

УДК 581.5(574.23:504.054)

МНОГОЛЕТНИЙ ИМПАКТНЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

© 2019 г. В. Т. Ярмишко*, @, О. В. Игнатъева**

*Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, ул. проф. Попова, 2, Санкт-Петербург, 197372 Россия

**Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, 194021 Россия

@E-mail: vasiliyarmishko@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.11.2018 г.

После доработки 23.04.2019 г.

Принята к публикации 23.04.2019 г.

Исследована пространственно-временная динамика структурно-функциональных параметров ненарушенных сосновых лесов и лесов, подвергающихся воздействию промышленных эмиссий, в составе которых присутствуют высокоагрессивные соединения серы в сочетании с тяжелыми металлами (Cu, Ni). Показано, что современное состояние разных компонентов сосновых лесов в фоновых условиях обусловлено естественными сукцессионными процессами. Отмечено, что аэротехногенное загрязнение — значимый фактор, определяющий жизненное состояние древостоев, а вблизи крупного медно-никелевого комбината в центральной части Кольского п-ова — доминирующий фактор, вызывающий ослабление и даже разрушение сообществ сосновых лесов. На фоне существенного снижения объемов атмосферных выбросов появляются симптомы улучшения жизненного состояния древесного яруса сосновых лесов даже в зоне сильного загрязнения.

DOI: 10.1134/S0002332919060134

В ходе исторического развития общества наблюдается повсеместное нарастание изменений окружающей среды вследствие локальных и глобальных воздействий, обусловленных интенсивной хозяйственной деятельностью человека. Все более проблематичным становится нахождение не мест воздействия, а ненарушенных растительных сообществ природными и антропогенными факторами. Обычная ситуация: большинство популяций вида находится в относительно оптимальных условиях, а среда начинает меняться. Возникает необходимость оценки последствий развития организма в неоптимальных условиях, характеристики фонового состояния и возможности его определения в качестве условной нормы. Для понимания реальных последствий наблюдаемых воздействий среды нужно не просто фиксировать определенные отклонения, а выяснять дальнейшую судьбу изменений.

В настоящее время один из основных факторов, оказывающих существенное влияние на функционирование лесных экосистем на северо-западе России (после рубок и пожаров), — промышленное атмосферное загрязнение. В центральной части Кольского п-ова основной источник эмиссии — комбинат “Североникель”, выбрасывающий в

окружающую среду значительные количества двуокиси серы и тяжелых металлов (Ni, Cu и др.). Ранее неоднократно отмечалось негативное воздействие атмосферных выбросов этого комбината на растительные сообщества (Раменская, 1974; Крючков, Сыроид, 1984; Влияние..., 1990; Лукина, Никонов, 1996, 1998; Ярмишко, 1997, 2009; Ярмишко и др., 2011; Yarmishko, Yarmishko, 2015; и др.). Четверть века назад на комбинате были предприняты попытки существенного снижения выбросов промышленных отходов. В этой связи можно было предположить, что в качестве ответной реакции нарушенных лесных экосистем должен начаться процесс постепенного их восстановления.

Цель работы — анализ материалов многолетнего мониторинга состояния сосновых лесов в центральной части Кольского п-ова и оценка их реакций на снижение аэротехногенного загрязнения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Кольская лесорастительная область располагается в границах Мурманской обл. — на Крайнем Севере России (рис. 1). В геологическом отношении район исследований представляет собой во-

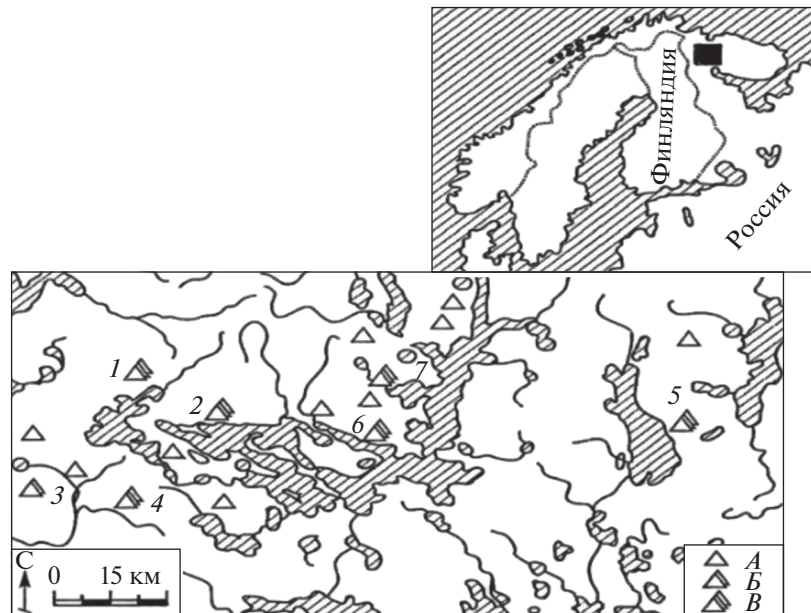


Рис. 1. Схема размещения постоянных пробных площадей (ППП) в сосновых лесах на Кольском п-ове. Основные районы исследований: 1 – Ливский, 2 – Мавринский, 3 – Ено-Ковдорский, 4 – Уполокшский, 5 – Ловозерский, 6 – Чунозерский, 7 – Мончегорский. Штриховкой показаны водные поверхности. А – размещение одиночных, Б – 2–3, В > 3 ППП.

сточную Фенноскандинавскую окраину Балтийского кристаллического щита. В центральной части Кольского п-ова преобладают низкопродуктивные лишайниковые и лишайниково-зеленомошные сосновые леса. Основной вклад в загрязнение окружающей среды на Кольском Севере вносят кислотообразующие соединения серы и тяжелые металлы, поступающие в атмосферу в составе выбросов медно-никелевого комбината.

Комбинат “Североникель” (Мончегорск; 67°55′ с. ш., 32°48′ в. д.) начал свою деятельность в 1939 г. (Позняков, 1999). Максимальные объемы выбросов, составляющие в год в среднем 230 тыс. т SO_2 и 15 тыс. т мелкодисперсной полиметаллической пыли, содержащей смесь сульфидов и оксидов тяжелых металлов, в основном Ni и Cu, наблюдались с 1973 по 1992 г. (рис. 2). С 1993 по 1999 г. наметилась тенденция к снижению удельных и валовых выбросов загрязняющих веществ вследствие проводимых мероприятий. С 1999 г. ежегодный объем выбросов остается относительно стабильным и составляет в среднем 40 тыс. т SO_2 и 5 тыс. т полиметаллической пыли (Ежегодник КМК, 2007). В последние годы эти показатели меняются незначительно (рис. 2).

Наши исследования проводились с 1981 по 2017 г. в лишайниково-зеленомошных средневозрастных (III–IV кл. возраста) сосновых лесах, расположенных на различном удалении от комбината в трех зонах: фоновой, буферной и импактной. В каждой зоне были заложены постоянные

пробные площади (ППП) размером 0.15–0.2 га. Краткая характеристика древесного яруса исследованных лесных сообществ приведена в табл. 1. В напочвенном покрове в травяно-кустарничковом ярусе доминируют *Vaccinium myrtillus* L., *V. vitis-idaea* L., *Empetrum hermaphroditum* Hagerup. Мохово-лишайниковый ярус формируют лишайники рода *Cladonia* (*C. stellaris* (Opiz.) Brodo; *C. rangiferina* (L.) Nyl., *C. mitis* (Sandst.) Hustich), а среди мхов чаще всего встречаются *Pohlia nutans* и *Hepaticae* spp.

На каждой ППП выполнили сплошной перебор деревьев; измерили, описали и оценили кроны и их состояние; определили возраст хвои и отобрали ее образцы для лабораторных исследований; определили категории жизненного состояния всех особей *Pinus sylvestris* L., входящих в состав древесного яруса (Ярмишко, 1997; Санитарные..., 1998; Методы..., 2002). Для определения возраста и анализа радиального прироста древесины у модельных деревьев отбирали образцы древесины (керны) буравом Пресслера или спилы ствола. Ширину годичных колец определяли на приборе ЛИНТАБ-6. В процессе выполнения исследований мы разработали и описали новый метод оценки площади годичного радиального прироста на примере сосны обыкновенной (Лянгузов и др., 2017). Он был разработан с использованием приближенных, а не точно измеренных значений площадей годичных приростов древесины исходя из предположения о нарастании древесины стволов в виде концентрических колец.

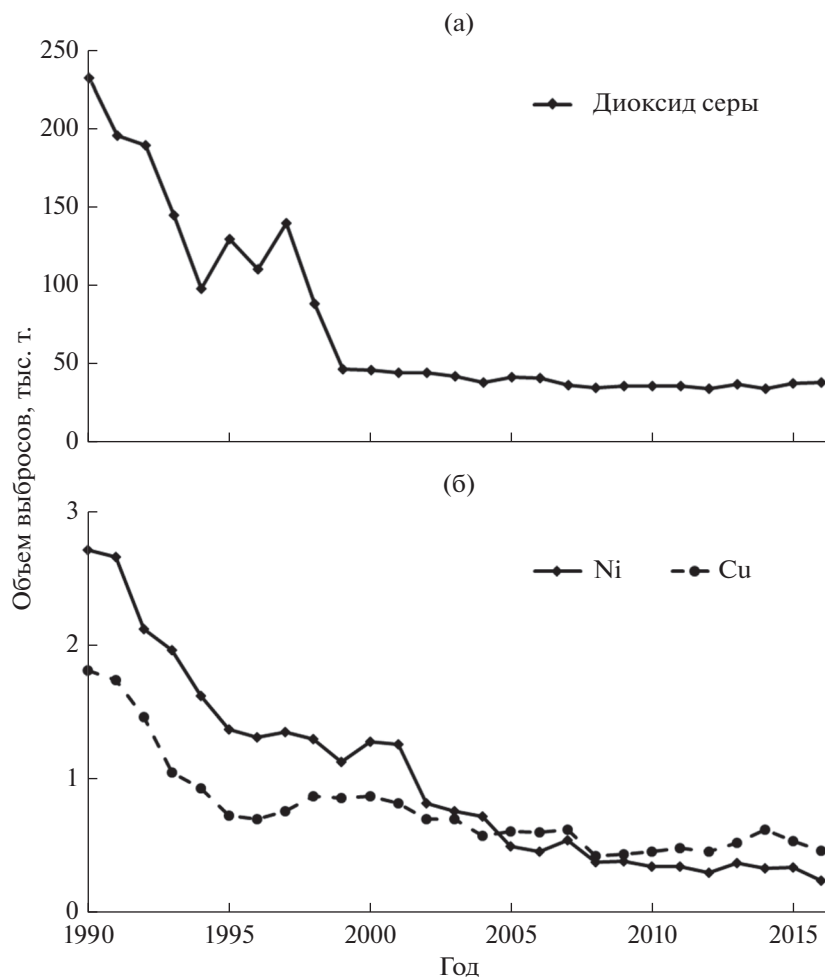


Рис. 2. Погодичная динамика атмосферных выбросов сернистого ангидрида, Ni и Cu (по данным Кольской горно-металлургической компании).

Продолжительность жизни хвои *P. sylvestris* определялась у 120–150 особей в верхней (на 8-й–10-й мутовках) и нижней (на 18-й–20-й мутовках) частях кроны с южной стороны на 3–5 побегах II порядка ветвления. Площадь повреждения хвои хлорозами и некрозами была оценена на основе анализа с помощью бинокулярной лупы типа МБС-9 100 пар хвоинок, отобранных с побегов II порядка ветвления у 5–7 деревьев на каждой пробной площади (Ярмишко, 1997; Динамика..., 2009).

Учет и оценка состояния подроста осуществлялись на всех ППП (предварительно размечены на квадраты размером 10 × 10 м). Характеристики живого напочвенного покрова исследуемых лесных сообществ определялись на постоянных учетных площадках (20–25 шт. на ППП) размером 1 × 1 м (Методы..., 2002). Статистическую обработку данных проводили методами дисперсионного и регрессионного анализов (Зайцев, 1984).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Относительно молодые сообщества *P. sylvestris* в фоновых районах Кольского п-ова имеют ряд особенностей, отличающих их от аналогичных древостоев, образующихся в европейской части северной тайги. Прежде всего это выраженное преобладание главной породы над лиственными древесными растениями на подавляющей площади практически во всех типах леса, причем доминирование сосны в большинстве случаев проявляется уже на этапе формирования древесного полога. Характерная черта молодых сосновых древостоев — участие в них ели и осины.

В сосновых лесах в фоновых условиях в центральной части Кольского п-ова в органогенном горизонте Al-Fe-гумусовых подзолистых почв содержание подвижных форм Ni и Cu составляет в среднем 10 мг/кг. Эти концентрации тяжелых металлов приняты за фоновое содержание (Динамика..., 2009). В 1–4-летней хвое *P. sylvestris* и листьях доминантных видов кустарничков с 1981 по

Таблица 1. Краткая характеристика древостоев III–IV классов возраста лишайниково-зеленомошных лесов в условиях разного уровня аэротехногенного загрязнения в центральной части Кольского п-ова (Мурманская обл.)

Месторасположения ППП (координаты*)	Высота над уровнем моря, м; направление и крутизна склона склона, °	Расстояние до источника загрязнения, км	Состав древостоя	Средние таксационные характеристики древостоев					Класс бонитета
				высота, м	диаметр, см	возраст, лет	число деревьев, шт./га	запас древесины, м³/га	
67°33.227' 31°04.751'	180, ЮЗ, 3°	70	10 С	8.5	10.1	50	1750	22.3	V
67°35.356' 31°39.159'	161, ЮЗ, 2–3°	60	10 С	8.0	8.3	60	5273	47.5	V
67°38.168' 32°42.234'	177, ЮЗ 5°	35	10 С	8.1	7.9	70	1852	32.0	V
67°49.216' 32°46.447'	175, ЮЗ 4°	8	10 С	3.2	3.4	60	5300	10.1	V-a
68°00.384' 32°55.540'	198, ЮЗ 10°	10	10 С, Б	4.3	5.1	70	5450	21.8	V-a

Примечание. * верхние строки – с.ш., нижние строки – в.д.; ЮЗ – юго-запад; состав древостоя: С – сосна обыкновенная, Б – береза (единично).

Таблица 2. Средняя продолжительность жизни хвой *Pinus sylvestris* на деревьях в средневозрастных сосновых лесах в районах с разным уровнем промышленного атмосферного загрязнения на Кольском п-ове

Год	Фоновый район	Буферная зона	Импактная зона
1982	6.0 ± 0.4	3.9 ± 0.8	2.4 ± 0.6
1987	5.7 ± 0.6	4.2 ± 1	2.5 ± 0.6
2005	6.4 ± 0.4	4.2 ± 0.7	5.3 ± 0.7
2008	6.7 ± 0.5	6.4 ± 0.7	5.0 ± 0.6
2014	6.2 ± 0.5	6.1 ± 0.5	5.3 ± 0.7
2017	6.3 ± 0.4	6.2 ± 0.6	5.3 ± 0.6

2008 г. содержание Ni изменялось с 16.1 до 1.5, а содержание Си – с 11.7 до 2.5 мг/кг абсолютно сухого вещества (АСВ). Эти значения находятся в интервале региональных фоновых концентраций и соответствуют нормальному содержанию этих элементов в растениях (Раменская, 1974; Лукина, Никонов, 1996, 1998; Лозановская и др., 1998).

Достаточно чувствительный и легко определяемый показатель состояния хвойных пород – продолжительность жизни хвой на деревьях (Алексеев, 1990; Ярмишко, 1990, 1997, 2005; Цветков, 1991; Степанчик и др., 1993; и др.). Информативность рассматриваемого показателя определяется большой продолжительностью функционирования ассимиляционных органов хвойных деревьев в северотаежных сообществах, в которых хвоя сосны на деревьях сохраняется 6–9, иногда 10–12 лет (Цветков, 1991; Ярмишко, 1997; и др.). В исследованных лесах в фоновых услови-

ях продолжительность жизни хвой *P. sylvestris* на деревьях за весь период наблюдений варьировала от 5.7 до 6.7 лет (табл. 2). Колебания продолжительности жизни хвой сосны на конкретных пробных площадях связаны главным образом с различиями погодных условий в отдельные годы.

Неоднократные детальные обследования поверхности хвоинок разного возраста позволили установить, что показатели жизненного состояния хвой достоверно не различались в исследованные периоды времени. В этих условиях лишь небольшая часть (не более 5%) хвой сосны имела хлорозы и отдельные точки в виде некрозов, которые занимали площадь <5% общей поверхности (табл. 3). На хвое старшего возраста (5–7 лет) площадь визуально наблюдаемых изменений цвета хвой иногда достигала 20% поверхности, что обусловлено, по-видимому, возрастными изменениями ассимиляционных органов.

Таблица 3. Поврежденность хвои *Pinus sylvestris* хлорозами и некрозами в условиях разного промышленного атмосферного загрязнения (верхние строки — 1998 г., нижние — 2014 г.)

Площадь повреждения хвои, %	Фоновый район			Буферная зона			Импактная зона		
	возраст хвои, лет								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<1	—	—	2	36	17	10	25	55	100
	—	—	1	26	5	5	18	20	35
1—5	—	—	2	31	56	56	37	46	100
	—	1	2	1	6	7	23	27	49
6—10	—	—	—	3	17	16	17	21	27
	—	—	—	—	—	—	3	13	22
11—25	—	—	—	—	9	16	12	38	36
	—	—	2	—	—	—	—	5	7
26—50	—	—	—	—	1	2	9	19	20
	—	—	—	1	—	—	—	—	—
51—75	—	—	—	—	—	—	—	3	7
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
>6	—	—	—	—	—	—	—	13	10
	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. “—” — отсутствие следов повреждения хвои.

Исследованные нами средневозрастные сосняки лишайниково-зеленомошные в фоновом районе характеризуются хорошим ростом и развитием, деревья равномерно распределены по площади, их число достигает в среднем 4–4.5 тыс. шт./га. Под их пологом размещаются сильно угнетенные живые и сухие особи сосны (2–3 тыс. шт./га).

Анализ данных по радиальному росту сосны показывает (рис. 3а), что в первые 12–15 лет жизни, когда еще отсутствуют жесткие конкурентные взаимоотношения в надземной части и в зоне корневых систем, она характеризуется достаточно активным приростом по диаметру (1.2–1.5 мм/год и более). В дальнейшем по мере развития молодняка сосны и растений напочвенного покрова интенсивность роста снижается на 23–25%, достигая >1 мм/год. С начала 1980-х гг. этот показатель достиг своего минимума (0.6–0.8 мм/год) и не изменялся на протяжении почти 20 лет. Судя по числу деревьев сосны на 1 га, по наличию тонкомера и сильно угнетенных особей, можно предположить, что процессы дифференциации в средневозрастных сосняках будут продолжены. На рис. 3а видно, что на исследованных участках отчетливо выражены кратковременные циклы флуктуаций прироста по диаметру, которые, очевидно, связаны с изменением погодных условий. Они, как правило, имеют синхронный характер и немного различаются по амплитудам колебаний. Радиальный прирост сосны в последние годы после некоторого подъема стал снижаться на всех исследованных участках (рис. 3а), что связано, на наш взгляд, с

усилением конкурентных взаимоотношений в сообществах с возрастом.

В фоновых сообществах *P. sylvestris*, расположенных на расстоянии 65 км и более от комбината “Североникель”, визуальные признаки повреждения хвои и крон отсутствуют, поэтому в виталитетных спектрах сосновых древостоев абсолютно доминировали здоровые особи на протяжении всего периода наблюдений (табл. 4). Доля ослабленных особей варьировала от 10 до 25.9%. В последние годы (2008–2014) виталитетная структура древостоев сосны обыкновенной заметно ухудшилась: здоровые особи составляют 62–68, ослабленные и сильно ослабленные — 24–30, сухие — почти 4% (табл. 4). Заметное ухудшение жизненного состояния исследованных древостоев сосны обыкновенной на ППП в фоновых условиях мы связываем, как отмечено выше, с усилением внутривидовых конкурентных взаимоотношений и, возможно, с глобальными изменениями климата.

Живой напочвенный покров в фоновых сосновых лесах хорошо развит. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса за период исследования составило 18% и достоверно не изменялось в результате разнонаправленности динамики проективного покрытия отдельных видов. Общее проективное покрытие мохово-лишайникового яруса также не изменялось и в среднем составляло 70–75%. Отмечено перераспределение участия ранне-, средне- и поздне-сукцессионных видов мхов и лишайников в формировании напочвенного покрова. Покрытие из раннесукцессионных видов ли-

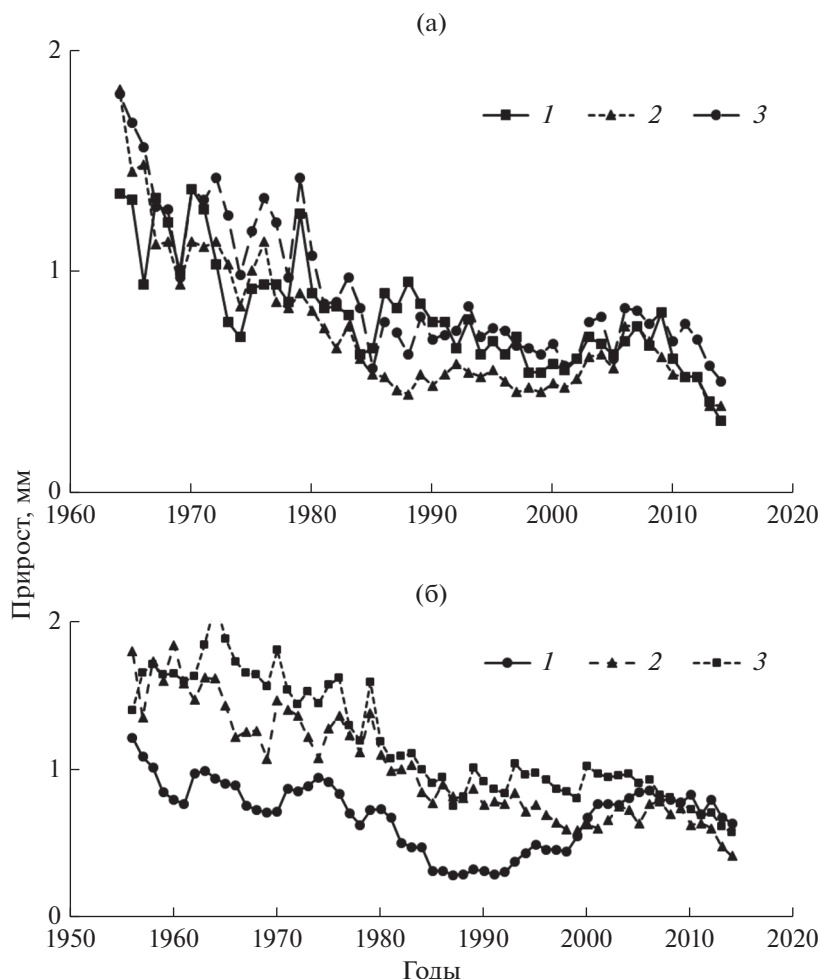


Рис. 3. Динамика радиального прироста *Pinus sylvestris* III–IV классов возраста за пределами воздействия аэротехногенных выбросов комбината “Североникель” (а: 1 – ППП 20, 2 и 3 – ППП 32) и в фоновом районе (1), в буферной (2) и импактной (3) зонах в центральной части Кольского п-ова (б).

шайников *Trapeliopsis granulosa* (Hoffm.) Lumbsch, *Cladonia deformis* (L.) Hofifr., *C. cornuta* (L.) Hoffm., *C. crispata* (Ach.) Flot., *C. gracilis* (L.) Willd. за период исследований уменьшилось от 8 до 1%. Покрытие из средне- и позднесукцессионных видов (*Cladonia uncialis* (L.) Weber ex F.H. Wigg., *Cladonia* spp. и *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.) увеличилось с 50 до 70%, при этом проективное покрытие *P. schreberi* возросло с 4 до 33% (Динамика..., 2009). Отмеченные изменения в мохово-лишайниковом ярусе были обусловлены усилением средообразующих функций древесного яруса.

Таким образом, весь комплекс наблюдаемых в фоновых условиях изменений древесного, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов в исследуемых лишайниково-зеленомошных средневозрастных сосновых лесах отражает естественные сукцессионные процессы при восстановлении сообществ после внешних нарушений (рубки, пожары).

В районе среднего уровня техногенного загрязнения (в буферной зоне, расположенной в 35 км от основного источника эмиссии) содержание кислоторастворимых форм Ni и Cu в верхних горизонтах почвы до 1997 г. превышало в 4–8 раз фоновые значения (Динамика..., 2009), а суммарное содержание этих металлов в хвое *P. sylvestris* было в 5–10 раз больше, чем в фоновых сообществах. По данным исследований в 2008 г. их содержание снизилось в 3 раза по отношению к максимальным значениям, зарегистрированным в 1984–1988 гг. (Ярмишко и др., 2011). Между суммарной концентрацией Ni и Cu в хвое *P. sylvestris* и объемом выбросов твердых веществ комбината “Североникель” существует линейная связь: $r = 0.93$, $n = 6$, $P < 0.05$, где r – коэффициент корреляции, n – число наблюдений, P – уровень значимости.

Продолжительность жизни хвои *P. sylvestris* в рассматриваемом районе в 1982–1990 гг. была до-

Таблица 4. Распределение деревьев *Pinus sylvestris* по категориям жизненного состояния на постоянных пробных площадях в условиях разного уровня аэротехногенного загрязнения в центральной части Кольского п-ова

Год	Категории жизненного состояния деревьев сосны обыкновенной				
	здоровые	ослабленные	сильно ослабленные	сухие	итого
Фоновый район					
1985	79.2	18.7	0	2.1	100
1987	76.3	21.5	1.5	0.7	100
1990	80.1	15.3	1.8	2.8	100
1991	81.6	14.1	2.3	2	100
2005	89.7	10.3	0	0	100
2008	68.1	25.9	4.3	1.7	100
2014	62.1	20.5	13.6	3.8	100
Буферная зона					
1985	11.1	40.0	36.7	12.2	100
1987	4.9	54.9	25.6	14.6	100
1990	1.8	54	29.2	15	100
1991	8.3	29.5	45.5	16.7	100
2005	69.4	8.1	4.1	18.4	100
2008	61	17.1	4.8	17.1	100
2014	64.2	12.6	10.6	12.6	100
Импактная зона					
1987	0	6.2	43.5	50.3	100
1990	0	8.1	42	49.9	100
2005	25.0	16.1	13.6	45.3	100
2008	21.3	28.7	9	41	100
2014	25.5	23.6	23.6	27.3	100

стоверно ниже, чем в фоновых условиях, и составляла в среднем 4 года (табл. 2). При этом преобладание неповрежденной хвои (64%) было зарегистрировано только для 1–2-летнего возраста. У большей части трехлетней хвои (56%) площадь повреждения составляла 1–5%. С увеличением возраста хвои уменьшается доля здоровой хвои и возрастает площадь повреждений: 50% четырехлетней хвои было покрыто хлорозами и некрозами, занимающими 6–10% всей поверхности; незначительная часть хвои (2–3%) имела некрозы красно-коричневого цвета, а здоровая хвоя отсутствовала (табл. 3). Исследования, проведенные в 2008–2014 гг., показали, что в пределах буферной зоны основная часть хвои *P. sylvestris* однолетнего возраста (93–98%) не имела следов повреждения. Пятнистые хлорозы и точечные некрозы микроскопических размеров, занимающих 1–5% поверхности, встречались только у незначительной части (~6%) хвои 2–3-летнего возраста. Доля здоровой хвои старшего возраста составляла не более 78%. В 2008–2014 гг. состояние хвои как по продолжительности жизни, так и по степени повре-

ждения достигло практически фоновых значений (табл. 2 и 3). Между продолжительностью жизни хвои *P. sylvestris* и ежегодным объемом атмосферных выбросов сернистого ангидрида и твердых веществ отмечается отрицательная связь ($r = -1$ и -0.97 , $n = 4$, $P < 0.05$). Взаимосвязь между содержанием тяжелых металлов в хвое *P. sylvestris* и продолжительностью ее жизни отсутствует.

Погодичная динамика прироста сосны обыкновенной в древостоях III–IV классов возраста в условиях разных уровней техногенного загрязнения в центральной части Кольского п-ова представлена на рис. 3б. В районе умеренного уровня атмосферного загрязнения значения показателей радиального прироста древесины до начала 1990-х гг. были близки к аналогичным значениям показателей в контрольных сообществах. Затем кривая прироста приобрела более отчетливый нисходящий характер, что связано, на наш взгляд, с накоплением в сообществе загрязнителей, особенно в почве, и продолжающимися внутривидовыми конкурентными процессами развивающихся сообществ. Корреляционный анализ рядов ради-

ального прироста сосны обыкновенной в районах умеренного загрязнения и объемов выбросов газообразных веществ достоверно обнаруживал (Ярмишко, 1997) отрицательную связь ($r = -0.47$, $n = 24$, $P < 0.05$). Исследования, проводимые в последние годы, показали, что сосна в рассматриваемых условиях откликнулась на снижение объемов выбросов токсических веществ интенсификацией прироста в начале 2000-х гг. на 10–15% по сравнению с прошлым периодом (рис. 36).

Результаты исследования виталитетной структуры сообществ сосны обыкновенной в буферной зоне свидетельствуют о том, что в 1981–1982 гг. доля здоровых особей не превышала 50, ослабленных – 31, сильно ослабленных и усыхающих – 19%. К началу 1990-х гг. состояние древостоев сосны заметно ухудшилось: доля здоровых особей составила 10–12%, доля ослабленных ~50%, а доля сильно ослабленных и усыхающих деревьев – 20–25% (табл. 4). При этом доля сухих деревьев возросла в 10 раз по сравнению с таковой в 1982 г. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в зоне средних уровней техногенного загрязнения ослабление деревьев сосны обыкновенной еще не достигло того критического значения, за которым эдификаторная роль древесного яруса теряет свое значение в сообществе. Ранее отмечалось (Ярмишко, 2005), что в случае существенного снижения или прекращения загрязнения окружающей среды в рассматриваемом районе возможно восстановление сосновых лесов естественным путем. Результаты исследований, проводимых в последние годы, подтвердили наши предположения. Так, при 4–6-кратном снижении среднегодовых объемов атмосферных выбросов загрязняющих веществ “Североникелем” с начала 2000-х гг. значения продолжительности жизни хвои приблизились к фоновым значениям (табл. 2), интенсивность повреждения ее также заметно уменьшилась (табл. 3). Снижение пресса на лесные сообщества и, как следствие, улучшение состояния ассимиляционных органов привели к увеличению доли здоровых особей в виталитетном спектре, которая в 2008–2014 гг. стала превышать 60% (табл. 4). Возрастание доли здоровых деревьев произошло за счет перехода части ослабленных особей в категорию здоровых. В результате доля ослабленных деревьев на ППП снизилась почти в 4 раза по сравнению с таковой в 1990 г. и составила 14%, а доля сильно ослабленных особей уменьшилась почти до 5% вследствие перехода части деревьев в более высокие категории жизненного состояния.

В напочвенном покрове исследованных сосновых лесов в буферной зоне в течение всего периода наблюдений значения проективного покрытия и высоты травяно-кустарничкового яруса достоверно не отличались от фоновых, при этом содержание Ni и Cu в листьях доминантных видов

кустарничков в 2–3 раза превышало фоновые концентрации (Динамика..., 2009). Связь между изменением концентраций тяжелых металлов в листьях кустарничков и динамикой выбросов, а также динамикой содержания кислоторастворимых форм Ni и Cu в органогенном горизонте почвы не была выявлена.

Состояние мохово-лишайникового яруса оставалось существенно нарушенным: в покрове преобладали раннесукцессионные виды, покрытие из климаксовых видов не превышало 10%, что в 5 раз меньше, чем в фоновых условиях. Высота яруса составляла в среднем 3 см, что в 1.5–3 раза меньше соответствующих фоновых значений. Наиболее нарушенное состояние яруса было зарегистрировано в 1994 г. в ответ на 20-летний период максимальных атмосферных выбросов (1973–1992 гг.): полное отсутствие основного доминанта мохового покрова фоновых сосновых лесов – *P. schreberi* и минимальное (1.5%) покрытие из видов рода *Cladina*. В 2006 г. общее проективное покрытие яруса оставалось на уровне 1994 г., но покрытие из климаксовых видов увеличилось до 9%, что свидетельствует о незначительном улучшении состояния яруса в ответ на резкое снижение воздушного загрязнения (Динамика..., 2009). В настоящее время в сложении мохово-лишайникового яруса основную роль по-прежнему играют раннесукцессионные виды лишайников (*T. granulosa*, *Cladonia* spp. и др.).

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в буферной зоне динамика состояния древесного яруса определяется режимом атмосферных выбросов комбината “Североникель”. Состояние мохово-лишайникового покрова связано, на наш взгляд, с уровнем как атмосферного, так и почвенного загрязнения. Следует отметить, что моховой компонент исследуемых сообществ наиболее чувствителен к комплексному воздействию загрязнителей. Травяно-кустарничковый ярус устойчив к наблюдавшимся в рассматриваемой зоне концентрациям загрязнителей окружающей среды.

В районах сильного загрязнения (импактная зона) для динамики содержания кислот растворимых форм тяжелых металлов в органогенном горизонте почв в период исследований были характерны независимые от режима атмосферных выбросов флуктуации (Лянгузова, 2009). Максимальные концентрации тяжелых металлов в хвое *P. sylvestris*, в 20–40 раз превышающие фоновые значения, были зарегистрированы в 1984–1988 гг., а минимальные (в 10–20 раз выше, чем фоновые) отмечались в 2005–2008 гг. (Динамика..., 2009). Коэффициент корреляции между содержанием Ni и Cu в хвое *P. sylvestris* и ежегодным объемом выбросов твердых веществ составлял 0.95 ($n = 6$, $P < 0.05$). Снижение суммарной концентрации Ni и Cu в ассимиляционных органах *P. sylvestris* было

обусловлено уменьшением доли их воздушного поступления, так как уровень загрязнения верхнего горизонта почвы оставался достаточно высоким.

Продолжительность жизни хвои *P. sylvestris* в импактной зоне за период наблюдений варьировала от 1.4 до 4.6 года (табл. 2). Минимальные значения были зарегистрированы в 1987 г., максимальные — в 2008–2014 гг. Динамика продолжительности жизни хвои характеризуется отрицательной связью с объемом выбросов сернистого ангидрида и твердых веществ (в обоих случаях $r = -1$, $n = 4$, $P < 0.05$).

В 1988 г. неповрежденной была только однолетняя хвоя *P. sylvestris*, доля которой составляла 25% (табл. 3). Двух- и трехлетняя хвоя по степени повреждения практически не различались (повреждения составляли 20–40%). В 2008 г. доли неповрежденной хвои *P. sylvestris* последовательно снижались с увеличением возраста и составляли 74, 55 и 12% для 1–3-летней хвои соответственно. При этом у поврежденной хвои площадь хлорозов и некрозов не превышала 10%. В целом, несмотря на значительное улучшение состояния ассимиляционного аппарата *P. sylvestris* к концу периода исследований (2008–2014 гг.), продолжительность жизни была ниже фоновых значений, а степень повреждения ее была выше (табл. 2 и 3).

В течение всего периода наблюдений древесный ярус характеризовался высокой степенью угнетенности в импактной зоне. Как и в буферной зоне, наихудшее состояние эдифицирующей синузии исследуемых лесных сообществ было отмечено через 15 лет после достижения объемами ежегодных выбросов максимальных значений, наблюдавшихся с 1973 по 1992 г. На фоне последующего снижения аэротехногенной нагрузки состояние древесного яруса сосновых лесов постепенно стало улучшаться. Важно отметить, что в 2005 г. впервые в импактной зоне было зарегистрировано появление в древесном ярусе условно здоровых особей *P. sylvestris*, доля которых составляла 25% (табл. 4).

Радиальный прирост сосны обыкновенной в зоне сильного загрязнения (в радиусе 8–12 км от источника эмиссии) в начале формирования древостоев не отличался высокой интенсивностью (0.8–0.9 мм/год). Несмотря на большую схожесть кривых хода роста молодых сообществ в рассматриваемых условиях (нисходящий характер) с таковыми в фоновых условиях и в буферной зоне, сосна здесь испытывает существенное воздействие загрязнителей с момента ее поселения (рис. 36). Увеличение мощности комбината и одновременное начало использования в 1970-х гг. норильской руды, отличающейся от местной повышенным содержанием S, — прямые причины существенного снижения (до 0.3 мм/год) прироста сосны в рассматриваемом районе (рис. 36). Интенсивность

радиального прироста сосны обыкновенной в районе сильного техногенного загрязнения постепенно стала увеличиваться с 1990-х гг., достигая в 2000-х гг. значений ее роста в двух других исследованных районах. Корреляционный анализ рядов радиального прироста сосны обыкновенной в районах сильного загрязнения обнаруживает достаточно высокую отрицательную связь. Значимая корреляция существует как между радиальным приростом сосны и количеством выбрасываемой в атмосферу двуокиси серы ($r = -0.8$, $n = 24$, $P < 0.05$), так и между количеством твердых частиц ($r = -0.85$, $n = 24$, $P < 0.05$). Следует отметить гораздо более тесную связь в районе сильного загрязнения, чем в условиях умеренного промышленного загрязнения. Здесь рост и развитие отдельных деревьев и древостоев сосны обыкновенной в большей степени зависят от интенсивности загрязнения окружающей среды диоксидом серы и окислами тяжелых металлов, чем от изменения климатических факторов. Однако и в рассматриваемых условиях, по нашему мнению, не следует исключать конкурентных взаимоотношений между растениями. Густота древостоев сосны здесь остается еще достаточно высокой (3.5–4.2 тыс./га), хотя они в значительной степени повреждены и ослаблены.

Результаты анализа виталитетной структуры сообществ сосны обыкновенной в импактной зоне свидетельствуют о том, что в начале наших исследований и до конца 1980-х гг. здоровых особей сосны в составе древостоя не было обнаружено, ослабленные составляли 6–8% и сильно ослабленные — 42–43% (табл. 4). Затем на фоне снижения аэротехногенного загрязнения с 1990 по 2005 г. состояние древостоев сосны стало заметно улучшаться, к 2005 г. число условно здоровых особей составляло уже 25%, а на долю ослабленных и сильно ослабленных экземпляров приходилось 16 и 14% соответственно (табл. 3). При этом сухие особи в древостое доминировали (~45%). Исследования последних лет не обнаружили существенного улучшения санитарного состояния сообществ *P. sylvestris*. Наблюдались переходы особей одних категорий в более высокие, что в конечном итоге оказывало положительное влияние на общее состояние исследуемых сообществ в импактной зоне.

В напочвенном покрове исследуемых сосновых лесов общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса с 1984 по 2006 г. снизилось с 14 до 6%. Последнее ее значение достоверно отличается от фоновых. Отрицательная реакция яруса на снижение атмосферных выбросов связана с длительным воздействием высоких концентраций тяжелых металлов в органогеомном горизонте почвы, где расположена основная масса корней и подземных побегов кустарничков. Средняя высота яруса за период исследований составляла 7–8 см, что в 1.5–2 раза меньше, чем в

фоновом районе. Доминант яруса в течение всего периода исследований в отличие от фоновых сообществ — *Arctostaphylos uva-ursi* L. Содержание тяжелых металлов в листьях кустарничков к концу периода исследований сократилось в среднем в 2 раза по отношению к их максимальным концентрациям в этой зоне, а в листьях *E. hermaphroditum* L. — более чем в 10 раз.

Мохово-лишайниковый ярус в период наблюдений находился в полностью разрушенном состоянии: его проективное покрытие составляло 10%, а высота — 0.5 см, что соответственно в 7 и 15 раз меньше фоновых значений этих величин. В формировании покрова участвуют только раннесукцессионные виды. Общее состояние яруса соответствует начальным стадиям восстановления в фоновых районах, регистрируемое через 5–10 лет после пожара (Горшков, Баккал, 2009). При сохраняющемся уровне аэротехногенного загрязнения мохово-лишайниковый ярус останется в полностью разрушенном состоянии на неопределенно долгое время.

Таким образом, в пределах импактной зоны динамика жизненного состояния сосновых древостоев определяется уровнем аэротехногенного загрязнения. Отсутствие заметных положительных реакций травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов на снижение объема атмосферных выбросов обусловлено, на наш взгляд, сохранением высокого уровня загрязнения почв тяжелыми металлами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетний импактный мониторинг средневозрастных сосновых лесов в центральной части Кольского п-ова показал, что маркером уровня загрязнения окружающей среды может служить накопление тяжелых металлов в ассимиляционных органах растений древесного яруса. Содержание тяжелых металлов в листьях кустарничков таким показателем не является, очевидно, в связи с перераспределением пылевых частиц, поступающих как из воздуха, так из древесного яруса и поверхности почвы.

Потенциальные возможности восстановления растительных сообществ зависят, на наш взгляд, от сценария дальнейшей динамики уровня аэротехногенной нагрузки: сохранение объемов атмосферных выбросов на установившемся в настоящее время уровне или полное прекращение промышленных выбросов (остановка предприятия). В настоящее время характеристики состояния хвой *P. sylvestris* в буферной зоне достигли фоновых значений, что свидетельствует о возможности постепенного восстановления древесного яруса лесных сообществ в этих условиях.

Растения травяно-кустарничкового яруса в пределах буферной зоны независимо от сценария динамики уровня техногенной нагрузки остаются в хорошем жизненном состоянии. В импактной зоне при сохранении существующего режима промышленных выбросов ярус будет находиться в современном существенно нарушенном состоянии, поскольку снижения уровня загрязнения почв тяжелыми металлами не происходит.

Мохово-лишайниковый ярус при сохранении современного объема выбросов и уровня содержания тяжелых металлов в лесной подстилке на территории среднего уровня промышленного загрязнения полностью не восстановится.

В заключение необходимо отметить, что, не смотря на установившийся с 1999 г. минимальный объем атмосферных выбросов (~40 тыс. т SO₂ и 5 тыс. т полиметаллической пыли), в настоящее время некорректно считать начавшимся процесс постепенного восстановления сильно поврежденных лесных экосистем в окрестностях основного источника эмиссии, комбината “Североникель”. Заметные положительные изменения регистрируются только для одного, хотя и важного компонента экосистем сосновых лесов — древесного яруса. Травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы, которые практически не отреагировали на изменения режимов выбросов, остаются соответственно в сильно нарушенном и разрушенном состоянии.

Наличие связи между режимом выбросов с содержанием тяжелых металлов в хвое *P. sylvestris* и ее отсутствие с содержанием тяжелых металлов в листьях кустарничков в буферной и импактной зонах свидетельствуют о том, что древесный ярус даже в разрушенном состоянии сохраняет свою фильтрующую функцию и перехватывает основное количество пылевых загрязняющих веществ из воздуха.

Динамика разных компонентов сосновых лесов в фоновых условиях центральной части Кольского п-ова обусловлена естественными сукцессионными процессами, в буферной и импактной зонах — режимом атмосферных выбросов и содержанием тяжелых металлов в почве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А. Некоторые вопросы диагностики и классификации поврежденных загрязнением лесных экосистем // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. С. 38–54.
- Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова. Л.: БИН РАН, 1990. 195 с.
- Горшков В.В., Баккал И.Ю. Нижние ярусы хвойных лесов // Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. СПб.: ВВМ, 2009. С. 197–204.

- Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. СПб.: ВВМ, 2009. 276 с.
- Зайцев Г.И. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1984. 424 с.
- Кольская ГМК // Ежегодник. 2007. № 5. 87 с.
- Крючков В.В., Сыроид Н.А. Почвенно-ботанический мониторинг в центральной части Кольского полуострова // Мониторинг природной среды Кольского Севера. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1984. С. 15–26.
- Лозановская И.Н., Орлов Д.С., Садовникова Л.К. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высш. школа, 1998. 287 с.
- Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. Ч. 1. 213 с.; Ч. 2. 192 с.
- Лукина Н.В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. 316 с.
- Лянгузов А.Ю., Ярмишко В.Т., Лянгузова И.Ю. Новый метод оценки годичного прироста стволов древесных растений // Раст. ресурсы. 2017. Т. 53. Вып. 4. С. 580–593.
- Лянгузова И.В. Динамика атмосферных выбросов предприятия по производству цветных металлов и накопление токсических веществ в растениях и почве // Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. СПб.: ВВМ, 2009. С. 25–58.
- Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
- Позняков В.Я. Североникель (страницы истории комбината “Североникель”). М.: Руда и металлы, 1999. 370 с.
- Раменская М.Л. Микроэлементы в растениях Крайнего Севера. Л.: Наука, 1974. 158 с.
- Санитарные правила в лесах Российской Федерации (Утв. приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 15.01.1998). М.: Рослесхоз, 1998. № 10. 18 с.
- Степанчик В.В., Тарасенко В.П., Василенко А.И. Техногенное загрязнение Республики Беларусь и его влияние на сосновые насаждения // Проблемы лесоведения и лесоводства: Науч. тр. Ин-та леса АН Беларуси. Гомель. 1993. Вып. 37. Ч. 1. С. 62–70.
- Цветков В.Ф. Состояние лесов, подверженных воздействию промышленных эмиссий в Мурманской области, и проблемы их сохранения // Экологические исследования в лесах Европейского Севера. Архангельск: Изд-во АИЛиЛХ, 1991. С. 125–136.
- Ярмишко В.Т. Состояние ассимиляционного аппарата сосны // Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова. Л.: БИН РАН, 1990. С. 55–64.
- Ярмишко В.Т. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 1997. 210 с.
- Ярмишко В.Т. Крона дерева как индикатор его состояния в условиях техногенного загрязнения окружающей среды // Проблемы экологии растительных сообществ. СПб.: ВВМ, 2005. С. 28–57.
- Ярмишко В.Т. Динамика древесного яруса сосновых (*Pinus sylvestris* L.) лесов // Динамика лесных сообществ северо-запада России. СПб.: ВВМ, 2009. С. 58–73.
- Ярмишко В.Т., Горшков В.В., Лянгузова И.В., Баккал И.Ю. Экологический мониторинг лесных экосистем Кольского полуострова в условиях аэротехногенного загрязнения // Регион. экология. 2011. № 1–2 (31). С. 21–29.
- Yarmishko V.T., Yarmishko M.A. Radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in varied environment influenced by air pollution in the European North of Russia // Forestry ideas (Bulgaria). Sofia. 2015. V. 21. № 2 (50). P. 96–105.

Impact Multi-year Monitoring of Pine Forests in the Central Part of the Kola Peninsula

V. T. Yarmishko^{1, #} and O. V. Ignateva²

¹Komarov Botanical Institute RAS, ul. prof. Popova 2, St. Petersburg, 197372 Russia

²Saint-Petersburg State Forest Engineering University, Institutskiy per. 5, St. Petersburg, 194021 Russia

[#]e-mail: vasilijarmishko@yandex.ru

The spatio-temporal dynamics of structural and functional parameters of pine trees in background conditions and exposed to industrial emissions, which are highly aggressive sulfur compounds in combination with heavy metals (Cu, Ni). It is shown that the current trends in the state of different components of pine forests in the background conditions due to natural succession processes. Technogenic air pollution is a significant factor in determining the vital state of forest stands, and close to major copper-nickel plant in the central part of the Kola peninsula, it is the dominant factor causing the weakening and even destruction of the communities of pine forest. On the background of a significant reduction in emissions is clearly the trend of improving the living condition of pine forests, even in the zone of strong pollution.