$, $p = 0.000$) фоновое значение этого параметра. На территории импактной зоны деревья сосны существенно ниже, чем в фоновой и буферной зонах ($H = 213.7$, $p = 0.000$), среднее значение медианы равно лишь 6.2 м.

При сравнении статистических параметров распределений было установлено, что в фоновых древостоях распределения особей сосны по градациям диаметра основания ствола отличаются суженным диапазоном, положительной асимметрией и незначительной островершинностью (табл. 2). На рис. 3 представлены примеры распределений диаметра основания ствола деревьев сосны в фоновом районе и на территории буферной и импактной зон. В буферной зоне древостой сосны также характеризуется суженным диапазоном, составляющим 0.4 от среднего максимального диапазона (66 см) данного вида в районе исследований. Положительная асимметрия распределений ($As = 0.30$ – 1.28) свидетельствует о доминировании низших классов

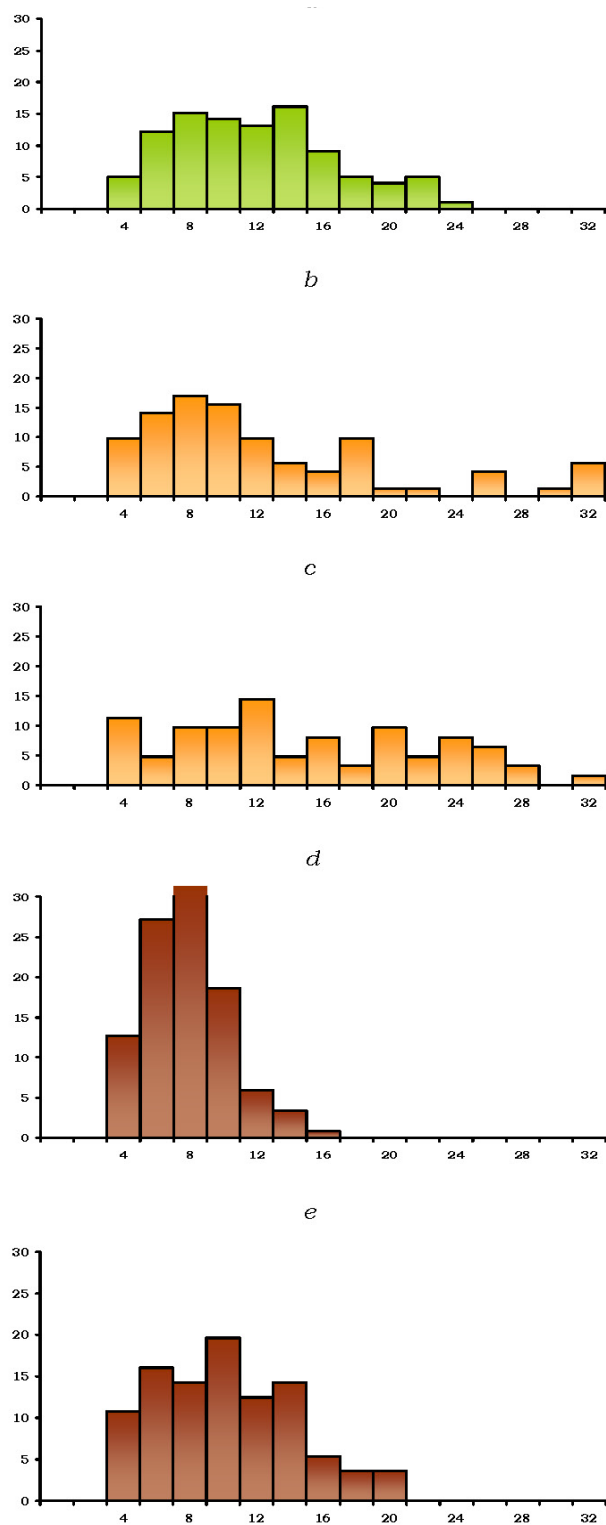


Рис. 3. Примеры распределений диаметра основания ствола *Pinus sylvestris* в фоновом районе (а – ПП1), буферной (б – ПП4; с – ПП5) и импактной зонах (д – ПП7, е – ПП9). По горизонтали – градации диаметра, см; по вертикали – частота, %.

Fig. 3. Examples of *Pinus sylvestris* trunk base diameter distributions in the background area (a – PSP1), buffer (b – PSP4; c – PSP5) and impact zones (d – PSP7, e – PSP9). X-axis – diameter grades, cm; y-axis – frequency, %.

диаметра основания ствола, а размах варьирования и величина коэффициента эксцесса (от -0.90 до 1.02) — о разнообразии форм распределений этого параметра (рис. 3). Наиболее узкий диапазон диаметра основания ствола зарегистрирован в древостоях сосны в импактной зоне, где этот параметр составляет от 9 до 23 см (табл. 2). Коэффициент асимметрии варьирует в нешироком интервале ($0.42-1.00$), но во всех случаях положителен, что подтверждает преобладание малоразмерных особей сосны в древостое. Для коэффициента эксцесса отмечен более широкий интервал варьирования — от -0.74 до 1.18 (табл. 2), что свидетельствует либо об умеренной островершинности ($0 < Ex < 3.0$), либо о плосковершинности ($-1.0 < Ex < 0$) распределений (рис. 3).

Распределения диаметров стволов сосны на высоте 1.3 м в целом сходны с распределениями диаметра основания ствола, особенно в фоновых древостоях и буферной зоне (табл. 2). В импактной зоне параметры распределений диаметров на высоте 1.3 м и у основания ствола несколько различаются. Распределения диаметра ствола на высоте 1.3 м отличаются еще более узким диапазоном, по сравнению с распределениями диаметра основания ствола независимо от уровня техногенного загрязнения. Различие величин коэффициентов асимметрии и эксцесса сравниваемых распределений не обнаруживает какой-либо выраженной закономерности.

В фоновых сосновых древостоях распределение деревьев по классам высоты характеризуется довольно слабой положительной асимметрией и весьма умеренной островершинностью (табл. 2), в древостое преобладают особи высотой 5–10 м (рис. 4). В буферной зоне распределение деревьев по высоте отличается незначительной асимметрией ($As = |0.06-0.14|$) и выраженной плосковершинностью ($Ex = -|0.39-0.88|$), особенно на ПП5, в пределах которой были отмечены деревья высотой от 4 до 18 м (рис. 4). В импактной зоне установленные значения коэффициентов асимметрии и эксцесса, соответственно $As = |0.06-0.56|$ и $Ex = -|0.09-0.52|$, свидетельствуют о симметричности или слабой положительной асимметрии и слабой плосковершинности распределений (рис. 4).

Таким образом, по градиенту аэротехногенного загрязнения значительно уменьшаются все размерные параметры деревьев сосны и существенно сужаются их диапазоны, особенно ярко это про-

Таблица 2. Статистические параметры размерных спектров древостоев сосны по градиенту аэротехногенного загрязнения
Table 2. Statistical parameters of pine stands size spectra along aerotechnogenic pollution gradient

№ ПП Number of PSP	Параметр Parameter	<i>N</i>	<i>Dd</i> , cm	<i>As</i>	<i>Ex</i>
Фоновый район / Background area					
1	<i>D</i> _{1.3}	99	16	0.52	-0.28
	<i>D</i> ₀	99	20	0.52	-0.31
	<i>H</i>	99	12	0.46	0.29
2	<i>D</i> _{1.3}	101	18	0.23	-0.35
	<i>D</i> ₀	101	23	0.32	-0.43
	<i>H</i>	101	11	-0.71	0.17
Буферная зона / Buffer zone					
3	<i>D</i> _{1.3}	147	21	0.53	-0.22
	<i>D</i> ₀	147	29	0.66	-0.21
	<i>H</i>	147	11	-0.14	-0.84
4	<i>D</i> _{1.3}	71	27	1.29	1.32
	<i>D</i> ₀	71	28	1.28	1.02
	<i>H</i>	71	13	0.06	-0.39
5	<i>D</i> _{1.3}	62	23	0.32	-0.86
	<i>D</i> ₀	62	28	0.30	-0.90
	<i>H</i>	62	14	-0.06	-0.88
Импактная зона / Impacted zone					
6	<i>D</i> _{1.3}	118	18	0.78	0.30
	<i>D</i> ₀	118	23	1.00	1.18
	<i>H</i>	118	8	0.56	-0.09
7	<i>D</i> _{1.3}	116	9	0.73	0.08
	<i>D</i> ₀	116	13	0.85	0.84
	<i>H</i>	116	5	0.33	-0.21
8	<i>D</i> _{1.3}	39	8	0.75	-0.08
	<i>D</i> ₀	39	9	0.43	-0.74
	<i>H</i>	39	4	0.06	-0.52
9	<i>D</i> _{1.3}	56	13	0.55	-0.37
	<i>D</i> ₀	56	16	0.42	-0.61
	<i>H</i>	56	6	0.47	-0.27

Примечание. *N* – объем выборки; *Dd* – диапазон параметра, см; *As* – коэффициент асимметрии; *Ex* – эксцесс.
Note. *N* – sample volume; *Dd* – parameter range, cm; *As* – asymmetry coefficient; *Ex* – excess.
Здесь и в табл. 4: *D*_{1.3} – диаметр на высоте 1.3 м, *D*₀ – диаметр основания ствола, *H* – высота дерева Да
Here and in table 4: *D*_{1.3} – DBH, *D*₀ – trunk base diameter, *H* – tree height Да

является в импактной зоне. Независимо от уровня загрязнения местообитаний тяжелыми металлами распределения всех исследуемых размерных параметров отличаются положительной асимметрией, что свидетельствует о преобладании в древостоях сосны малоразмерных особей.

Виталитетная структура древостоев сосны
На рис. 5 представлены усредненные виталитетные спектры сосновых древостоев по градиенту аэротехногенного загрязнения. В фоновых условиях в виталитетных спектрах древостоев преобладают ослабленные и сильно ослабленные особи сосны,

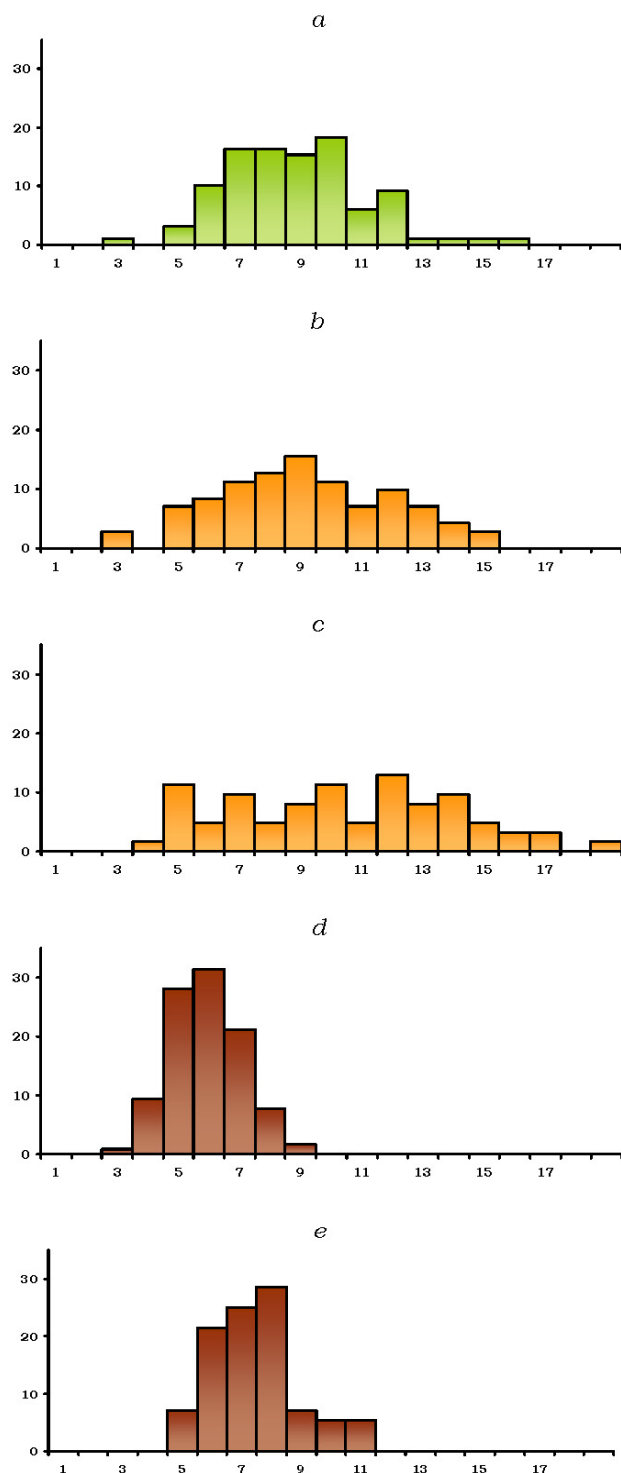


Рис. 4. Примеры распределений высоты деревьев *Pinus sylvestris* в фоновом районе (*a* – ПП1), буферной (*b* – ПП4; *c* – ПП5) и импактной зонах (*d* – ПП7, *e* – ПП9). По горизонтали – градации высоты, м; по вертикали – частота, %.

Fig. 4. Examples of *Pinus sylvestris* tree height distributions in the background area (*a* – PSP1), buffer (*b* – PSP4; *c* – PSP5) and impact zones (*d* – PSP7, *e* – PSP9). X-axis – height grades, m; y-axis – frequency, %.

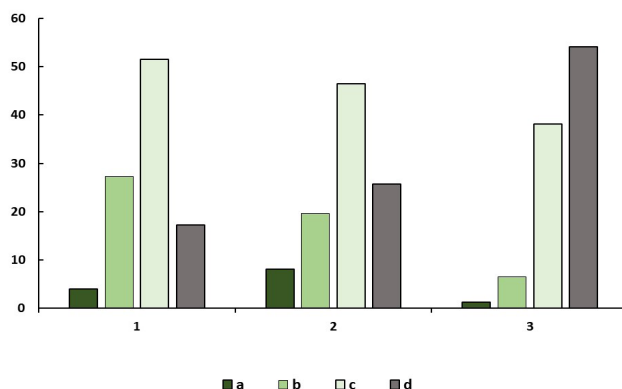


Рис. 5. Усредненные виталитетные спектры древостоев сосны в фоновой (1), буферной (2) и импактной (3) зонах.

По горизонтали: 1 – фоновый район, 2 – буферная зона, 3 – импактная зона; по вертикали – доля (%) каждой категории жизненного состояния от общего числа деревьев: *a* – здоровые; *b* – ослабленные; *c* – сильно ослабленные; *d* – усыхающие.

Fig. 5. Average vitality spectra of pine stands in background (1), buffer (2) and impact (3) zones.

X-axis: 1 – background area, 2 – buffer zone, 3 – impacted zone; y-axis – share (%) of each vitality class from the total number of trees: *a* – healthy; *b* – weakened; *c* – severely weakened; *d* – dying-off.

доли которых составляют соответственно 27 и 52% от общего числа деревьев, при этом доля усыхающих особей достаточно велика и достигает 17%. В буферной зоне абсолютный максимум в виталитетных спектрах сосновых древостоев приходится на сильно ослабленные особи (46%), при этом доля усыхающих особей возрастает в 1.5 раза, а доля ослабленных особей соответственно уменьшается примерно в 1.5 раза по отношению к их доле в фоновом районе. В импактной зоне свыше 50% особей от их общего числа относятся к категории усыхающих, достаточно велика доля сильно ослабленных особей (38%), а доля здоровых особей минимальна (1.3%) среди сравниваемых древостоев.

Более детальный анализ виталитетной структуры сосновых древостоев выявил их особенности в разных сообществах и по градиенту аэротехногенного загрязнения (табл. 3). Во всех виталитетных спектрах древостоев сосны выявлена левосторонняя асимметрия, которая усиливается по мере приближения к источнику загрязнения, что свидетельствует об увеличении доли низших классов жизненности. Отрицательные значения эксцесса, зарегистрированные в фоновых древостоях и в буферной зоне, сменяются положительными величинами в импактной зоне, т.е. происходит смена более или менее выров-

Таблица 3. Статистические параметры виталитетных спектров древостоев сосны по градиенту аэротехногенного загрязнения

Table 3. Statistical parameters of pine stands vitality spectra along aerotechnogenic pollution gradient

№ ПП Number of PSP	<i>M</i>	<i>Std. Dev.</i>	<i>Md</i>	<i>As</i>	<i>Ex</i>	<i>V</i> , %	<i>L_n</i>
Фоновый район / Background area							
1	2.82	0.76	3.00	−0.25	−0.21	27.0	0.48
2	2.29	1.15	2.00	0.58	−0.47	30.4	0.66
Буферная зона / Buffer zone							
3	2.95	0.89	3.00	−0.37	−0.76	30.2	0.44
4	2.80	0.86	3.00	−0.45	−0.26	30.5	0.48
5	2.81	0.76	3.00	−0.56	0.36	27.3	0.44
Импактная зона / Impacted zone							
6	3.35	0.74	3.00	−0.94	0.40	22.0	0.33
7	3.20	0.62	3.00	−0.60	1.54	19.4	0.37
8	3.69	0.52	4.00	−1.44	1.25	14.1	0.23
9	3.55	0.71	4.00	−1.61	2.26	20.0	0.27

Примечание. *M* – среднее значение категории состояния; *Std. Dev.* – стандартное отклонение; *Md* – медиана; *As* – коэффициент асимметрии; *Ex* – эксцесс; *V* – коэффициент вариации; здесь и в табл. 4: *L_n* – индекс жизненного состояния.
Note. *M* – mean value of the state category; *Std. Dev.* – standard deviation; *Md* – median; *As* – asymmetry coefficient; *Ex* – excess; *V* – coefficient of variation; here and in table 4: *L_n* – vital status index.

Таблица 4. Результаты регрессионного анализа зависимости размерных параметров и показателей виталитета особей сосны от индекса техногенной нагрузки при аппроксимации линейными уравнениями типа $y = a + bx$

Table 4. Results of regression analysis of the dependence of size parameters and vitality indices of individual pine trees on the anthropogenic load index when approximated by linear equations of the type $y = a + bx$

Параметр Parameter	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Se</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
<i>D_{1.3}</i>	9	−0.86	<i>a</i>	11.90	0.58	20.6	0.000
			<i>b</i>	−0.028	0.006	−4.44	0.003
<i>D₀</i>	9	−0.85	<i>a</i>	14.65	0.69	21.3	0.000
			<i>b</i>	−0.032	0.008	−4.27	0.004
<i>H</i>	9	−0.86	<i>a</i>	9.95	0.56	17.9	0.000
			<i>b</i>	−0.028	0.006	−4.49	0.003
Категория жизненного состояния (КС) Vitality class (VS)	9	0.88	<i>a</i>	2.68	0.10	25.7	0.000
			<i>b</i>	0.006	0.001	5.00	0.002
<i>L_n</i>	9	−0.85	<i>a</i>	0.518	0.002	14.9	0.000
			<i>b</i>	−0.002	0.0004	−4.29	0.004

Примечание. *N* – объем выборки; *R* – коэффициент корреляции; *K* – коэффициенты уравнения; *M* – значения коэффициентов; *Se* – стандартная ошибка коэффициентов; *t* – расчетное значение критерия Стьюдента; *p* – уровень значимости.
Note. *N* – sample size; *R* – correlation coefficient; *K* – equation coefficients; *M* – coefficient values; *Se* – standard error of the coefficients; *t* – calculated value of Student's criterion; *p* – significance level.

ненных спектров на островершинные с абсолютным максимумом на усыхающих особях. Все виталитетные спектры характеризуются невысокой степенью вариабельности, коэффициент вариации изменяется от 14.1 до 30.5%. Индекс жизненного состояния последовательно снижается по градиенту аэротехногенного загрязнения от 0.48–0.66 в фоновых сосновых лесах до 0.23 в древостоях импактной зоны.

Таким образом, можно констатировать, что несмотря на сниженную аэротехногенную нагрузку по мере приближения к источнику загрязнения ухудшается жизненное состояние древостоев сосны, что выражается в снижении индекса жизненного состояния. Абсолютный максимум в виталитетных спектрах смещается с ослабленных или сильно ослабленных на категорию усыхающих особей, что приводит к возрастанию по абсолютной величине коэффициентов асимметрии и эксцесса в распределениях особей сосны по категориям жизненного состояния.

Связь параметров древостоя с уровнем загрязнения местообитаний

Результаты регрессионного анализа данных показывают, что зависимости размерных параметров особей и показателей виталитета от уровня загрязнения местообитаний тяжелыми металлами могут быть аппроксимированы линейными уравнениями с высокими уровнями значимости (табл. 4). Все коэффициенты корреляции значимы при уровне значимости $p < 0.004$.

Таким образом, можно констатировать, что с увеличением уровня загрязнения местообитаний тяжелыми металлами значимо уменьшаются высота деревьев сосны и диаметры стволов, ухудшается жизненное состояние древостоев, увеличивается доля усыхающих особей в виталитетных спектрах.

В настоящее время на комбинате «Североникель» ежегодный объем выбросов диоксида серы не превышает 35 тыс. т, а твердых веществ — 3.5 тыс. т, что в 5–8 раз меньше этих показателей в период высокой аэротехногенной нагрузки, наблюдавшейся в 1970–1990-е гг. Необходимо подчеркнуть, что сниженная интенсивность атмосферной эмиссии загрязняющих веществ сохраняется уже свыше 20 лет. Следовательно, вполне логично предположить, что за этот период начался процесс самоочищения Al-Fe-гумусовых подзолов и уровень загрязнения

местообитаний тяжелыми металлами снизился. Однако проведенные исследования показали, что в буферной зоне значения ИТН варьируют в пределах 6.3–17.4 отн. ед., что обусловлено розой ветров. На территории импактной зоны значимые различия в содержании тяжелых металлов в лесной подстилке конкретных ПП отсутствуют, но сохраняется очень высокий уровень загрязнения органогенного горизонта почвы тяжелыми металлами (ИТН > 130 отн. ед.). Следовательно, равновесие между поступлением тяжелых металлов из загрязненного воздуха на поверхность почвы и их вымыванием в нижележащие горизонты почвы не наступило, продолжается процесс накопления соединений Ni и Cu. Полученные результаты согласуются с мнением большинства исследователей, изучавших уровень загрязнения почв вблизи предприятий цветной металлургии на фоне разной интенсивности атмосферной эмиссии загрязняющих веществ, о высокой консервативности почв по отношению к тяжелым металлам [4, 17, 18, 20–24; 32–35].

Среди лесов бореальной зоны северотаежные сосновые леса отличаются разреженностью, невысокой сомкнутостью крон и достаточно низкими морфометрическими параметрами (высота, диаметр, сумма площадей сечения). На Кольском полуострове в процессе постпирогенной сукцессии (в интервале от 80 до 380 лет после пожара) высота древостоев сосны увеличивалась от 8.0 до 17.5 м, диаметр ствола деревьев на высоте 1.3 м варьировал от 10 до 32 см [36, 37]. При одинаковой давности пожара (80–85 лет) в ряду от наиболее сухих сосновых редколесий к наиболее влажным соснякам зеленомошным все размерные параметры древостоев сосны увеличиваются: средняя высота деревьев в пределах от 8.5 до 13.0 м; диаметр ствола на высоте 1.3 м — от 10.7 до 15.0 см; средняя сумма площадей сечения — от 6.4 до 27.2 м²/га [38, 39]. Полученные нами средние значения размерных параметров древостоев фоновых сосняков хорошо согласуются с приведенными литературными данными для района исследований, что свидетельствует об идентичности лесорастительных условий местообитаний при давности последнего пожара 80–85 лет.

Согласно данным [40, 41], к настоящему времени возраст сосновых древостоев на сети мониторинговых постоянных пробных площадей, расположенных по градиенту аэротехногенного загрязнения,

составляет в среднем 70 лет, диаметр ствола на высоте груди уменьшается с 8.3 см в фоновом районе до 3.4–5.1 см в импактной зоне, а высота деревьев — с 8.0 м до 3.2–4.3 м соответственно. Выявленные нами закономерности изменения размерных параметров деревьев сосны в целом согласуются с приведенными данными для сети мониторинговых пробных площадей. Результаты дисперсионного анализа данных показывают значимые различия всех размерных параметров по градиенту современной аэротехногенной нагрузки, а зависимость всех размерных параметров деревьев сосны от уровня загрязнения местообитаний тяжелыми металлами с высоким уровнем значимости аппроксимируется линейными регрессионными уравнениями. Следовательно, можно констатировать, что сохраняющийся в настоящее время высокий уровень загрязнения верхнего горизонта подзолов по-прежнему остается главным фактором, лимитирующим ростовые процессы деревьев сосны.

Исследование виталитетной структуры ценопопуляций лесообразующих видов в фоновых лесах Кольского полуострова выявило доминирование ослабленных и сильно ослабленных деревьев сосны в процессе послепожарного восстановления сосновых лесов разной типологической принадлежности [36, 37, 39, 42–44]. Эта закономерность прослеживается на всех стадиях восстановления сосновых лесов (80–380 лет после пожара), а также в сосново-еловых лесах Кольского полуострова [44]. Все размерные параметры деревьев сосны разных категорий жизненного состояния значимо различаются [31]. При давности последнего пожара 80–85 лет высота и диаметр ствола деревьев последовательно снижаются соответственно от 12 м и 18.0 см у здоровых особей до 8 м и 8.1 см у усыхающих деревьев сосны. Ухудшение жизненного состояния особей древесных растений, приводящее к их ослаблению, может быть обусловлено многочисленными факторами. Основной причиной ослабления деревьев в естественных условиях большинство исследователей считают обострение уровня конкуренции между особями в процессе развития сообщества, что отмечалось не только на примере сосны обыкновенной, но и для других лесообразующих пород — *Larix sukaczewii* Dylis и *L. sibirica* Ledeb. [45], *Pinus sibirica* Du Tour [46, 47], *Picea obovata* Ledeb. и *Betula pubescens* Ehrh. [37, 44], *Abies nordmanniana* (Steven) Spach [48]. В то же время для коренных сосняков Печоро-Илычского заповедника пока-

зано, что степень поврежденности конкретного соснового массива в основном обусловлена его возрастом и частотой прохождения в нем лесных пожаров и слабо зависит от водного режима и почвенных условий местообитания [49]. Состояние древостоев кедра сибирского на прегенеративных стадиях развития особей и в начале генеративного периода тем лучше, чем слабее конкуренция; в дальнейшем основное значение в изменении жизненного состояния играют процессы, связанные со старением [47]. Полученные нами данные о преобладании ослабленных и сильно ослабленных особей сосны в фоновых 70-летних древостоях полностью согласуются с мнением большинства исследователей о доминировании этих категорий жизненного состояния в виталитетных спектрах древостоев сосны.

По мере приближения к источнику загрязнения жизненное состояние древостоев сосны ухудшается, и минимальные значения индекса жизненного состояния регистрируются на территории импактной зоны, а в виталитетном спектре абсолютный максимум приходится на долю усыхающих особей. Из этого следует, что на современном этапе фактором, определяющим виталитетную структуру сосновых древостоев, является уровень почвенного загрязнения местообитаний тяжелыми металлами. В то же время при рассмотрении виталитетных спектров сосновых древостоев в динамическом аспекте некоторые исследователи констатируют улучшение жизненного состояния особей сосны на фоне резкого снижения интенсивности атмосферной эмиссии загрязняющих веществ [40, 41]. Авторами зарегистрировано увеличение продолжительности жизни хвои сосны и уменьшение повреждения ассимиляционных органов хлорозами и некрозами на всей загрязненной территории, особенно ярко эти признаки проявляются в пределах импактной зоны.

Ранее [50, 51] нами было показано, что резкое сокращение объемов атмосферных выбросов комбинатом «Североникель» положительно сказалось на накоплении тяжелых металлов в листьях ягодных кустарничков и хвое сосны, а также привело к возрастанию радиального прироста стволовой древесины сосны на загрязненной территории. Как показали результаты сравнительного анализа радиального прироста деревьев сосны за два периода исследований (1980–1999 и 2000–2019 гг.), ответная реакция радиального прироста сосны на снижение интенсивности аэротехногенной нагрузки выражена

наиболее ярко в импактной зоне, различия достигают 1.8–3 крат. В период сниженной аэротехногенной нагрузки (2000–2019 гг.) значения медиан радиального прироста значительно превышают таковые в фоновом районе, что можно рассматривать в качестве признака восстановления продуктивности стволовой древесины сосны. Корреляционный анализ данных радиального прироста сосны и объемов атмосферных выбросов диоксида серы и полиметаллической пыли выявил различия во взаимосвязи этих параметров при разном уровне аэротехногенной нагрузки. На территории буферной зоны взаимосвязь между указанными параметрами отсутствует, а в пределах импактной зоны установлена значимая отрицательная корреляция ($r = -[0.51–0.81]$, $p < 0.05$), что демонстрирует ответную реакцию ростовых процессов на снижение аэротехногенной нагрузки [51]. При сопоставлении уровней накопления тяжелых металлов в индикаторных видах растений за два периода исследований (1980–1999 и 2000–2019 гг.) установлено, что различия в содержании тяжелых металлов в листьях растений, произрастающих на территории буферной зоны, незначимы ($z = 0.72–2.2$, $p = 0.08–0.50$). В пределах импактной зоны максимальное снижение содержания Ni и Cu (в 6–8 раз) обнаружено в листьях *Empetrum hermaphroditum*, а минимальное (менее 3 раз) — в листьях *Vaccinium myrtillus* [50]. Уменьшение содержания тяжелых металлов в ассимиляционных органах лекарственных растений обусловлено меньшим количеством пылевых частиц, поступающих из загрязненного воздуха на поверхность листовой пластинки в процессе седиментации. Однако содержание Ni в листьях лекарственных растений на территории импактной зоны превышает токсичный порог, поэтому не рекомендуется проводить сбор лекарственного сырья в радиусе 15–20 км от г. Мончегорска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование современного состояния средневозрастных сосновых древостоев Кольского полуострова на фоне сниженной интенсивности аэротехногенного загрязнения позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Несмотря на резкое снижение объемов атмосферных выбросов загрязняющих веществ комбинатом «Североникель», уровень загрязнения верхнего органогенного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов тяжелыми металлами сохраняется высоким на территории буферной

зоны и очень высоким в пределах импактной зоны, что подтверждает мнение большинства исследователей о высокой степени консервативности лесных почв по отношению к тяжелым металлам. Дополнительное поступление техногенных соединений на поверхность почвы по-прежнему препятствует самоочищению загрязненных почв.

2. Распределения размерных параметров деревьев *Pinus sylvestris* примерно в 50% случаев подчиняются нормальному закону. Аппроксимация экспоненциальным и распределением Вейбулла неприменима для всех эмпирических размерных параметров исследуемых древостоев сосны независимо от уровня загрязнения местообитаний. В ряде случаев (30%) применима аппроксимация либо χ^2 -распределением, либо логнормальным распределением, для которого характерно преобладание низших градаций параметров.

3. Характер распределений размерных параметров (высота дерева, диаметр основания ствола, диаметр на высоте 1.3 м) всех исследуемых древостоев *Pinus sylvestris* свидетельствует о доминировании малоразмерных особей, как в фоновых условиях, так и при аэротехногенном загрязнении. По мере приближения к источнику загрязнения значительно уменьшаются все размерные параметры деревьев сосны и существенно сужаются их диапазоны, особенно ярко это проявляется в импактной зоне.

4. В виталитетных спектрах фоновых сосновых древостоев преобладают ослабленные и сильно ослабленные особи. По градиенту аэротехногенного загрязнения ухудшается жизненное состояние древостоев, абсолютный максимум в виталитетных спектрах в импактной зоне смещается на усыхающие особи. На фоне сниженной атмосферной эмиссии загрязняющих веществ главным фактором, определяющим состояние особей *P. sylvestris* и сосновых древостоев, продолжает оставаться уровень загрязнения почвы тяжелыми металлами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 121032500047-1) Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН. Авторы благодарят за помощь в проведении химических анализов А. И. Беляеву.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pacyna J. M., Pacyna E. G., Aas W.* 2009. Changes of emissions and atmospheric deposition of mercury, lead, and cadmium. — *Atmos. Environ.* 43(1): 117–127.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.066>
2. *Pacyna E. G., Pacyna J. M., Fudala J., Strzelecka-Jastrzab E., Hlawiczka S., Panasiuk D., Nitter S., Pregger T., Pfeiffer H., Friedrich R.* 2007. Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe. — *Atmos. Environ.* 41(38): 8557–8566.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.040>
3. *Fioletov V. E., McLinden C. A., Krotkov N., Li C., Joiner J., Theys N., Carn S., Moran M. D.* 2016. A global catalogue of large SO₂ sources and emissions derived from the Ozone Monitoring Instrument. — *Atmos. Chem. Phys.* 16(18): 11497–11519.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-11497-2016>
4. *Воробейчик Е. Л.* 2022. Естественное восстановление наземных экосистем после прекращения промышленного загрязнения. 1. Обзор современного состояния исследований. — *Экология.* 1: 3–41.
<https://doi.org/10.31857/S0367059722010115>
5. *Трубина М. Р., Дьяченко А. П.* 2020. Современное состояние мохового покрова лесов после сокращения выбросов Среднеуральского медеплавильного завода. — *Поволж. экол. журн.* 4: 477–491.
<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-4-477-491>
6. *Трубина М. Р., Михайлова И. Н., Дьяченко А. П.* 2022. Динамика сообществ криптогамных организмов на мертвой древесине после снижения выбросов медеплавильного завода. — *Экология.* 6: 421–429.
<https://doi.org/10.31857/S0367059722060166>
7. *Михайлова И. Н.* 2020. Динамика сообществ эпифитных лишайников в начальный период после снижения выбросов медеплавильного завода. — *Экология.* 1: 43–50.
<https://doi.org/10.31857/S0367059720010072>
8. *Михайлова И. Н.* 2022. Динамика границ распространения эпифитных макролишайников после снижения выбросов медеплавильного завода. — *Экология.* 5: 321–333.
<https://doi.org/10.31857/S0367059722050080>
9. *Мухачева С. В.* 2021. Многолетняя динамика сообществ мелких млекопитающих в период снижения выбросов медеплавильного завода. I. Состав, обилие и разнообразие. — *Экология.* 1: 66–76.
<https://doi.org/10.31857/S0367059721010108>
10. *Мухачева С. В.* 2022. Многолетняя динамика концентраций тяжелых металлов в организме землероек рода *Sorex* в периоды высоких и сниженных выбросов медеплавильного завода. — *Экология.* 5: 370–384.
<https://doi.org/10.31857/S0367059722050092>
11. *Баркан В. Ш., Лянгузова И. В.* 2018. Содержание тяжелых металлов в доминантных видах мхов как индикатор аэротехногенной нагрузки. — *Экология.* 2: 119–126.
<https://doi.org/10.7868/S0367059718020051>
12. *Нестерков А. В.* 2022. Признаки восстановления сообществ беспозвоночных травостоя после снижения выбросов медеплавильного завода. — *Экология.* 6: 468–478.
<https://doi.org/10.31857/S0367059722060130>
13. *Урбанавичюс Г. П., Боровичев Е. А., Еришов В. В.* 2021. Криптогамные организмы — пионеры восстановления северогазовых лесов при снижении воздушного промышленного загрязнения. — *Лесоведение.* 2: 195–207.
<https://doi.org/10.31857/S0024114821020108>
14. *Бельский Е. А., Ляхов А. Г.* 2021. Динамика населения птиц-дуплогнездников в условиях сокращения промышленных выбросов (на примере Среднеуральского медеплавильного завода). — *Экология.* 4: 278–288.
<https://doi.org/10.31857/S0367059721040041>
15. *Бельская Е. А.* 2018. Динамика трофической активности филофагов березы в период снижения атмосферных выбросов медеплавильного завода. — *Экология.* 1: 74–80.
<https://doi.org/10.7868/S0367059718010092>
16. *Бельская Е. А., Замшина Г. А.* 2023. Тяжелые металлы в листьях березы в период сокращения выбросов крупного медеплавильного завода. — *Экология.* 6: 446–452.
<https://doi.org/10.31857/S0367059723060112>

17. Черненко Т. В., Кабиров Р. Р., Басова Е. В. 2011. Восстановительные сукцессии северотаежных ельников при снижении аэротехногенной нагрузки. — Лесоведение. 6: 49–66. <https://www.elibrary.ru/okdvsx>
18. Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. СПб.: Изд-во ООО “ВВМ”, 2009. 276 с.
19. Сухарева Т. А., Лукина Н. В. 2014. Минеральный состав ассимилирующих органов хвойных деревьев после снижения уровня атмосферного загрязнения на Кольском полуострове. — Экология. 2: 97–104. <https://doi.org/10.7868/S0367059714020085>
20. Лянгузова И. В. 2017. Динамические тренды содержания тяжелых металлов в растениях и почвах при разном режиме аэротехногенной нагрузки. — Экология. 4: 250–260. <https://doi.org/10.7868/S0367059717040114>
21. Воробейчик Е. Л., Трубина М. Р., Хантемирова Е. В., Бергман И. Е. 2014. Многолетняя динамика лесной растительности в период сокращения выбросов медеплавильного завода. — Экология. 6: 448–458. <https://doi.org/10.7868/S0367059714060158>
22. Воробейчик Е. Л., Кайгородова С. Ю. 2017. Многолетняя динамика содержания тяжелых металлов в верхних горизонтах почв в районе воздействия медеплавильного завода в период снижения его выбросов. — Почвоведение. 8: 1009–1024. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17080135>
23. Лянгузова И. В., Гольдвирт Д. К., Фадеева И. К. 2016. Пространственно-временная динамика загрязнения Al-Fe-гумусового подзола в зоне влияния комбината цветной металлургии. — Почвоведение. 10: 1261–1276. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16100105>
24. Kabala C., Chodak T., Szerszen L. 2008. Influence of land use pattern on changes in copper content in soils around a copper smelter, based on a 34-year monitoring cycle. — *Žemės ūkio Mokslai*. 15(3): 8–12.
25. Позолотина В. Н., Лебедев В. А., Антонова Е. В., Григорьев А. А., Шалаумова Ю. В., Тарасов О. В. 2022. Современное состояние древостоев в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа, ближней к эпицентру Кыштымской аварии. — Экология. 1: 42–54. <https://doi.org/10.31857/S0367059722010097>
26. Нестерков А. В., Нестеркова Д. В. 2023. Реакция населения беспозвоночных остепненных и пойменных лугов на выбросы Карабашского медеплавильного завода. — Экология. 6: 470–480. <https://doi.org/10.31857/S0367059723060057>
27. Позняков В. Я. 1999. Североникель. М. 432 с.
28. Классификация и диагностика почв России. Смоленск, 2004. 342 с.
29. Переверзев В. Н. 2011. Почвообразование в лесной зоне Кольского полуострова. — Вестн. КНЦ РАН. 2: 74–82. <https://www.elibrary.ru/pbjxkl>
30. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
31. Катютин П. Н., Горшков В. В. 2020. Жизненное состояние, скорость роста и надземная фитомасса *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в средневозрастных северотаежных лесах. — Растительные ресурсы. 56(2): 99–111. <https://doi.org/10.31857/S0033994620020065>
32. Евдокимова Г. А., Калабин Г. В., Мозгова Н. П. 2011. Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия воздушных выбросов комбината «Североникель». — Почвоведение. 2: 261–268. <https://www.elibrary.ru/ndjduv>
33. Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П., Корнейкова М. В. 2014. Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия газовой воздушных выбросов комбината «Печенганикель». — Почвоведение. 5: 625–631. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14050049>
34. Кашупина Г. М. 2018. Мониторинг загрязнения почв тяжелыми металлами в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове. — Почвоведение. 4: 493–505. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1804010X>
35. Баркан В. Ш., Лянгузова И. В. 2018. Изменение уровня загрязнения органогенного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов в ответ на снижение аэротехногенной нагрузки (Кольский полуостров). — Почвоведение. 3: 338–346.
36. Горшков В. В., Ставрова Н. И., Катютин П. Н., Тумакова Е. А. 2013. Типы размерной и виталитетной структуры ценопопуляций *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в условиях северной тайги (Кольский п-ов). — Растительные ресурсы. 49(4): 512–531. <https://www.elibrary.ru/rcfevf>
37. Ставрова Н. И., Горшков В. В., Катютин П. Н. 2016. Формирование структуры ценопопуляций лесообразующих видов в процессе послепожарного восстановления северотаежных лесов. — Труды Карельского научного центра РАН. 3: 10–28. <https://doi.org/10.17076/bg187>

38. Ставрова Н. И., Горишков В. В., Катютин П. Н. 2021. Разнообразие размерной структуры средневозрастных сосновых (*Pinus sylvestris* L.) древостоев в условиях северной тайги (Мурманская область). — Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Вып. 9. 12(6): 51–56.
<https://doi.org/10.37614/2307-5252.2021.6.12.9.006>
39. Ставрова Н. И., Горишков В. В., Катютин П. Н. 2023. Виталитетная структура древостоев в средневозрастных северотаежных сосновых лесах. — Лесоведение. 5: 471–485.
<https://doi.org/10.31857/S0024114823040113>
40. Ярмишко В. Т., Игнатъева О. В. 2019. Многолетний импактный мониторинг состояния сосновых лесов центральной части Кольского полуострова. — Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 6: 658–668.
<https://doi.org/10.1134/S0002332919060134>
41. Ярмишко В. Т., Игнатъева О. В. 2021. Сообщества *Pinus sylvestris* L. в техногенной среде на Европейском Севере России: Структура, особенности роста, состояние. — Сиб. лесн. журн. 3: 44–55.
<https://doi.org/10.15372/SJFS20210305>
42. Горишков В. В., Ставрова Н. И., Катютин П. Н., Лянгузов А. Ю. 2021. Радиальный прирост сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в северотаежных лишайниковых сосновых лесах и редколесьях. — Известия РАН. Сер. Биологическая. 2: 200–210.
<https://doi.org/10.31857/S0002332921020053>
43. Katjutin P. N., Stavrova N. I., Gorshkov V. V., Lyanguzov A. Yu., Bakkal I. J u., Mikhailov S. A. 2020. Radial growth of trees differing in their vitality in the middle-aged Scots pine forests in the Kola peninsula. — *Silva Fennica*. 54(3): 10263.
<https://doi.org/10.14214/sf.10263>
44. Stavrova N. I., Gorshkov V. V., Katjutin P. N., Bakkal I. Ju. 2020. The structure of Northern Siberian spruce–Scots pine forests at different stages of post-fire succession. — *Forests*. 11: 558.
<https://doi.org/10.3390/f11050558>
45. Fedorkov A. 2014. Vitality and height growth of two *Larix* species and provenances in a field trial located in north-west Russia. — *Silva Fennica*. 48(1): 1053.
<https://doi.org/10.14214/sf.1053>
46. Демидко Д. А. 2006. Виталитетная структура ненарушенных древостоев кедра сибирского в субальпийском подпо-
ясе и на верхней границе леса в Горном Алтае. — Экология. 5: 394–397.
47. Демидко Д. А. 2011. Состояние кедровых древостоев Северо-Восточного Алтая и методы его оценки. — Лесоведение. 1: 19–27.
48. Бебия С. М. 2000. Дифференциация деревьев в лесу, их классификация и определение жизненного состояния древостоев. — Лесоведение. 4: 35–43.
49. Торлопова Н. В., Ильчуков С. В. 2003. Жизненное состояние коренных сосняков Печоро-Илычского биосферного заповедника. — Лесоведение. 3: 34–40. <https://www.elibrary.ru/onouud>
50. Lyanguzova I., Katjutin P. 2023. Effects of high and low aerotechnogenic emissions of heavy metals on wild plants. — *Forests*. 14(8): 1650.
<https://doi.org/10.3390/f14081650>
51. Катютин П. Н., Лянгузова И. В. 2023. Особенности динамики радиального прироста *Pinus sylvestris* L. при разном уровне промышленного загрязнения на Кольском полуострове. — Лесотехнический журнал. 13(4–2): 76–94.
<https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/18>

Current State of *Pinus Sylvestris* (Pinaceae) Stands under Reduced Aerotechnogenic Load at the Kola Peninsula

© 2024. I. V. Lyanguzova¹, P. N. Katjutin^{1, 2} *

¹V.L. Komarov Botanical Institute of RAS, Saint Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: ILyanguzova@binran.ru

Abstract — Against the backdrop of reduced atmospheric emissions from a large copper-nickel combine (Murmansk region) recorded over the last 20 years, the size and vitality structures of *Pinus sylvestris* L. stands in middle-aged pine forests in the background area, buffer and impact zones were studied, and the current content of Ni and Cu in forest

litter was estimated. It was found that the reduction of the aerotechnogenic load did not lead to a decrease in the level of pollution of the organogenic horizon of Al-Fe-humus podzols by heavy metals; in the impact zone their content is still more than 100 times higher than background concentrations. Distributions of all morphometric parameters of pine stands regardless of the level of aerotechnogenic load are characterised by positive asymmetry, which indicates the predominance of small-sized individuals in pine stands. The vitality spectra of background pine stands are dominated by weakened and severely weakened individuals; with increasing levels of heavy metal pollution of habitats, the vital state of stands deteriorates, and the absolute maximum in vitality spectra shifts to the share of desiccated individuals.

Keywords: northern taiga, pine forests, stands, size structure, vitality structure, heavy metals, aerotechnogenic pollution, Murmansk region

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute Botanic Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on the objects of the Unique scientific installation No. USU_673947 "Collections of open and protected ground plants of the Institute Botanic Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences."

REFERENCES

1. Pacyna J. M., Pacyna E. G., Aas W. 2009. Changes of emissions and atmospheric deposition of mercury, lead, and cadmium. — *Atmos. Environ.* 43(1): 117–127.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.066>
2. Pacyna E. G., Pacyna J. M., Fudala J., Strzelecka-Jastrzab E., Hlawiczka S., Panasiuk D., Nitter S., Pregger T., Pfeiffer H., Friedrich R. 2007. Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe. — *Atmos. Environ.* 41(38): 8557–8566.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.040>
3. Fioletov V. E., McLinden C. A., Krotkov N., Li C., Joiner J., Theys N., Carn S., Moran M. D. 2016. A global catalogue of large SO₂ sources and emissions derived from the Ozone Monitoring Instrument. — *Atmos. Chem. Phys.* 16(18): 11497–11519.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-11497-2016>
4. Vorobeichik E. L. 2022. Natural recovery of terrestrial ecosystems after the cessation of industrial pollution: 1. A state of the art review. — *Rus. J. Ecol.* 53(1): 1–39.
<https://doi.org/10.1134/S1067413622010118>
5. Trubina M. R., Dyachenko A. P. 2020. Current state of forest moss communities after reduction of emissions from the Middle-Ural Copper Smelter. — *Povolzhskiy Journal of Ecology.* 4: 477–491.
<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-4-477-491>
6. Trubina M. R., Mikhailova I. N., Dyachenko A. P. 2022. Dynamics of communities of cryptogamic organisms on dead wood after reduction of emissions from a copper smelter. — *Rus. J. Ecol.* 53(6): 437–447.
<https://doi.org/10.1134/s1067413622060169>
7. Mikhailova I. N. 2020. Dynamics of epiphytic lichen communities in the initial period after reduction of emissions from a copper smelter. — *Rus. J. Ecol.* 51(1): 38–45.
<https://doi.org/10.1134/S1067413620010075>
8. Mikhailova I. N. 2022. Dynamics of distribution boundaries of epiphytic macrolichens after reduction of emissions from a copper smelter. — *Rus. J. Ecol.* 53(5): 335–346.
<https://doi.org/10.1134/s1067413622050083>
9. Mukhacheva S. V. 2021. Long-term dynamics of small mammal communities in the period of reduction of copper smelter emissions: 1. Composition, abundance and diversity. — *Rus. J. Ecol.* 52(1): 84–93.
<https://doi.org/10.1134/S1067413621010100>
10. Mukhacheva S. V. 2022. Long-term dynamics of heavy metal concentrations in the food and liver of shrews (genus. *Sorex*) during high and reduced emissions periods from the copper smelter. — *Rus. J. Ecol.* 53(5): 381–395.
<https://doi.org/10.1134/s1067413622050095>
11. Barkan V. Sh., Lyanguzova I. V. 2018. Concentration of heavy metals in dominant moss species as an indicator of aerial technogenic load. — *Rus. J. Ecol.* 49(2): 128–134.
<https://doi.org/10.1134/S1067413618020030>
12. Nesterkov A. V. 2022. Recovery signs in grass-stand invertebrate communities after a decrease in copper smelting emissions. — *Rus. J. Ecol.* 53(6): 553–564.
<https://doi.org/10.1134/s1067413622060133>

13. *Urbanavichus G. P., Borovichev E. A., Ershov V. V.* 2021. Cryptogamic organisms as pioneers of the Northern taiga recovery affected under the conditions of lowered industrial air pollution. — Russian Journal of Forest Science. 2: 195–207. <https://doi.org/10.31857/S0024114821020108>
14. *Bel'skii I. A., Lyakhov A. G.* 2021. Dynamics of the community of hole-nesting birds upon reduction of industrial emissions (the example of the Middle-Ural Copper Smelter). — Rus. J. Ecol. 52(4): 296–306. <https://doi.org/10.1134/S1067413621040044>
15. *Belskaya E. A.* 2018. Dynamics of trophic activity of leaf-eating insects on birch during reduction of emissions from Middle-Ural Copper Smelter. — Rus. J. Ecol. 49(1): 87–92. <https://doi.org/10.1134/S1067413617060029>
16. *Belskaya E. A., Zamshina G. A.* 2023. Heavy metals in birch leaves during the reduction of emissions from a large copper smelter. — Rus. J. Ecol. 54(6): 509–515. <https://doi.org/10.1134/s1067413623060115>
17. *Chernenkova T. V., Kabirov R. R., Basova E. V.* 2011. Regeneration successions of Northern taiga spruce forests under reduction of aerotechnogenic impact. — Contemp. Probl. Ecol. 4(7): 742–757. <https://doi.org/10.1134/S199542551107006X>
18. [Dynamics of forest communities in the Nord-West of Russia]. 2009. St. Petersburg. 276 p. (In Russian)
19. *Sukhareva T. A., Lukina N. V.* 2014. Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution in the Kola peninsula. — Rus. J. Ecol. 45(2): 95–102. <https://doi.org/10.1134/S1067413614020088>
20. *Lyanguzova I. V.* 2017. Dynamic trends of heavy metal contents in plants and soil under different industrial air pollution regimes. — Rus. J. Ecol. 48(4): 311–320. <https://doi.org/10.1134/S1067413617040117>
21. *Vorobeichik E. L., Trubina M. R., Khantemirova E. V., Bergman I. E.* 2014. Long-term dynamic of forest vegetation after reduction of copper smelter emissions. — Rus. J. Ecol. 45(6): 498–507. <https://doi.org/10.1134/S1067413614060150>
22. *Vorobeichik E. L., Kaigorodova S. Y.* 2017. Long-term dynamics of heavy metals in the upper horizons of soils in the region of a copper smelter impacts during the period of reduced emission. — Eurasian Soil Sci. 50(8): 977–990. <https://doi.org/10.1134/S1064229317080130>
23. *Lyanguzova I. V., Goltvirt D. K., Fadeeva I. K.* 2016. Spatiotemporal dynamics of the pollution of Al-Fe-humus podzols in the impact zone of a nonferrous metallurgical plant. — Eurasian Soil Science. 49(10): 1189–1203. <https://doi.org/10.1134/S1064229316100094>
24. *Kabala C., Chodak T., Szerszen L.* 2008. Influence of land use pattern on changes in copper content in soils around a copper smelter, based on a 34-year monitoring cycle. — *Žemės ūkio Mokslai*. 15(3): 8–12.
25. *Pozolotina V. N., Lebedev V. A., Antonova E. V., Grigo'iev A. A., Shalaumova Yu. V., Tarasov O. V.* 2021. Current state of forest tree stands in the East-Ural radioactive trace area closet to Kyshtym accident epicenter. — Russ. J. Ecol. 52(6): 578–590. <https://doi.org/10.1134/S106741362201009X>
26. *Nesterkov A. V., Nesterkova D. V.* 2023. The response of the invertebrate communities of steppe and floodplain meadows to emissions from the Karabash copper smelter. — Russ. J. Ecol. 54(6): 542–552. <https://doi.org/10.1134/s106741362306005x>
27. *Poznyakov V. Ya.* 1999. Severonickel. M. 432 p. (In Russian)
28. *Classification and diagnostic of soils of Russia*. 2004. Smolensk. 342 p. (In Russian)
29. *Pereverzev V. N.* 2011. Pochvoobrazovanie v lesnoi zone Kol'skogo poluostrova. — *Vestnik Kolskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2: 74–82. <https://www.elibrary.ru/pbjxkl> (In Russian)
30. *Methods for forest community studies*. 2002. Saint-Petersburg. 240 p. (In Russian)
31. *Katyutin P. N., Gorshkov V. V.* 2020. Vitality, growth speed and aboveground biomass of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) in middle-aged north taiga forests. — *Rastitelnye resursy*. 56(2): 99–111. <https://doi.org/10.31857/S0033994620020065> (In Russian)
32. *Evdokimova G. A., Kalabin G. V., Mozgova N. P.* 2011. Contents and toxicity of heavy metals in soils of the zone affected by aerial emissions from the Severonikel Enterprise. — Eurasian Soil Sci. 44(2): 237–244. <https://doi.org/10.1134/S1064229311020037>
33. *Evdokimova G. A., Mozgova N. P., Korneikova M. V.* 2014. The content and toxicity of heavy metals in soils affected by aerial emissions from the Pechenganikel plant. — Eurasian Soil Science. 47(5): 504–510. <https://doi.org/10.1134/S1064229314050044>

34. Kashulina G. M. 2018. Monitoring of soil contamination by heavy metals in the impact zone of copper-nickel smelter on the Kola Peninsula. — Eurasian Soil Science. 51(4): 467–478.
<https://doi.org/10.1134/S1064229318040063>
35. Barkan V. Sh., Lyanguzova I. V. 2018. Changes in the degree of contamination of organic horizons of Al-Fe-humus podzols upon a decrease in aerotechnogenic loads, the Kola Peninsula. — Eurasian Soil Sci. 51(3): 327–335.
<https://doi.org/10.1134/S106422931803002X>
36. Gorshkov V. V., Stavrova N. I., Katoutin P. N., Tumakova E. A. 2013. Types of size and vitality structure of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) coenopopulations in Northern taiga (Kola Peninsula). — Rastitelnye resursy. 49(4): 512–531. <https://www.elibrary.ru/rcfevf> (In Russian)
37. Stavrova N. I., Gorshkov V. V., Katyutin P. N. 2016. Structure formation of forest tree species coenopopulations during post-fire recovery of northern taiga forest. — Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science. 3: 10–28.
<https://doi.org/10.17076/bg187> (In Russian)
38. Stavrova N. I., Gorshkov V. V., Katyutin P. N. 2021. Variety of size structure of middle-aged pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the Northern taiga (Murmansk region). — Transactions of the Kola Science Centre. Applied Ecology of the North. Series 9. 12(6): 51–56.
<https://doi.org/10.37614/2307-5252.2021.6.12.9.006>
39. Stavrova N. I., Gorshkov V. V., Katyutin P. N. 2023. Vitality structure of the middle-aged northern taiga pine forest stands. — Lesovedenie. 5: 471–485.
<https://doi.org/10.31857/S0024114823040113> (In Russian)
40. Yarmishko V. T., Ignateva O. V. 2019. Multiyear impact monitoring of pine forests in the central part of the Kola Peninsula. — Biology Bulletin. 46(6): 636–645.
<https://doi.org/10.1134/S106235901906013X>
41. Yarmishko V. T., Ignat'eva O. V. 2021. Communities of *Pinus sylvestris* L. in the technogenic environment in the European North of Russia: structure, features of growth, condition. — Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 3: 44–55.
<https://doi.org/10.15372/SJFS20210305> (In Russian)
42. Gorshkov V. V., Stavrova N. I., Katjutin P. N., Lyanguzov A. Y. 2021. Radial growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in lichen pine forests and woodlands of the northern taiga. — Biol. Bull. 2: 200–210.
<https://doi.org/10.1134/S1062359021020059>
43. Katjutin P. N., Stavrova N. I., Gorshkov V. V., Lyanguzov A. Yu., Bakkal I. Ju., Mikhailov S. A. 2020. Radial growth of trees differing in their vitality in the middle-aged Scots pine forests in the Kola Peninsula. — Silva Fennica. 54(3): 10263.
<https://doi.org/10.14214/sf.10263>
44. Stavrova N. I., Gorshkov V. V., Katjutin P. N., Bakkal I. Ju. 2020. The structure of Northern Siberian spruce–Scots pine forests at different stages of post-fire succession. — Forests. 11(5): 558.
<https://doi.org/10.3390/f11050558>
45. Fedorkov A. 2014. Vitality and height growth of two *Larix* species and provenances in a field trial located in north-west Russia. — Silva Fennica. 48(1): 1053.
<https://doi.org/10.14214/sf.1053>
46. Demidko D. A. 2006. Vitality structure of undisturbed Siberian stone pine stands in the subalpine belt and at the timberline in the Mountain Altai. — Russ. J. Ecology. 37(5): 359–362.
<https://doi.org/10.1134/S1067413606050109>
47. Demidko D. A. 2011. The state of Siberian pine forests in Northeastern Altai and methods for its assessment. — Lesovedenie. 1: 19–27. (In Russian) <http://lesovedenie.ru/index.php/forestry/article/view/280>
48. Bebiya S. M. 2000. [Tree differentiation in the forest, their classification and determination of stand vitality]. — Lesovedenie. 4: 35–43. (In Russian)
49. Torloпова N. V., Ilchukov S. V. 2003. Vital state of native pine forests at the Pechora-Ilych biosphere reserve. — Lesovedenie. 3: 34–40. <https://www.elibrary.ru/onouud> (In Russian)
50. Lyanguzova I. V., Katjutin P. N. 2023. Effects of high and low aerotechnogenic emissions of heavy metals on wild plants. — Forests. 14(8): 1650.
<https://doi.org/10.3390/f14081650>
51. Katjutin P. N., Lyanguzova I. V. 2023. Radial growth of *Pinus sylvestris* L. under industrial pollution on the Kola Peninsula. — Lesotekhnicheskii Zhurnal. 13(4–2): 76–94.
<https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/18> (In Russian)